

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre Énergie Matériaux Télécommunications

Capteurs à fibre optique pour les applications environnementales

Par

Hamid Esmaeelzadeh Limodehi

Thèse présentée pour l'obtention du
grade de Doctorat en sciences de
l'énergie et des matériaux, Ph.D.

4 décembre, 2018

Jury d'évaluation

Examineur externe	Raman Kashyap Polytechnique Montréal, Canada
Examineur externe	Claudine Allen Université Laval, Canada
Examineur interne	Andreas Peter Ruediger INRS-EMT, Canada
Directeur de recherche	François Légaré INRS-EMT, Canada

Pour ma famille

Résumé

De nos jours, le rôle des capteurs électroniques est comparable au système nerveux du corps humain. Impossible d'imaginer sa survie sans système nerveux. Dans le but de contrôler l'état de santé de notre corps, des données biologiques sont à tout moment collectées dans toutes les parties de notre corps pour être envoyées au cerveau via notre système nerveux.

La technologie des capteurs actuels repose principalement sur des systèmes électroniques, qui, dans de nombreux cas, ne sont pas assez rapides et précis et ont des limitations physiques les empêchant de fonctionner correctement en milieux non-contrôlés. A l'inverse, les capteurs à base de fibre optique sont plus rapides, plus précis et ont peu de limitations ce qui leur permet de fonctionner dans des milieux non-contrôlés ou difficiles d'accès.

Si les fibres optiques ont pu révolutionner le domaine des télécommunications, pourquoi ne le feraient-elles pas dans le domaine des capteurs, en permettant la création de réseaux interconnectés planétairement, permettant de surveiller des écosystèmes complets ou même les changements climatiques? Pour pouvoir parvenir à cet objectif, les systèmes actuels devraient être remplacés par la technologie optique. Durant les 25 dernières années, le remplacement des capteurs électroniques par leurs équivalents optiques n'a été que très partiel en raison de limitations technologiques et surtout de prix prohibitifs.

Le principal objectif de cette thèse est d'élaborer un système de capteurs environnementaux, principalement pour mesurer l'humidité, basé sur une technologie à fibre optique qui soit économiquement viable. Les facteurs qui motivent l'auteur à adopter cette approche dans le cadre de ce projet de doctorat sont décrits ci-dessous.

La première motivation est la migration des plates-formes électroniques actuelles vers des technologies photoniques, à l'image du rôle que la fibre optique a joué dans les télécommunications. Depuis l'invention des «guides d'ondes diélectriques» en 1966, les systèmes de communication à fibres optiques ont utilisé les ondes lumineuses comme porteuses pour transmettre des informations d'un endroit à un autre. De distances de quelques mètres obtenues en laboratoire, on est passé à des milliers de kilomètres dans la première décennie du XXI^e siècle, avec des débits qui sont passés de quelques dizaines de Mbit/s à la fin des années 1960 à des dizaines de Tbit/s à l'heure actuelle. Grâce à cette énorme capacité de transmission, les systèmes d'émetteurs radio ont été largement remplacés par des

systèmes à fibres optiques pour la transmission de données de télécommunications sur longues distances depuis le début du siècle. Par conséquent, la mise en place des réseaux à fibres optiques a conduit à des moyens de communications déployés mondialement pour l'ensemble du spectre des données, à savoir la voix et la vidéo, aussi bien en temps réel qu'en temps différé. Une partie de ces contenus pourrait être attribuée aux données collectées à partir de systèmes de détection environnementaux ou industriels connectés au réseau. Ces données de détection, acquises par des systèmes de transducteurs, pourraient contenir les informations de paramètres physico-chimiques pour être traitées puis envoyées via le réseau. Étant donné que les systèmes de communication sont à présent basés sur la photonique, les systèmes de détection peuvent être intégrés directement dans les réseaux actuels de télécommunications. Pour cela, les systèmes actuels de détection devraient migrés vers des techniques optiques afin d'être intégrés dans l'actuelle infrastructure de télécommunications.

La deuxième motivation est liée au fait que les capteurs électriques d'humidité actuellement commercialisés ne conviennent pas, en raison de la géométrie et de la construction de la sonde, à des environnements ayant des limitations strictes d'encombrement ou des conditions chimiques agressives. En revanche, les capteurs optiques ont certains avantages intrinsèques, tels que des temps de réponse rapide, une immunité au bruit électromagnétique et à la détection croisée, et fonctionnent en toute sécurité dans des endroits présentant des risques de déflagration et d'inflammabilité. En outre, les capteurs à fibre optique offrent des fonctionnalités supplémentaires telles que des capacités de détection ultra-rapides, leur légèreté, leur non-intrusivité et leur flexibilité. Par conséquent, de nombreuses études ont été menées sur l'utilisation de technologies optiques ou à fibres optiques pour des applications de détection. Il est souvent avancé que les capteurs optiques devraient largement se développer en raison de leurs nombreux avantages. Néanmoins, malgré tous les efforts déployés au cours du dernier quart de siècle, cet objectif n'a pas encore été atteint et les capteurs électriques/électroniques dominant toujours le marché des détecteurs. L'un des principaux obstacles à cette substitution est qu'actuellement le prix des capteurs optiques n'est pas concurrentiel par rapport au prix des détecteurs électriques. Par exemple, les capteurs basés sur les réseaux de fibre de Bragg (FBG) sont relativement coûteux en raison de l'utilisation de composants, tels que des sondes, des sources lumineuses et des détecteurs. À moins de réussir à réduire les coûts de ces composants, il semble fort probable que les capteurs électroniques resteront probablement la technologie de choix pour la grande majorité des applications de détection. Pour réduire le prix, il est impératif

d'utiliser des composants à bas prix, notamment pour la source de lumière, le transducteur et le détecteur. L'objectif principal des travaux présentés dans cette thèse a été de développer un capteur optique d'humidité capable de concurrencer les technologies électroniques existantes.

Dans les chapitres 3 et 4, j'expose les travaux théoriques et les expériences associées, effectuées dans le but d'introduire une plate-forme optique efficace pour la détection de l'humidité. Dans la section théorique, j'ai créé une relation entre la résonance des plasmons de surface dans le guide d'ondes à fibre optique et le phénomène de condensation/évaporation des molécules d'eau, ce qui a permis d'élaborer une nouvelle méthode pour mesurer l'humidité ambiante et la température du point de rosée. Il y est également détaillé les activités expérimentales, en particulier, le processus de fabrication des capteurs et les mesures, afin de valider de la théorie mentionnée précédemment. Le chapitre 5 de cette thèse décrit la mise en œuvre d'une solution optique efficace et peu onéreuse, un prototype de capteur optique multicanal de rosée et d'humidité (MODHS – "Multi-channel Optical Dew & Humidity Sensor"). Le MODHS développé permet de surveiller simultanément le point de rosée et l'humidité d'une série de systèmes de microclimat dans des bâtiments industriels pour des endroits difficiles d'accès, des musées, des salles d'archives, des bibliothèques, des laboratoires, etc. Ce résultat a été obtenu grâce à un design innovant, à la fois dans ses aspects techniques et conceptuels. Un avantage notable des MODHS est qu'ils utilisent des cellules photoconductives ou des photodiodes pour la détection, au lieu d'utiliser des spectromètres coûteux. Le MODHS utilise également une simple diode électroluminescente (DEL) en tant que source lumineuse, pour fournir la lumière à plusieurs canaux de fibres optiques, de façon simultanée. De plus, il ne nécessite pas l'utilisation d'une couche absorbant l'humidité, contrairement aux autres capteurs d'humidité, la nouvelle méthode de détection étant basée sur la résonance des plasmons de surface et la condensation de la vapeur d'eau. La plateforme actuelle du MODHS permet également d'intégrer d'autres transducteurs à fibre optique dans le système de capteur pour mesurer d'autres paramètres environnementaux. Cette recherche pourrait conduire à de nouvelles et importantes perspectives pour la mise en œuvre de nouveaux systèmes de capteurs optiques avec une efficacité sans précédent, un prix compétitif et la suppression des limites imposées par les technologies électriques/électroniques actuelles.

Abstract

Present day sensing systems can draw the analogy to the central nervous system of living beings. In order to monitor the health of the system, biological data is instantly collected from all parts of the organism and sent to the brain via the nervous system. Current sensor technologies are primarily based on electronics which are not fast or accurate enough in many cases. Moreover they often can have physical limitations that prevent them from properly functioning in uncontrolled environments. As an alternative solution optical fiber-based sensors can be fast and accurate with fewer limitations, allowing them to operate in uncontrolled or difficult-to-access environments. Fiber optics have already revolutionized telecommunications, why would not they do the same with sensor technology? This technology could allow the creation of an interconnected planetary network that can control an entire ecosystem, or even climate change.

To achieve this goal, current sensor systems would need to be replaced by optical technology. Over the last 25 years this has not been feasible due to technological and economic difficulties. The main objective of this thesis is to introduce a robust and cost-effective environmental sensor based on fiber optic technologies. Motivating factors are discussed below;

First consider the migration of current electronic platforms towards photonics. Since the invention of “dielectric waveguides” in 1966 optical fiber communication systems have used light waves as carriers to transmit information from one place to the other. The distance of a few meters in laboratory was increased to thousands of kilometers in the first decade of this century with bit rates reaching from few tens of Mbit/s in late 1960s to tens of Tbit/s at present. Due to such enormous transmission capacity, radio transmitter systems have largely been replaced by fiber optic systems for long-haul telecommunication data transmission since beginning of this century. Establishment of the fiber-optic based networks has brought worldwide communications medium for the entire spectrum of data including of voice, video, and both real-time and non-real-time content. Part of this content could be used for sensing data gathered from environmental or industrial systems connected to the network. This sensing data acquired by transducers system could contain information from physical/chemical parameters to be processed and transmitted in the network. Hence, sensing systems can be integrated directly into today’s communications networks since the current network technology

is primarily based on photonics. This requires current sensing systems migrate toward optical techniques in order to integrate with existing telecom infrastructure.

The next motivating point is related to the fact that the current electrical based humidity sensors on the market are not suitable for use under environments with stringent limitations on physical space, and chemical conditions due to probe geometry and construction. Conversely, optical based sensors have some intrinsic advantages such as fast response, immunity to electromagnetic noise and related cross-sensing, and safe operation in explosive and flammable environments. In addition, fiber optic based sensors offer features such as ultra-fast response, lightweight, non-intrusive, and flexible. Numerous investigations have been conducted on the use of optical and fiber optic based technologies for sensing applications and it is argued that optical sensors will be widely deployed because of these advantageous properties. However, despite these efforts over the past quarter century optical based sensing technology has not yet been extensively realized and electrical based sensors still dominate the market. One of main obstacles is that the prices of optical based sensors are not competitive when compared to their electronic counterparts. For example Fiber Bragg Grating (FBG) based sensors are relatively expensive due to use of components such as their probes, light sources and detectors.

Unless the price point of optical sensing systems can be greatly reduced, it seems likely that electronic solutions will continue to dominate. To meet this competitive price point we must use cost-effective components including light source, transducer, and detector. The primary goal of the work presented in this thesis was to develop an optical humidity sensor capable of competing with existing electronic technologies.

Chapters 3 and 4 demonstrate the theoretical background and related experiments performed to develop an efficient platform for optical humidity sensing. In theoretical section a relationship between surface plasmon resonance in fiber optic waveguide and water molecules condensation/evaporation phenomenon was developed. This lead a novel method for measuring ambient humidity and dew point temperature. This was also demonstrated the experimentally, including sensor fabrication and measurement to examine the proposed theory. The results achieved through chapters 3 & 4 demonstrate the initial theory was valid encouraging the realization of a cost-effective optical-based environmental sensor, using a fiber optic approach.

Chapter 5 reports the work on the realization an efficient and cost-effective optical solution, a prototype Multi-channel Optical Dew & Humidity Sensor (MODHS). The

developed MODHS enables simultaneous monitoring of dew point and humidity on a suite of microclimate systems in hard-to-access industrial locations, museums, archive rooms, libraries, laboratories, and etc. This achievement was thanks to the innovative design both conceptually and technologically. Notable advantages of the MODHS are that it employs simple photoconductive cells or photodiodes for detection, instead to use expensive spectrometers. Moreover the MODHS employs a simple LED as the light source to supply required measuring light on several fiber optic channels. It is also exempt from any moisture absorbent layer (in contrast with other humidity sensors) due to its novel sensing method based on surface plasmon resonance and water vapor condensation. The present platform of our introduced MODHS also allows further fiber optic transducer of other parameters to be incorporated in the sensor system. This research may open new and important perspectives for implementing other optical sensor systems with unprecedented efficiency, competitive price, and overcoming limitations of present electrical technologies.

Remerciements

Pour commencer, je tiens à remercier le Canada pour son accueil et en particulier la province de Québec. Moi et ma famille s'y sont intégrés avec joie. Non seulement pour sa nature, mais aussi pour sa structure politique et gouvernementale, la démocratie libérale, au moyen duquel les habitants du monde entier peuvent vivre en paix dans une société moderne et libre. Les gouvernements provinciaux et fédéral soutiennent les familles d'étudiants qui ont des enfants, qu'ils soient citoyens ou non, très appréciables!

Je remercie sincèrement mon superviseur, François Légaré, qui m'a donné l'opportunité de rejoindre l'INRS. Un scientifique sage, crédible et intelligent qui sait diriger et soutenir correctement les membres de son groupe. Ce fut sans aucun doute une chance et un honneur pour moi de travailler avec lui. François, merci beaucoup pour tout ce que tu as fait pour moi.

Je remercie profondément mon épouse Farzaneh pour sa patience, son attention et sa camaraderie. Je la remercie pour son sacrifice de fournir un environnement familial agréable pendant ces années.

Je voudrais remercier Dr. Ali Hassani d'avoir partagé son temps avec moi lors de nos discussions et collaborations précédentes. Il était instructif d'acquérir des compétences en rédaction scientifique.

J'aimerais également remercier des personnes de l'INRS pour leur aide dans cette thèse: E. Isgandarov, P. Ernotte, M. Pinsard, R. Helsten.

Enfin, je voudrais remercier l'INRS-EMT et le CRSNG.

Table des matières

Résumé.....	III
Abstract.....	VI
Remerciements.....	IX
Table des matières	X
Liste des figures.....	XIV
Liste des sigles et abréviations	XXV
CHAPTIRE 1 (INTRODUCTION)	1
1.1 Enquête des technologies de détection de l'humidité	1
1.2 Détection de l'humidité à l'aide de technologies optiques	6
1.2.1 Capteurs optiques d'humidité	7
1.2.2 Capteurs d'humidité à fibre optique	12
1.2.3 Capteurs basés sur la spectroscopie directe.....	26
1.3 Résonance Plasmonique de Surface pour des applications de détection	30
1.3.1 Théorie électromagnétique des plasmons de surface	30
1.3.2 Excitation des Plasmons de Surface.....	32
1.3.3 Résonance des plasmons de surface dans les fibres optiques ..	33
1.4 Examen des méthodes optiques pertinentes utilisées dans la thèse.....	41
1.4.1 Les principes de base de l'humidité et les paramètres de mesure.....	42
1.4.2 Détection de l'humidité en utilisant le phénomène d'évaporation / condensation	43

1.4.3 Amélioration des performances de notre capteur d'humidité à fibre optique basé sur SPR.....	46
1.5 Objectifs et Organisation de la Thèse	48
CHAPITRE 2 (ARTICLE 1)	52
A SUPER CONTINUUM CHARACTERIZED HIGH-PRECISION SPR FIBER OPTIC SENSOR FOR REFRACTOMETRY	52
2.1 Abstract.....	53
2.2 Introduction	53
2.3 Fabrication	54
2.4 Measurements and Results	55
2.4.1 Optical setup to characterize the sensor	55
2.4.2 Characterization of the sensor	59
2.4.3 Performance of our Plasmonic LRI Sensor.....	60
2.5 Conclusion	65
CHAPTIRE 3 (ARTICLE 2)	66
SMART TEXTILE PLASMONIC FIBER DEW SENSORS.....	66
3.1 Abstract	67
3.2 Introduction	67
3.3 Theory	69
3.3.1 SPR and depth probe	69
3.3.2 Dew formation and evaporation.....	71
3.4 Measurement	74
3.4.1 Dew sensing experimental environment	74
3.4.2 Dependence of humidity and evaporation rate	79
3.4.3 Dependence of humidity and evaporation rate	80

3.5 Conclusion	81
CHAPTIRE 4 (ARTICLE 3)	83
FIBER OPTIC HUMIDITY SENSOR USING WATER VAPOR CONDENSATION ...	83
4.1 Abstract	84
4.2 Introduction	84
4.3 Theory.....	85
4.3.1 Moisture detection by the SPR probe	85
4.3.2 Dependence of vapor condensation rate on ambient humidity ...	86
4.4 Results and Discussion	88
4.4.1 Measurement Setup	88
4.4.2 Real-time measurements.....	90
4.4.3 Dependence of transmission reduction rate on ambient RH	92
4.4.4 Sensor response to breath exposure.....	93
4.5 Conclusion	94
CHAPTIRE 5 (ARTICLE 4)	96
MULTI-CHANNEL FIBER OPTIC DEW AND HUMIDITY SENSOR.....	96
5.1 Abstract	97
5.2 Introduction	97
5.3 Instrument Description	98
5.3.1 General Layout.....	98
5.3.2 Light Transmitter	100
5.3.3 Moisture Transducer and Sensing Mechanism	100
5. 4 Results and Discussion	102
5.4.1 Test of Multi-Channel Optical Dew and Humidity Sensor (MODHS) in Traditional Regime.....	102

5.4.2 Test of Multi-channel Optical Dew and Humidity Sensor (MODHS) in our proposed method	104
5.5 Conclusion	107
CHAPTIRE 6 (CONCLUSION ET PERSPECTIVES)	109
6.1 Conclusions de la thèse.....	109
6.2 Perspectives d'avenir.....	112
REFERENCES.....	114

Liste des figures

Figure 1.1: Les capteurs d'humidité différents des domaines d'applications [6].	2
Figure 1.2: Méthodes conventionnelles pour mesurer l'humidité en utilisant différentes approches mécaniques, électriques, et optiques : (a) hygromètre à cheveux, (b) hygromètre à bulbe humide et sec, (c) Principe du capteur d'humidité capacitif, (d) Structure interdigitée avec les électrodes en peigne, (e) Hygromètre à miroir refroidi, et (f) Hygromètre à absorption optique infrarouge et ultraviolet.	4
Figure 1.3: Classification des capteurs optiques d'humidité selon leur géométrie et leurs mécanismes de détection	8
Figure 1.4: Diagramme de réflexion par couche sensible déposée sur la base du prisme [61].	9
Figure 1.5: Plate-forme de détection réfractométrique avec un capteur optique intégré basé sur les guides d'ondes planaires obtenus par voie sol-gel et une couche de détection [62]	11
Figure 1.6: (a) Configuration expérimentale pour capteur d'humidité optique en fibre de verre en U. (b) Diagramme schématique de la réflexion et de la réfraction dans une fibre optique couplée à une tige de borosilicate en forme de U revêtue d'un film de MgO [63]	12
Figure 1.7: Schéma d'un capteur d'humidité à fibre optique utilisant des réseaux de Bragg [67].	14
Figure 1.8: Processus de fabrication du réseau de fibres à longue période d'entrefer [84].	15
Figure 1.9: Schéma des configurations interférométriques à base de fibres optiques: (a) Mach-Zehnder, (b) Michelson et (c) Sagnac	16
Figure 1.10: Diagramme schématique du capteur HR basé sur l'interféromètre à microfibres optiques elliptiques à haute biréfringence de Sagnac basé sur le capteur HR [91].	17

Figure 1.11: Diagramme schématique du capteur HR basé sur un FPI revêtu d'une couche de chitosane et du décalage de la longueur d'onde du capteur lors d'une exposition à un environnement d'humidité relative variable [92].	18
Figure 1.12: Représentation schématique de l'interféromètre à fibre à cristaux photoniques (FCP) [99].	20
Figure 1.13: Schéma d'une fibre optique à effilage double en ligne correspondant à un interféromètre modal de Mach-Zehnder [108].	21
Figure 1.14: Diagramme schématique du capteur d'humidité basé sur l'interféromètre de Michelson [111].	22
Figure 1.15: Configuration schématique du capteur HR à fibre optique hybride [113].	23
Figure 1.16: Propagation de la lumière dans le RLP auto-interférant (a) trajet de propagation vers l'avant et (b) trajet de propagation de la réflexion [115].	24
Figure 1.17: Diagramme schématique d'un résonateur à micro-nœud en PAM pour la détection d'humidité [117].	25
Figure 1.18: Excitation d'un MCG équatorial d'une microsphère par couplage évanescent à une onde guidée dans une fibre optique effilée. Les positions de résonance sont détectées comme des creux dans la lumière transmise à des longueurs d'onde particulières [118].	26
Figure 1.19: Diverses configurations pour les capteurs à fibre optique spectroscopiques [121].	27
Figure 1.20: Le schéma de la distribution de champ du plasmon de surface p-polarisée se propageant à l'interface métal/diélectrique.	30
Figure 1.21: Schéma de la relation de dispersion des ondes de résonance plasmon de surface et la ligne de l'aire	32

- Figure 1.22: Figure 1.22: Schémas de l'utilisation d'un coupleur pour l'excitation plasmonique, a) l'utilisation d'un prisme dans la configuration de Kretschmann, b) l'utilisation d'un guide d'ondes avec une polarisation TM. 33
- Figure 1.23: (a) Schéma de la section transversale d'un poli latéral, (b) Représentation schématique de la relation de dispersion du mode guidé du cœur et des plasmons de surface. L'image en médaillon montre le transfert de puissance du mode guidé du cœur de la fibre vers des plasmons de surface au point d'accord de phase, point d'intersection des courbes, pour une valeur d'indice de réfraction de l'analyte. 34
- Figure 1.24: (a) Distribution du flux d'énergie des modes de guide guide du cœur et de plasmon excités sur le dessus de la surface polie, à l'interface de l'eau/or, pour la conception de fibre optique normale polie latéralement (b) les spectres de perte des modes guidés du cœur (courbe en trait plein) correspondent à l'excitation des modes plasmons sur la surface métallique. En modifiant l'indice de réfraction de l'analyte, avec un changement aussi petit que 0,01, le pic plasmonique se déplace jusqu'à 23 nm (courbe en pointillés). 36
- Figure 1.25: (a) Défaut dans un cristal photonique parfait. Le rayon des tiges extérieures est de $0,42a$, le deuxième type de rayon est de $0,3a$, le rayon de la plus petite tige est de $0,225a$. (b) La figure combinant les bandes interdites, les modes guidés, le cône de lumière et la ligne de lumière pour la structure étudiée. 38
- Figure 1.26: (a) Comparaison de la partie réelle de l'indice de réfraction entre la FCP coupée latéralement et les cristaux photoniques présentant un défaut. (b) Le champ électrique, la composante z , la distribution du mode fondamental à la longueur d'onde de fonctionnement de 640 nm alors que l'indice de réfraction adjacent de la couche d'or est celui de l'eau, $n_a = 1,33$ 39

- Figure 1.27: (a) Distribution du flux d'énergie des modes guidés du cœur et des modes plasmons excités sur le dessus de la surface polie à l'interface de l'eau et de l'or pour un capteur RPS à FOM polie latéralement. (b) Le spectre de perte calculé du mode guidé par le cœur (courbe en trait plein) comporte un pic d'atténuation correspondant à l'excitation des modes plasmoniques sur la surface revêtue de métal du capteur. La courbe en pointillés présente le décalage remarquable du pic d'atténuation résonnant dû à un changement de l'indice de réfraction de l'analyte aussi faible que 0.01..... 40
- Figure 1.28: (a) Variation de la longueur d'onde de résonance par rapport à l'indice de réfraction de l'analyte (passage de 1,33 à 1,41) pour deux structures différentes, les détecteurs RPS conventionnels (courbe en pointillés) et les détecteurs RPS à FOM polie latéralement (courbe pleine). (b) comparaison de sensibilité entre les deux structures: fibre conventionnelle monomode polie latéralement ou SMF (courbe en trait-point) et des sondes RPS à FOM polie latéralement (courbe en pointillés).. 41
- Figure 1.29: Image schématique de la vue latérale de capteur d'humidité à fibre optique tandis que l'effet la sonde RPS détecte sans cesse l'humidité due à la vapeur d'eau (a) la condensation de la vapeur d'eau et (b) Son évaporation sur la couche d'or, revêtement sur la surface polie (c) Variation de l'intensité lumineuse transmise (Iout) pendant la condensation et l'évaporation de la vapeur d'eau 44
- Figure 1.30: (a) Schéma du montage des trois électrodes pour l'électrochimie représentant le récipient en verre et la géométrie de l'électrode-échantillon, (b) Diagramme d'électro-polissage..... 46
- Figure 1.31: Angle de contact ou amélioration de la mouillabilité à la surface du capteur: en haut avant le traitement de surface, en bas après le traitement surface..... 47

Figure 1.32: Intensité lumineuse transmise pendant la formation d'humidité à la température ambiante de 25 °C pour deux situations de surface non traitée et traitée respectivement.	48
Figure 1.33: Une disposition générale du système de détection multicanal de la rosée optique et de l'humidité (MODHS).....	49
Figure 2.1: An optical microscopic image of the cross-section of the side-polished standard single-mode fiber optic showing the residual cladding δ and the sensing area on the polished surface.	55
Figure 2.2: (a) A schematic of the setup which was used for measurement and characterization of our fabricated fiber sensor, (b) the optical setup for generating SC broadband light source.....	56
Figure 2.3: Fluctuations and shot noise in the time domain; an ultra-short optical pulse train exhibits pulse-to-pulse amplitude noise due to quantum fluctuations.	58
Figure 2.4: fluctuations of the output power for the generated super continuum beam.....	58
Figure 2.5: Transmission spectrum for our sensor in air (red color solid curve), water (black color solid curve) and its absorption spectrum (blue color dotted curve).	59
Figure 2.6: Absorption spectrum of the sensors fabricated by CHPM having different residual cladding thicknesses.....	60
Figure 2.7: Shift of the plasmonic dips in the transmission spectrum for different refractive indices of the analyte.....	61
Figure 2.8: Variation of plasmonic resonance wavelength (λ_{res}) with variation of the liquid refractive index.	62
Figure 2.9: Amplitude sensitivity for the fabricated sensor when $\delta n_a = 0.01$	63

Figure 2.10: (a) Measurement of relative intensity noise for the SC source and its related SPR signal in three different situations, showing a direct relation between them. (b) A real time measurement at $\lambda = 600\text{nm}$ while the RI of the analyte varies as much as 0.0001. . 64

Figure 3.1: Sample of our proposed distributed smart textile SPR dew sensor. 69

Figure 3.2: (a) Electric field distribution for surface plasmons on the metal/dielectric boundary. (b) Depth probe of surface plasmon versus operating wavelength at the metal/dielectric boundary. 71

Figure 3.3: (Left) Relative Humidity (RH) versus temperature, dashed-line curve. (Right) Evaporation rate of a wet surface (E_v) versus temperature, solid blue line. 73

Figure 3.4: Cross section of the side-polished SPR fiber sensor showing the power distribution and plasmonic waves; plasmons are excited on the top of the gold layer to form a sensing area for dew measurements. (b) Schematics of temperature and humidity gradients adjacent to gold surface layer with tiny water layers forming. 74

Figure 3.5: Optical microscope image of the side-polished SM fiber, fixed in Al mount, under light reflection. The bottom images show the cross section (left) and the top view (right)..... 75

Figure 3.6: Schematic of the optical setup used to test the SPR dew sensor in the laboratory: (Top image) a picture of the supercontinuum beam; (middle image) layout of the environmental chamber, including the sensor, thermoelectric cooler, and other required equipment; (bottom image) the side-polished fiber sensor woven into the textile. 76

Figure 3.7: Schematic of the optical setup used to test the SPR dew sensor in the laboratory: (Top image) a picture of the supercontinuum.....	77
Figure 3.8: Real-time loss response at $\lambda = 632$ nm when the temperature reaches 9 °C. The SPR output power decreases from its maximum to its minimum in 9 s.....	79
Figure 3.9: Real-time measurement of optical output intensity versus total evaporation time of the layer of water with 250 nm probe depth thickness.	80
Figure 3.10: Comparison between RH obtained by Eq. (3.10) (the blue dashed curve) and those measured using our SPR sensor (red circular points).....	81
Figure 4.1: (a) Side view of the fiber optic humidity sensor, where the SPR probe senses moisture that condenses on top of the gold layer coated on the side-polished surface. (b) Top view microscopic image of the sensing area in our sensor, where the surface is wet due to the drop-wise condensation of water molecules in the adjacent air.	86
Figure 4.2: (a) Theoretical dependence of water vapor condensation rate on ambient RH, obtained using Eq. (4.3), with fixed ambient temperatures of 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, and 50°C. (b) Dependence of water vapor condensation rate on ambient temperature with ambient RHs of 30%, 40%, and 50%.	88
Figure 4.3: Scheme of our experimental setup including a light source (red LED), a sensor, an environmental chamber, and a control and DAQ module. The conditioning module consisted of a heater, an ultrasonic air humidifier, an air dryer, and a thermoelectric cooler.	89

Figure 4.4: Real-time measurements obtained inside the environmental chamber: ambient RH measured by the reference humidity sensor (dotted-dashed green curve); T_s (dotted black curve), ambient temperature (double-dashed orange curve), transmitted light signal (solid blue curve), and T_{dew} (dashed red curve). 90

Figure 4.5: Comparison between estimated (filled-in red circles) and reference (black squares) RHs inside the chamber. 91

Figure 4.6: Real-time measurements obtained by the sensor inside the environmental chamber for the interval time from 1300 s to 1400 s. 91

Figure 4.7: (a) Transmitted light intensity reduction during moisture formation, which demonstrates that the slope, i.e., the condensation rate, increases significantly as the ambient RH increases. (b) Dependence of transmission reduction rate on the ambient RH at two different ambient temperatures. 92

Figure 4.8: Transmitted light intensity during moisture formation at temperatures of 10°C, 20°C, 30°C, and 40°C when the ambient RH was fixed near 30%. The inset shows an approximately linear relationship between the transmission reduction rate and the ambient temperature. 93

Figure 4.9: Response of the proposed sensor to human breath exposure when placed at different distances from the mouth of a person. The dashed black curve represents the response of a commercial humidity sensor when used in the same conditions as the proposed sensor. 94

Figure 5.1: (a) A general layout of multi-channel optical dew and humidity sensing (MODHS) system. (b) A schematic diagram of the MODHS including: transmitter, receiver and controller. 99

Figure 5.2: (a) Scheme of the transmitter comprises a light source, illustratively a red LED, and a fiber optic head connected to the plurality of optical fibers, inset is a real picture in which the tip-polished LED was stuck to fiber optic head by glue. (b) A cross-sectional image of our fiber optic head supporting seven channels for seven transducers, inset image is when it is fed by the LED light. 100

Figure 5.3: (a) Simulation for a portion of fiber optic channel which is side-polished and coated by a layer of metal to act as a transducer to detect ambient humidity. The inset image is when moisture forms on the polished surface, resulting the SPR effect and coupling between transmitting light and surface plasmons. (b) A top view of the sensing area, where the surface is wet due to condensation of water molecules in the adjacent air. 101

Figure 5.4: (a) Transmission light intensity of three transducers for three channels No. 1, 2, and 3 in the real-time measurement, for which, the transducers are situated in three different chambers. (b), (c), and (d) transmission light intensity along with RH variation versus time for each chamber. 103

Figure 5.5: Real-time measurements obtained inside the environmental chamber: ambient RH measured by the reference humidity sensor (green curve); T_s (dotted black curve), ambient temperature (double-dashed orange curve), transmitted light signal (solid blue curve), and T_{dew} (dashed red curve). 105

Figure 5. 6: (a) Upper plot: alternatively lowering and raising, or probing the temperature of the transducers (T_s) to directly measure the ambient dew point (T_{dew}) during ambient RH variation for three channels No. 1 (blue color), 2 (black color), and 3 (red color). Bottom: The corresponding transmission light intensity of the three transducers for those three channels. (b), (c), and (d) variation trend for ambient RH (green curves in the top), and T_{dew}

(red curves in the bottom), in which, we depict the obtained values of the ambient RH and T_{dew} as filled-in squares. 106

Publications associées

1. Hamid Esmailzadeh, Maxime Rivard, Ezatollah Arzi, Francois Légaré, Alireza Hassani, "A super-continuum characterized high-precision SPR fiber optic sensor for refractometry," *Sensors & Actuators A*, 229 (2015) 8–14.
2. Hamid Esmailzadeh, Maxime Rivard, Ezatollah Arzi, François Légaré, Alireza Hassani, "Smart Textile Plasmonic Fiber Dew Sensors," *Optics Express*, Vol.23, No. 10 (2015) 14981-14992.
3. Hamid E Limodehi, François Légaré, "Side-Polished Micro-Structured Optical Fiber Based SPR Sensor for Refractometry and Temperature," *IEEE explore*, DOI: 10.1109/PN.2016.7537890 Aug 2016.
4. Hamid E Limodehi and François Légaré, "Fiber optic humidity sensor using water vapor condensation," *Optics Express*, Vol.25, No. 13 (2017) 15313-15321.
5. Hamid E Limodehi, Morteza Mozafari and François Légaré, "Multi-channel Fiber Optic Dew and Humidity Sensor," *Journal of Optical Fiber Technology*, 41 (2018) 89–94.

Patente

Invention of "Optical Fiber Humidity Sensing System", Hamid E Limodehi, François Légaré, Mohammed Chaker, *US & Canada Patent* application, based on the US provisional patent application APP. NO. 62/462,565 – ATTY. DOCKET NO.771/14448.112 (23 FEB 2017).

Liste des sigles et abréviations

λ :	longueur d'onde dans le vide
ω :	la fréquence
k :	nombre d'onde
β :	paramètre modal
n_{eff} :	Indice modal effectif
P_0 :	puissance injectée à $z = 0$
L :	longueur de
S :	sensibilité
α :	perte de transmission
n_a :	indice de réfraction de l'analyte
ϵ :	permittivité
c :	vitesse de la lumière dans le vide
ω_{sp} :	fréquence plasmonique de surface
HA (AH):	humidité absolue (absolute humidity)
HR (RH):	humidité relative (relative humidity)
T :	température
I :	intensité lumineuse transmise (transmitted light intensity)
t :	temps
RIN :	relative intensity noise
LOD :	limite de détection
UIR (RIU):	unité d'indice de réfraction (refractive index unite)

<i>SPR:</i>	surface plasmon resonance
<i>RPS</i>	résonance du plasmon de surface
<i>SC:</i>	super continuum
$\delta :$	residual cladding thickness
<i>E :</i>	evaporation rate
$\tau :$	evaporation time
$\gamma :$	psychometric constant
$c_p :$	air specific heat
$\dot{m} :$	condensation rate on the surface
$h_{eff} :$	effective heat transfer coefficient
$h_{fg} :$	specific enthalpy of the saturated vapor

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, l'état de l'art des capteurs d'humidité sera présenté en offrant un bref aperçu des méthodes et technologies mentionnées précédemment. Cet aperçu concerne principalement les technologies optiques de détection de l'humidité, comme une alternative possible aux capteurs électriques, dominant actuellement le marché. Ensuite, nous discutons de la théorie de l'excitation plasmon de surface avant de décrire les méthodes de détection utilisées dans cette recherche. Finalement, le fondement de cette thèse et sa structure y seront décrits.

1.1 État de l'art des technologies de détection de l'humidité

L'humidité est un facteur qui joue un rôle important partout sur Terre. Pour avoir une atmosphère environnante souhaitable, il est essentiel de surveiller, détecter et contrôler l'humidité ambiante sous différentes conditions par des capteurs précis et sensibles. En fait, le besoin de protection des conditions environnementales a conduit à des études sur la détection et à la fabrication de systèmes basés sur l'utilisation de méthodes physiques et chimiques en présence de matériaux organiques, inorganiques ou hybrides. Ainsi, les capteurs d'humidité ont été largement utilisés aussi bien pour des applications industrielles et domestiques, en tant qu'équipement de mesure ou pour des questions de confort humain [1-6].

Aujourd'hui, la mesure de l'humidité et de l'humidité relative (HR) est un facteur d'une grande importance dans les procédés industriels (alimentation, traitement des produits alimentaires, production de papier et de textile, assemblage de moteurs et microélectronique) [7-11], l'agriculture [12-15], le contrôle environnemental (surveillance des bâtiments et des infrastructures, climatisation des serres, surveillance de l'humidité du sol, surveillance des conditions météorologiques et écologiques) [16-23], surveillance médicale ou sanitaire (comme l'équipement respiratoire, les stérilisateurs, les incubateurs, les procédés pharmaceutiques et les produits biologiques) [24-28], et beaucoup d'autres [29-30]. La figure 1.1 représente quelques applications importantes des capteurs

d'humidité. Selon un rapport d'étude de marché de Frost and Sullivan en 2017, la taille estimée du marché mondial des capteurs d'humidité devrait atteindre 1,90 milliard de dollars en 2023 [31].

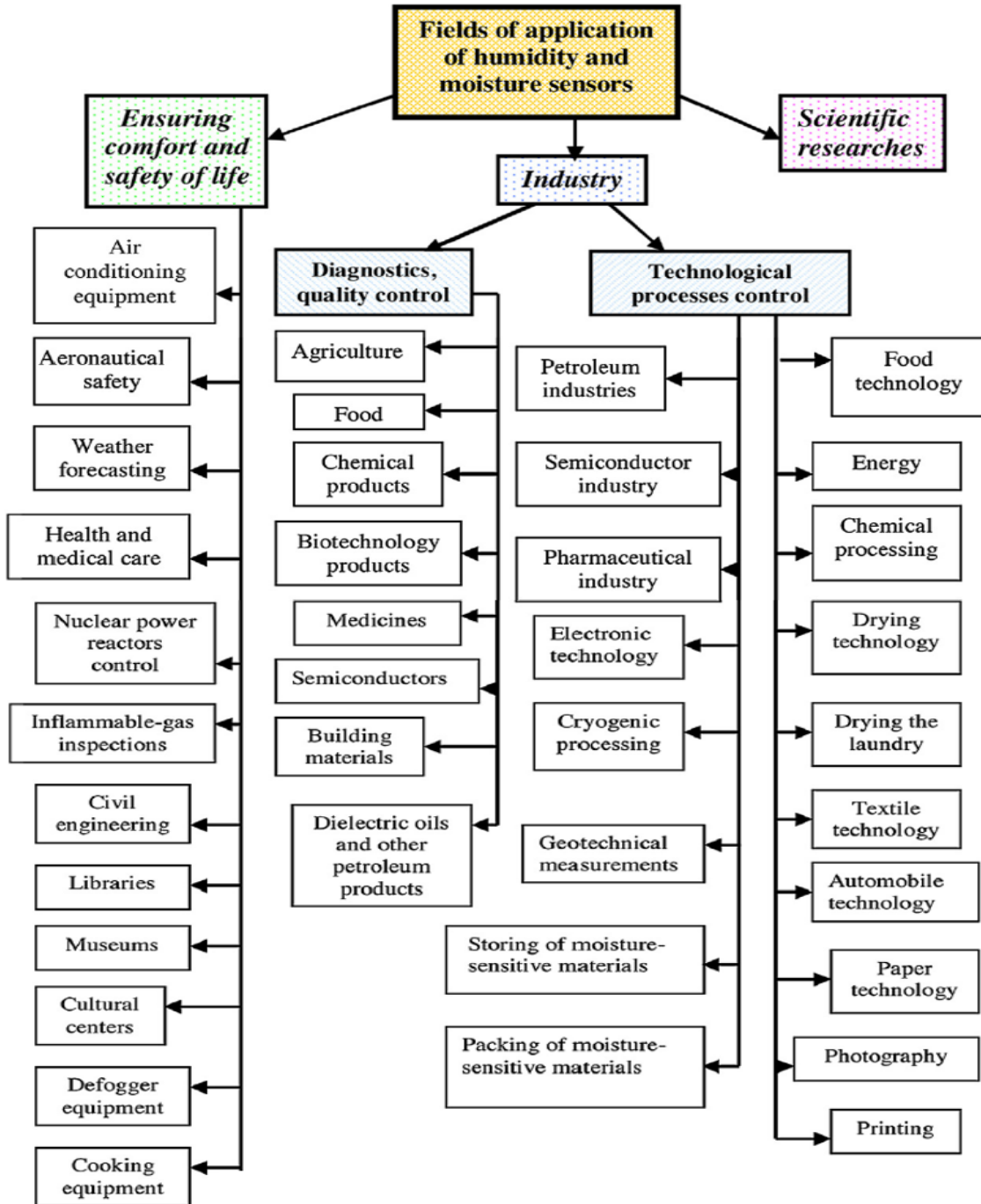


Figure 1.1: Les capteurs d'humidité dans différents domaines d'applications. Cette figure a été prise dans la référence [6].

En raison des différentes conditions de fonctionnement des capteurs d'humidité dans différents domaines d'application, allant d'une utilisation à l'intérieur de bâtiments ou à l'extérieur, divers types d'instruments de détection d'humidité ont été développés sur la base de différents principes physiques et chimiques et d'une grande variété de matériaux hygroscopiques [32-37].

L'origine du premier système de mesure de l'humidité remonte à 179 av. J-C lorsque les Chinois ont fabriqué un système de mesure de l'humidité en utilisant une approche de type «balance»: un morceau de laine suspendu est attaché à une extrémité d'une grande balance, la masse de la laine augmentant lorsque l'air devient plus humide et diminuant lorsque l'air est sec [38]. Plusieurs siècles plus tard, en 1550, ce dispositif a été amélioré en remplaçant la laine par une éponge et par la suite, de nombreuses variantes de cet hygromètre ont été développées, en employant du papier, des cheveux, du nylon et de l'acétate. Au cours des XVII^e et XVIII^e siècles, il existait plusieurs théories pour expliquer la façon dont l'eau se dissout dans l'air. En 1790, un important principe a été établi ; les vapeurs aqueuses ont les propriétés des gaz. Il a également été établi qu'il existe une relation entre l'humidité et la température [39]. En 1803, L.W. Gilbert soutient que « le degré d'humidité dépend du rapport de la vapeur réellement présente à ce qui est possible » [38]. Depuis lors, de nombreux types de capteurs d'humidité, y compris les hygromètres mécaniques, les psychromètres à bulbe humide et sec, ainsi que différents types de technologies électriques et optiques ont été fabriqués et développés pour des applications industrielles et autres. Les capteurs d'humidité peuvent être classés selon la méthode employée ou leur principe de fonctionnement. La figure 1.2 montre schématiquement les méthodes couramment utilisées pour mesurer l'humidité.

Ces méthodes utilisent des techniques qui relient les propriétés fondamentales de la vapeur d'eau aux divers schémas de transduction qui reposent sur des approches mécaniques, électriques et optiques pour fournir des mesures d'humidité. Parmi les différents capteurs d'humidité, les capteurs électriques capacitifs et résistifs sont les plus couramment vendus et utilisés [40]. Les capteurs d'humidité capacitifs fonctionnent sur la mesure des changements diélectriques d'un film mince hygroscopique lors de son exposition à l'humidité. Les capteurs résistifs (à impédance) reposent sur le mécanisme de transduction impliquant un changement de la conductivité provoqué par l'absorption d'humidité dans un matériau hygroscopique tel que les polymères conducteurs. Cette popularité pourrait être due à leur capacité à satisfaire les exigences générales telles

qu'une faible consommation d'énergie, une bonne répétabilité et une offre de choix varié d'éléments de détection parmi les différents types disponibles. Néanmoins, ils ont l'inconvénient d'être dépendants à la température et d'avoir une sensibilité croisée à certaines espèces chimiques [41]. La figure 1.2 (d) représente un capteur d'humidité à couche mince basé sur la structure interdigitée avec des électrodes en peigne et une membrane poreuse. Typiquement, le changement de résistance en fonction de l'humidité suit une évolution exponentielle inverse et varie presque de 1 K Ω à 100 M Ω . De plus, les temps de réponse des capteurs résistifs vont généralement de 10 à 30 secondes pour une variation de 63% du taux d'humidité [42].

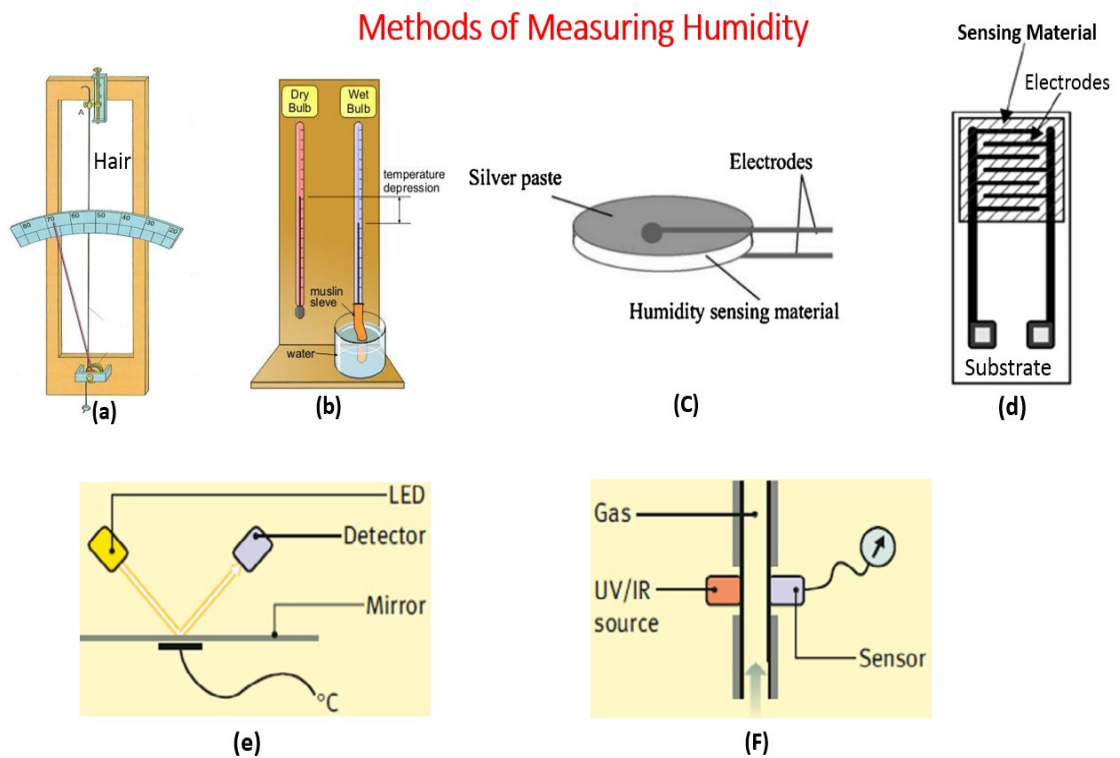


Figure 1.2: Méthodes conventionnelles pour mesurer l'humidité en utilisant différentes approches mécaniques, électriques et optiques (a) Hygromètre à cheveux, (b) Hygromètre à bulbe humide et sec, (c) Principe du capteur d'humidité capacitif, (d) Structure interdigitée avec les électrodes en peigne, (e) Hygromètre à miroir refroidi, et (f) Hygromètre à absorption optique infrarouge et ultraviolet. Ces figures ont été prises dans les références [4,5].

La configuration typique des capteurs capacitifs d'humidité peut être soit une structure en sandwich avec deux surfaces d'électrodes de chaque côté, représentée par la figure

1.2(c), soit une structure interdigitée avec des électrodes en peigne, comme pour les capteurs résistifs pour la mesure d'humidité relative (Figure 1.2 (d)), de telle sorte que le film de polymère diélectrique est déposé entre les électrodes [42, 43]. Plusieurs capteurs capacitifs d'humidité relative (HR) ont également été conçus et produits en utilisant des électrodes interdigitées en or, platine ou argent déposées sur des couches minces de polymères organiques par des techniques de déposition par impression ou sur des céramiques poreuses par des techniques de revêtement sur un substrat céramique [44, 45].

En ce qui concerne les matériaux de détection, les capteurs électriques d'humidité relative peuvent être classés en trois catégories, dont le type céramique (semi-conducteur), les capteurs à base de polymères organiques / inorganiques et les capteurs hybrides (polymère / céramique). Tous ces catégories de capteurs utilisent les changements des propriétés physiques et électriques de matériaux sensibles lorsque exposés aux différentes conditions d'humidité atmosphérique du milieu environnant et fournissent une mesure de l'humidité due à une certaine quantité d'adsorption et de désorption des molécules de vapeur d'eau [46].

Les capteurs d'humidité électriques à base de film sont largement utilisés en raison de leurs avantages tels que la flexibilité de conception et le taux de déposition rapide. Parmi ceux-ci, les détecteurs à base d'oxyde métallique semi-conducteur et à base d'oxyde métallique/polymère, principalement produits par des techniques de dépôt de couche mince/épaisse, sont remarquables en raison de la variété de choix d'éléments sensibles, des post-traitements et de caractéristiques de réponse possibles. En comparaison avec les capteurs d'humidité à base de film polymère, le processus de synthèse de la céramique est plus simple et donne des temps de réponse plus courts, cependant, les polymères sont moins coûteux. Ces capteurs sont opérationnels sur une large gamme d'humidité et peuvent facilement être produits en grande quantité lors de demandes de volume élevé.

Des éléments nanométriques peuvent également être incorporés dans des films céramiques et polymères/céramiques pour des applications de détection d'humidité en raison des grandes perspectives de performance qu'ils offrent. Les capteurs d'humidité utilisant des nanofils, des nanofibres, des nanotiges et des hétérojonctions p-n sont les sous-classes préférées du type céramique (inorganique). Cependant, dans les conditions

pratiques d'environnements réels, il reste encore de nombreux défis à résoudre pour améliorer l'efficacité du capteur et ses caractéristiques de réponse.

Bien que les capteurs électriques /électroniques d'humidité miniaturisés mentionnés ci-dessus aient un rôle prépondérant sur le marché actuel, en comparant les perspectives globales de ces capteurs, il s'avère qu'il existe toujours des inconvénients à l'efficacité des éléments de détection. Le coût des sondes électriques de haute qualité est généralement de l'ordre de 200 à 300 \$ l'unité, ce qui est plutôt dispendieux. Ils ne sont pas encore assez rapides pour suivre avec précision l'humidité relative ambiante et le point de rosée dans certains processus de fabrication. De plus, ils ne sont pas adaptés pour surveiller simultanément plusieurs zones éloignées les unes des autres.

1.2 Détection de l'humidité à l'aide de technologies optiques

- Vers des systèmes de détection optique.

Le développement de systèmes de détection basés sur des technologies optiques est prioritaire pour les raisons suivantes. La première raison est liée au rôle des technologies optiques dans les télécommunications mondiales actuelles. Depuis l'invention des « guides d'ondes diélectriques » en 1966 par Charles Kao et George Hockham de la compagnie *Standard Telephone Cables* (STC) à Harlow en Angleterre [47], les systèmes de communication à fibres optiques ont utilisé les ondes lumineuses comme porteurs pour transmettre des informations d'un endroit à l'autre. La distance de quelques mètres en laboratoire a été portée à quelques kilomètres, à des centaines de kilomètres, et maintenant à des milliers de kilomètres dans la première décennie de ce siècle avec des débits qui sont passés de quelques dizaines de Mbit/s à la fin des années 1960 à 100 Gbit/s et des dizaines de Tbit/s actuellement [48]. En raison de cette énorme capacité de transmission, depuis le début du XXIe siècle, les systèmes basés sur la fibre optique ont largement remplacé les systèmes d'émetteurs radio pour la transmission de données sur longue distance.

La mise en place de l'Internet à base de fibre optique a conduit à un support de communication dans le monde entier pour l'ensemble du spectre des modes de communication, à savoir les données, la voix et la vidéo, à la fois en temps réel et en temps différé. Une partie de ces contenus peut être attribuée aux données de détection qui sont collectées à partir de systèmes de détection

industriels et non industriels connectés au réseau. Ces données de détection, acquises par des transducteurs dans les systèmes de détection, contiennent des informations sur les paramètres physiques et chimiques devant être traitées puis envoyées à un public cible dans le réseau. Par conséquent, les systèmes de détection actuels peuvent être considérés comme faisant partie du système de communication. Étant donné que les systèmes de communication se déplacent vers les technologies optiques, cela requiert que les systèmes de détection s'orientent également vers des technologies optiques.

La deuxième raison est liée aux avantages des capteurs optiques par rapport à leurs homologues électriques car ils peuvent fonctionner sans aucune interférence avec des champs électriques ou magnétiques proches [49]. Ils ont un temps de réponse rapide par rapport aux capteurs électriques et n'ont pas besoin de contacts électriques qui pourraient être endommagés par la substance à détecter. Pour la même raison, ils sont beaucoup plus sûrs en présence de vapeurs ou de gaz inflammables [50]. Les capteurs à fibre optique présentent également bien d'autres avantages en raison de leur capacité à fonctionner à distance, en réseau ou de manière distributive, leur adéquation pour les endroits difficiles d'accès, leur durabilité, leur stabilité à long terme, leur reproductibilité, leur facilité d'utilisation et leur rentabilité selon la méthode et les matériaux employés.

Les capteurs électriques et mécaniques mesurant l'humidité présentent certains désavantages. Par exemple, les capteurs capacitifs sont limités par la distance et les capteurs résistifs sont limités par la stabilité à long terme lorsqu'ils sont exposés à des vapeurs chimiques et autres contaminants tels que des vapeurs d'huile qui peuvent entraîner une défaillance prématurée ; ils ont tendance à mesurer une valeur erronée du taux d'humidité lorsqu'exposés à la condensation si une couche hydrosoluble est utilisée pour détecter l'humidité. Finalement, les capteurs, utilisant la conductivité thermique pour mesurer l'humidité, répondent aussi à tout gaz ayant des propriétés thermiques différentes de celles de l'air sec (contenant principalement de l'azote), affectant ainsi la sélectivité du capteur [51]

1.2.1 Capteurs optiques d'humidité

Le développement des approches optiques a permis d'établir différents types de techniques de détection et de mesure. Dans le cas des capteurs d'humidité, l'interaction de la vapeur d'eau avec une couche sensible, par exemple des couches de céramique ou

de polymère, conduit à une modification des paramètres optiques tels que la réflectance [52, 49], l'indice de réfraction [53, 54], le décalage en longueur d'onde [55- 57], la photoluminescence [58, 59]. D'après des études réalisées précédemment, les capteurs optiques d'humidité peuvent être classés suivant leur géométrie et leur méthode de détection. La figure 1.3 représente un diagramme en arbre pour classer les capteurs optiques d'humidité, lesquels sont brièvement décrits dans les sections suivantes.

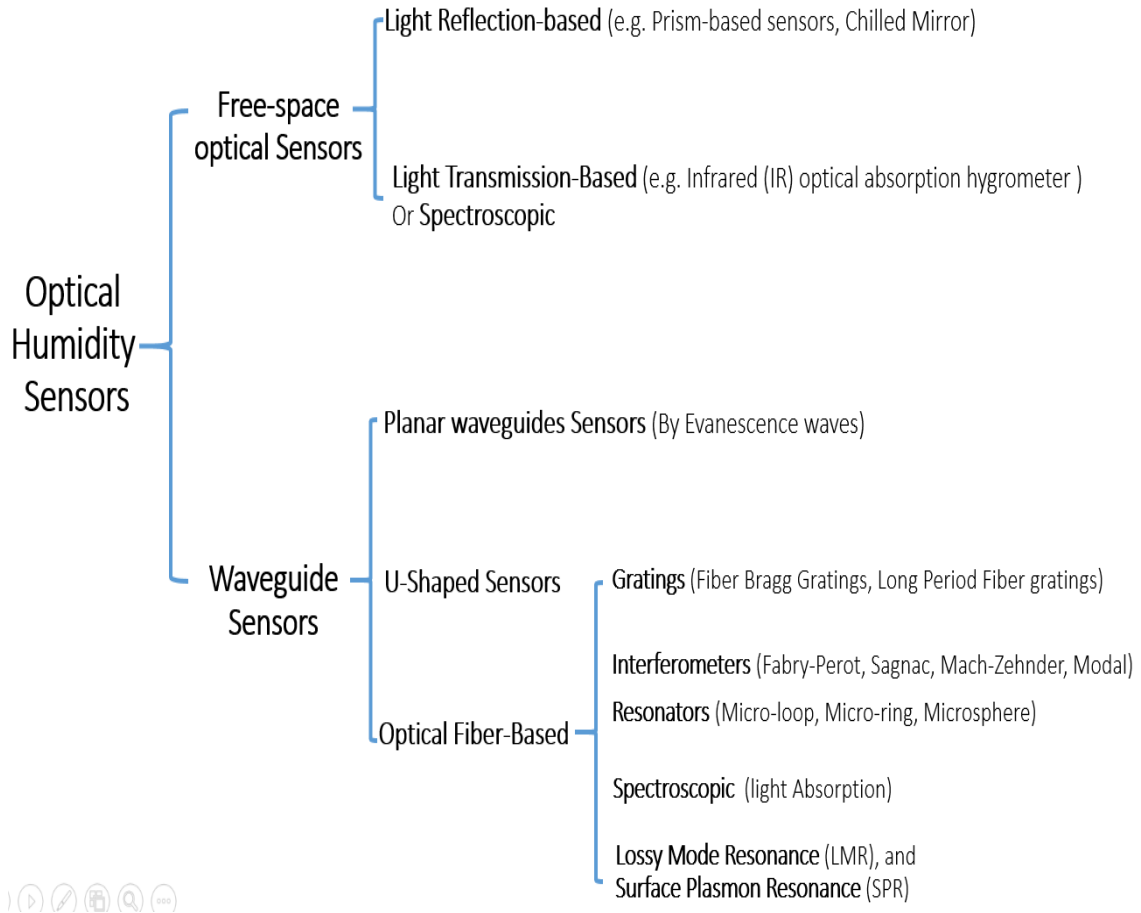


Figure 1.3: Classification des capteurs optiques d'humidité selon leur géométrie et leurs mécanismes de détection.

- Capteur d'humidité utilisant un prisme

La figure 1.4 décrit le diagramme de la réflexion par le film recouvrant la base du prisme. Le prisme est fixé dans une ouverture rectangulaire de la paroi d'une chambre en acier spécialement conçue avec un support métallique de sorte que seule la base du prisme, sur lequel le film est déposé, se trouve à l'intérieur de la chambre. Un faisceau de lumière

laser He-Ne non polarisé de longueur d'onde 630 nm pénètre dans le prisme à partir de l'une de ses faces isocèles et est réfléchi à partir de l'interface verre-film à sa base.

La lumière réfléchie émergeant de l'autre face isocèle du prisme est détectée par une fibre optique et introduite dans un puissance-mètre. Un humidificateur / déshumidificateur avec un thermomètre est placé dans un plat disposé lui-même sur un pilier dans la chambre. L'humidité relative à l'intérieur de la chambre change lentement et l'intensité de la lumière réfléchie à l'interface film-verre est enregistrée, entraînant une diminution continue de la puissance de sortie observée dans toute la gamme d'humidité avant saturation. Les résultats obtenus par Yadav et *al.* montrent que les résultats sont reproductibles et aucun effet de vieillissement n'a été observé [60, 61].

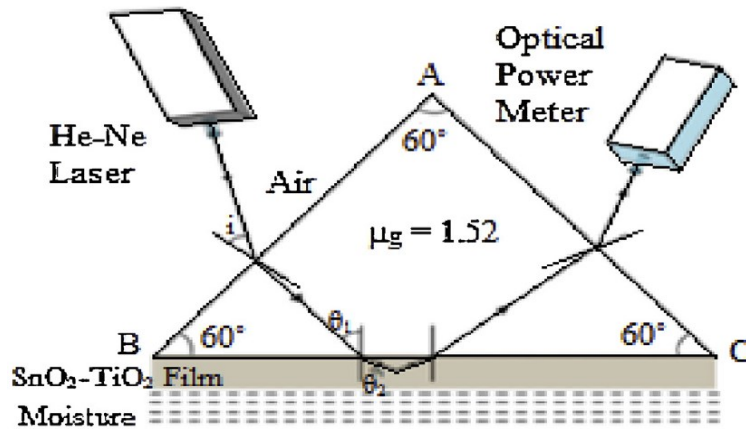


Figure 1.4: Diagramme de réflexion par couche sensible déposée sur la base du prisme. Cette figure a été prise dans la référence [61].

- Hygromètre à miroir refroidi

L'hygromètre à miroir refroidi, également connu sous le nom d'hygromètre à condensation optique, est un dispositif basé sur une technique optique pour la détermination de la température du point de rosée. Un hygromètre à miroir refroidi conventionnel contient un miroir réfléchissant à la surface duquel l'eau se condense à température contrôlée et un module optoélectronique qui mesure le signal optique réfléchi par la surface du miroir, représenté schématiquement par la figure 1.2(e). À l'état « sec », la température du miroir est supérieure au point de rosée, le signal maximum est reflété dans le détecteur du module optronique. Lorsque la température descend au-dessous du point de rosée, l'intensité du signal est réduite en raison de la dispersion de la lumière résultant de la

formation de gouttelettes d'eau sur la surface du miroir. Bien que l'hygromètre à miroir refroidi peut fournir des mesures avec une précision de ± 0.1 °C [39], cette méthode optique est coûteuse en espace libre, difficile à miniaturiser et nécessite un entretien régulier en raison de la sensibilité de la surface du miroir à la contamination.

- Hygromètre à absorption optique infrarouge

Comme le montre la Figure 1.2 (f), le principe de fonctionnement d'un hygromètre à absorption IR est basé sur une technique d'absorption à double longueur d'onde utilisant une longueur d'onde primaire pour laquelle une forte absorption optique est observée et une longueur d'onde secondaire de référence pour laquelle l'absorption est négligeable. Les mesures d'humidité sont ensuite obtenues grâce au rapport des transmissions de ces deux longueurs d'onde choisies. Cette technique permet la mesure directe de l'absorption d'eau qui minimise la dérive dans les lectures et également les interférences causées par des contaminants tels que des particules et d'autres espèces gazeuses dans l'environnement d'essai. La sensibilité de l'instrument dépend de la longueur du trajet d'absorption et est donc régie par la loi de Beer-Lambert où la transmission du rayonnement IR à travers le gaz absorbant est inversement proportionnelle à la fonction exponentielle de la concentration de gaz et à la longueur du trajet. Bien que cet instrument ait une dérive négligeable et puisse généralement fonctionner sur une large plage d'humidité, il n'est pas facile de le miniaturiser pour une détection à distance.

- Capteurs d'humidité à guide d'ondes planaire

Un capteur d'humidité à guide d'ondes planaire typique est constitué d'un film mince, de couches diélectriques ou semi-conductrices, déposées sur un substrat ayant un indice de réfraction inférieur, ainsi que d'une fine couche de détection déposée sur la partie supérieure du guide d'ondes (représenté schématiquement Figure 1.5). Les capteurs d'humidité à guide d'ondes planaire utilisent des phénomènes associés à la propagation de la lumière, à sa transformation et à sa génération dans des structures de guides d'ondes. L'absorption de surface et de volume des molécules d'eau dans la couche de détection provoque les changements d'indice de réfraction effectifs pour certains modes dans le guide d'onde, en raison de l'interaction des ondes évanescentes des modes guidés et de la couche de détection. De nos jours, des technologies microélectroniques planaires ont été développées pour créer plusieurs types de capteurs d'humidité à guide

d'ondes planaires. Les technologies planaires permettent de monter des circuits optiques intégrés miniaturisés sur un unique substrat [62, 57], ce qui permet de les produire en masse, mais, par contre, ce capteur ne convient pas aux applications de télédétection.

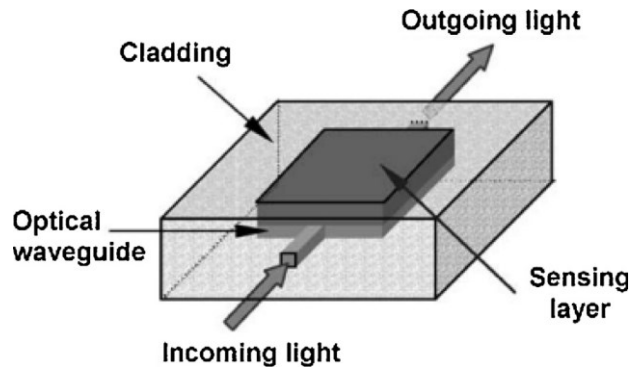


Figure 1.5: Plate-forme de détection réfractométrique avec un capteur optique intégré basé sur des guides d'ondes planaires obtenus par voie sol-gel et une couche de détection. Cette figure a été prise dans la référence [62].

- Capteurs en forme de U

Comme représenté sur la figure 1.6 (a), un capteur d'humidité optique en forme de U est constitué d'une tige de verre en forme de U d'un diamètre de 1 mm sur laquelle est déposée une couche mince d'oxyde métallique. La configuration expérimentale est représentée à la figure 1.6 (b). Cette tige de verre est fixée sur la paroi d'une chambre en acier de telle sorte que la courbure de la tige en forme de U reste à l'intérieur de la chambre et les deux bras sortent à l'extérieur. Les deux extrémités de ces bras sont couplées à des fibres optiques en plastique. Un faisceau délivré par une source laser He-Ne est introduit dans l'une des deux fibres et est détecté dans l'autre fibre, couplée à un puissance-mètre optique pour mesurer son intensité. Les mesures de l'intensité de sortie sont prises lorsque l'humidité à l'intérieur de la chambre varie. La tige de verre en forme de U est revêtue d'un film poreux. Initialement, le film est exempt de molécules d'eau et a de l'air sec dans ses pores. Lors de l'exposition à une humidité même faible, une adsorption rapide à la surface des vapeurs d'eau dans le film poreux se produit, provoquant une atténuation rapide de la lumière transmise.

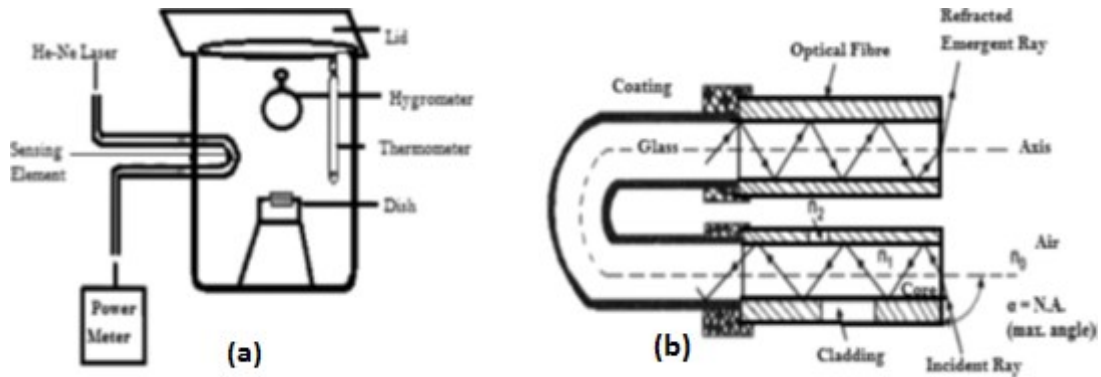


Figure 1.6: (a) Configuration expérimentale pour capteur d'humidité optique en fibre de verre en U. (b) Diagramme schématique de la réflexion et de la réfraction dans une fibre optique couplée à une tige de borosilicate en forme de U revêtue d'un film de MgO. Cette figure a été prise dans la référence [63].

Cette atténuation est due à l'augmentation de la fuite de lumière dans le revêtement de tige, dont l'indice de réfraction augmente lorsque le pourcentage d'humidité relative augmente. Au fur et à mesure que l'humidité relative augmente, le film poreux commence à être saturé, ce qui résulte en une sensibilité plus faible pour cette région. Les résultats expérimentaux indiquent qu'au-dessus de 90% d'humidité relative, les variations de l'intensité de la lumière à la sortie deviennent négligeables. La réponse rapide des capteurs peut être attribuée à la pénétration rapide des molécules d'eau dans le revêtement. Ce type de capteurs peut être utilisé pour mesurer dans la gamme de HR entre 5 et 95%. La fragilité de la tige de verre en U est l'inconvénient principal pour ce type de capteur.

1.2.2 Capteurs d'humidité à fibre optique

Les techniques optiques discutées jusqu'ici ont leurs propres avantages et inconvénients mais aucune d'entre elles ne peut satisfaire la majorité des exigences d'exactitude, de précision, de coût et de facilité de fonctionnement et de maintenance. Pour la surveillance in situ de l'humidité ou de la pression de vapeur, dans des environnements potentiellement dangereux ou explosifs, il faut disposer d'un système de détection à distance. Les capteurs d'humidité à fibre optique conviennent à ces fins. Les fibres optiques sont capables d'agir à la fois comme guide d'ondes et comme transducteur, en plus, de présenter les avantages remarquables décrits ci-dessous:

- La fibre optique présente une faible atténuation et une large bande ce qui la rend appropriée sur de longues distances.
- Les fibres optiques sont constituées de matériaux diélectriques chimiquement inertes. Par conséquent, ces capteurs sont insensibles aux interférences électromagnétiques.
- Ayant un point de fusion élevé, les fibres optiques peuvent être utilisées dans des environnements à haute température.
- Le temps de réponse, la plage dynamique et la résolution des capteurs à fibre optique sont beaucoup plus élevés que ceux des capteurs électriques conventionnels [64, 65].

Dans ce qui suit, différents types de capteurs d'humidité à fibre optique sont brièvement décrits.

- Capteur fibré à réseau de Bragg (FBG)

Un réseau de Bragg est une structure optique qui consiste en une perturbation périodique de l'indice de réfraction d'un guide d'onde. Un FBG est formé par l'exposition du cœur de la fibre optique à un schéma d'interférence optique intense de lumière ultraviolette [66]. L'exposition produit une augmentation permanente de l'indice de réfraction du cœur de la fibre, créant une modulation d'indice de réfraction en fonction du modèle d'exposition comme illustré à la figure 1.7 [67].

Lorsque la lumière est introduite dans la fibre optique, une petite quantité de lumière est réfléchi en fonction de changement de réfraction périodique. Tous les signaux lumineux se combinent de façon cohérente en une seule réflexion à une longueur d'onde particulière lorsque la période de réseau est approximativement égale à la moitié de la longueur d'onde de la lumière d'entrée [67]. Le réseau de fibre affecte seulement la propagation de la lumière qui possède une longueur d'onde qui satisfait l'équation de Bragg, $\lambda_B = 2n\Lambda$, où λ_B est la longueur d'onde de Bragg, n est l'indice de réfraction effectif du réseau dans le cœur de la fibre, et Λ est la période du réseau. En raison des dimensions du masque et des caractéristiques des fibres monomodes de communication standard (SMF), la longueur d'onde de Bragg est généralement située dans le domaine infrarouge. Les matériaux hygroscopiques sont couramment utilisés pour développer des capteurs d'humidité à fibre optique utilisant des FBG, en raison de la contrainte qu'ils peuvent exercer sur les FBG lors de leur gonflement. Par ailleurs, graver la gaine d'un

FBG et la revêtir avec une couche sensible améliore la sensibilité de cette structure optique [68]. Plusieurs matériaux polymères ont été enduits sur un FBG et testés à des fins de détection de l'humidité, tels que le polyimide [69, 70], le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) [68, 72], et appuient sur le FBG lors de leur gonflement. Malgré la dépendance à la température, la faible plage dynamique et les coûts des capteurs FBG, ils suscitent toujours un grand intérêt en raison de leur capacité de multiplexage inhérente [73].

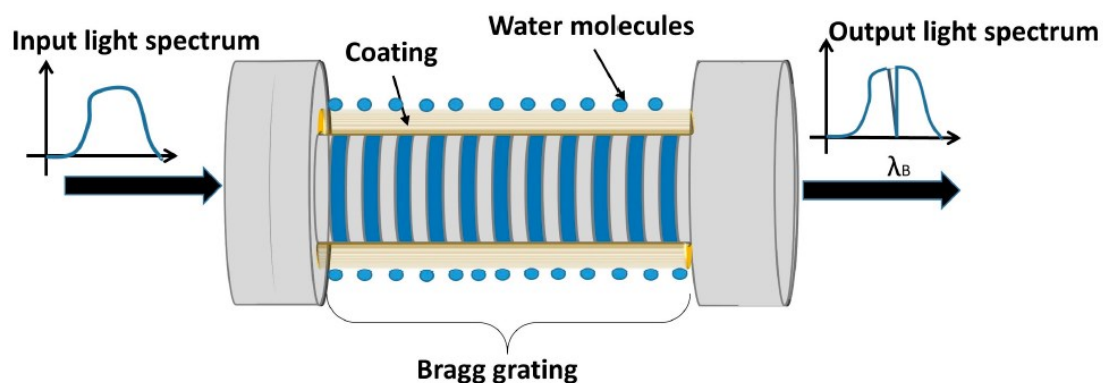


Figure 1.7: Schéma d'un capteur d'humidité à fibre optique utilisant des réseaux de Bragg. Cette figure a été prise dans la référence [67].

- Réseaux de fibre à longue période

Les réseaux de fibres à longue période (RLP) consistent en une modification périodique de l'indice de réfraction du cœur d'une fibre optique monomode (SMF). Contrairement aux FBG, qui ont une période sub-micronique, les RLP ont une période typiquement comprise entre 100 microns et 1 mm. Ceci provoque dans les RLP un couplage de lumière entre le mode guidé par le cœur et les différents modes en co-propagation dans la gaine [76 75]. Ce couplage produit une série de bandes d'atténuation dans le spectre de transmission de la fibre optique, chacune étant centrée sur une longueur d'onde de résonance différente. Bien que les RLP aient été initialement développés en tant que filtres à bande de réjection [78], ils présentent également des caractéristiques intéressantes pour la détection. Plusieurs types de matériaux ont été étudiés en tant que revêtements pour le développement de capteurs d'humidité relative à base de RLP, dont les polymères [79, 80], les hydrogels [81], la gélatine [82], les matériaux à base de chlorure de cobalt [83] et les nanosphères de SiO₂ [83]. La plupart des récentes

recherches ont été consacrées à l'étude des performances de ce capteur pour de faibles valeurs de l'humidité relative (de 0,4% jusqu'à 36%) et de température (de -10 à 20 °C) et soumis à des radiations. A cet effet, le matériau choisi pour le revêtement était du dioxyde de titane et la sensibilité obtenue était de 1,4 nm /% HR à de faibles valeurs d'humidité relative, ce qui est une sensibilité élevée pour un RLP [77].

Fu et *al.* [84] ont mis au point une nouvelle méthode de fabrication des RLP qui est représentée schématiquement sur la figure 8. Il combine les méthodes de polissage latéral et de gravure de fibres pour créer des entrefers sur la région polie qui atteint le cœur de la fibre optique. Après avoir enduit ce dispositif avec du chlorure de calcium, ils ont obtenu une sensibilité allant jusqu'à 1,36 nm /% HR dans la gamme 55% - 90% HR. Le principal inconvénient des capteurs d'humidité à fibre optique basés sur des FBG et des RLP est qu'ils sont intrinsèquement sensibles à la température, provoquant une erreur de mesure induite par la température.

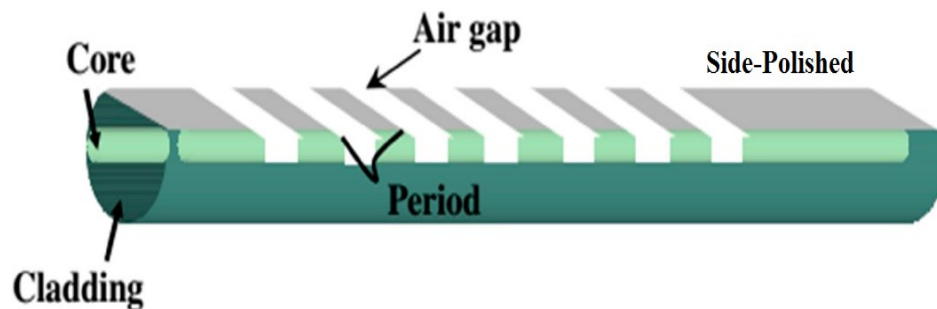


Figure 1.8: Processus de fabrication du réseau de fibres à longue période d'entrefer. Cette figure a été prise dans la référence [84].

- Capteurs interférométriques

L'interférométrie optique est un outil puissant et polyvalent, qui a été utilisé pour la détection dans les fibres optiques afin d'obtenir des performances élevées. Les interféromètres à fibres optiques utilisent l'interférence entre deux faisceaux qui se propagent suivant différents trajets optiques dans une seule fibre ou deux fibres distinctes dans l'une desquelles le chemin optique pourrait être modifié par une perturbation externe spécifique. La cible, devant être mesurée, peut être identifiée à l'aide de différents moyens de détection tels que la longueur d'onde, l'intensité, la phase de polarisation, etc. Le mécanisme de détection dépend de la perturbation des propriétés

de phase du signal lumineux et la détection du changement de phase est obtenue en mélangeant le signal d'intérêt avec un signal de référence. La différence de phase entre les deux signaux se transforme en une variation d'intensité optique. Comme l'illustre la figure 1.9, diverses configurations d'interféromètre, telles que Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac et Fabry-Perot, peuvent être employées pour des applications de détection [85-88].

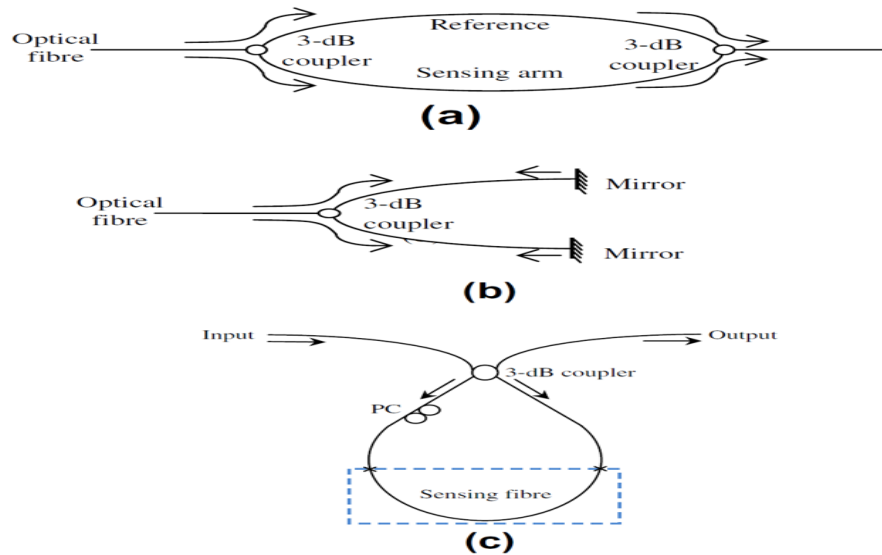


Figure 1.9: Schéma des configurations interférométriques à base de fibres optiques : (a) Mach-Zehnder, (b) Michelson et (c) Sagnac. Cette figure a été prise dans la référence [2].

La tendance actuelle dans les interféromètres à fibre optique est de les miniaturiser pour des applications à des échelles du micromètre et donc, les composants optiques traditionnels tels que les diviseurs de faisceaux, les combineurs et les lentilles d'objectif ont été rapidement remplacés par des dispositifs fibrés de petite taille à l'échelle des fibres. Cette innovation convient bien aux applications de détection de l'humidité relative grâce à des structures en ligne telles que celles des fibres qui ont deux trajets optiques dans leur structure physique, offrant un alignement facile, une efficacité de couplage et une stabilité élevées.

- Interféromètres de Sagnac

L'application la plus connue pour les interféromètres de Sagnac est le gyroscope, mais ils ont aussi été largement étudiés et utilisés pour d'autres applications de capteurs [89].

Les interféromètres de Sagnac utilisent une source de lumière monochromatique cohérente. La lumière monochromatique rend le comportement interférent plus prévisible et la cohérence est requise pour la détection du déphasage. Le faisceau laser est divisé en deux faisceaux différents forcés à suivre un seul et même chemin mais en direction opposée. Les deux faisceaux sont recombinaés à leur sortie de la fibre dans un diviseur et le déphasage provoque une variation de la puissance optique de sortie. Pour la détection de l'humidité, deux approches différentes ont été proposées par J. Wang et *al.*, et L. Sun et *al.* [90, 91]. Tous les deux utilisent une configuration similaire, illustrée à la Figure 1.10, qui comprend une source lumineuse à large bande (BBS) et un analyseur de spectre optique (OSA). La différence principale est liée à l'utilisation d'une couche sensible supplémentaire dans un cas [90], alors que dans l'autre cas, le principe de détection est basé sur l'interaction entre le champ évanescent d'une fibre optique à haute biréfringence (Hi-Bi) et l'humidité de l'environnement.

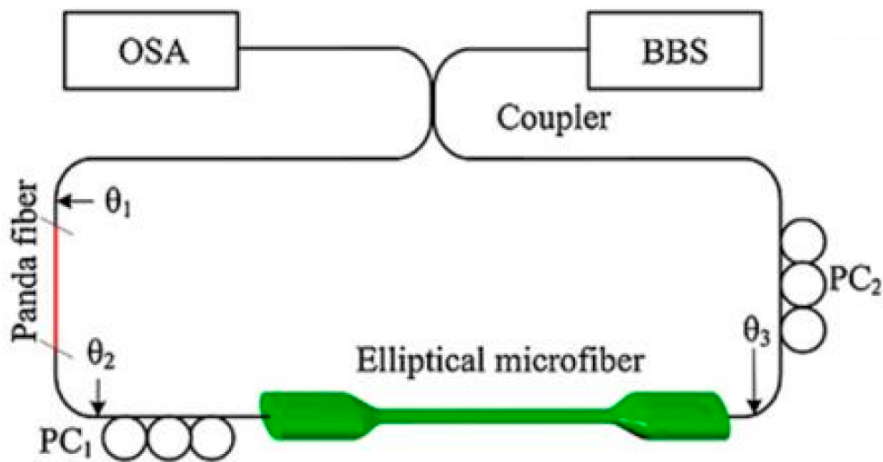


Figure 1.10: Diagramme schématique du capteur HR basé sur l'interféromètre à microfibres elliptiques à haute biréfringence de Sagnac. Cette figure a été prise dans la référence [91].

L'alcool polyvinylique (PVA) est utilisé comme matériau sensible dans la première approche [90]. Il est déposé sur une fibre optique à maintien de polarisation (PMF) gravée chimiquement, qui forme l'un des bras de l'interféromètre. L'autre bras est formé par une PMF non modifiée. Par conséquent, l'interférence se produit en raison de la différence de phase relative introduite dans les modes guidés par les PMF. Les bandes d'atténuation

obtenues, avec des atténuations de 20 et 25 dB, ont une largeur à mi-hauteur (FWHM) de 11,8 et 5,2 nm, respectivement. Une sensibilité de 111,5 pm /% HR a été atteinte dans la plage d'humidité 20-80% avec un temps de réponse d'environ six secondes.

Des sensibilités plus grandes ont été obtenues par L. Sun et *al.* [91]. La fabrication de cet interféromètre de Sagnac, représenté sur la figure 1.10, nécessite une configuration plus complexe pour la fabrication de la fibre optique sensible, qui est une fibre optique biréfringence élevée (Hi-Bi) constituée d'une microfibre elliptique pour laquelle des contrôleurs de polarisation sont nécessaires. Le dispositif final représente une sensibilité de 422 pm /% HR avec des temps de réponse de seulement 60 ms.

- Cavités de Fabry-Pérot

Un phénomène optique largement utilisé pour le développement de capteurs à fibre optique, et spécifiquement pour la fabrication de capteurs d'humidité, est l'interféromètre de Fabry-Pérot (FPI). Les FPI sont basés sur les interférences causées par les réflexions multiples de la lumière entre deux surfaces réfléchissantes. Les faisceaux transmis, étant en phase, génèrent des interférences constructives et correspondent alors à un pic de transmission élevé, alors que si les faisceaux transmis sont déphasés, une interférence destructive se produit et cela correspond à un minimum de transmission. La situation des faisceaux réfléchis multipliés, en ce qu'ils sont dans la même phase ou non, dépend de la longueur d'onde de la lumière, de l'angle auquel la lumière traverse la fibre et de l'indice de réfraction du matériau entre les surfaces réfléchissantes.

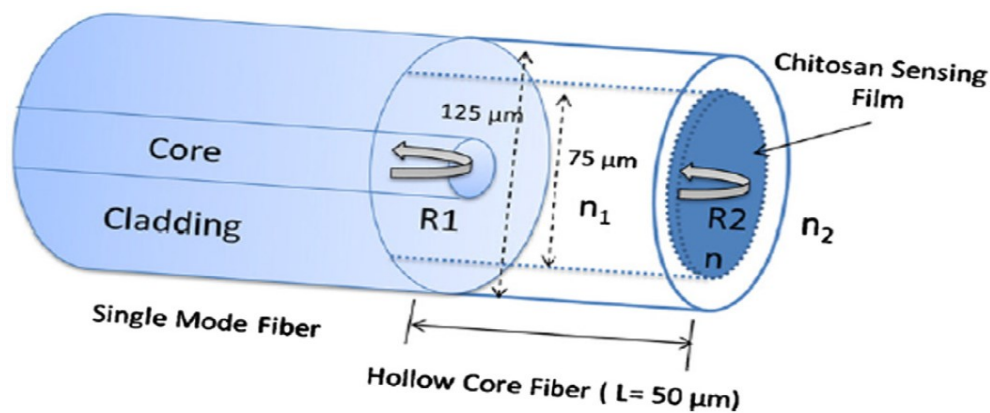


Figure 1.11: Diagramme schématique du capteur HR basé sur un FPI revêtu d'une couche de chitosane et du décalage de la longueur d'onde du capteur lors d'une exposition à un environnement d'humidité relative variable. Cette figure a été prise dans la référence [92].

Un capteur interférométrique à fibre optique intéressant, proposé par Chen et *al* implique de couper une section de fibre à cœur creux d'une fibre monomode (SMF) et de revêtir la pointe de la fibre à cœur creux avec du chitosane, créant ainsi un capteur basé sur le principe de l'interféromètre de Fabry-Pérot (FPI), qui est montré à la Figure 1.11. Le capteur présente une sensibilité de 130 pm /% HR dans une plage d'humidité de 20% à 95% avec un temps de réponse rapide de 380 ms. Un autre type de capteur d'humidité à FPI a été récemment développé par Ascorbe et *al* en déposant un revêtement sur la facette d'extrémité de la fibre optique [93]. Les interféromètres de Fabry-Pérot, ayant du dioxyde d'étain déposé sur la facette d'extrémité d'une SMF [93], présentent une large gamme dynamique (90 nm), un faible temps de réponse et une sensibilité de 1,27 nm /% HR. Les autres matériaux sensibles à l'humidité utilisés dans les interféromètres de Fabry-Pérot sont les semi-conducteurs [93, 94], les céramiques [95], les polymères [96, 97], etc. L'alumine poreuse anodique a été étudiée et une sensibilité de 0,31 nm /% HR a ainsi été obtenue [95].

- Interféromètre de Mach-Zehnder (IMZ) à base des fibres à cristaux photoniques

Les fibres à cristaux photoniques (FCP) peuvent être considérées comme étant des interféromètres de Mach-Zehnder, bien qu'elles puissent également être utilisés comme interféromètres de Michelson ou de Sagnac. Ces fibres sont caractérisées par un motif complexe de trous d'air microscopiques dans le plan transversal qui court tout le long de la fibre. Les FCP sont intéressantes en raison des différentes alternatives possibles pour construire des interféromètres modaux tout-fibrés tels que les structures effilées ou hybrides de FCP [98]. L'élément essentiel de ces interféromètres est une région microscopique dans laquelle les vides de la FCP sont complètement déformés. Les deux interfaces déformées entre les segments de la FCP et des SMF produisent l'excitation et la recombinaison des modes du cœur et des gaines, qui furent réalisées par D. Lopez-Torres [99]. Le schéma de la structure optique est représenté sur la figure 1.12.

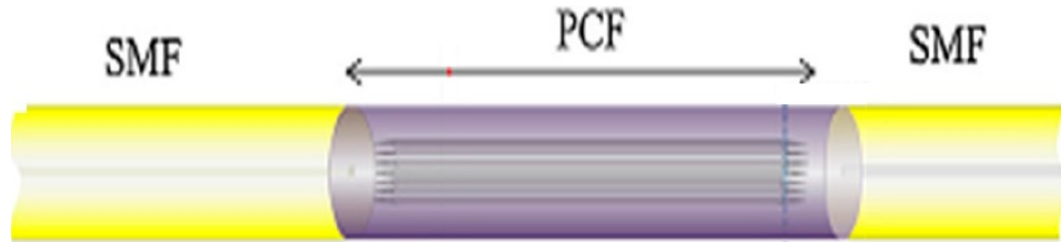


Figure 1.12: Représentation schématique de l'interféromètre à fibre à cristaux photoniques (FCP). Cette figure a été prise dans la référence [99].

Le revêtement de la FCP avec des matériaux hygroscopiques, tels que l'agarose, l'alcool polyvinylique ou le chlorhydrate d'allylamine et l'acide acrylique, améliore la sensibilité de ces interféromètres jusqu'à 2,35 nm /% HR dans la plage de 75% à 95% HR.

- Capteurs d'humidité à fibre optique effilée

Comme mentionné précédemment, l'IMZ nécessite deux chemins optiques différents pour générer des interférences. Un chemin optique est le cœur de la fibre optique, tandis que l'autre chemin optique peut être les modes guidés dans la gaine. Pour cette raison, il est nécessaire de permettre aux modes de se propager à travers la gaine pour obtenir un interféromètre modal basé sur le principe de l'IMZ. Plusieurs approches ont été suivies à cet effet. L'une des structures les plus connues est celle des fibres optiques effilées non adiabatiques (FOCNA), qui ont été introduites par Corres et *al.* [103, 104] et Socorro et *al.* [105]. Dans une FOCNA, le mode fondamental est couplé à des modes d'ordre supérieur, ce qui génère des interférences modales et par conséquent, une puissance oscillante à la sortie de la fibre. Dans une SMF effilée, la région centrale de la conicité agit comme une fibre multimode et la lumière est guidée à travers la gaine de la fibre, ce qui permet au milieu ambiant de fonctionner comme nouvelle gaine [103]. Ce couplage des modes dans le rétrécissement de la fibre rend le cône très sensible aux variations de l'indice de réfraction du milieu ambiant, ce qui permet son utilisation en tant que capteur d'humidité à fibre optique en ajoutant un revêtement approprié. Le cône de silice développé par Y. Tan et *al.* [106], avec un diamètre de taille de 3,8 μm , a permis de mesurer une sensibilité relative à l'humidité de 97 pm /%HR avec une sensibilité thermique transversale de seulement -0,048 /% HR, sans aucun revêtement fonctionnel supplémentaire. De la même manière, les micro-fils utilisés par Rota-Rodrigo et H. Fu ne nécessitent pas de revêtements supplémentaires pour obtenir un capteur à fibre optique

d'humidité, fournissant des sensibilités de 115 pm /% HR dans la plage d'humidité relative de 30% à 90% et 0,14 rad / %HR dans la gamme de 20% à 70% [107].

Les fibres optiques à effilage adiabatique double en ligne, présentées à la figure 1.13, peuvent également être considérées comme un IMZ modal, développé par M. Soltanian et *al.* en 2016 [108]. La première région conique diffracte le mode fondamental et par conséquent, permet aux modes de gaine de s'exciter. Les différences entre les indices de réfraction effectifs du cœur et les modes de gaine résultent en un déphasage. L'augmentation de l'humidité relative affecte l'indice de réfraction effectif des modes de gaine, tandis que l'indice de réfraction du mode de cœur demeure inchangé. Sur cette base, des sensibilités de principe de fonctionnement de 20 pm /% HR ont été obtenues sans aucune couche sensible. Le principal inconvénient est sa sensibilité à haute température, bien qu'aussi très fragile.

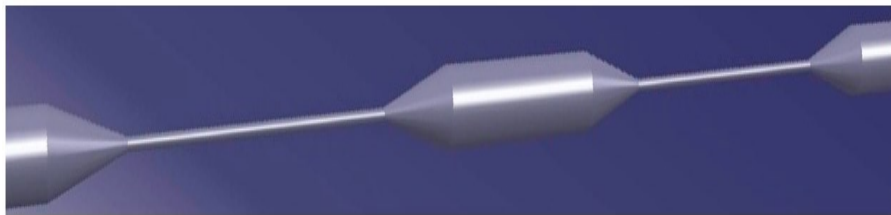


Figure 1.13: Schéma d'une fibre optique à effilage double en ligne correspondant à un interféromètre modal de Mach-Zehnder. Cette figure a été prise dans la référence [108].

- Les combinaisons de différentes fibres

La structure de fibre monomode-multimode-monomode (SMS) a été introduite par S. Silva et *al.* [109], ouvrant la porte vers certaines applications en raison de ses caractéristiques spectrales. Le principe physique de cet interféromètre est que la lumière transmise à travers le mode fondamental de la fibre monomode est couplée à plusieurs modes dans la section de la fibre multimode et re-couplée au mode fondamental de la fibre monomode à la sortie du segment de la fibre multimode. Une fibre optique SMS, revêtue de PVA, qui a été développée par J.An et *al.* [110], offre une sensibilité de 90 pm /% HR, alors qu'en combinant la structure optique SMS, la méthode d'effilage et un revêtement de nanoparticules de SiO₂, le capteur à fibre optique d'humidité développé par Y. Miao et *al.*, présenté à la figure 14, offre une sensibilité de 584,2 pm /% HR.

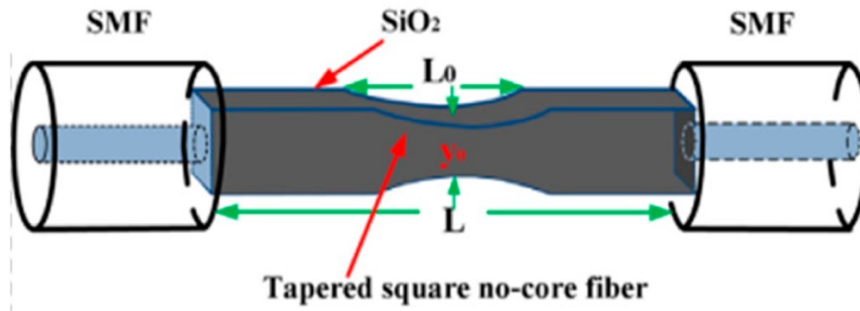


Figure 1.14: Diagramme schématique du capteur d'humidité basé sur l'interféromètre de Michelson. Cette figure a été prise dans la référence [111].

Une étude intéressante est sur la performance des interféromètres modaux, comme les structures SMS, lorsque le segment multimode est recouvert d'un matériau ayant un indice de réfraction complexe. L'optimisation des paramètres du revêtement, tels que l'indice de réfraction et l'épaisseur du film, conduit à une sensibilité plus élevée, comme démontré par I. Del Villar et *al.* [112].

- Réseaux et interférométrie (Capteurs hybrides)

Plusieurs conceptions de capteurs ont été rapportées, qui impliquent à la fois une combinaison de réseaux de fibres et de configurations interférométriques pour obtenir une détection de l'humidité relative plus efficace que par l'utilisation de l'une ou l'autre approche seule. Comme discuté précédemment, les capteurs à base des réseaux de fibre de Bragg (FBG) et des réseaux à longue période (RLP) sont intrinsèquement sensibles à la température. Par conséquent, dans la plupart des cas, l'implication du réseau est considérée pour les capteurs hybrides, afin d'éliminer l'erreur de mesure induite par la température dans les résultats obtenus de détection d'humidité relative.

Par exemple, B. Gu et *al.* ont proposé un capteur basé sur un interféromètre à fibre à réseau de Bragg où le polychlorure de vinyle (P₄VPHCl) et l'acide vinyl sulfonique (PVS) sont déposés sur la surface du capteur pour la détection de l'humidité relative. Le schéma du capteur est présenté à la figure 1.15. Le FBG est utilisé pour compenser les effets de la température sur la performance globale du capteur. Ce capteur est capable de détecter des changements de l'humidité relative avec une résolution de 0,78%, et fonctionne sur une large plage de RH et à différentes températures.

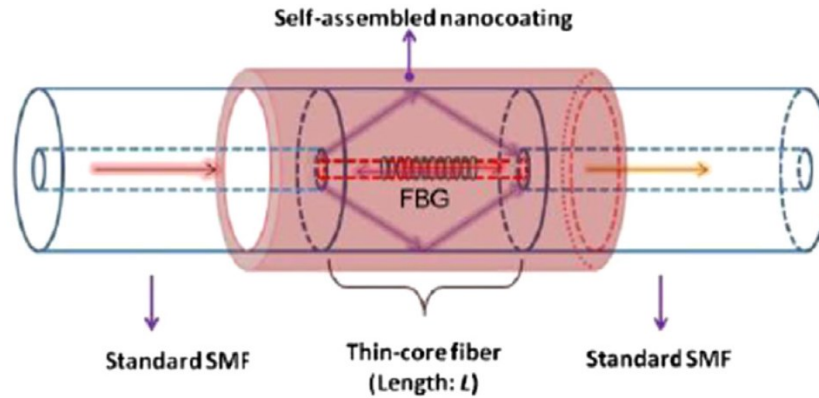


Figure 1.15: Configuration schématique du capteur HR à fibre optique hybride. Cette figure a été prise dans la référence [113].

Un autre avantage de la conception hybride pour la détection basé sur un réseau interférométrique est d'améliorer la technique de mesure, c'est-à-dire de créer une sonde et ainsi d'obtenir une meilleure résolution dans le système de détection. Une configuration typique impliquant un système de capteur à base de réseaux à longue période (RLP) présente fréquemment l'inconvénient que la sonde est utilisée en mode de transmission. En outre, la large bande passante de l'atténuation constitue une difficulté lorsque le dispositif est utilisé comme sonde pour un capteur classique. Pour surmonter les limites, une configuration de type interféromètre de Michelson a été proposée par Lam et al [114] en utilisant une paire de réseaux à longue période (RLP) formés en revêtant un miroir à l'extrémité distale du RLP, appelé RLP auto-interférant afin de créer un réflectomètre (comme présenté à la Figure 1.16). Cette configuration de détection est plus pratique à utiliser et est capable de surmonter les limites du capteur à RLP unique en raison des décalages dans les bandes d'atténuation qui sont plus facilement détectables [115].

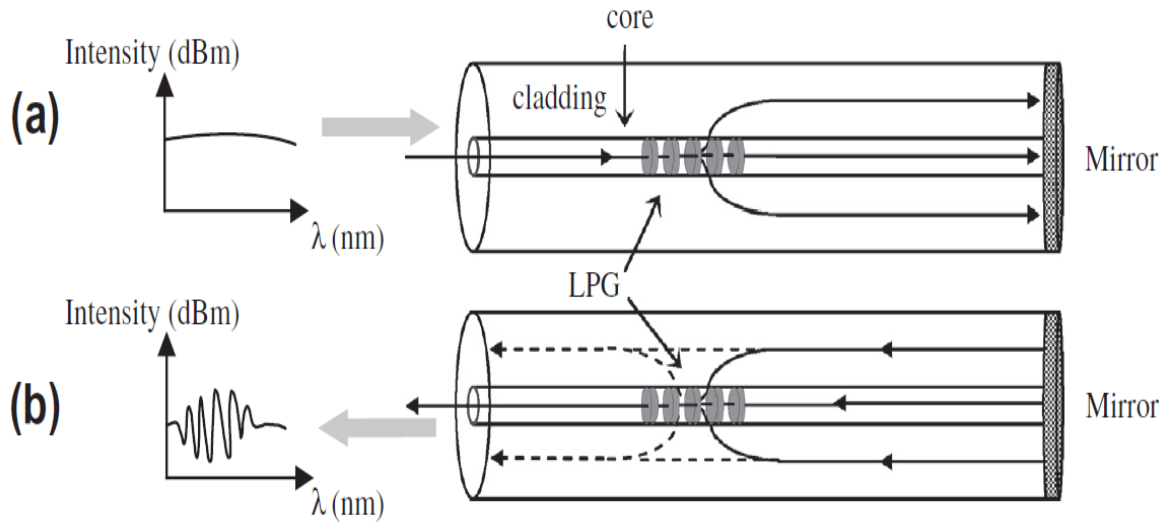


Figure 1.16: Propagation de la lumière dans le RLP auto-interférent (a) trajet de propagation vers l'avant et (b) trajet de propagation de la réflexion. Cette figure a été prise dans la référence [115].

- Résonateurs à micro-boucle et micro-noeud

Les dispositifs optiques présentés dans cette section sont basés sur des micro-cônes constituant le résonateur. Les résonateurs peuvent être fabriqués de différentes manières. Dans des résonateurs à micro-boucle, en raison du diamètre de la fibre, une fraction importante du champ guidé est laissée à l'extérieur de la fibre sous forme d'ondes évanescentes. Ensuite, ces ondes évanescentes peuvent être auto-couplées au segment parallèle à la microfibre et interférer avec la lumière qui est guidée à travers la boucle. Un résonateur à boucle développé en utilisant une SMF standard, réalisé par Y. Zheng et al [116], a atteint une sensibilité de 1,8 pm /% HR sans aucun revêtement. Sa gamme spectrale est d'environ 350 pm et le contraste des franges atteint 7 dB. Une structure similaire est ce que l'on appelle le résonateur à micro-nœud. Le résonateur à micro-nœud, développé par P. Wang et al (Figure 1.17), réalisé en polyacrylamide (PAM), présente une grande sensibilité de 490 pm /% HR [117].

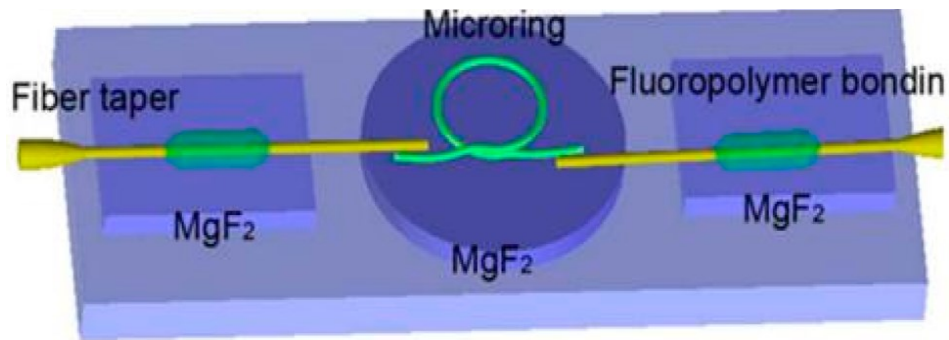


Figure 1.17: Diagramme schématique d'un résonateur à micro-nœud en PAM pour la détection d'humidité. Cette figure a été prise dans la référence [117].

- Les Modes de « Chuchotement de Galerie » (MCG)

Ce type de résonateur est constitué de deux composants optiques, le guide d'ondes et le coupleur. Le résonateur diélectrique à structures circulaires supporte les oscillations de la surface électromagnétique, qui sont couplées de façon évanescente au guide d'ondes. Les réflexions internes totales de la surface courbée du résonateur confinent l'énergie de la lumière à l'intérieur du résonateur générant des creux de transmission. Les positions spectrales des creux de transmission dépendent fortement de la géométrie du résonateur et des propriétés optiques du matériau. Ils offrent une haute résolution et la capacité de mesurer des très basses valeurs de l'humidité relative. Comme représenté à la Figure 1.18, une fibre optique effilée a été utilisée comme un guide d'ondes et une microsphère de silice, recouverte d'agarose, a été utilisée comme structure de résonateur. Ce capteur, réalisé par Maleek et al [118], fournit une sensibilité de 518 pm / % HR [118].

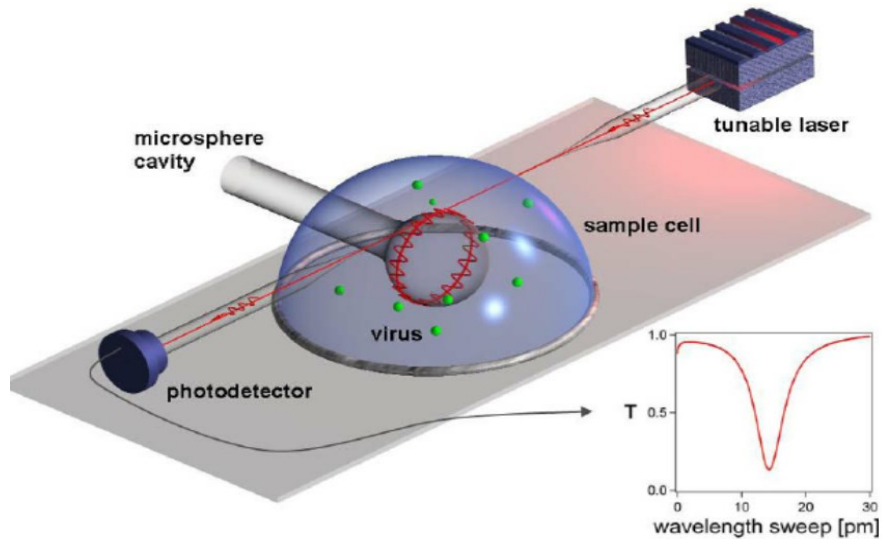


Figure 1.18: Excitation d'un MCG équatorial d'une microsphère par couplage évanescent à une onde guidée dans une fibre optique effilée. Les positions de résonance sont détectées comme des creux dans la lumière transmise à des longueurs d'onde particulières. Cette figure a été prise dans la référence [118].

1.2.3 Capteurs basés sur la spectroscopie directe

La méthode spectroscopique a été largement utilisée dans l'analyse chimique. Cette méthode examine le signal optique obtenu et relie les mesures basées sur l'absorption ou la fluorescence à la concentration de l'analyte cible. Il n'est donc pas surprenant que ce soit également une méthode populaire pour de nombreux capteurs chimiques à fibre optique. Comme le montre la Figure 1.19, la conception générale de ces capteurs peut simplement comprendre des fibres optiques avec une cellule d'échantillon pour des mesures spectroscopiques directes ou être configurées comme des optrodes de fibre où une couche sélective chimique est déposée sur la fibre optique [119].

La plupart des configurations spectroscopiques pour la détection de l'humidité sont basées sur la conception optrode où des réactifs sensibles à l'humidité tels que le chlorure de cobalt (CoCl_2) et l'oxyde de cobalt (Co_3O_4) [120, 121] sont attachés à l'extrémité de la fibre de détection. Les mesures sont faites en surveillant la variation d'intensité à la suite de l'absorption due à l'interaction entre les réactifs chimiques impliqués et l'humidité. Par exemple, Tao et al [120] ont réalisé un capteur optique à cœur de fibre actif pour la

détection de l'humidité en utilisant un concept similaire à la détection d'absorption en ligne. L'élément de détection a été moulé en utilisant une solution sol-gel mélangée avec du CoCl_2 . Le capteur est constitué d'une fibre de silice sol-gel dopée au CoCl_2 de 0,2 cm de long (diamètre de $390 \mu\text{m}$) avec les deux extrémités attachées à des fibres optiques de diamètre similaire. Le signal optique à 632 nm se propageant au travers du cœur de la fibre active a été mesuré pour obtenir des informations sur le niveau d'humidité. Ce capteur est capable de détecter le niveau d'humidité jusqu'à 2% HR. Cependant, la limite supérieure de fonctionnement pour cette conception de capteur est inférieure à 10% HR, qui peut être adaptée en ajustant la concentration du dopant.

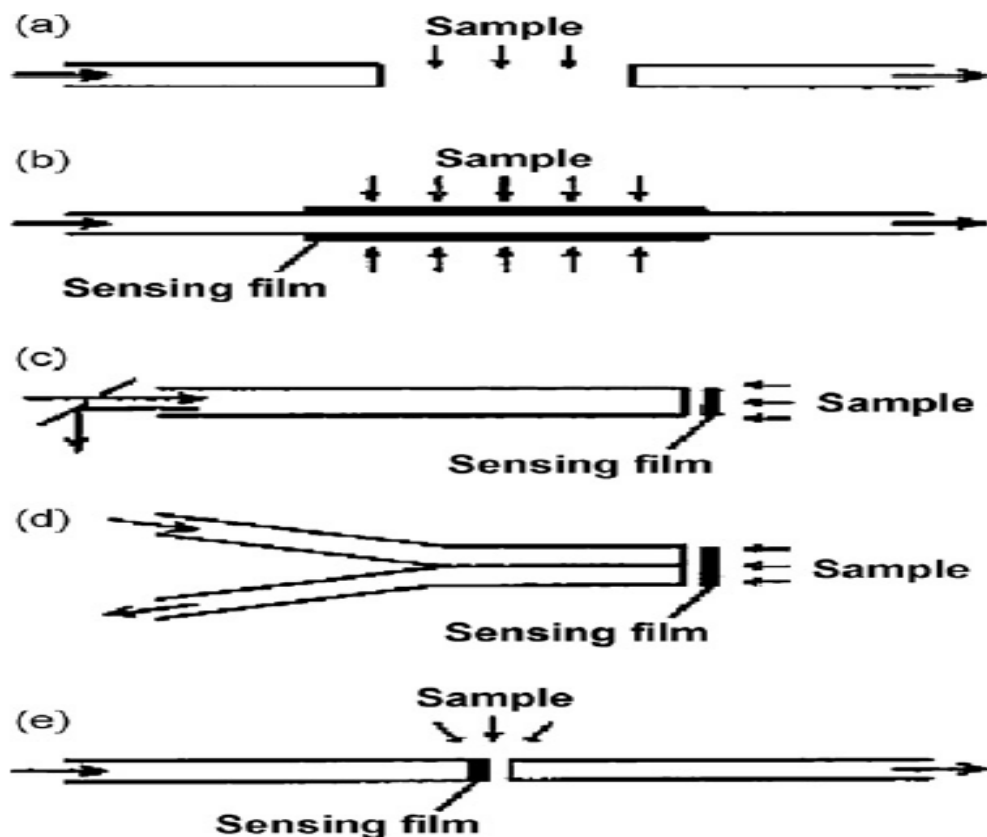


Figure 1.19: Diverses configurations pour les capteurs à fibre optique spectroscopiques. Cette figure a été prise dans la référence [121].

- Capteurs d'humidité à fibre optique basés sur des résonances en mode avec perte
Malgré la similarité de la résonance en mode avec perte (RMP) et de la résonance plasmonique de surface, il existe des différences importantes qui permettent de distinguer les deux phénomènes. Ce qui les rend similaires est que les deux sont des résonances

électromagnétiques qui génèrent une bande d'atténuation sur le spectre de transmission. Cependant, dans les résonances de plasmon de surface, il y a un transfert d'énergie de la lumière vers les électrons libres du métal noble, alors qu'en résonance en mode avec perte, la lumière est couplée avec le revêtement. Une autre différence est la possibilité d'observer la résonance sur les modes transverses magnétiques (TM) et transverses électriques (TE), ce qui pourrait simplifier la configuration requise et le nombre de matériaux disponibles pour la génération RMP, ce qui élargit l'application du capteur à base de RMP [122].

La structure d'un dispositif à base de RMP consiste en un guide d'ondes, qui permet d'accéder au champ évanescent, recouvert d'une couche mince du matériau approprié. La condition pour la génération de RMP est d'avoir une valeur positive de la partie réelle de la permittivité de la couche mince et qu'elle soit supérieure à la valeur de la partie imaginaire et en plus à la partie réelle du matériau entourant la couche mince [95]. Les résonances en mode avec perte sont générées lorsqu'il y a un couplage résonant de la lumière aux modes guidés dans le revêtement externe.

Plusieurs matériaux, surtout des oxydes métalliques tels que ITO [123], SnO₂ [124], In₂O₃ [125], TiO₂ [126] et des polymères, tels que poly(hydro chlorure d'allylamine) et poly(acide acrylique) [127], ont été testés et vérifiés pour la génération de RMP. La grande variété de matériaux disponibles pour le développement de capteurs à fibre optique permet d'envisager une large gamme d'applications. En plus des recherches sur les matériaux appropriés, les structures de RMP ont évoluées et ont été étudiées sur une large gamme de fibres optiques. L'oxyde d'indium-étain (ITO) est le premier matériau testé, mais d'autres oxydes métalliques tels que le dioxyde d'étain ont été étudiés. Les résultats obtenus par cette combinaison (RMP générée par le dioxyde d'étain et le polycarbosilane) montrent une sensibilité de 100 pm/HR% sur la gamme HR 20% à 80%. En ajoutant une couche externe, la sensibilité de l'appareil s'améliore et atteint des valeurs autour de 1 nm /% HR [123].

Les RMP peuvent également être combinés avec un autre phénomène optique tel que la résonance de plasmon de surface localisée. Cela a été démontré en utilisant la méthode de nano-assemblage couche par couche (CpC) pour développer un revêtement de polymère chargé de nanoparticules d'argent (Ag NPs) sur une fibre optique [129].

- Capteur à fibre optique basé sur le principe de résonance de plasmon de surface

La résonance plasmon de surface (RPS) présente des avantages en termes de sensibilité, de précision de détection et de résolution par rapport aux autres techniques. La RPS est devenu l'une des techniques de détection les plus prometteuses en raison de sa capacité à surveiller les moindres petits changements de l'indice de réfraction à une interface métal-diélectrique. La caractéristique la plus distinctive des guides d'ondes plasmons est que l'onde électromagnétique se propage non pas à l'intérieur du guide d'onde plasmon, mais le long de sa surface. Le capteur d'humidité optique basé sur la RPS est capable de surveiller l'humidité avec une bonne résolution et une sensibilité élevée pour une gamme presque complète de valeurs d'humidité relative [130, 131]. D'habitude, l'or est utilisé comme métal actif de la RPS pour les capteurs optiques d'humidité. Les capteurs à fibre optique à RPS sont généralement constitués d'une fibre en forme de D ou effilée, comme guide d'ondes, et d'une couche mince d'or (ou autre matériau de support comme l'oxyde d'indium et d'étain (ITO) afin de générer la RPS). Enfin, un matériau de détection d'humidité, comme les oxydes métalliques ou des couches de polymère, doit être exposé à un endroit de la mesure.

Par exemple, Hernáez et al [132] ont développé un capteur à fibre optique basé sur la RPS dans lequel un revêtement d'oxyde d'indium et d'étain (ITO) a été déposé sur une fibre de diamètre de coeur de 200 μm , provoquant le décalage de la longueur d'onde de RPS vers la région infrarouge. Ensuite, en utilisant la méthode de couche par couche, un revêtement de polymère est déposé sur la couche d'ITO. Les variations de l'humidité externe sont à l'origine des changements d'épaisseur et d'indice de réfraction du revêtement polymérique et donc de la résonance plasmon. La réponse de ces dispositifs est caractérisée par des variations de l'humidité relative dans la gamme de 20% à 80%, obtenant une variation de 65 nm dans la longueur d'onde de RPS.

Bien que nous utilisions l'effet RPS pour mesurer l'humidité ambiante relative et absolue, en utilisant des fibres optiques, la méthode utilisée dans cette thèse, est basée sur le changement de l'intensité lumineuse transmise. Par conséquent, nous discuterons de la théorie de la résonance plasmonique de surface dans la section suivante, avant de décrire les méthodes de détection que nous avons utilisées dans le cadre de ce projet doctoral.

1.3 Résonance Plasmonique de Surface pour des applications de détection

1.3.1 Théorie électromagnétique des plasmons de surface

La fluctuation cohérente de la densité des électrons de surface excités par les champs électromagnétiques produit les ondes plasmons de surface qui se propagent le long de l'interface entre le métal et le diélectrique. La propagation des ondes de résonance de plasmon de surface (RPS) sur un film métallique peut être entièrement décrite par la résolution des équations de Maxwell et l'application des conditions aux limites électromagnétiques à l'interface métal / diélectrique [133].

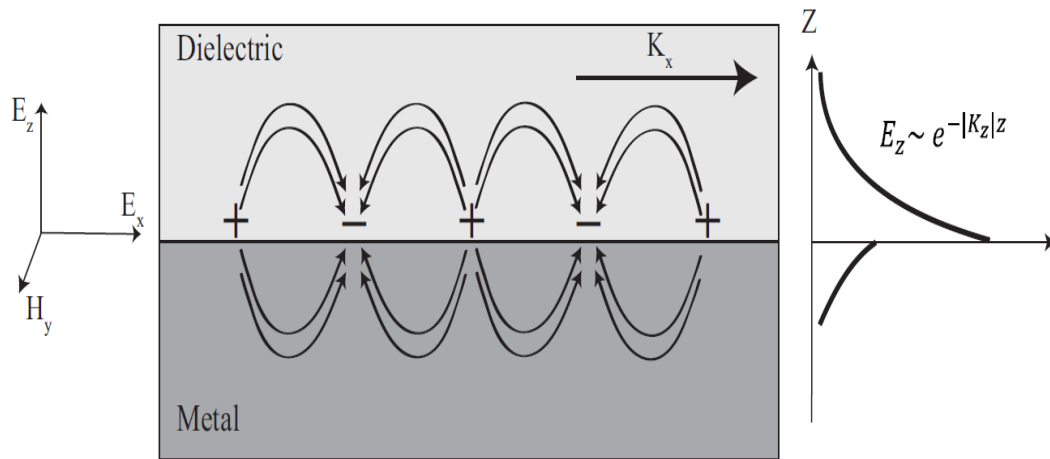


Figure 1.20: Le schéma de la distribution de champ du plasmon de surface p-polarisé se propageant à l'interface métal/diélectrique. Cette figure a été prise dans la référence [139].

Pour discuter de la solution à l'équation de Maxwell pour les plasmons de surface, nous considérons deux espaces semi-infinis divisés par le plan horizontal ($z = 0$) qui est représenté à la Figure 1.20 où les demi-espaces supérieur ($z \geq 0$) et inférieur ($z \leq 0$) sont respectivement occupés par le diélectrique et le métal. Les champs électriques dans le diélectrique et le métal peuvent être respectivement décrits comme:

$$E_d = E_0^d \exp[i(k_x x - \omega t)] \exp(-ik_z^d z) \quad (1.1)$$

Et

$$E_m = E_0^m \exp[i(k_x x - \omega t)] \exp(-ik_z^m z) \quad (1.2)$$

Où "d" et "m" indiquent respectivement la permittivité du diélectrique, ayant qu'une partie réelle pour le diélectrique, ε_d , et le métal ayant une partie réelle et complexe $\varepsilon_m = \varepsilon' + i\varepsilon''$.

Ici k_z^d et k_z^m sont les vecteurs d'ondes perpendiculaires à l'interface métal/diélectrique qui sont décrits par:

$$Z \geq 0 \quad k_z^d = \left[\varepsilon_d \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - k_x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

Et

$$Z \leq 0 \quad k_z^m = \left[\varepsilon_m \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - k_x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

Les vecteurs d'onde k_z^d et k_z^m définissent efficacement la profondeur de pénétration des plasmons de surface. En effet, l'amplitude de champ des plasmons de surface décroît exponentiellement à partir de l'interface métal/diélectrique, comme $\exp(-|K_z^d||z|)$ et $\exp(-|K_z^m||z|)$, où $K_z^d = ik_z^d$ et $K_z^m = ik_z^m$ respectivement.

Ceci définit la profondeur de pénétration des plasmons de surface (la profondeur à laquelle l'amplitude du champ diminue à 1/e), en tant que $\delta_{zd} = \frac{1}{|K_z^d|}$ et $\delta_{zm} = \frac{1}{|K_z^m|}$ pour le diélectrique et le métal respectivement.

Le vecteur d'onde de plasmon de surface dans la direction x, k_x , est défini comme

$$k_x = k_x^r + ik_x^i = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m}{\varepsilon_d + \varepsilon_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

Voir la référence (Raether, 1988). La partie imaginaire du k_x^i est responsable de la perte de propagation des ondes de plasmon de surface, tandis que la partie réelle du vecteur d'onde k_x^r définit la relation de dispersion des plasmons de surface. La valeur de k_x^r , tant que $|\varepsilon_m^r| > \varepsilon_m^i$, peut être estimée comme étant :

$$k_x^r = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m^r}{\varepsilon_d + \varepsilon_m^r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

La figure 1.21 représente la relation de dispersion d'une onde de résonance plasmon et la ligne de lumière de l'air. Lorsque la fréquence de fonctionnement augmente comme

$\omega = \omega_{sp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1+\epsilon_d}}$, la constante diélectrique du métal, estimée en utilisant l'approximation du gaz d'électrons libres $\epsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$, devient moins négative et atteint $\epsilon_m^r = -\epsilon_d$. Par conséquent, la valeur de k_x^r tend vers l'infini.

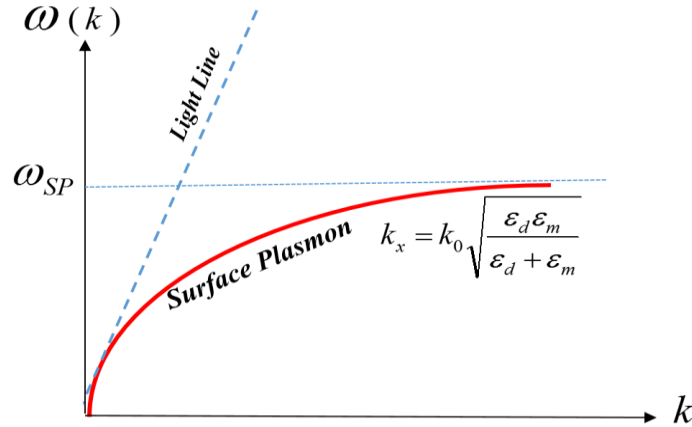


Figure 1.21: Schéma de la relation de dispersion des ondes de résonance de plasmon de surface.

1.3.2 Excitation des Plasmons de Surface

Pour exciter le plasmon de surface, le vecteur d'onde de la lumière parallèle à l'interface métal / diélectrique doit être égal à celui du plasmon de surface, c'est-à-dire

$$k_x^{light} = k_x^r = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_d \epsilon_m^r}{\epsilon_d + \epsilon_m^r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.7)$$

Comme le vecteur d'onde du plasmon de surface se propageant le long d'une interface métal/diélectrique est toujours plus grand que celui de la lumière se propageant dans le diélectrique adjacent, un coupleur, tel qu'un prisme ou un guide d'onde, doit être utilisé de façon à faire correspondre les deux vecteurs d'ondes pour obtenir l'accord de phase entre le vecteur d'onde de la lumière et celui du plasmon de surface.

La configuration de Kretschmann, représentée sur la Figure 1.22 (a), est un exemple de l'utilisation du prisme en tant que coupleur. Dans la configuration de Kretschmann, le

faisceau de lumière polarisée p dirigé dans un prisme en verre se réfléchit sur une fine couche métallique à la facette du prisme. Ainsi, pour exciter le plasmon de surface, la valeur du composant du vecteur d'onde de la lumière, parallèle à la couche métallique, $k_x^{light} = \frac{\omega}{c} n_{prism} \sin\theta$, peut être ajustée par le choix approprié de l'angle d'incidence, tant que l'indice de réfraction du prisme est plus grand que celui du matériau diélectrique.

Dans une autre configuration, la figure 1. 22 (b) représente le schéma d'un guide d'onde en plaque, guidant un mode TM, qui fonctionne comme un coupleur pour exciter les ondes plasmon sur la couche métallique mince déposée sur le dessus du guide d'onde. En comparaison directe du coupleur à prisme avec la figure 1.22 (b), l'angle d'incidence de la lumière est défini par la constante de propagation du mode guidé. En ajustant la constante de propagation du mode guidé, on peut ajuster l'angle d'incidence de la lumière pour exciter l'onde plasmon de sorte que $\beta_{mode} = k_x^r$.

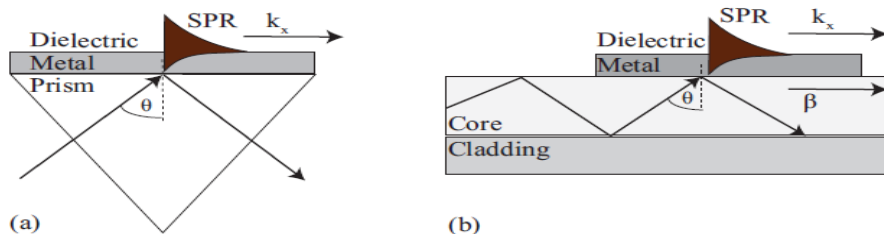


Figure 1.22: Schémas de l'utilisation d'un coupleur pour l'excitation plasmonique, a) l'utilisation d'un prisme dans la configuration de Kretschmann, b) l'utilisation d'un guide d'ondes avec une polarisation TM. Cette figure a été prise dans la référence [139].

1.3.3 Résonance des plasmons de surface dans les fibres optiques

A) Dans les fibres optiques conventionnelles

Grâce à leur capacité de fonctionnement à distance, les fibres optiques sont un excellent choix pour être utilisées comme guides d'ondes pour exciter le plasmon de surface dans les applications de détection. Les plasmons de surface d'une couche métallique déposés sur le corps de fibre, sont excités en interagissant avec les champs évanescents des modes guidés dans le cœur. Afin de renforcer les champs évanescents dans un capteur à fibre optique plasmonique, il est nécessaire de polir le revêtement des fibres optiques.

Par conséquent, ces capteurs ont été fabriqués sous différentes formes telles que des structures en forme de D, polies latéralement [134], sans gaine [135], à saut d'indice [136], à gradient constant [137], et de fibres effilées [138]. Parmi eux, la fibre en forme de D offre une meilleure résistance mécanique et une procédure de fabrication facile.

La Figure 1.23 (a) représente le schéma de la section transversale d'une fibre optique polie latéralement pour laquelle une fine couche de métal ~ 50 nm d'or est déposée au-dessus de la zone polie. La figure 1.23 (b) est le schéma des relations de dispersion du mode guidé fondamental du cœur et des ondes de plasmon de surface. La figure montre également les lignes de lumière du cœur avec un indice de réfraction n_1 et le revêtement avec un indice de réfraction n_2 . Le point d'intersection indique les points d'accord de phase entre le mode guidé dans le cœur et les relations de dispersion plasmon. Au point de l'accord de phase, une grande partie de la puissance optique de transmission est transférée à l'onde plasmon de surface avec perte sur le dessus de la zone polie latéralement, comme représentée sur l'image en médaillon sur la figure 1.23 (b). Ceci entraîne une diminution significative de la puissance transmise au voisinage de la longueur d'onde de l'accord de phase. De plus, selon l'équation (1.6), la constante de propagation du plasmon de surface k_x change en fonction du changement de la constante diélectrique d'un analyte limitrophe. Par conséquent, une modification de la constante diélectrique de l'analyte change la position du point de l'accord de phase et donc la position du pic dans le spectre de transmission.

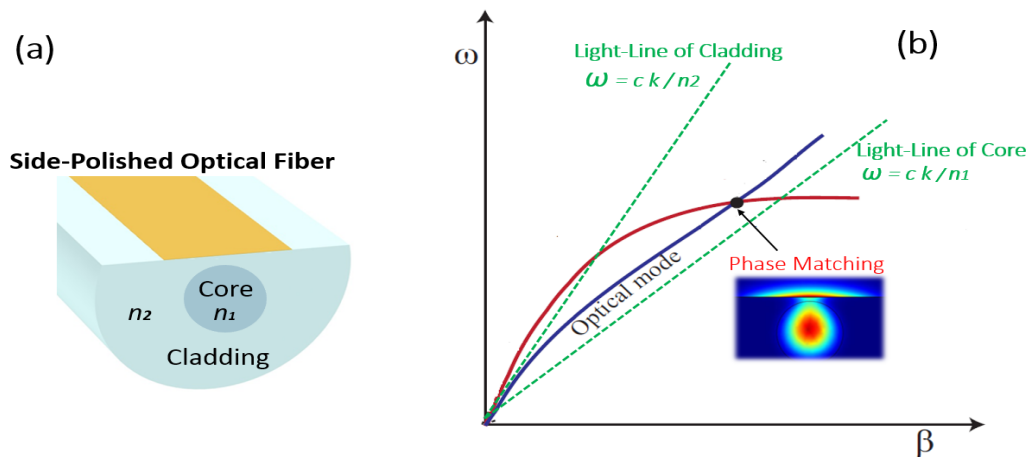


Figure 1.23: (a) Schéma de la section transversale d'un poli latéral, (b) Représentation schématique de la relation de dispersion du mode guidé du cœur et des plasmons de surface. L'image en médaillon montre le transfert de puissance du mode guidé du cœur de

la fibre vers des plasmons de surface au point d'accord de phase, point d'intersection des courbes, pour une valeur d'indice de réfraction de l'analyte.

Par exemple, nous étudions une fibre optique normale polie latéralement, monomode dans le visible avec un diamètre du cœur $d_{core} = 4 \mu m$, un diamètre de gaine $d_{clad} = 125 \mu m$, une épaisseur de gaine résiduelle $\delta = 0,5 \mu m$ et une couche d'or de 40 nm déposée sur la surface du revêtement. Le capteur est immergé dans l'eau ce qui signifie que l'indice de réfraction du diélectrique limitrophe est $n_a = 1.33$. La figure 1.24 (a) montre la distribution du flux d'énergie du mode guidé fondamental du cœur autour de la longueur d'onde de fonctionnement de $\lambda = 600 \text{ nm}$, excitant les plasmons de surface au-dessus de la couche d'or dans ce capteur.

Un capteur à fibre optique plasmonique typique fonctionne au voisinage d'un point d'accord de phase entre le mode guidé du cœur et une onde plasmon localisée à la surface métallisée. Ensuite, les deux modes deviennent fortement mélangés et les pertes d'un mode guidé du cœur augmentent considérablement en raison du transfert d'énergie dans le mode plasmon avec perte. La perte du mode du cœur est proportionnelle à la partie imaginaire $Im(n_{eff})$ où n_{eff} est l'indice de réfraction effectif du mode guidé et pour référence, les pertes en décibels par centimètre sont définies comme:

$$\alpha \left(\frac{dB}{cm} \right) = 40\pi Im(n_{eff}) / (\ln(10) \lambda. cm) \quad (1.8)$$

où λ est en centimètres. La détection de l'augmentation des pertes d'un mode guidé du cœur au point de son accord de phase avec un plasmon constitue le cœur de nombreuses conceptions de capteurs plasmoniques.

Afin de démontrer l'application de la réfractométrie du capteur précité, la perte plasmonique du mode fondamental en fonction de la longueur d'onde est représentée pour ce capteur à fibre optique polie latéralement. Lorsque l'indice de réfraction de l'analyte est légèrement modifié ($\Delta n_a = 0.01$), nous observons que les positions du pic de résonance plasmonique se décalent jusqu'à 24 nm vers des longueurs d'onde plus grandes.

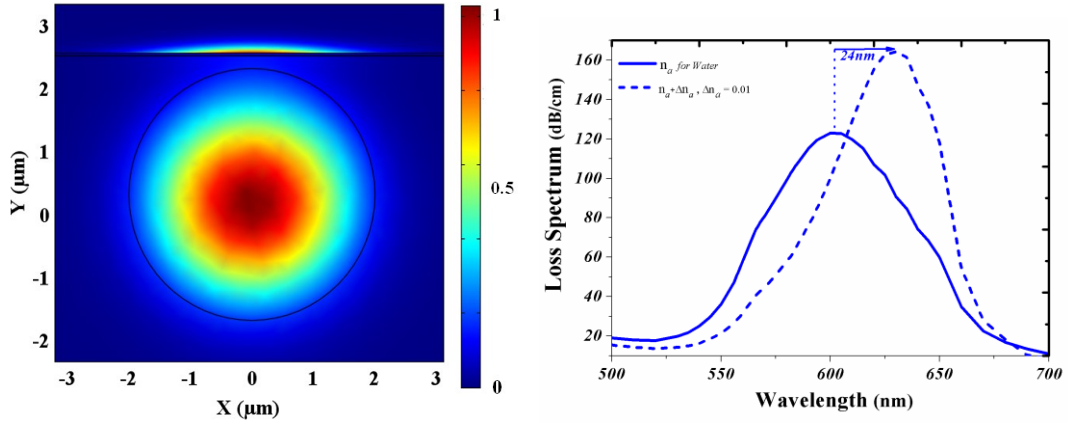


Figure 1.24: (a) Distribution du flux d'énergie des modes de guide du cœur et de plasmon excités sur le dessus de la surface polie, à l'interface de l'eau/or, pour la conception de fibre optique normale polie latéralement (b) les spectres de perte des modes guidés du cœur (courbe en trait plein) correspondent à l'excitation des modes plasmons sur la surface métallique. En modifiant l'indice de réfraction de l'analyte, avec un changement aussi petit que 0,01, le pic plasmonique se déplace jusqu'à 23 nm (courbe en pointillés).

Il existe deux approches principales pour détecter les variations de l'indice de réfraction de l'analyte: la première approche est l'interrogation de la longueur d'onde pour laquelle les changements d'indice de réfraction de l'analyte sont détectés en mesurant le déplacement d'un pic plasmonique. Dans ce cas, la sensibilité est définie comme:

$$S_{\lambda}(nm.RIU^{-1}) = \left| \frac{\delta\lambda_{peak}}{\delta n_a} \right| \quad (1.9)$$

où $\delta\lambda_{Peak}$ est le déplacement du pic de résonance, δn_a est le changement de l'indice de réfraction de l'analyte et RIU est une unité d'indice de réfraction. La sensibilité correspondante pour le capteur plasmonique à fibre optique polie latéralement est de 2400 nm.RIU⁻¹. La deuxième approche est une interrogation basée sur l'amplitude par laquelle toutes les mesures sont effectuées à une seule longueur d'onde pour laquelle on définit $\alpha(\lambda, n_a)$ comme la perte de transmission d'un mode guidé du cœur qui est fonction de la longueur d'onde et de l'indice de réfraction de l'analyte en cours d'utilisation. Considérant P_0 comme la puissance optique introduite dans le mode du cœur de la fibre, la puissance détectée après propagation dans capteur de longueur L sera $P(L, \lambda, T) = P_0 \exp(-\alpha(\lambda, T)L)$ et la sensibilité est définie comme:

$$S_{amp}(cm.RIU^{-1}) = \left. \frac{|\partial P/P|}{\partial n_a} \right|_{T_c} = L \frac{\partial \alpha(\lambda, n_a)}{\partial n_a} \quad (1.10)$$

En choisissant $L = 1/\alpha$, par laquelle la puissance de sortie se réduit avec $1/e$, on obtient :

$$S(RIU^{-1}) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha(\lambda, n_a)}{\partial n_a} \quad (1.11)$$

Un défi majeur pour les capteurs à fibres optiques classiques est leur restriction dans la gamme de détection de l'indice de réfraction de l'analyte. L'utilisation de fibres optiques microstructurées (FOM) peut être une bonne solution pour cette catégorie de capteurs. Comme il est possible d'ajuster les paramètres géométriques des FOMs pour atteindre une résonance de plasmon de surface à la longueur d'onde désirable pour un analyte ayant un indice de réfraction défini [139], c' est un avantage des FOM par rapport aux fibres optiques conventionnelles, donc nous avons étudié théoriquement l'utilisation de FOMs polies latéralement dans des capteurs à fibre optique plasmoniques, comme possibilité pour la réfractométrie, tel que décrit dans la section suivante.

B) Fibres à cristaux photoniques polies latéralement ou Fibres Optiques Microstructurées

Comme mentionné précédemment, les conceptions de guides d'ondes classiques sont limitées par la gamme des indices de réfraction de matériau disponibles expérimentalement. Par conséquent, l'accord de phase entre le plasmon et un mode de cœur est typiquement difficile en dehors de la plage typique d'indice de réfraction. Pour surmonter les limites imposées par les matériaux, il est possible de jouer sur la géométrie du guide d'onde pour manipuler les relations de dispersions des modes et d'obtenir des accords de phase entre les modes plasmoniques et guidés. L'utilisation d'une fibre optique microstructurée (FOM) pour le capteur plasmonique semble être une solution car la géométrie complexe d'une FOM a suffisamment de paramètres structurels (géométriques), tels que la position et la taille des trous d'air pour régler l'indice effectif des modes guidés. En outre, ce capteur pourrait avoir une meilleure performance en sensibilité par rapport aux guides d'ondes traditionnels à fibres optiques, comme cela a été confirmé par calcul numérique.

Au début, nous avons considéré un guide d'ondes à cristaux photoniques bidimensionnel (2D) à treillis triangulaire, comme présenté à la Figure 1.25 (a). La structure est composée de tiges remplies d'air, dans la direction de l'axe z, intégrées dans un matériau d'indice de 1,46 et avec un défaut dans le cristal photonique parfait. La constante du treillis est $a = 2\mu\text{m}$, le rayon de la tige d'air est de $0,42a$, alors que le deuxième type de rayon est de $0,3a$ et le rayon de la plus petite tige est de $0,225a$.

Il y a généralement deux mécanismes de guidage dans les FOM: le guidage par indice ou réflexion totale interne (RTI), et le guidage par bande interdite. Pour déterminer quel est le mécanisme correspondant à notre structure, il faut représenter le diagramme de bande interdite du cristal photonique parfait ainsi que les modes guidés dans le défaut. La figure 1.25 (b) représente les deux diagrammes y compris les largeurs de bande interdite et les modes guidés fondamentaux lorsque $k_z a/2\pi$ varie entre 1 et 3. Comme représenté à la figure 1.25 (b), il existe plusieurs espaces pour confiner les ondes le long de l'axe z (en bleu, vert et rouge) pour lesquels aucun des modes guidés fondamentaux (lignes vert clair et orange) ne se trouve à l'intérieur de ces bandes. Tout en considérant ces dernières, on peut estimer que le mécanisme correspondant à cette fibre à cristaux photoniques est le guidage par indice ou réflexion totale interne.

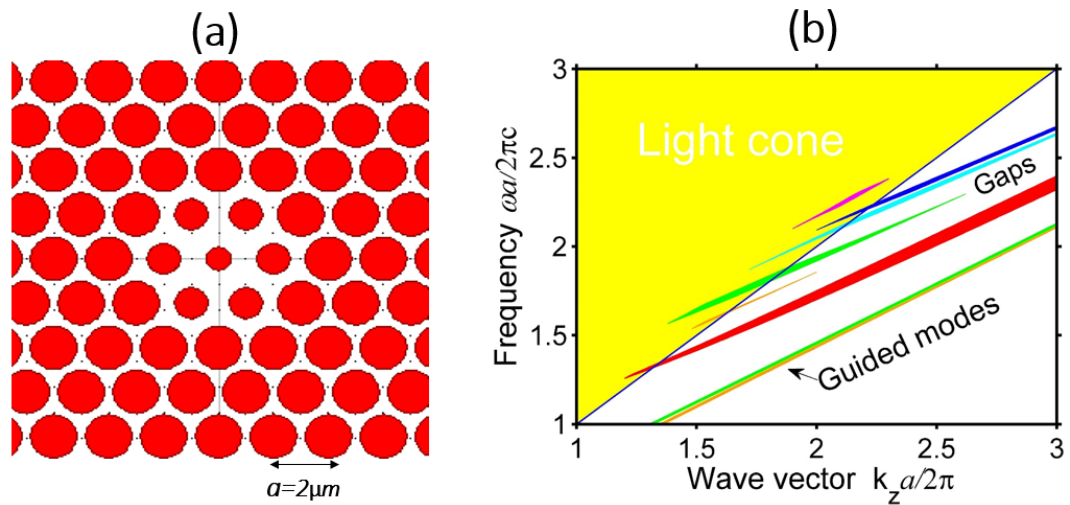


Figure 1.25: (a) Défaut dans un cristal photonique parfait. Le rayon des tiges extérieures est de $0,42a$, le deuxième type de rayon est de $0,3a$, le rayon de la plus petite tige est de $0,225a$. (b) La figure combinant les bandes interdites, les modes guidés, le cône de lumière et la ligne de lumière pour la structure étudiée

Nous avons ensuite étudié le capteur plasmonique à FOMs polies latéralement dont le profil de FCP est similaire aux défauts mentionnés ci-dessus, représenté schématiquement sur la Figure 1.26 (a). La couche d'or est d'une largeur de $10\mu\text{m}$ et d'une épaisseur de 40 nm . L'indice effectif du mode fondamental est utile pour trouver le mode dans la nouvelle FCP plasmonique coupée latéralement. Afin d'obtenir son mode fondamental guidé, nous cherchons le long de la ligne du mode fondamental de la structure de la Figure 1.25 (a) pour obtenir la partie réelle de l'indice effectif de la FCP, $\text{Re}(n_{\text{eff}})$. La Figure 1.26 (a) montre les courbes de dispersion en fonction de la longueur d'onde pour la FCP avec défaut et également pour la FCP polie latéralement, respectivement les courbes rouges et bleues. Comme prévu, le diagramme indique que la courbe de dispersion dans les cristaux photoniques avec défaut est très similaire à la structure FCP polie latéralement, car les structures sont presque identiques. La figure 1.26 (b) montre le profil en coupe transversale du capteur FOM plasmonique étudié et le champ électrique, la composante z, la distribution du mode fondamental guidé à la longueur d'onde de fonctionnement de 640 nm tandis que le milieu entourant de la couche d'or est de l'eau avec un indice de réfraction de $1,33$.

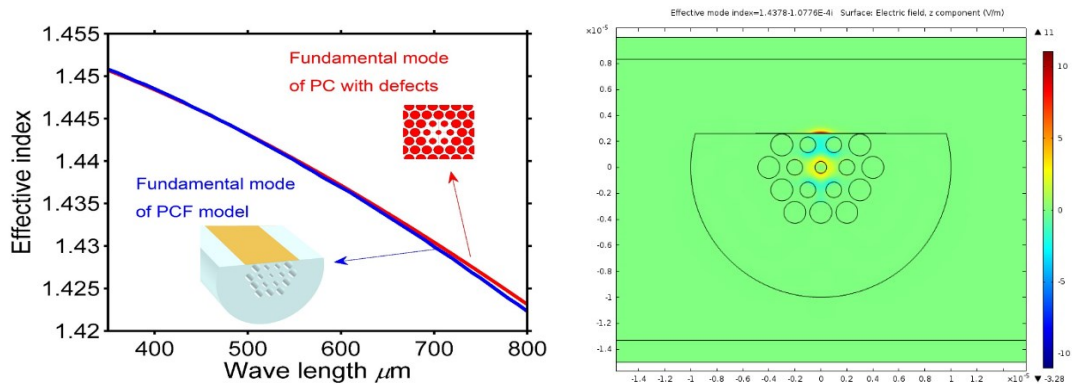


Figure 1.26: (a) Comparaison de la partie réelle de l'indice de réfraction entre la FCP coupée latéralement et les cristaux photoniques présentant un défaut. (b) Le champ électrique, la composante z, la distribution du mode fondamental à la longueur d'onde de fonctionnement de 640 nm alors que l'indice de réfraction adjacent de la couche d'or est celui de l'eau, $n_a = 1,33$.

La figure 1.27 (a) montre également les distributions de puissance optique du mode fondamental guidé par le cœur à $\lambda = 635\text{ nm}$ et des plasmons de surface excités sur le dessus de la surface polie. Pour démontrer le potentiel de détection de ce capteur

plasmonique à FOM, les pertes plasmoniques du mode guidé du cœur ont été évaluées lorsque l'indice de réfraction de l'analyte est légèrement modifiée par $\Delta n_a = 0.01$. Par conséquent, la Figure 1.27 (b) montre les pertes des modes guidés par le cœur dans la gamme de longueurs d'onde de 550 à 750 nm pour ce capteur. À proximité d'un point d'accord de phase, la perte d'un mode guidé par le cœur augmente énormément en raison du transfert d'énergie dans le mode plasmon avec perte conduisant à un pic plasmonique autour de $\lambda = 640$ nm dans le spectre de perte. Pour $\Delta n_a=0.01$, le pic du spectre de perte se déplace jusqu'à 43 nm vers des longueurs d'onde plus grandes correspondant à une sensibilité spectrale de 4300 nm.RIU^{-1} .

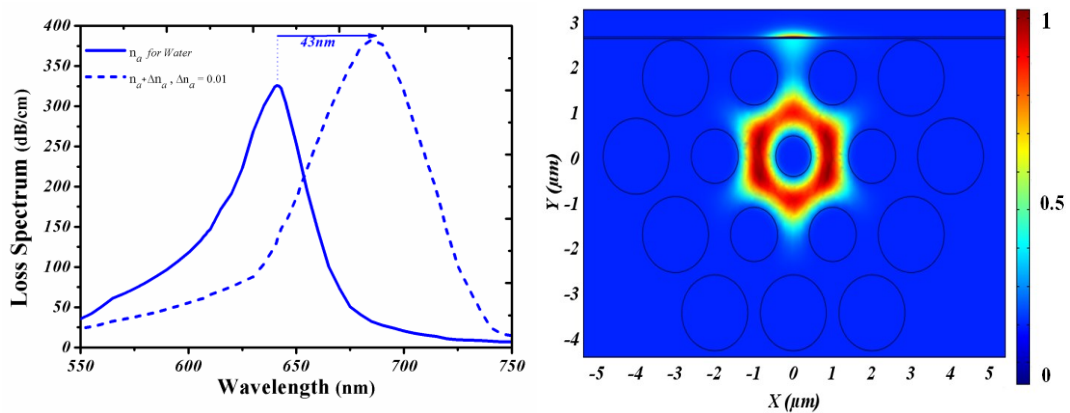


Figure 1.27: (a) Distribution du flux d'énergie des modes guidés du cœur et des modes plasmons excités sur le dessus de la surface polie à l'interface de l'eau et de l'or pour un capteur RPS à FOM polie latéralement. (b) Le spectre de perte calculé du mode guidé par le cœur (courbe en trait plein) comporte un pic d'atténuation correspondant à l'excitation des modes plasmoniques sur la surface revêtue de métal du capteur. La courbe en pointillés présente le décalage remarquable du pic d'atténuation résonant dû à un changement de l'indice de réfraction de l'analyte aussi faible que 0.01.

Cette valeur obtenue indique une amélioration significative par rapport au capteur à fibre optique traditionnel. Pour comparer, la Figure 1.28 (a) nous permet de comprendre la dépendance des longueurs d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction de l'analyte qui est sondé par les capteurs à fibre plasmonique dans les deux cas. La figure 1.28 (a) montre que lorsque l'indice de réfraction de l'analyte augmente ; la longueur d'onde de résonance ainsi que la sensibilité spectrale augmente en parallèle dans les

deux cas mais le taux de variation de la FOM polie latéralement est plus élevé que dans le cas conventionnel.

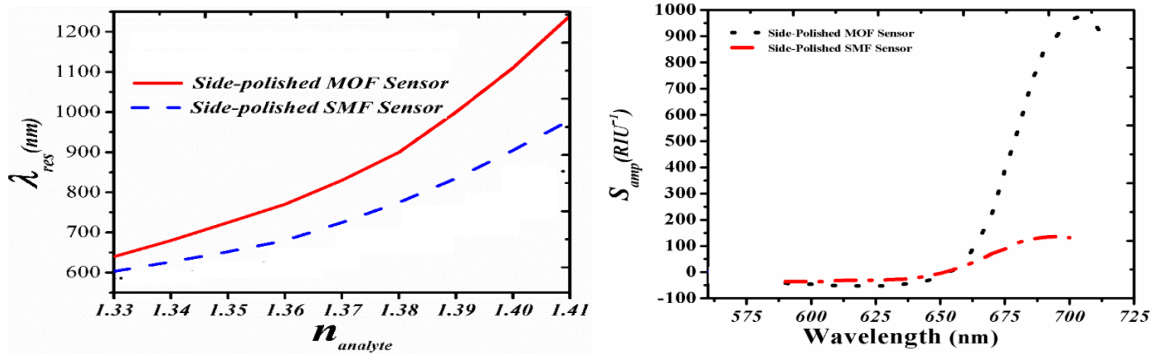


Figure 1.28: (a) Variation de la longueur d'onde de résonance par rapport à l'indice de réfraction de l'analyte (passage de 1,33 à 1,41) pour deux structures différentes, les détecteurs RPS conventionnels (courbe en pointillés) et les détecteurs RPS à FOM polie latéralement (courbe pleine). (b) comparaison de sensibilité entre les deux structures: fibre conventionnelle monomode polie latéralement ou SMF (courbe en trait-point) et des sondes RPS à FOM polie latéralement (courbe en pointillés).

En ce qui concerne l'approche en amplitude, la sensibilité maximale du capteur conventionnel et du capteur à FOM sont respectivement de 120 et 960 RIU⁻¹, comme représenté à la Figure 1.28 (b). Ceci indique une amélioration significative. La raison de cette amélioration peut être liée à l'amélioration de la propriété de biréfringence de la FOM en raison de l'élimination de ses trois trous supérieurs. Bien que cette étude théorique prédise une meilleure performance pour les capteurs à FOM comparés aux capteurs traditionnels de fibre, dans la pratique, il s'avère que l'on doit aussi considérer les facteurs de coût et les difficultés techniques pendant le processus de fabrication d'un capteur à FOM polie latéralement.

1.4 Examen des méthodes optiques pertinentes utilisées dans la thèse

Avant de discuter des méthodologies optiques utilisées, il est souhaitable auparavant d'introduire brièvement les définitions de base de l'humidité relative et absolue et ensuite de décrire les méthodologies de détection utilisées dans le cadre de cette recherche doctorale.

1.4.1 Les principes de base de l'humidité et paramètres de mesure

L'humidité est définie comme la quantité de vapeur d'eau dans une atmosphère d'air ou d'autres gaz. Les paramètres d'humidité sont énoncés de diverses manières et les unités correspondantes sont basées sur la technique de mesure utilisée. Les termes les plus couramment utilisés sont "**humidité relative (HR)**", "**parties par million (PPM)**" en fraction massique ou en fraction volumique et "**point de rosée/gel (D/F PT)**" dans lesquels ces deux derniers sont des sous-classes de "**l'humidité absolue (HA)**". Les unités d'humidité absolue sont applicables aux résultats de mesures primaires si l'on peut mesurer directement la valeur de la teneur en vapeur d'eau. En revanche, l'humidité relative est vraie pour les résultats de mesures secondaires, dans lesquelles les valeurs de la vapeur d'eau ne sont pas mesurées directement.

L'humidité absolue (densité de vapeur) est définie comme le rapport entre la masse de vapeur d'eau dans l'air et le volume d'air, en unité de grammes par mètre cube et donné par :

$$HA = \frac{m_w}{v} \quad (1.12)$$

Où HA est l'humidité absolue (g/m³ ou grains/ft³), m_w est la masse de vapeur d'eau (gramme ou grain), et v est le volume d'air (m³).

L'humidité relative est définie comme le rapport entre la quantité d'humidité contenue dans un volume d'air donné et le niveau d'humidité maximale (saturée) que l'air peut contenir à une température et une pression données. HR est une grandeur dépendante de la température, et par conséquent, il s'agit d'une mesure relative. La mesure de HR est exprimée en pourcentage et déterminée par l'expression:

$$HR\% = \frac{P_v}{P_s} \times 100 \quad (1.13)$$

Où P_v est la pression partielle réelle de la teneur en humidité dans l'air et P_s est la pression saturée de l'air humide à la même température donnée (à la fois en Bar ou KPa). Les parties par million en volume (PPM_v) sont définies comme le volume de la teneur en vapeur d'eau par volume de gaz sec et les parties par million en poids (PPM_w) sont obtenues en multipliant les PPM_v par la masse molaire de l'eau par masse molaire de ce gaz (ou de l'air). PPM_v et PPM_w sont les mesures d'humidité absolue.

Le point de rosée est défini comme une température (supérieure à 0°C) à laquelle la teneur en vapeur d'eau du gaz commence à se condenser en eau liquide et le point de gel est la température (inférieure à 0°C) à laquelle la vapeur d'eau dans un gaz se condense en glace. Les paramètres du point D/F sont des fonctions de la pression du gaz mais indépendants de la température et ce sont donc des mesures d'humidité absolue. Autrement dit, le point de rosée est la température à laquelle la pression de vapeur saturante de l'eau est égale à la pression partielle de la vapeur d'eau (dans une atmosphère d'air). La différence entre la température ambiante et la température du point de rosée est une mesure de l'humidité relative ambiante.

1.4.2 Détection de l'humidité en utilisant le phénomène d'évaporation / condensation

L'évaporation et la condensation sont fondamentales au cycle de l'eau dans la nature et affectent les paramètres météorologiques tels que l'humidité ambiante. L'humidité relative ambiante est soumise à la température ambiante, symboliquement nous la décrivons par $HR = f(T)$. Il est également connu à partir de notre expérience quotidienne et du modèle théorique de Brutsaert [140] que le taux d'évaporation des molécules d'eau des surfaces humides dépend de la température ambiante et de l'humidité relative, que nous décrivons symboliquement par $E_v = g(HR, T)$. Réciproquement, si l'on pouvait connaître le taux d'évaporation ou le temps (τ), il serait possible d'estimer l'humidité relative ambiante à une température ambiante définie (T). Dans un processus inverse, le taux de condensation de la vapeur d'eau sur une surface solide dépend de l'humidité relative et de la température ambiante, comme confirmé par l'équation d'Incropera [141] et que nous décrivons symboliquement par $C.R. = h(HR, T)$. En d'autres mots, si l'on est capable de mesurer le taux de condensation de la vapeur d'eau, l'humidité relative ambiante peut être estimée à une température ambiante définie.

Pour l'humidité absolue, la température ambiante du point de rosée/ de gel est liée à la température ambiante (T) et à l'humidité relative (HR), introduite par la formule de Mangus et symboliquement donnée par $T_{dew} = u(T, HR)$ [26], ce qui implique que si l'on peut mesurer le point de rosée/gel ambiant, il est possible d'obtenir la valeur de l'humidité relative ambiante à une température définie. Dans notre méthode de détection, la condensation et l'évaporation se produisent dans l'environnement adjacent à une couche

de métal (or) sur le dessus d'une fibre optique polie latéralement où les ondes plasmoniques sont excitées par les ondes évanescentes des modes guidés par le cœur. L'effet de RPS apparaît dès qu'une petite quantité d'humidité se forme sur la surface de la couche d'or, entraînant une diminution de la quantité de lumière transmise due à la perte plasmonique. Le taux de cette diminution dépend de l'humidité ambiante et en permet la mesure.

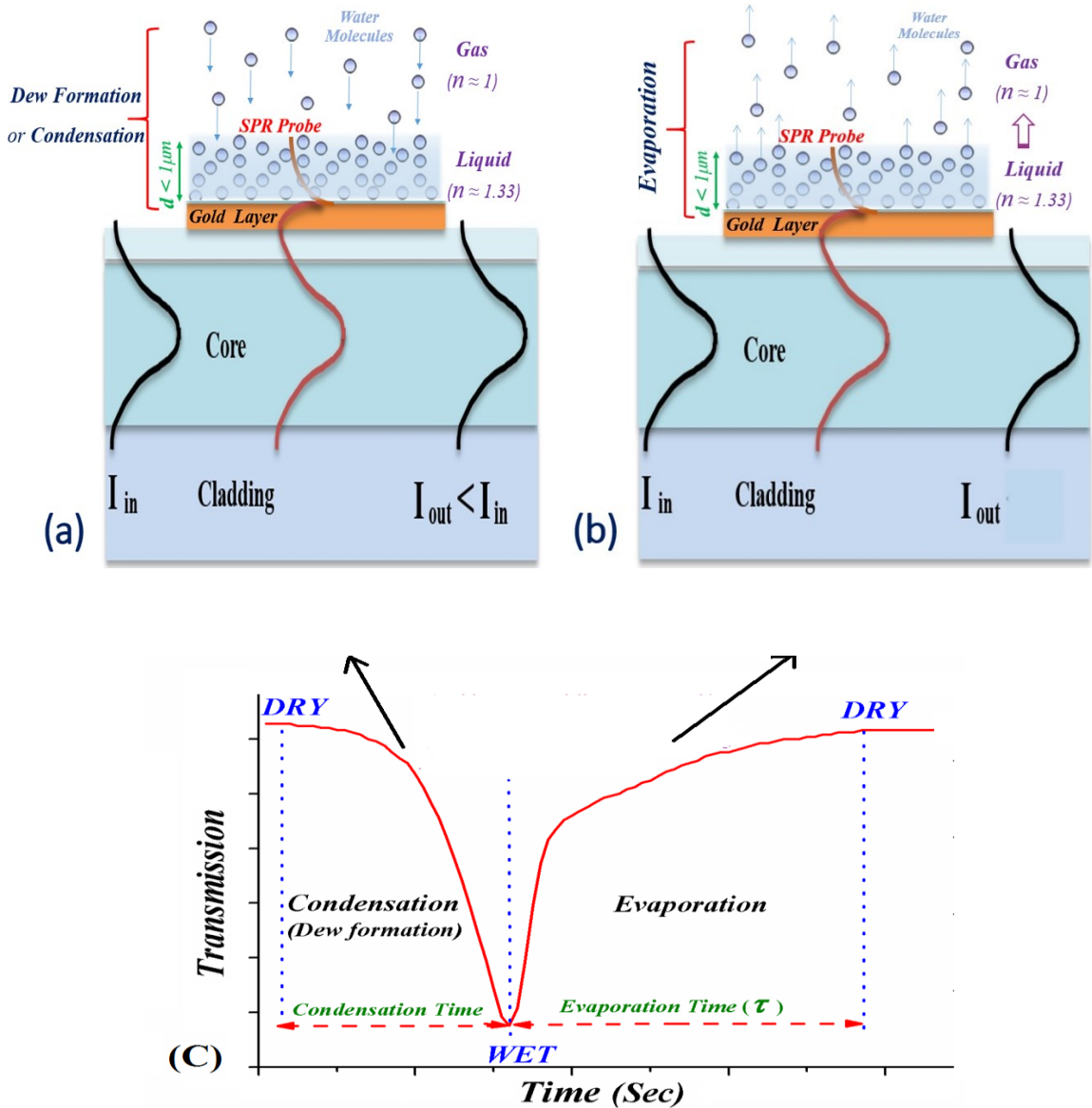


Figure 1.29: Image schématique de la vue latérale du capteur d'humidité à fibre optique tandis que la sonde RPS détecte sans cesse l'humidité due à (a) la condensation de la

vapeur d'eau et (b) son évaporation sur la couche d'or, revêtement sur la surface polie. (c) Variation de l'intensité lumineuse transmise (I_{out}) pendant la condensation et l'évaporation de la vapeur d'eau.

Afin de donner une illustration, la Figure 1.29 décrit schématiquement la vue latérale du capteur d'humidité à fibre optique présentée dans cette thèse. Dans le schéma de la Figure 1.29(a), les plasmons de surface sont excités par le mode fondamental de la lumière guidée tandis qu'une couche mince d'eau s'est formée au-dessus de la couche mince d'or en raison de la condensation de la vapeur d'eau. La condition requise pour la formation de rosée est que la température du capteur soit égale ou inférieure à la température ambiante de rosée/ de gel, condition obtenue soit naturellement par condition physique de l'environnement de mesure ou artificiellement par un refroidisseur thermoélectrique par effet Peltier.

La sonde RPS, qui balaie en continu la surface de l'or, est très sensible à tout changement minime de l'épaisseur de la couche d'eau (~ 10 nm). Par conséquent, il permet de mesurer la moindre condensation de vapeur d'eau dans la zone de détection en observant la perte plasmonique ($I_{in}-I_{out}$). Le processus inverse est réalisé au moment de l'évaporation, représenté sur la Figure 1.29 (b), tandis que l'épaisseur de la couche d'eau est du même ordre de grandeur que la profondeur de la sonde RPS, c'est-à-dire, inférieure à $1 \mu\text{m}$. La Figure 1.29 (c) présente également l'intensité de la lumière transmise pendant le phénomène de condensation / évaporation pour lequel le taux de variation dépend de la HR ambiante. Celle-ci nous permet de mesurer l'humidité relative ambiante en connaissant le taux de l'intensité lumineuse transmise.

L'alternative suivante consiste à mesurer directement la température du point de rosée / gel à l'endroit du transducteur en enregistrant la température du capteur à fibre à l'aide d'un fil de thermocouple et en enregistrant également l'intensité de la lumière transmise. La méthode est assez simple, donc quand l'intensité commence à diminuer de façon spectaculaire, la température du capteur à fibre (T_s) va atteindre la température du point de rosée (T_{dew}). La technique employée ici est similaire à celle utilisée dans l'hygromètre à miroir refroidi, sauf que nous avons une atténuation due à la perte de RPS au lieu de la diffusion et que le miroir et l'optique de masse sont remplacés par des fibres optiques.

1.4.3 Amélioration des performances de notre capteur d'humidité à fibre optique basé sur RPS

Pour améliorer la performance des capteurs à fibre optique basés sur la SPR en termes de temps de réponse à la formation de rosée sur la surface de la couche d'or, un moyen consiste à augmenter la mouillabilité de la surface d'or, c'est-à-dire, à fabriquer une surface hydrophile. En effet, si la mouillabilité d'une surface est plus importante, la formation de rosée sur la surface est conséquemment plus rapide et entraînant une accélération de la détection par la sonde RPS. La technique que nous utilisons dans cette thèse pour rendre la surface hydrophile est un traitement d'électro-polissage de la surface d'or. La Figure 1.30 (a) montre schématiquement un montage d'électro-polissage typique comprenant des anodes en argent / chlorure d'argent (l'électrode de référence pour mesurer le courant électrochimique), platine (la contre-électrode pour la tension de commande) et une cathode d'or (l'électrode de travail) alors que tous sont immergés dans un électrolyte composé d'acide chlorhydrique (25%) et de glycérine (75%). Le schéma de la figure 1.30 (b) représente le processus d'électro-polissage, effectué dans le laboratoire, processus relativement rapide car réalisé en moins de 30 secondes.

L'angle de contact (AC) quantifie la mouillabilité d'une surface solide par un liquide via l'équation de Young. Pour montrer le résultat de notre traitement de surface, nous mesurons l'AC de la couche d'or avant et après le traitement du polissage électrolytique.

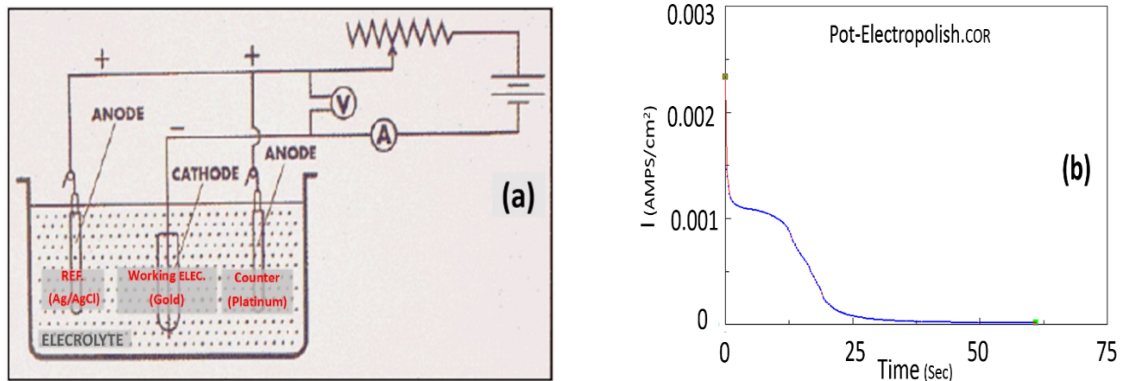


Figure 1.30: (a) Schéma du montage des trois électrodes pour l'électrochimie représentant le récipient en verre et la géométrie de l'électrode-échantillon, (b) Diagramme d'électro-polissage.

La Figure 1.31 montre des images microscopiques optiques de gouttes d'eau formées à la surface de la couche d'or en raison de la condensation de la vapeur d'eau. Les images du haut de la Figure 1.31 représentent les gouttes d'eau formées sur la surface avant le traitement avec des angles de contact entre 49° et 55° . Alors que les images en bas de la Figure 1.31 représentent les gouttes d'eau formées sur la même surface après le traitement avec les angles de contact entre 18° et 22° , révélant une réduction remarquable pour l'AC ou plus de mouillabilité de la surface du capteur.

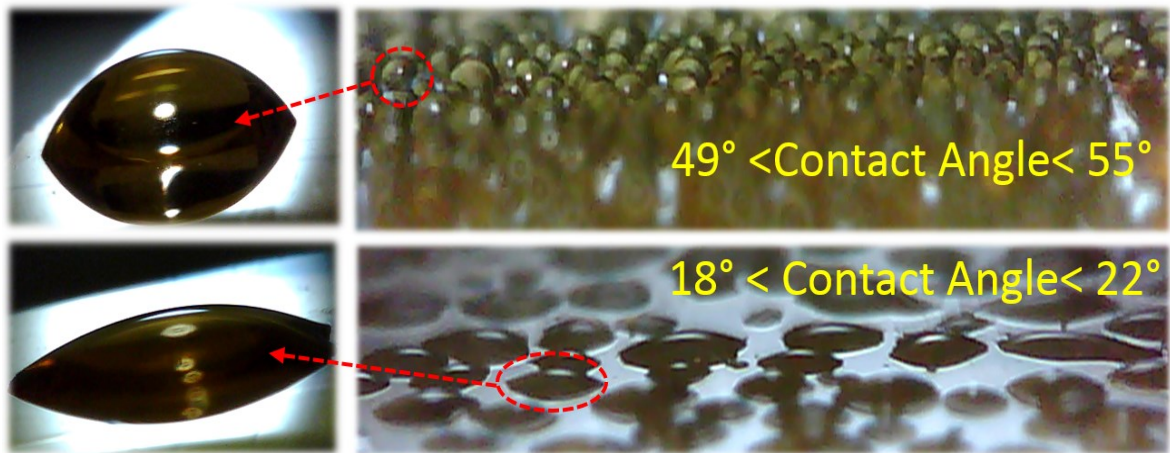


Figure 1.31: Angle de contact ou amélioration de la mouillabilité à la surface du capteur: en haut avant le traitement de surface, en bas après le traitement surface.

La Figure 1.32 montre l'intensité de la lumière transmise au cours de la condensation de l'eau aux températures ambiantes de 25°C et l'humidité relative ambiante de 58% pour le capteur à fibre RPS dans deux situations, traitées et non traitées. La courbe rouge continue représente l'intensité de la lumière transmise pour le capteur à fibre optique RPS avec une surface non traitée. La courbe noire en pointillée réfère à l'intensité de la lumière transmise du capteur à fibre optique RPS avec une surface traitée, révélant une amélioration de 20% du temps de réponse.

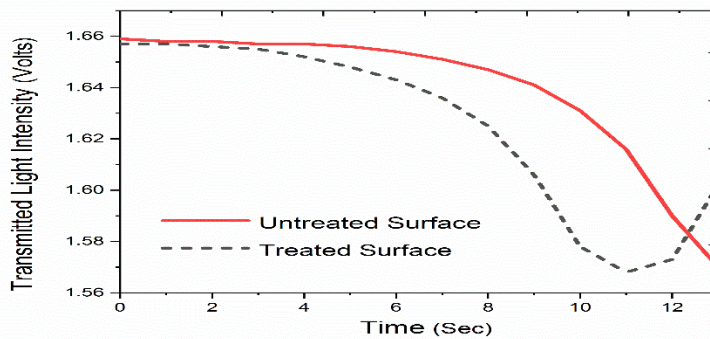


Figure 1.32: Intensité lumineuse transmise pendant la formation d'humidité à la température ambiante de 25 ° C pour deux situations de surface, non traitée et traitée respectivement.

1.5 Objectifs et Organisation de la Thèse

Malgré les nombreuses technologies qui ont été introduites jusqu'à présent pour répondre aux besoins du marché, il existe une forte demande pour des capteurs d'humidité plus fiables et plus efficaces, notamment pour contrôler ou conduire la maintenance dans des situations où un grand nombre de systèmes de microclimats sont répartis individuellement dans des locaux industriels, cliniques, salles blanches, musées, entrepôts de produits combustibles ou dangereux, maisons et dans la nature.

On prétend souvent que les capteurs d'humidité optiques ont d'excellentes capacités et remplaceront les capteurs électriques en raison de leurs avantages. Mais, en dépit de tous les progrès réalisés par les chercheurs au cours du dernier demi-siècle, ceci ne s'est pas encore produit. L'obstacle le plus important pour la substitution des technologies de détection optique est le prix non compétitif de ces technologies par rapport à leurs homologues électriques. Par exemple, des technologies de détection optique basées sur un réseau de fibre de Bragg (FBG) utilisent des sondes compliquées et coûteuses et des détecteurs coûteux, c'est-à-dire un spectromètre ou un réflectomètre optique dans le domaine temporel (OTDR). Les capteurs électroniques sont susceptibles de rester la technologie de choix pour la grande majorité des applications de détection sur le marché, à moins que les coûts des technologies de détection optique soient drastiquement réduits.

Un capteur optique est généralement constitué de composants tels que: la source de lumière, un transducteur optique et un détecteur, ainsi que d'autres pièces requises. Par

conséquent, il est important de concevoir d'un système de capteur qui utilise des composants optiques peu dispendieux. Donc, l'objectif principal de cette thèse est de proposer une solution optique rentable et fiable pour les applications de détection environnementale (rosée et humidité ici). La faisabilité de cet objectif dépend de la méthode de conception et de détection utilisée, exigeant de la nouveauté dans les aspects théoriques et techniques.

Comme solution rentable et efficace, les capteurs optiques multi-canaux (MODHS) sont proposés dans cette thèse. Le développement du MODHS peut fournir une surveillance de l'humidité et du point de rosée pour une série de systèmes de microclimat dans des endroits industriels difficilement accessibles ainsi que des musées, des salles d'archives, des bibliothèques, des laboratoires, etc. La Figure 1.33 montre la disposition générale du MODHS proposé. Il est constitué de plusieurs canaux de fibres optiques, chaque canal est incorporé avec un transducteur pour détecter l'humidité, offrant une empreinte compacte.

En introduisant un nouveau concept pour la sonde RPS et la condensation de vapeur, on propose une méthode efficace pour mesurer précisément le point de rosée ambiant dans laquelle le transducteur est exempt de toute couche absorbant l'humidité, contrairement aux autres capteurs d'humidité à fibres optiques déjà présentés. De plus, le système de capteur proposé nous permet d'utiliser des photodiodes pour la détection au lieu d'utiliser des spectromètres coûteux. Les caractéristiques mentionnées ci-dessus permettent de réduire le prix du capteur pour réaliser une technologie optique rentable dans le marché concurrentiel actuel des capteurs.

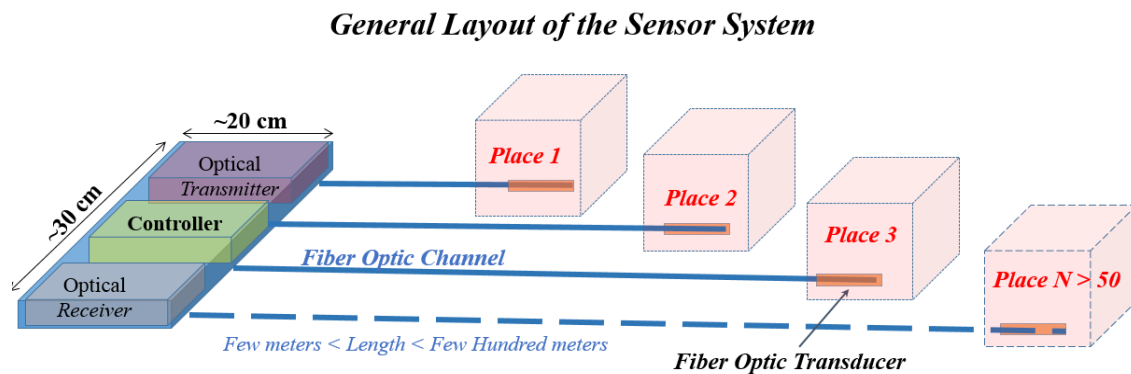


Figure 1.33: Une disposition générale du système de détection multicanal de la rosée optique et de l'humidité (MODHS).

Un autre cas utile dans le contexte de la surveillance environnementale est la réfractométrie des milieux aquatiques. La détection d'indice de réfraction du liquide (IRL) permet de mesurer les concentrations et joue un rôle majeur dans les applications chimiques et de bio-détection. Par rapport aux recherches effectuées précédemment, il y a des possibilités d'améliorer ces types de capteurs. Les capteurs à fibre optique basés sur RPS sont parmi les principales méthodes de surveillance par IRL. Par conséquent, l'un des objectifs initiaux de cette thèse était d'atteindre une sensibilité plus élevée et une meilleure limite de détection dans un capteur à fibre optique basé sur la RPS et d'utiliser une source lumineuse continue pour surveiller les changements d'IRL entre 1.3 et 1.4.

Cette thèse se compose d'une introduction, de quatre chapitres d'articles et d'un chapitre de conclusion. Chaque chapitre de cette thèse est centré sur une réalisation différente de cette recherche doctorale. Dans le chapitre 1 (introduction) de cette thèse, nous donnons d'abord un état de l'art des capteurs d'humidité, puis une description de la théorie fondamentale derrière les ondes de plasmon de surface et finalement, les méthodologies de détection utilisées dans cette thèse.

Le chapitre 2 fournit un rapport de recherche expliquant comment nous avons amélioré des performances du capteur IRL basé sur la RPS. Une façon d'améliorer ses performances est d'optimiser les processus de fabrication ou de mesure. Pour l'aspect mesure, l'une des erreurs significatives dans un système de mesure optique provient des bruits de la source lumineuse. Parmi les différents types de ces bruits, le bruit d'intensité est le plus important. Parce qu'il limite la précision de mesure en diminuant le rapport signal sur bruit (SNR) du capteur à fibre optique. Par conséquent, l'effort a été concentré sur la réduction du bruit d'intensité dans notre source de lumière. Pour réduire ce bruit, une source de lumière super-continuum est utilisée ce qui permet une amélioration du SNR et aussi de la limite de détection.

Les chapitres 3 et 4 décrivent les aspects théoriques et techniques des capteurs à fibre optique RPS pour la détection de la rosée et de l'humidité ambiante. Le mécanisme de détection des capteurs proposés est basé sur une nouvelle idée. Selon l'idée proposée, le taux de condensation / évaporation de la vapeur sur une surface solide dépend de l'humidité relative ambiante (HR) qui peut être mesurée. Étant donné que la résonance plasmon de surface (RPS) sur une couche métallique est sensible au changement d'indice de réfraction de son milieu diélectrique adjacent, l'effet RPS apparaît dès qu'une petite

quantité d'humidité se forme sur le capteur, entraînant une diminution de la quantité de lumière transmise par perte de RPS. En utilisant ce concept, nous avons développé notre capteur d'humidité à fibre optique basé sur deux méthodes par RPS. La première méthode consiste à utiliser la dépendance du taux d'évaporation de l'eau par rapport à l'humidité relative ambiante qui est réalisée sur la mesure de changement de la lumière transmise dans le capteur à fibre optique avec la variation de l'humidité relative ambiante. Dans le second procédé, le point de rosée ou l'humidité absolue de l'air ambiant est directement mesuré en détectant une baisse considérable de l'intensité lumineuse transmise due à la RPS. Les résultats expérimentaux s'accordent bien avec la théorie et indiquent l'efficacité de notre idée proposée.

Le chapitre 5 présente un système de détection de rosée et de l'humidité à fibre optique multicanal qui utilise une nouvelle méthode basée sur la relation entre la résonance plasmonique de surface (RPS) et la condensation de la vapeur d'eau sur la surface du capteur. Cela comprend la conception, la fabrication et les essais du système de capteurs de rosée et de l'humidité à fibre optique à canaux multiples. Le système proposé peut détecter instantanément l'humidité ou la formation de rosée / gel sur ses surfaces de détection solides. Il permet également de surveiller simultanément l'humidité relative ambiante et les points de rosée/gel pour différents environnements avec une précision de 5%. La technologie introduite convient à la surveillance de l'humidité dans les environnements d'industries avancées tels que la fabrication de semi-conducteurs, les produits pharmaceutiques, les salles blanches, les musées, la production d'aliments et de boissons, etc. Les résultats ont été obtenus pour deux méthodes de détection. La première est la méthode de détection traditionnelle, pour laquelle le capteur ne peut mesurer l'humidité relative ambiante que lorsqu'elle est supérieure à 40%. La seconde est notre nouvelle méthode proposée, pour laquelle, il n'y a pas de limitation sur la plage de mesure de l'humidité relative. **Le chapitre 6** résume le travail présenté dans cette thèse et propose des perspectives potentielles pour les travaux futurs.

CHAPITRE 2 (ARTICLE 1)

CAPTEUR OPTIQUE À FIBRE SPR DE HAUTE PRÉCISION CARACTÉRISÉE PAR UN CONTINUUM POUR LA RÉFRACTOMÉTRIE

A SUPER CONTINUUM CHARACTERIZED HIGH-PRECISION SPR FIBER OPTIC SENSOR FOR REFRACTOMETRY

Hamid Esmeailzadeh^{1,2}, Ezatolah Arzi^{2,*}, François Légaré¹, Maxime Revard¹, Alireza Hassani¹

Les résultats de cet article ont été publiés dans la reference suivante:

H. Esmailzadeh, M. Rivard, E. Arzi, F. Légaré, A. Hassani, "A super-continuum characterized high-precision SPR fiber optic sensor for refractometry," *Sensors & Actuators A*, 229 (2015) 8–14.

¹ Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-EMT, 1650 Blv. Lionel-Boulet, Varennes, Québec, Canada

² Department of Physics, University of Tehran, North Kargar Street, Tehran, Iran

2.1 Abstract

Here we introduce a high sensitive side-polished fiber optic based surface plasmon resonance (SPR) sensor for refractometry in liquids for 1.32 to 1.37 Refractive Index Unit (RIU). In fabrication, a Controllable Hybrid Polishing Method (CHPM) was used to make high quality D-shaped fibers. For characterization, a Super Continuum (SC) light source was used in the measurement setup. The sensor has a spectral sensitivity of 5200 nm/RIU with a Limit of Detection (LOD) of 5.8×10^{-6} RIU. Also, we have demonstrated that by reducing the intensity noise in our light source, a Signal-to-Noise Ratio (SNR) of 12.6 dB and a Limit of Detection (LOD) of 3.7×10^{-6} RIU is achievable in an intensimetric approach.

Keywords: Surface Plasmons, D-shaped Fiber, Side-polished Fiber Optic Sensor, Surface Plasmon Resonance, Refractometry, Sensors, SNR, Plasmonic Sensors.

2.2 Introduction

Due to the advantages of immunity to electromagnetic interference, Non-stimulant in explosive environment, high sensitivity and long distance remote measurement capability, side-polished fiber optic sensors have received a great deal of attentions in an extensive range of sensing applications including liquid refractometry[142], gas [143], temperature[144], biochemical and biosensing [145-148], and also in other fiber based devices such as directional couplers [149], polarizers [150,151], and telecom filters [152] during recent decades. Monitoring Liquid Refractive Index (LRI) change plays a major role in chemical and biosensing applications and because of that it has been done using Surface Plasmon Resonance (SPR) optical fibers [153, 154]. Despite of the all previously done researches, there is still a room for practical improvement of these types of sensors. Here, our main goal is to achieve higher sensitivity, and better Limit of Detection (LOD), in D-shaped optical fiber based SPR sensor operating for LRI changes from 1.32 to 1.37.

In the fabrication part, the most important task is to delicately remove the clad of a fiber optic to reach the evanescence waves of a propagating light. We have used a Controllable Hybrid Polishing Method (CHPM) for clad removing of standard single-mode optical fibers. In the characterization of the fabricated LRI sensors, reducing the errors in the

measurement system is crucial to get a better precision. One of the significant errors in an optical measurement system is the noise of the light source. Among the various types of the noises for a light beam, the noise of its intensity, or optical power fluctuations, is more important in an intensimetric approach, because it restricts the measurement precision through decreasing the signal-to-noise ratio (SNR) of the fiber optic sensor. In our case we need to have a stable broadband light beam which is due to be launched into the core of the optical fiber sensor, as narrow as 10-60 μm , using an optical coupling setup.

The commercial broadband light sources which have been used traditionally in similar fiber optic sensors are halogen-tungsten lamps, and rarely white light LEDs, integrated with an optical coupling system leading to a fiber optic outlet. In these commercial light sources, manufacturing efforts to make a low noise production is restricted by economic factors, such as marketing competition, to reduce the price. Hence, one must try is to provide a broadband light source with higher stability, or less intensity noise. Therefore, we employed a Super Continuum (SC) broadband light source in the measurement setup to generate a low noise and high power beam, through illuminating a photonic crystal fiber by a stabilized ultrafast pulsed laser. In the following sections, we first describe the fabrication process of the sensor and then demonstrate the characterization process of our fabricated sensor, and finally present the results obtained.

2.3 Fabrication

Our device works based on the excitation of surface plasmons in a thin layer of gold, coated on a side-polished fiber optic (8/125 μm), by evanescence waves of guided mode in the fiber. The performance of such plasmonic LRI sensor strongly depends on two factors, the residual cladding thickness δ [155], shown in Figure 2.1, and also to the smoothness of the polished surface in sensing area, because of its influence on the quality of the coated metal layer [156]. Figure 2.1 shows a sample of our side-polished fibers which was fabricated by the CHPM technique, introduced in our previous work [157], benefits from the advantages of both mechanical polishing and chemical etching methods.

In mechanical polishing, only one side of the fiber is removed and the other side remains untouched, unlike chemical etching in which the fiber clad is removed from all sides, resulting in higher mechanical strength for the fragile fiber. On the other hand, chemical

etching can gradually remove cladding of the fiber whereby enables us to reach a desired residual cladding thickness (δ), with a precision of 100 nm. Hence, the combination of these two methods in the CHPM technique improves the mechanical stability of the polished fiber optic and accomplishes a good smoothness for the side-polished surface with a roughness of 3.9 nm, measured by Atomic Force Microscopy (AFM).

In order to use SPR mechanism, we need to deposit a thin gold layer on the fabricated side-polished optical fiber. For this purpose, a gold layer having a thickness of 45 nm was coated on the surface of the side-polished area by DC sputtering deposition method at room temperature, with a deposition rate of 0.3 Å/sec, a plasma power of 5 W and a vacuum pressure of 1.2×10^{-6} Torr.

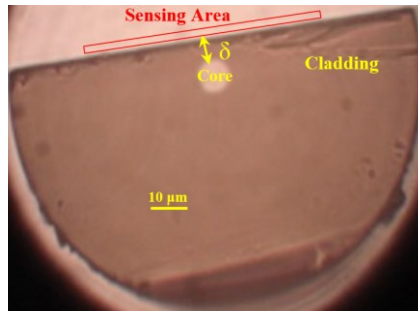


Figure 2.1: An optical microscopic image of the cross-section of the side-polished standard single-mode fiber optic showing the residual cladding δ and the sensing area on the polished surface.

2.4 Measurements and Results

2.4.1 Optical setup to characterize the sensor

In order to test and characterize the fabricated devices, it is necessary to arrange an optical setup which mainly includes a broadband light source, the fabricated sensor adjacent to an analyte, and an optical detector, schematically shown in Figure 2.2a. As mentioned before, we chose super continuum light source in the measurement setup. The mechanism of the SC beam generation is based on nonlinear optics effects for which when the ultra-short pulses pass through a crystal as a nonlinear medium, the bandwidth broadening is occurred for them. Figure 2.2b shows the setup we used for the SC beam

generation in which an ultrashort pulsed laser beam (from an Ar⁺-pumped mode-locked Ti:sapphire laser) after passing through several optical pieces is launched into a commercial microstructure optical fiber (SC-800, NKT-Photonic, core diameter of 2 μm and length of 12 cm) and finally becomes a relevant broadband SC beam in visible-near IR range.

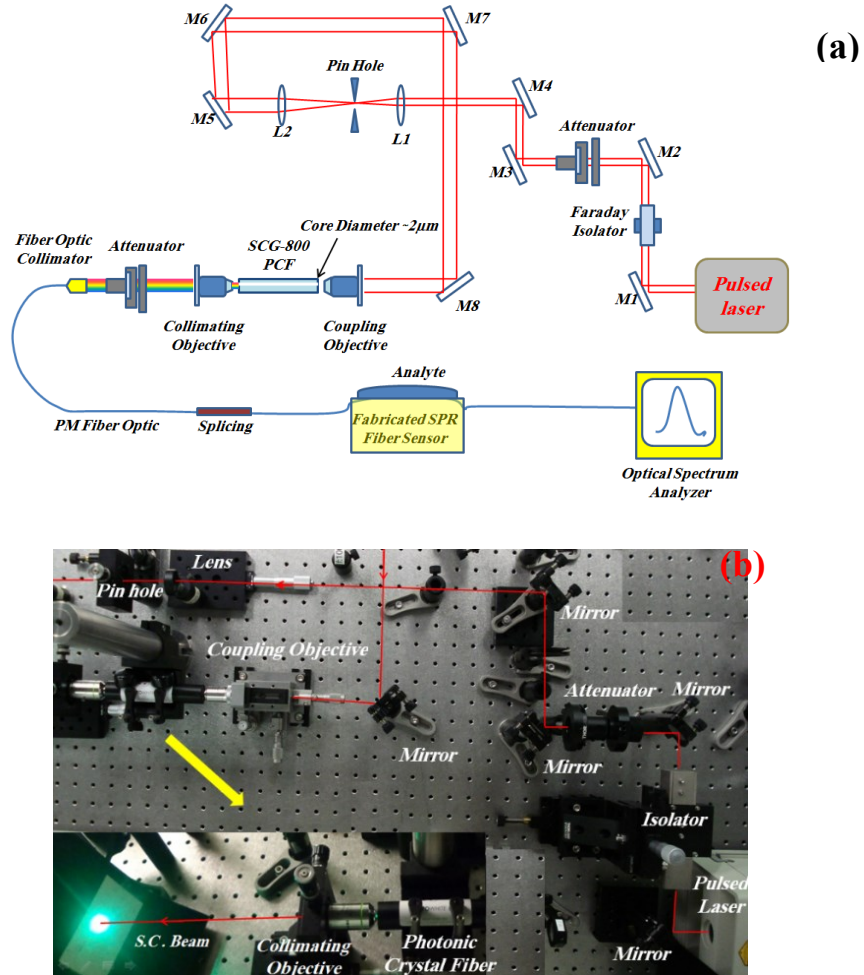


Figure 2.2: (a) A schematic of the setup which was used for measurement and characterization of our fabricated fiber sensor, (b) the optical setup for generating SC broadband light source.

In order to have a high stable SC light source beam, it is necessary to minimize all kinds of noise sources (e. g. perturbations caused by sound or mechanical vibration, thermal noise, dark current noise, excess laser noise) whereby reaching to the lowest possible level of intensity noise, i. e. *shot noise limit*. Shot noise is a quantum noise effect, related

to the discrete nature of photons leading to a fundamental randomness of photon flux that is transformed into fluctuations in the photocurrent upon photo detection [158]. In another word, the fundamental limit to the optical intensity noise, as observed in many situations such as photodiodes or CCD cameras, is given by shot noise.

Before following the shot noise reduction, we give a definition for optical noise here. There are actually various features of noise for a light source; such as: amplitude or intensity noise, phase noise and timing noise. In the context of intensity noise of a light source, it is common to specify the *Relative Intensity Noise* (RIN), which is the power noise normalized to the average power level. The optical power of the laser can be considered as $P(t) = P_{av} + \delta P(t)$ with an offset power of P_{av} and a fluctuating quantity $\delta P(t)$ with zero mean value. The RIN is then given by δP divided by the average power. Nevertheless, a root mean square (r.m.s.) value of RIN is usually more useful, hence RIN can also be statistically described as follows [159]:

$$RIN = \frac{\delta P(t)}{P_{av}} \Big|_{rms} = \frac{\sqrt{\langle \delta P^2 \rangle}}{P_{av}} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S(f) df} = \sqrt{\langle S \rangle \Delta f} \quad (2.1)$$

where $S(f)$ is Power Spectral Density (PSD) noise, due to amplified spontaneous emission, $\langle S \rangle$ is the mean PSD noise, and f_1 and f_2 are the noise frequency boundaries in the detection bandwidth interval (Δf). In the shot noise limit which the RIN is limited only by the shot noise, it is given by [160]:

$$RIN_{shot} = \frac{\langle S \rangle}{P_{av}} \quad (2.2)$$

in which the PSD is independent of noise frequency (*white noise*), and then RIN of the laser decreases with increasing average optical power P_{av} , as demonstrated by Obarski et al [161]. It implies that having a high power pulsed laser can help to reduce the shot noise of the laser beam.

On the other hand, the noise of the SC beam generally depends on wavelength, pulse energy, chirp or duration, and repetition rate of the pulsed laser [162-164]. Nevertheless, the studies done by N. R. Newbury et al on the generated SC beam in the microstructure fiber [162], shows the resulting noise of the SC beam mainly arises from the shot noise of the input laser pulses implying the importance of the shot noise reduction. Considering the above mentioned cases, the optimized parameters of the pulsed laser that we chose

to reach the minimum RIN, were 12 nJ, 850 nm, 55 fs and 80 MHz for pulse energy, wavelength, pulse duration, and repetition rate respectively.

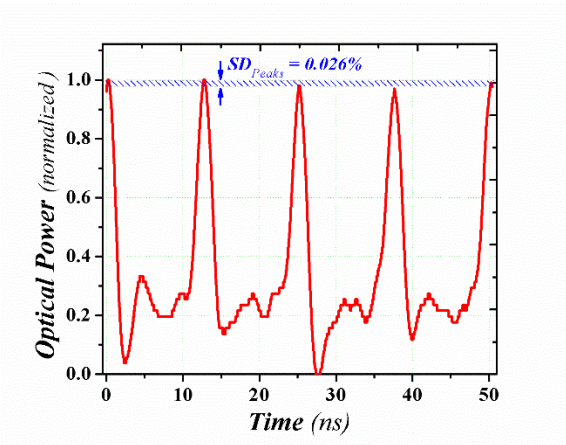


Figure 2.3: Fluctuations and shot noise in the time domain; an ultra-short optical pulse train exhibits pulse-to-pulse amplitude noise due to quantum fluctuations.

Figure 2.3 shows an ultra-short optical pulse train acquired using a high-speed photodiode detector (DET36A - Si Detector, Thorlabs) and then displayed by a digital oscilloscope (TDS1001b, Tektronix) in the Lab. It shows a pulse distribution and also random peak to peak variations, with a standard deviation (SD) of 0.026 %, within a sample interval of 50 ns. Then the microstructure optical fiber is illuminated by the above optimized laser beam to generate SC beam.

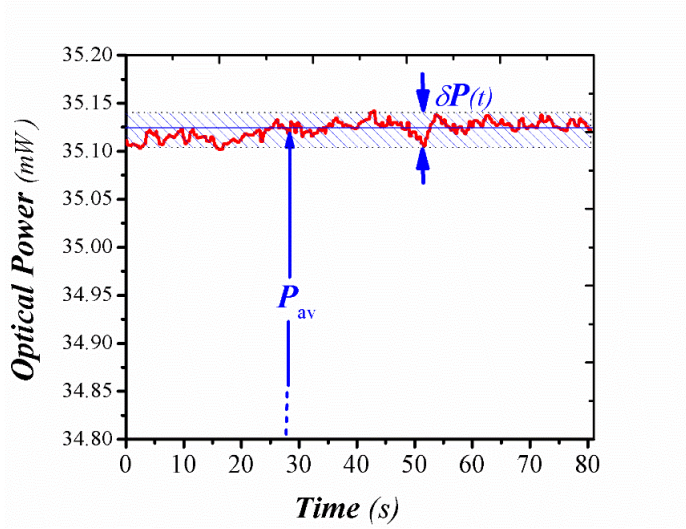


Figure 2.4: fluctuations of the output power for the generated super continuum beam.

After coupling the generated SC beam into the fiber optic, we get a SC beam with an average power of $P_{av} = 35 \text{ mW}$ in the single-mode fiber optic ($8/125 \text{ }\mu\text{m}$). Figure 2.4 shows fluctuations of output power for the SC beam in a real time measurement for a time interval of 80s in which the *rms* value of the power fluctuation is $\delta P_{rms} = \langle \delta P^2(t) \rangle^{0.5} = 0.02 \text{ mW}$ leading to a RIN, or $\delta P_{rms}/P_{av}$, of 0.00057, or 0.057% (in percent). It is worth to compare our achieved stability with other extensively used broadband light sources. For example, in halogen-tungsten lamps (e.g. AQ4300 series -yokogawa), typical noise is $\pm 0.05 \text{ dB}$ or $\pm 1\%$ and also there are the same values of noises for Fiber-Coupled white LED sources (e. g. MBB1F1, Thorlabs), in addition, their output power (0.3 mW) is not enough to be used in our case. This excellent light stability and high power of the SC source enabled us to get a better LOD.

2.4.2 Characterization of the sensor

The fabricated LRI sensor has been designed to work in the visible and near IR region, somewhere between 600 -700 nm.

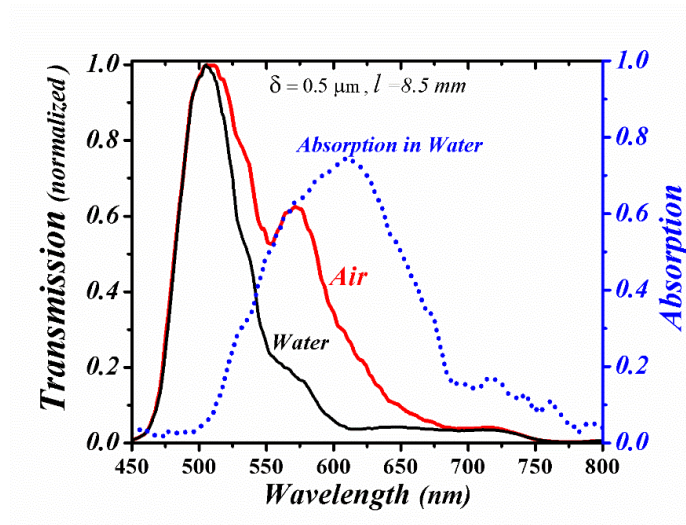


Figure 2.5: Transmission spectrum for our sensor in air (red color solid curve), water (black color solid curve) and its absorption spectrum (blue color dotted curve).

Figure 2.5 shows transmission spectrum (red and black solid-line curves) and also the plasmonic absorption spectrum (dotted-line curve) for one of our sensors in which there is a peak around $\lambda = 630 \text{ nm}$ with a full width half maximum (FWHM) of about 120 nm. The

propagating length of surface plasmons, $L_p=1/2Im[\beta]$ where β is the propagation constant of surface plasmons on metal/dielectric interface, is a few hundred micrometers in our operating wavelength range [165]. When $\delta \leq 1 \mu\text{m}$, there is a full interaction between surface plasmons and the evanescence fields of the guided light in the core. Hence, we expect a polishing length of about 8 mm to be enough to get the best efficiency. Figure 2.6 shows the plasmonic absorption peaks for three fabricated sensors with polishing length of $l=8 \pm 0.5 \text{ mm}$ but having different residual cladding thicknesses, i.e. $\delta=0.5, 1.0$ and $1.5 \mu\text{m}$. It clearly demonstrates that, the less δ , the more plasmonic absorption, implying the importance of polishing depth control on the sensor function.

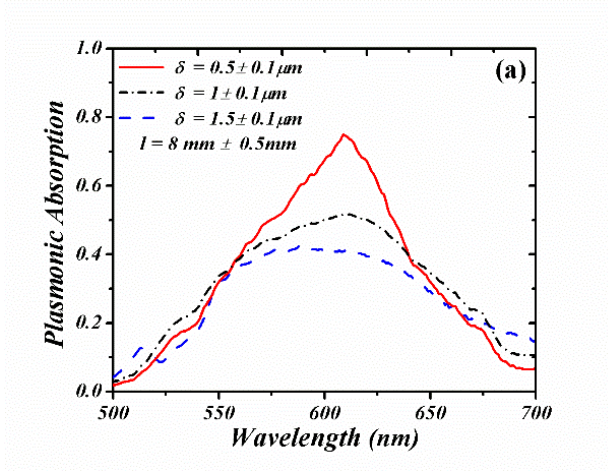


Figure 2.6: Absorption spectrum of the sensors fabricated by CHPM having different residual cladding thicknesses.

2.4.3 Performance of our Plasmonic LRI Sensor

There are two main approaches for LRI sensing, the first approach is wavelength interrogation in which the variation of the analyte RI is detected by measuring the plasmonic resonance peak shift. In this case, spectral sensitivity is defined as:

$$S_{\lambda} (\text{nm.RIU}^{-1}) = \left| \frac{\delta\lambda_{res}}{\delta n_a} \right| \quad (2.3)$$

where $\delta\lambda_{res}$ is the shift of the resonance peak and δn_a is the RI change of the analyte.

In order to experimentally determine the spectral sensitivity of the sensor, it is necessary to put it inside analytes with different known RIs and then recording the plasmonic loss

spectrum one by one for comparison and calibration. We used solutions of water and sugar as our analytes with various RIs, in which, mixtures of different amounts of sugar and distilled water were used. Their refractive indices were determined by a commercial refractometer with a precision of 10^{-5} providing several liquids with known RI for calibration purposes. By putting the sensor inside the analytes and saving the transmitted spectrum of each, the plasmonic absorption dips were obtained for all of them. Figure 2.7 shows their transmission spectra in which there are six plasmonic absorption dips for the six different refractive indices, or different sugar concentrations.

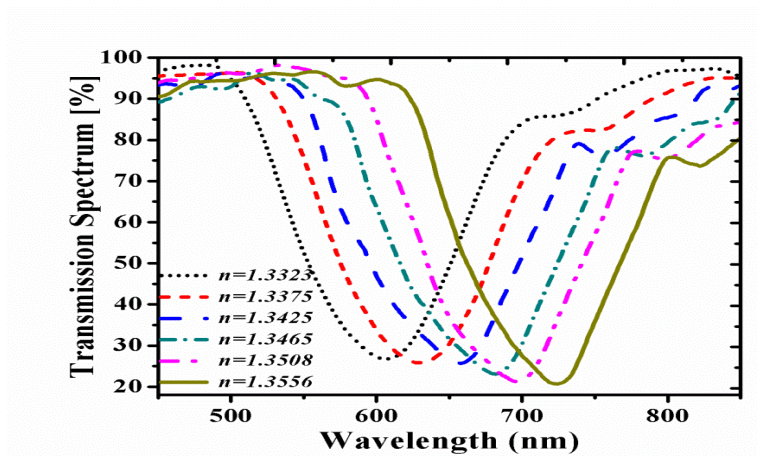


Figure 2.7: Shift of the plasmonic dips in the transmission spectrum for different refractive indices of the analyte.

Figure 2.7 clearly demonstrates that when the solution refractive index changes from 1.3323 to 1.3556, the dip of the transmission spectrum (or the peak of the absorption spectrum), shifts from 607 nm to 728 nm, i.e. as much as 121 nm. Figure 2.8 shows that the shifts of λ_{res} can be calibrated linearly versus variation of analyte refractive index, whereby the slope of the line or spectral sensitivity, is 5200 nm.RIU^{-1} . This achieved spectral sensitivity is a little better than the best similar sensors, reported in literatures [166-172].

To determine the limit of detection in a spectral approach, it is reasonable to accept that at least a 0.03 nm wavelength shift can be resolved, with state of the art OSA or spectrometers [173]. Therefore, the LOD would be the ratio between the resolution (0.03 nm) and the sensitivity, i. e. 5200 RIU^{-1} , yielding a limit of detection $\sim 5.8 \times 10^{-6} \text{ RIU}$.

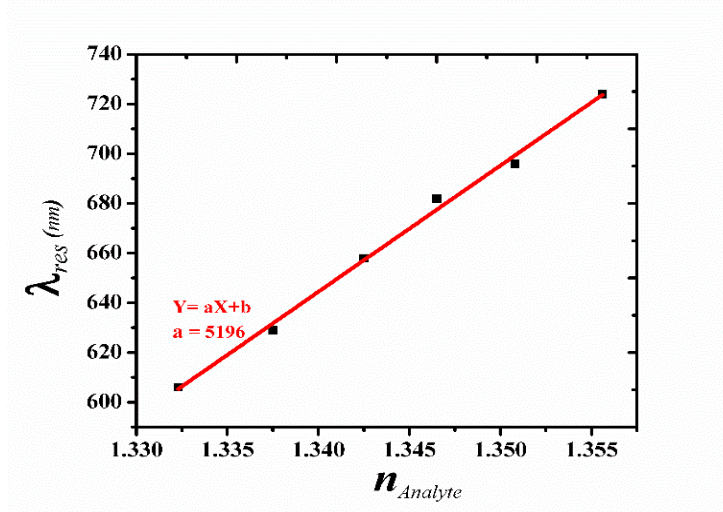


Figure 2.8: Variation of plasmonic resonance wavelength (λ_{res}) with variation of the liquid refractive index.

In the development of fiber optic LRI sensors, the sensor based on intensity modulation is one of the most popular sensors owing to its many merits, like lower cost, intrinsic safety and ease-of-installation. Hence, we introduce the amplitude-based method in which only variations of the output power due to the SPR loss are measured in a specified wavelength. Considering P_0 to be the power launched into the fiber core mode, the power detected after propagation along the sensor of length l will be $P(l, \lambda) = P_0 \exp(-\alpha(\lambda)l)$ and the sensitivity is defined as:

$$S_{amp}(RIU^{-1}) = \frac{|\partial P/P|}{\partial n_a} \quad (2.4)$$

Regarding the intensimetric approach and using the above formula, the amplitude sensitivity for our sensor can be obtained when the analyte RI is slightly varied (δn_a). Figure 2.9 depicts the amplitude sensitivity when RI of the analyte varies from 1.3324 to 1.3425 (i.e. $\delta n_a = 0.01$) in which the maximum sensitivity of our proposed sensor in the vicinity of $\lambda = 620$ nm is $S_{amp} = 295$ RIU⁻¹.

The resolution of the sensor in a specific wavelength is the minimum value of ∂n_a when the value of $|\partial P/P|$ verges to its minimum, i.e. RIN of the SPR signal, given by RIN/S_{amp} . Hence, in the intensimetric approach, Limit of Detection (LOD) of the sensor is defined

as its resolution when S_{amp} is maximum, or $LOD=RIN/ S_{max}$ in brief. It obviously states, the less RIN of the SPR signal, the better LOD.

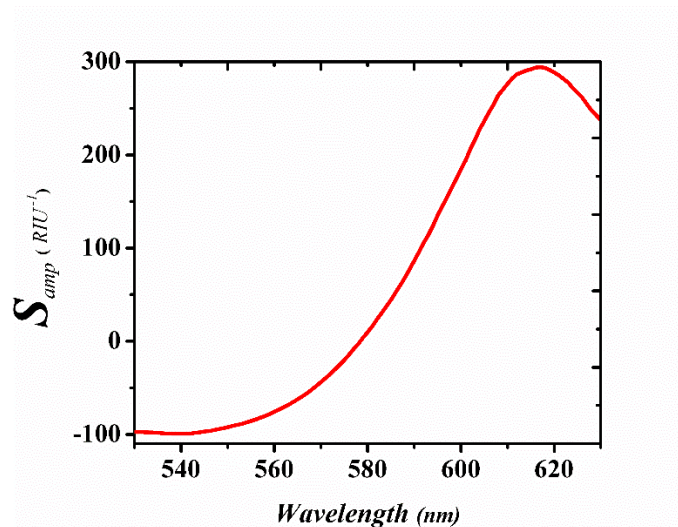


Figure 2.9: Amplitude sensitivity for the fabricated sensor when $\delta n_a= 0.01$.

In order to demonstrate the influence of the RIN of our SC source on the sensor performance, we did some measurements. First, by using a band-pass filter (centered at $\lambda = 600$ nm and $\Delta\lambda= 10$ nm) the broadband SC source is converted to a narrowband source, before launching it into the core of the fiber optic sensor. After launching the SC beam in the core of the fiber sensor, we measured the RIN of the SC source (when the sensor was in air) and also for its related SPR signal (while the sensor was immersed inside the analyte). We separately did it in three different situations, or three different noises, and the results have been depicted in Figure 2.10a. This Figure shows that there is a direct relation between the noise of the SC source beam and its SPR signal. It means that reducing the noise of the light source leads to a reduction of the noise of the SPR signal.

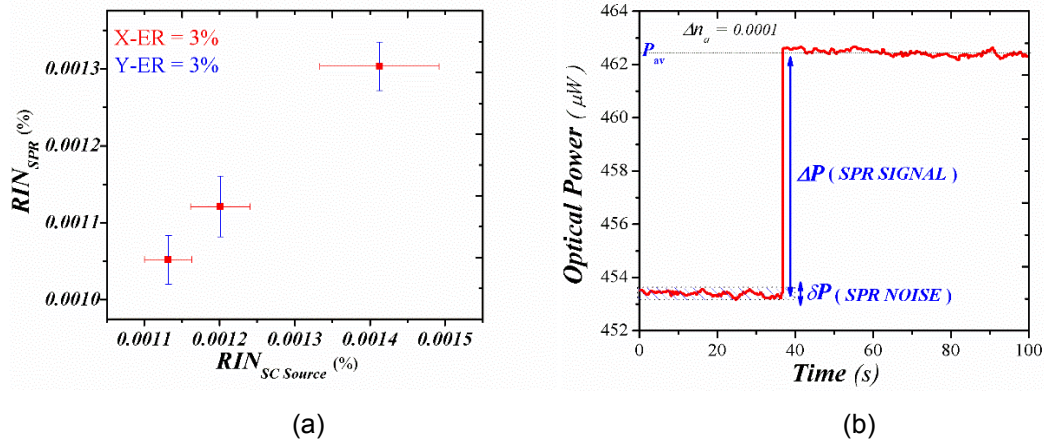


Figure 2.10: (a) Measurement of relative intensity noise for the SC source and its related SPR signal in three different situations, showing a direct relation between them. (b) A real time measurement at $\lambda = 600\text{nm}$ while the RI of the analyte varies as much as 0.0001.

Another performance factor which can be defined for the sensor in an intensimetric approach, is its signal-to-noise ratio. We define the SNR, in dB, as: $SNR(\text{dB}) = 10 \text{Log} (\Delta P / \delta P)$; where δP is the noise of the SPR output power and ΔP is the SPR signal due to the RI variation of the analyte, as sketched in Figure 2.10b.

Figure 2.10b shows a real time measurement of the sensor, at $\lambda = 630\text{nm}$, in which the SPR signal noise is $\delta P \sim 0.5 \mu W$. When the RI slightly changes, $\Delta n_a = 0.0001$, it causes a signal, or a change in the output power, as much as $\Delta P \sim 9.2 \mu W$ resulting in a SNR of 12.6 dB.

For a constant signal, $\Delta P = \text{cte}$, the SNR is inversely proportional to δP , or indeed to the RIN. Hence we expect the less RIN, the better SNR for the sensor. It means that noise reducing in the light source leads to the reduction of the noise for the SPR signal, consequently helps to reach a better SNR for the sensor.

Also we can easily obtain the RIN of the SPR signal from Figure 2.10b. Since the average power is $P_{av} = 462 \mu W$, and the power fluctuation or the noise is $\delta P \sim 0.5 \mu W$, the value of the RIN of the SPR signal is ~ 0.0011 (or 0.11 %). Taking into account that the maximum value of the amplitude sensitivity for the sensor is equal 296RIU^{-1} , then this value of the RIN, i.e. 0.0011, leads to a LOD of $3.7 \times 10^{-6} \text{RIU}$ in an intensimetric approach. In comparison with the LOD of $5.8 \times 10^{-6} \text{RIU}$, in wavelength interrogation, this obtained LOD

shows an improvement as much as 57%. This rate of improvement is actually valuable when we know that improving of the precision in this level is not experimentally so easy.

2.5 Conclusion

This article In order to have a high precision LRI fiber optic sensor, it is necessary to improve both fabrication and measurement parts. In fabrication we used a Controllable Hybrid Polishing Method (CHPM) for clad removing of standard single-mode fibers. It enabled us to make high quality D-shaped fibers with desired residual cladding thickness (δ).

In characterization, the efforts was focused onto reducing the intensity noise in our light source, i. e. Super Continuum light source, helping us to reach better precisions for the fabricated sensor in our measurements.

By testing the fabricated sensor in liquid solutions with refractive index dynamic range of 1.32 to 1.37, a spectral sensitivity of 5200 nm.RIU-1 and thereby a LOD of 5.8×10^{-6} RIU were obtained. Also, after minimizing the intensity noise, as much as $RIN = 0.0011$, we could get to a signal-to-noise ratio (SNR) of 12.6 dB, and a Limit of Detection (LOD) of 3.7×10^{-6} RIU for the sensor in an intensimetric approach indicating an improvement of 57% in comparison with wavelength interrogation.

CHAPITRE 3 (ARTICLE 2)

CAPTEURS DEW DE FIBRE PLASMONIQUE SMART TEXTILE SMART TEXTILE PLASMONIC FIBER DEW SENSORS

Hamid Esmailzadeh^{1,*}, Maxime Rivard¹, Ezatollah Arzi², and Alireza Hassani³,
François Légaré¹

Les résultats de cet article ont été publiés dans la référence suivante:

H. Esmailzadeh, M. Rivard, E. Arzi, F. Légaré, A. Hassani, "Smart Textile Plasmonic Fiber Dew Sensors," *Optics Express*, Vol.23, No. 10 (2015) 14981-14992.

¹ Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-EMT, 1650 Blv. Lionel-Boulet, Varennes, Québec, Canada.

² Department of Physics, University of Tehran, North Kargar Street, Tehran, Iran.

³ SensWear Inc., Montreal, Québec, Canada.

3.1 Abstract

We propose a novel Surface Plasmon Resonance (SPR)-based sensor that detects dew formation in optical fiber-based smart textiles. The proposed SPR sensor facilitates the observation of two phenomena: condensation of moisture and evaporation of water molecules in air. This sensor detects dew formation in less than 0.25 s, and determines dew point temperature with an accuracy of 4%. It can be used to monitor water layer depth changes during dew formation and evaporation in the range of a plasmon depth probe, i.e., 250 nm, with a resolution of 7 nm. Further, it facilitates estimation of the relative humidity of a medium over a dynamic range of 30% to 70% by measuring the evaporation time via the plasmon depth probe.

3.2 Introduction

The dew point is the temperature to which water vapor in the air has to be cooled in order to condense into water on a solid surface at constant pressure. Dew point monitoring to prevent catastrophic effects is very critical, especially in advanced industries dealing with electronic devices and pharmaceuticals. Further, dew point is measured in various drying and heat-treatment processes such as in plastic molding and metal treatment. It is also monitored in compressed air pipelines, where excess moisture results in poor end-product quality, ice formation, and equipment corrosion. Other typical dew monitoring applications include dry environments for lithium battery manufacturing and gas-insulated high-voltage equipment for use in the power industry [174-176].

A dew sensor can detect dew formation on a surface and determine the dew point temperature of a medium. Various types of hygrometers and humidity sensors can operate as dew sensors. These include mechanical hygrometers, wet and dry bulb psychrometers, Infrared (IR) optical absorption hygrometers, electronic humid sensors, and optical waveguide humid sensors [177,178]. However, none of these hygrometers and humidity sensors can satisfy the majority of dew sensor requirements in terms of precision, cost, ease of operation, maintenance, and remote operation.

In contrast to electrical humidity sensors, optical fiber humidity sensors can offer features such as small size, immunity to electromagnetic interference, multiplexing, and remote

sensing capabilities. In fact, to date, numerous investigations have been conducted on the use of optical fiber sensors for humidity and moisture measurement since the beginning of this millennium. [179, 180]. In general, these sensors use direct spectroscopic [181-182], evanescent wave [183, 184], in-fiber grating [185, 186], interferometry, or hybrid methods [187-189] to measure humidity. Among these optical fiber humidity sensors, only a few can be used for dew point detection, and those that do often have working principles based on interferometry in optical fibers [189-191]. For example, Mathew et al. presented a sensor for dew detection that is based on a photonic crystal fiber interferometer (PCFI) operated in reflection mode. Their proposed sensor has good dew point measurement accuracy, estimated at ± 0.1 °C [189]. Further, Bao et al. [191] recently introduced a reflection-based fiber optic phase sensing method to quantify the dew point of CO₂ in an industrially relevant post-capture CO₂ mixture stream. Their method, which employs thin film interference on the tip of an optical fiber, has an accuracy of 5%.

In this paper, we propose the first SPR-based optical fiber dew sensor. The SPR effect results in high sensitivity to refractive index changes in a dielectric adjacent to its metal layer and has numerous applications, from biochemical sensing to environmental monitoring [192-195]. Rivero et al. previously used localized SPR in optical fiber to sense humidity [196]. Iwamia et al. [197] were the first to introduce a working dew sensor based on localized SPR for dew forming on a nonporous ceramic in an optical free-space setup. However, despite its high sensitivity, their optical free-space setup is not suitable for remote or inline detection outside of the laboratory. In our method, we use optical fiber instead of a free-space setup and, consequently, we propose a novel approach based on the plasmonic effect to detect dew formation as well as humidity.

We also investigate the integration of plasmonic optical fiber dew sensors in an ordinary textile as part of a smart textile for future distributed dew sensing. Smart textiles are active materials formed by the incorporation of electronic or optical sensing elements into fabrics or garments, resulting in such materials having sensing and actuation properties. Although, to date, most smart textiles are only based on microelectronic devices, nevertheless the idea of making smart textiles using optical fiber is still very interesting because the flexibility of optical fibers could result in textiles supporting many fibers to form a distributed sensor. Recently, polymer optical fiber sensors have been used in the body of smart textiles (operating based on grating or micro-bend principles) for stress and

pressure sensing [198, 199], biomedical and medical cases [200, 201], geotextile and environmental engineering [202], and also decorative purposes [203].

Figure 3.1 shows the integration of our SPR sensor (the polished one in the middle) with two other fibers (covered with red cladding jackets) in the body of a smart textile. (The two other fibers in the figure are not sensors, they were simply embedded in the textile to demonstrate our idea of having several distributed sensors in the body of a smart textile.) Although, we here propose to have several dew sensors in textiles to form a distributed smart textile dew sensor, the other fibers can actually be other types of sensors; for example, Bragg grating fiber sensors to detect the temperature or pressure simultaneously. In this paper, our focus is on smart textiles dew sensors that detect dew points using only one plasmonic optical fiber dew sensor.

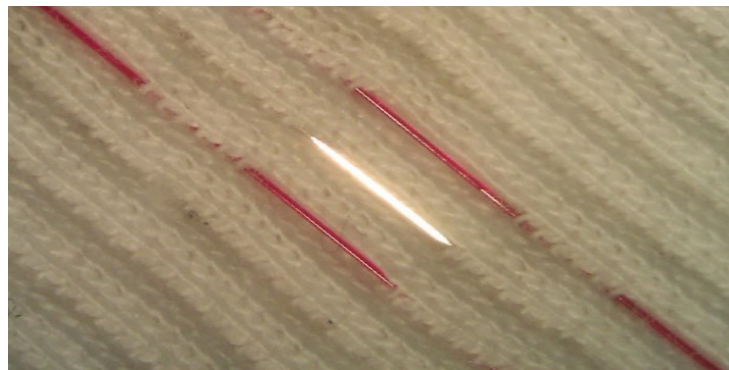


Figure 3. 1: Sample of our proposed distributed smart textile SPR dew sensor.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 gives an overview of the theory underlying plasmon waves and their sensitivity to water layer formation on top of the gold layer. This is followed by a look at dew formation and evaporation. Section 3 discusses how dew formation and humidity are sensed using our proposed SPR sensor and presents our SPR measurement results.

3.3 Theory

3.3.1 SPR and depth probe

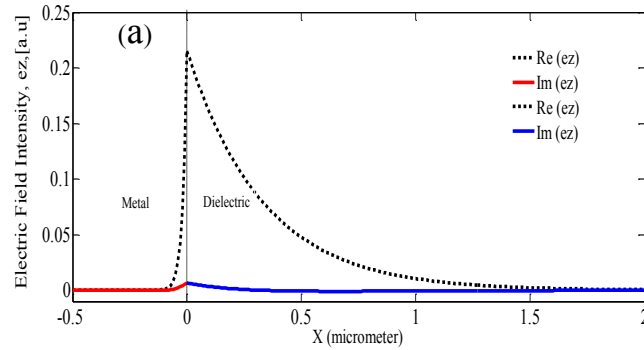
The SPR is excited by an electromagnetic (EM) field perpendicular to a metal surface at the phase-matching point between an electron and an optical wave. In a gold layer coated on the polished surface of an optical fiber, this phase-matching occurs when the propagation constant of a guided mode of the optical fiber is equal to that of the SPR [192]. Each plasmon wave has a depth probe indicating how far the plasmon field penetrates to the dielectric adjacent to the metal surface. We briefly explain the general formulation for surface plasmon and depth probe in a plasmonic sensor to give a better understanding of our dew sensing method and its relation to plasmonic depth probe. Surface plasmon waves are surface electromagnetic waves that propagate parallel to a metal/dielectric interface, represented as

$$E = e(x) \exp(i(\beta z - \omega t)) \quad (3.1)$$

Where β is propagation constant in the z direction and $e(x)$ is the electrical field component, represented by

$$e_z(x) = A \exp(-\gamma_{d,m} x), \text{ and } \gamma_{d,m} = ik \frac{\epsilon_d}{\sqrt{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (3.2)$$

where ϵ_m and ϵ_d are metal and dielectric permittivity, respectively, and $k = 2\pi / \lambda$. Figure 2(a) shows an SPR electric field at $\lambda = 800$ nm inside both metal and dielectric. This figure illustrates the depth probe where the tail of the plasmonic field diminishes gradually in the dielectric. This means that the SPR can sense the dielectric index change very close to the metal/dielectric boundary.



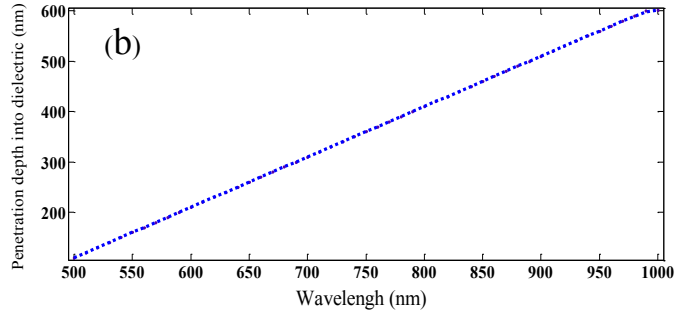


Figure 3. 2: (a) Electric field distribution for surface plasmons on the metal/dielectric boundary. (b) Depth probe of surface plasmon versus operating wavelength at the metal/dielectric boundary.

Mathematically, the penetration depth of SPR can be calculated using Eq. (3.3). Figure 3.2 (b) shows the linear relation between penetration or probe depth and plasmonic excitation wavelength:

$$L_{pd} = \frac{1}{Re\{\gamma_d\}} \quad (3.3)$$

In Figure 2.2(b), the penetration depth is a few hundred nanometers; thus, surface plasmon depth probes are extremely sensitive to changes in the refractive index (or ϵ) of dielectrics that are very close to the metal/dielectric boundary. This characteristic enables us to design a very sensitive dew sensor based on SPR, especially when the dielectric index varies from the index of air (~ 1) to the index of water (~ 1.33), which are huge variations compared to the sensitivity of surface plasmon sensors, thus enabling us to immediately measure very tiny changes in the thickness of the water layer due to dew condensation on the surface of the metal.

3.3.2 Dew formation and evaporation

Relative humidity (RH) is one of the most important parameters in dew formation theory. It is defined as the ratio of water partial pressure (H₂O), e , to saturated water vapor pressure $e_s(T)$, at a given temperature (T), and can be defined as

$$RH(\%) = \frac{e}{e_s(T)} \times 100 \quad (3.4)$$

where $T(^{\circ}\text{C})$ is the temperature of air and $e_s(T)$ is calculated using a Buck formula [175]:

$$e_s(T) = (1.0007 + 3.46 \times 10^{-6} P) \times (6.1121) e^{\frac{17.502T}{240.97+T}} \quad (3.5)$$

where P is pressure in hectopascal.

Figure 3 depicts the correlation between RH and T in the temperature range 10°C to 50°C . The dashed-line black curve shows that RH decreases as the air temperature increases. Eq. (3.6) is a Magnus formula to calculate the dew point temperature (T_D) using the known temperature (T) and RH of an air parcel in the medium adjacent to the surface [204]:

$$T_D = \frac{243.04 \left[\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17.625T}{243.04 + T} \right]}{17.625 - \ln\left(\frac{RH}{100}\right) - \frac{17.625T}{243.04 + T}} \quad (3.6)$$

In the dew process, we study the condensation of water vapor. However, the inverse process, evaporation, is also interesting for us here. In the evaporation phenomenon, water evaporates from the surface where the water vapor in the air is not saturated ($RH < 100\%$), which implies that the evaporation rate (E) is related to RH. Introduced by Brutsaert's theoretical model [140], Eq. (3.7) can be used to estimate the evaporation rate, which in turn can be compared to direct measurements:

$$\lambda E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) + \frac{\gamma^*}{\Delta + \gamma^*} E_A \quad (3.7)$$

where, λE (W/m^2) is the latent heat flux, in which λ (kJ/kg) is the latent heat of vaporization and E ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) is evaporation rate; Δ ($\text{Pa}/^{\circ}\text{K}$) is the rate of saturation pressure, which depends on the temperature; R_n (W/m^2) is the net radiation; G (W/m^2) is the sum of ground and water heat fluxes; and $\gamma^* = 0.93\gamma$, where γ is the psychrometric constant.

$E_A = \rho C_p [e_s(T) - e] / 0.93 r_a \gamma$ is an atmosphere drying function that represents the capacity of the atmosphere to transport water vapor [205], in which r_a ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) is aerodynamic constant, ρ (kg/m^3) is air density. c_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) is air specific heat, γ is the psychrometric constant, T (K) is the air temperature, and e (pa) is vapor pressure with subscript s indicating saturation.

If the net radiation and heat fluxes are negligible, and Δ is relatively constant, the first term of Eq. (3.7) becomes negligible; thus, the evaporation rate can be simplified as in Eq. (3.8):

$$E = \frac{\rho C_p}{\lambda r_a (\Delta + \gamma^*)} [e_s(T) - e] = \frac{e p C_p}{\lambda r_a (\Delta + \gamma^*)} \left[\frac{100}{RH} - 1 \right] \quad (3.8)$$

The right hand side of Figure 2.3, blue solid curve, depicts the evaporation rate vs temperature plotted using Eq. (3.8). The evaporation rate increases with the temperature of the air in the medium adjacent to a wet surface.

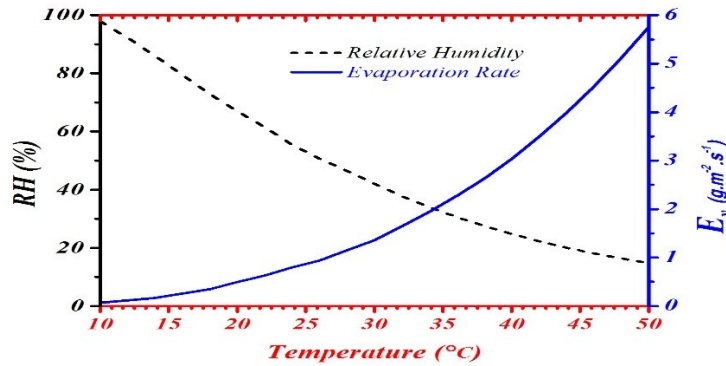


Figure 3. 3: (Left) Relative Humidity (RH) versus temperature, dashed-line curve. (Right) Evaporation rate of a wet surface (Ev) versus temperature, solid blue line.

In our sensor, condensation and evaporation will happen in the environment adjacent to a metal surface, where the plasmon waves are excited by the optical power. Thus, to give an illustration of the dew point and evaporation rate at our SPR sensor, we start with a simulation showing excited plasmons and a depth probe. Figure 4(a) shows a cross section of our fiber optic SPR dew sensor with the plasmon waves excited on top of the gold layer, coated on the side-polished surface. In this simulation, the fundamental core mode excites surface plasmons at 632 nm, while we consider 250 nm of dew (water) formed on top of the 45 nm gold layer. Because surface plasmon sensors are very sensitive to any tiny change in the thickness of the water layer (~10 nm), it is possible to measure any tiny condensation or evaporation in the sensing area by measuring the plasmonic loss.

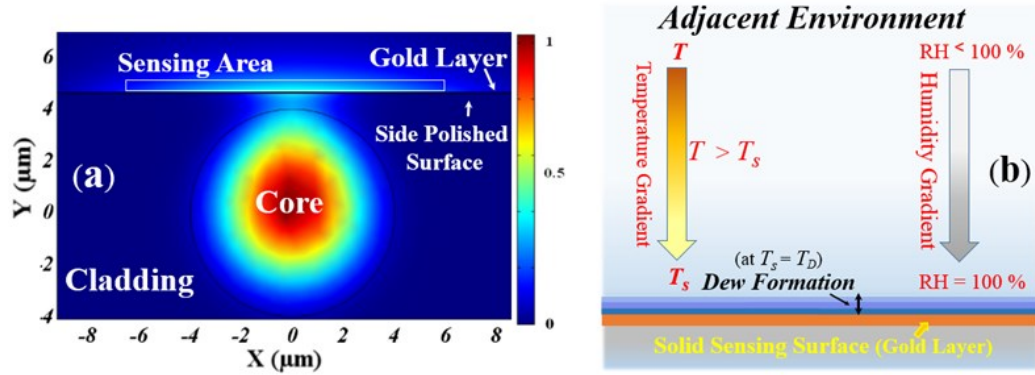


Figure 3. 4: Cross section of the side-polished SPR fiber sensor showing the power distribution and plasmonic waves; plasmons are excited on the top of the gold layer to form a sensing area for dew measurements. (b) Schematics of temperature and humidity gradients adjacent to gold surface layer with tiny water layers forming.

Figure 4(b) depicts schematics of the sensing area and its adjacent air environment. Because of the temperature difference between the surface and the air, a temperature gradient exists between adjacent environment (T) and the gold surface (T_s), as well as a humidity gradient in air between the environment ($RH < 100\%$) and the gold layer ($RH = 100\%$), where dew can be formed. No dew forms on the gold surface as long as the temperature of the gold surface (T_s) is greater than that of the dew point of the adjacent environment (T_D). We assume that dew forms in consecutive layers on the gold surface while T_s becomes equal or less than T_D . In the next section, we experimentally demonstrate and discuss how the SPR method is used to sense the dew formation and evaporation phenomena on the gold layer.

3.4 Measurement

3.4.1 Dew sensing experimental environment

To demonstrate dew formation using SPR, we used the smart textile sample in Figure 2.1, in which plasmonic side-polished optical fibers are woven into a white fabric along with two other optical fibers. As stated above, we used two red fibers in our smart textiles to demonstrate the potential to have distributed sensing smart textiles. Our SPR optical fiber dew sensor was a standard SM fiber (8/125 μm) polished using the Controllable hybrid

side-polishing method (CHPM) which had been introduced in our previous work [206]. The CHPM method enhances the surface smoothness by 34%, which improves the sensitivity of our plasmonic sensor. Figure 2.5 shows an optical microscope image of two parallel side-polished fibers, fixed in an aluminum mount, with a polished length of approximately 8 mm and a residual cladding thickness of approximately 0.5 μm . The two bottom images in Figure 2.5 show the cross section of the side-polished fiber, in the waist area, bottom left, and the top view of one of the polished fibers taken by a scanning electron microscope, bottom right.

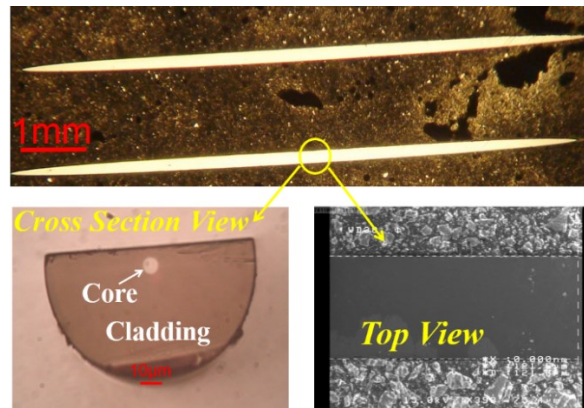


Figure 3. 5: Optical microscope image of the side-polished SM fiber, fixed in Al mount, under light reflection. The bottom images show the cross section (left) and the top view (right).

Figure 2.6 shows our experimental setup in the laboratory, which includes a supercontinuum (SC) light source, smart textile sensor, and a spectrometer. The SC light source, which is used in the measurement setup only for research purposes, enables us to study the response of our sensor for a wide range spectrum [207], but it is quite feasible to use a low-price white light LED with lower power as well. To generate the SC beam, we used a Ti: Sapphire pulsed laser, 40X coupling objective, photonic crystal fiber tube (SKT-800 Newport) and other optical components, as schematically depicted in Figure 2.6.

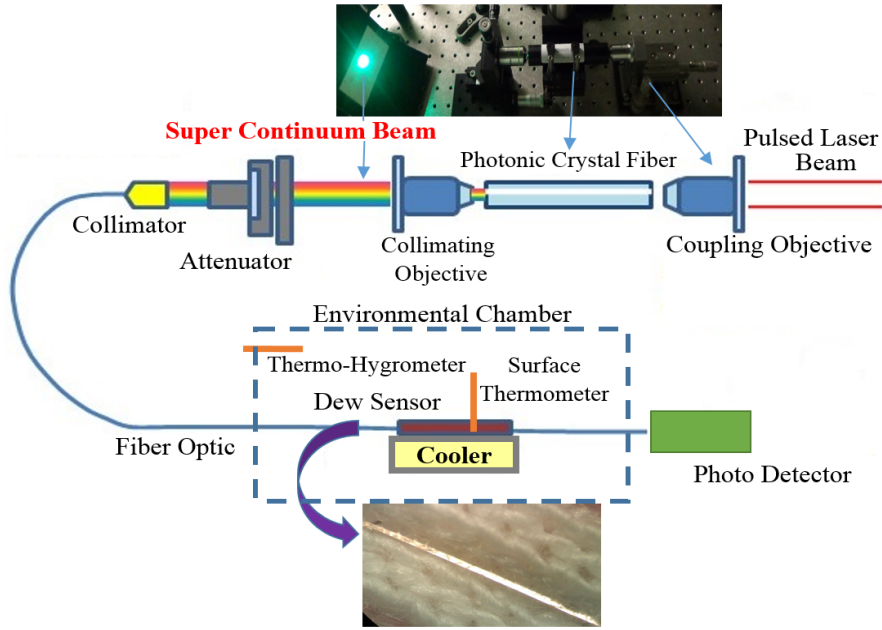


Figure 3. 6: Schematic of the optical setup used to test the SPR dew sensor in the laboratory: (Top image) a picture of the supercontinuum beam; (middle image) layout of the environmental chamber, including the sensor, thermoelectric cooler, and other required equipment; (bottom image) the side-polished fiber sensor woven into the textile.

To study the dew response of the smart textile sensor, it was affixed to a thermoelectric cooler (TEC), connected to the probe of a surface thermometer, as illustrated in Figure 2.6. The setup was accommodated inside an environmental chamber equipped with a digital thermo-hygrometer and an ultrasonic humidifier. The dew sensing experiment was carried out at room temperature and normal atmospheric pressure. In addition, the temperature and humidity of our laboratory and the chamber were the same here. The measured temperature and relative humidity of the environment were $T = 21^\circ\text{C}$ and $\text{RH} = 45\%$, respectively. To determine the dew point of the environment, T_D , the temperature of the sensor was reduced using a TEC from ambient temperature to the dew point temperature at the fixed ambient RH, i.e., $\text{RH} = 45\%$. Thus, we reduced the temperature in our smart textile sensor to reach the saturated condition for the water vapor in the air adjacent to the gold layer, leading to dew formation on the gold surface. While the temperature of the dew sensor was being reduced from $T = 21^\circ\text{C}$ to $T = 9^\circ\text{C}$, there was no change in the transmission spectra of the sensor (black narrow solid curve in Figure 3.7) implying that the gold surface was still dry, or $T_S > T_D$. However, at $T = 9^\circ\text{C}$, the

transmitted spectra gradually changed from black narrow solid curve (dry) to red thick solid curve (wet) in Figure 3.7 in 9 s because of dew formation on the surface of the gold layer. During this process, a thin layer of water formed on top of the gold layer, changing the refractive index on the top of the layer from one to approximately 1.33, which caused SPR excitation on different wavelengths to be observed in the transmission spectrum. The black and red curves show the minimum and maximum loss range of the sensor, which means that the SPR sensor can sense any tiny change in water layer thickness from zero to the SPR depth probe. Thus, our sensor can detect any layer formation from zero to around 250 nm, which is very sensitive for consolidation on and evaporation from the gold surface. Subsequently, we used Eq. (3.6) to calculate the dew point and compared it with the results measured using our SPR sensor. By substituting $T = 21^\circ\text{C}$ and $\text{RH} = 45\%$ into Eq. (3.6), we calculated the dew point temperature to be $T_D = 9.4^\circ\text{C}$, which is very close to the temperature that we observed from maximum loss in our SPR sensor.

The right side of Figure 2.7 shows the normalized plasmonic loss spectrum, defined as relative loss change ($\Delta P/P$), for an index difference of 0.33, implying that the SPR sensor has the best sensitivity around 600 nm. Thus, a simple red light LED can be used as a source here.

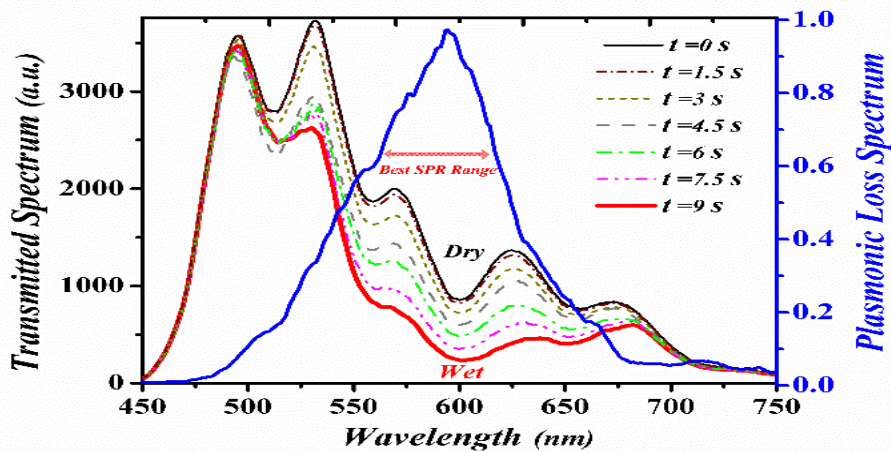


Figure 3. 7: Schematic of the optical setup used to test the SPR dew sensor in the laboratory: (Top image) a picture of the supercontinuum.

Figure 3.8 shows the real-time loss response at 632 nm when the temperature reached 9°C , with a helium-neon laser source. This is the point at which the dew formed on the top

of the gold layer in our experiment and the output power in the SPR sensor decayed in 9 s. We calculated the depth probe to be 250 nm at 632 nm, which means that the loss starting from the minimum reached to its maximum while the 250 nm water layer was forming on top of the gold layer in 9 s, at an average rate of approximately 27 nm/s. This dew formation rate is meaningful compared with typical values of condensation rates, such as those introduced by Garratt et al. [208]. For any water layer thicker than 250 nm no loss or transmission change can be observed.

Our detector can detect loss changes of 2%, which means we can monitor the water layer formation on the top of the gold layer. Our sensor is thus suitable for in-situ measurement of the thickness of the dew layer. Hassani and Skorobogatiy previously reported that they used an SPR sensor to monitor the thickness of bio layers [209]. Hence, we believe that we can use the same formulation in [209] to calculate the thickness of the dew layer forming on the surface of the gold layer. Eq. (3.9) gives the definition of the sensitivity of SPR sensors:

$$S [nm^{-1}] = \lim_{d_{Dew} \rightarrow 0} \frac{|P(d_{Dew}) - P(0)| / P(0)}{d_{Dew}} \quad (3.9)$$

where $P(0)$ is the output power at a dew thickness of zero and $P(d_{Dew})$ is a function of the dew layer thickness at a specific operating wavelength of λ , which is 632 nm here. Using Eq. (3.9) and taking $d_{Dew} = 250$ nm at 632 nm, we measure $P(d_{Dew}) = 0.18$ and $P(0) = 0.98$, normalized values, leading to a sensitivity of approximately 0.0032 nm^{-1} and a signal-to-noise ratio (SNR) of 16 dB—by definition, $SNR = 10 \text{ Log}[(P(0)-P(d_{Dew}))/\text{noise}]$ and the noise here is 0.02 (or 2%). With the detection of the 2% change in the transmitted power, the sensor can easily detect the formation of 7 nm water layer thickness. Considering 9 s for loss saturation, the response time of the sensor is then 0.25 s for the formation of each 7 nm dew layer. This is much faster than commercial electronic dew meters, which have response times of several seconds to one minute.

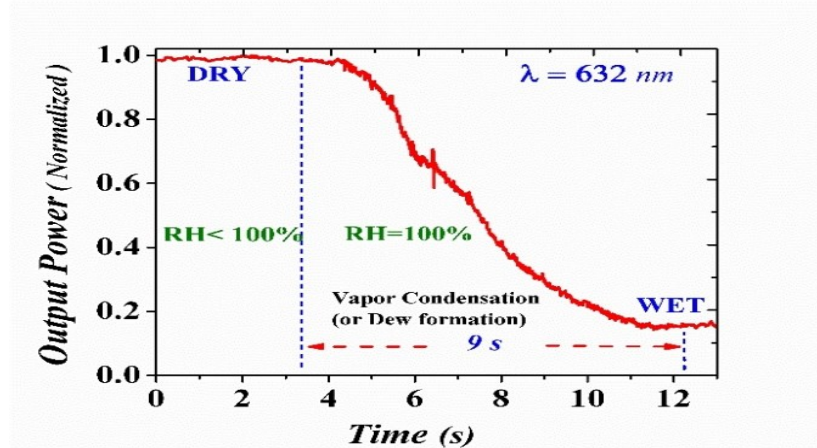


Figure 3. 8: Real-time loss response at $\lambda = 632 \text{ nm}$ when the temperature reaches $9 \text{ }^\circ\text{C}$. The SPR output power decreases from its maximum to its minimum in 9 s.

Further, in order to assess the reliability of the measurements, we repeated the experiment four times in sequence with identical conditions. The condensation times were measured as 9.5 s, 9 s, 8.5 s, and 8.5 s, respectively, leading to a variation of 5% and good repeatability.

3.4.2 Dependence of humidity and evaporation rate

In the inverse process to our activities in the previous section, the SPR sensor can be exploited to measure the evaporation rate for a wet layer. This means that in the range of 250 nm we can detect the evaporation of each 7 nm layer by monitoring the loss, so that, the 2% loss change leads to 7 nm water layer decrease on the top of the gold layer. Figure 2.9 shows the real-time measurement for a total 250 nm water layer evaporation, $\tau = 7.2 \text{ s}$ and $\tau = 9.3 \text{ s}$ when the RH of the adjacent air is 38% and 47%, respectively. Based on this measurement, evaporation rates of $\sim 41 \text{ nm/s}$ and $\sim 32 \text{ nm/s}$ are obtained, respectively.

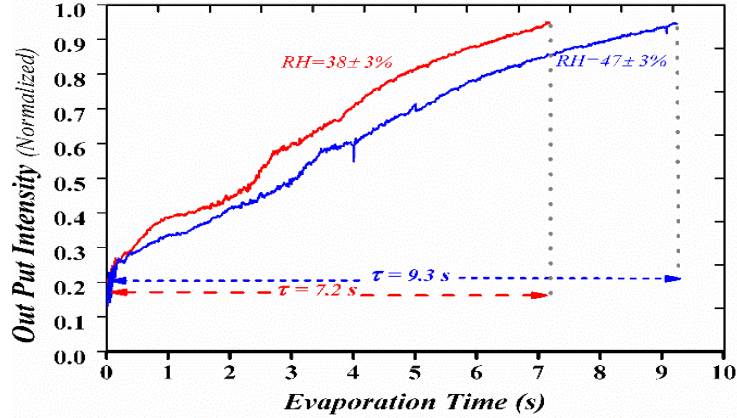


Figure 3. 9: Real-time measurement of optical output intensity versus total evaporation time of the layer of water with 250 nm probe depth thickness.

3.4.3 Dependence of humidity and evaporation rate

According to the laws of thermodynamics, water evaporation rate slows as the surrounding environment becomes more humid or cooler, and vice versa. This also applies to the evaporation rate of the tiny water layer on the gold surface in our sensor. In this section, we estimate RH using the measured evaporation rate in Eq. (3.8).

Another useful term that can be used instead of evaporation rate is evaporating time (τ), which is the time that the water layer with depth probe thickness 250 nm takes to evaporate from the surface of the gold layer. $E_{av}\tau = A$ shows the relation between the average evaporation rate (E_{av}) and (τ), where $A = 0.25 \text{ g/m}^2$. By substituting $E_{av} = A / \tau$ in Eq. (3.8), we obtain the relationship between RH and τ as

$$RH(\%) = \frac{100\alpha\tau}{A + \alpha\tau} \quad (3.10)$$

The blue dashed curve in Figure 2.10 shows the RH and τ dependency in our experiment obtained using Eq. (3.10), where $\alpha = 0.023 \text{ g/m}^2\cdot\text{s}$ was obtained based on parameters in the laboratory, $\alpha = \epsilon\rho C_p / \lambda r_a (\Delta + \gamma^*)$

The red circular points in Figure 2.10 are the measured evaporation times of the 250 nm water layer for RHs from 30% to 70% by our SPR sensor. The horizontal error bars in Figure 2.10 show approximately 5% error in our evaporation time measurements. The vertical error bars are calculated considering the intrinsic errors of all employed measurement modules such as resolution of photo wattmeter and instability of light source. It is also a safe assumption to consider approximately 10% error based on equipment that people use in the laboratory. It is not too wonderful if the theoretical results fit perfectly with the experimental results because the SPR sensor is very sensitive to the water layer thickness in its probe depth range. Thus, the sensor can sense the evaporation rate of the water layer, which implies a better resolution for humidity change in the laboratory environment. Thus it is safe to propose to calculate the RH in the environment using evaporation time as measured by our SPR sensor.

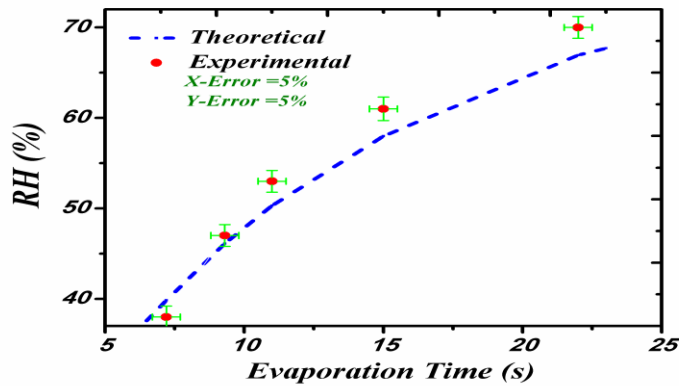


Figure 3. 10: Comparison between RH obtained by Eq. (3.10) (the blue dashed curve) and those measured using our SPR sensor (red circular points).

3.5 Conclusion

In this paper, we proposed the first smart textile dew sensor using plasmonic optical fiber, in which we utilize a surface plasmon depth probe to detect dew formation and evaporation with higher response times and sensitivities than conventional sensors. In addition, the proposed smart textile plasmonic dew sensor offers electrical immunity and distributed sensing, which are not possible or not sufficiently achievable with electrical dew point sensors. In introducing our smart textile plasmonic dew sensor, we demonstrated the high

sensitivity of surface plasmon resonance in relation to condensation and evaporation. This is the core sensing mechanism of our sensor. Two approaches were used to show the utilization of this core sensing mechanism. In the first approach, the focus was on using the condensation phenomenon to make a dew sensor, where the plasmonic fiber sensor was able to accurately detect dew formation on the surface of the sensor. In the second approach, the focus was on water evaporation rate, and the smart textile operated as a humidity sensor in an RH dynamic range of 30% to 70%. This case is worth further study using flammable gases instead of water and steam.

Acknowledgments

We would like to thank Robert Johnston, Mathieu Laliberte, and Morteza Mozafari for technical assistance rendered in their respective laboratories throughout this project. This research was funded by INRS-EMT and the NSERC CREATE Training Program in Integrated Sensor Systems (ISS), grant number 371305-2010.

CHAPITRE 4 (ARTICLE 3)

CAPTEUR D'HUMIDITÉ À FIBRE OPTIQUE UTILISANT UNE CONDENSATION DE VAPEUR D'EAU

FIBER OPTIC HUMIDITY SENSOR USING WATER VAPOR CONDENSATION

Hamid E LIMODEHI¹, François Légaré^{1,*}

Les résultats de cet article ont été publiés dans la référence suivante:

H. E. Limodehi and F. Légaré, "Fiber optic humidity sensor using water vapor condensation," *Optics Express*, Vol.25, No. 13 (2017) 15313-15321.

¹ Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-EMT, 1650 Blv. Lionel-Boulet, Varennes, Québec, Canada.

4.1 Abstract

The rate of vapor condensation on a solid surface depends on the ambient relative humidity (RH). Also, surface plasmon resonance (SPR) on a metal layer is sensitive to the refractive index change of its adjacent dielectric. The SPR effect appears as soon as a small amount of moisture forms on the sensor, resulting in a decrease in the amount of light transmitted due to plasmonic loss. Using this concept, we developed a fiber optic humidity sensor based on SPR. It can measure the ambient RH over a dynamic range from 10% to 85% with an accuracy of 3%.

4.2 Introduction

Various types of hygrometers, including mechanical hygrometers, wet and dry bulb psychrometers, infrared optical absorption hygrometers, and optical waveguides, can operate as humidity sensors [210, 211]. Although optical humidity sensors have advantages such as immunity to electromagnetic interference and fast responses, electrical humidity sensors remain more commonly used since optical hygrometers and humidity sensors do not satisfy most requirements in terms of cost, ease of operation, maintenance, and remote operability. In contrast, fiber optic humidity sensors offer features such as small sizes, multiplexing, and remote sensing capabilities. Hence, numerous investigations have been conducted on the use of fiber optic sensors for humidity and moisture measurements since the beginning of this millennium [212-213]. In general, these sensors utilize direct spectroscopic [215], evanescent wave [216], in-fiber grating [217,218], interferometric, or hybrid [219-221] methods to measure humidity. In this paper, we propose a surface plasmon resonance (SPR)-based fiber optic humidity sensor using water vapor condensation on solid surfaces.

The SPR effect results in the high sensitivity of the dielectric adjacent to a metal layer to refractive index changes and has numerous applications, from biochemical sensing to environmental monitoring [222-228]. The previously proposed plasmonic fiber optic humidity sensors work based on the SPR concept in which a plasmonic peak in the loss spectrum is deformed or displaced because of refractive index changes in the adjacent dielectric due to ambient relative humidity (RH) variations [229-232]. In these kinds of

sensors, the difference between the plasmonic peaks is measured. In contrast, the characteristics of the plasmonic peaks are assessed in our technique.

In our measurement method, the SPR effect appears as soon as a small amount of moisture forms on the fiber optic sensor, resulting in a decrease in the amount of light transmitted due to plasmonic loss. We discovered that the rate of this decrease depends on and enables easy measurement of the ambient humidity.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 begins with a brief discussion of the sensitivity of surface plasmon waves to moisture formation on top of a gold layer, which is followed by a theoretical description of the dependences of vapor condensation on the ambient humidity and temperature. In section 3, we discuss how ambient humidity is sensed in our innovative method and present the measurement results obtained using our proposed sensor. Finally, section 4 describes our conclusions.

4.3 Theory

4.3.1 Moisture detection by the SPR probe

The Surface plasmon waves are surface electromagnetic waves that propagate parallel to a metal/dielectric interface. They are excited by an electromagnetic field perpendicular to the metal surface at the phase-matching point between an electron wave and an optical wave. In a typical SPR fiber optic sensor, this phase-matching occurs when the propagation constant of a guided mode in the fiber is equal to that of the surface plasmon wave on top of the metal layer coated on the surface of the fiber [18]. The tail of the field of each plasmon wave diminishes gradually in the dielectric, indicating how far the plasmon field penetrates into the dielectric and serving as an SPR depth probe. As we found previously [233], SPR can be used to probe depths of up to 1 μm when the operating wavelength is in the visible wavelength range. Thus, SPR enables the sensing of dielectric index changes very close to the metal/dielectric boundary.

In our fiber optic sensor, condensation and evaporation occur near the gold layer coated on the side-polished surface, and plasmon waves can be excited by the light transmitted into the sensor. The condensation process in our sensor is illustrated schematically in Figure (4.1)1(a), which depicts surface plasmon waves excited by the fundamental mode

of the guided light and an approximately 1- μm -thick layer of water formed on top of a 50-nm-thick gold layer due to vapor condensation. Since SPR sensors are very sensitive to tiny changes in the water layer thickness, it is possible to measure small amounts of water vapor condensation in the sensing area by measuring the plasmonic loss ($I_{in}-I_{out}$).

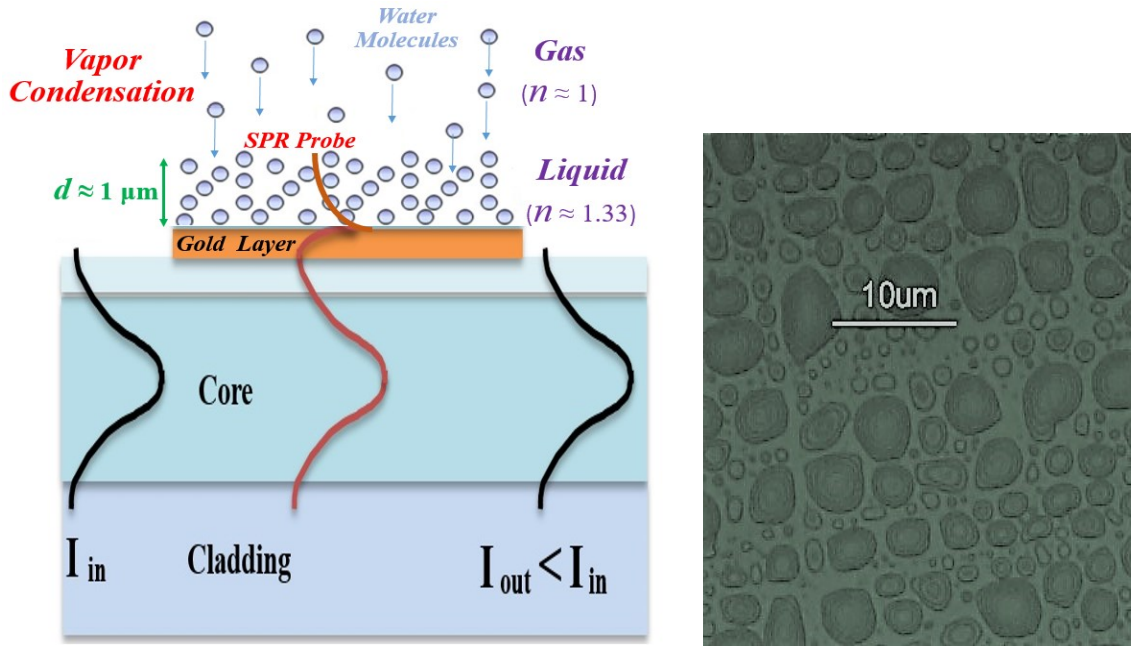


Figure 4. 1: (a) Side view of the fiber optic humidity sensor, where the SPR probe senses moisture that condenses on top of the gold layer coated on the side-polished surface. (b) Top view microscopic image of the sensing area in our sensor, where the surface is wet due to the drop-wise condensation of water molecules in the adjacent air.

Figure 4.1(b) presents a top view of the sensing area in our sensor, where the surface is wet due to the drop-wise condensation of water molecules in the adjacent air. As shown, the water droplets range in size from a few hundred nanometers to a few microns, implying that the thickness of the water layer on the surface of the sensing area should be on the order of micron or less. Hence, our SPR-based fiber optic sensor enables the immediate detection of moisture formation and its thickness variations. In the following section, we describe how the vapor condensation rate depends on the ambient RH, enabling the sensor to yield the ambient RH.

4.3.2 Dependence of vapor condensation rate on ambient humidity

It is well known that moisture forms more slowly on a solid surface as the surrounding environment becomes warmer and dryer, as verified experimentally and by thermodynamics. Hence, the rate of water vapor condensation on a solid surface should depend on the ambient RH. During condensation, the free energy of the water molecules from the air is absorbed by the solid surface because of the phase shift from gas to liquid. Hence, the condensation rate on the surface \dot{m} can be calculated using the following equation, which was previously presented by Incropera [141]:

$$\dot{m} = \frac{h_{eff} A (T_{dew} - T_s)}{h_{fg}}, \quad (4.1)$$

where h_{eff} is the effective heat transfer coefficient, A_s is the surface area exposed to the ambient water vapor, T_{dew} is the ambient dew point temperature, T_s is the surface (or sensor) temperature, and h_{fg} is the specific enthalpy of the saturated vapor. The Magnus formula, Eq. (4.2), can be used to calculate the dew point temperature T_{dew} based on the known temperature T and the RH of ambient air adjacent to the surface [203]:

$$T_{dew} = \frac{243.04 \left[\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17.62T}{243.04 + T} \right]}{17.62 - \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17.62T}{243.04 + T}}. \quad (4.2)$$

Substituting Eq. (4.2) into Eq. (4.1) to obtain Eq. (4.3) demonstrates that the condensation rate depends on the ambient RH and temperature:

$$\dot{m} = \frac{h_{eff} A \left[\frac{243.04 \left[\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17.62T}{243.04 + T} \right]}{17.62 - \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17.62T}{243.04 + T}} - T_s \right]}{h_{fg}} \quad (4.3)$$

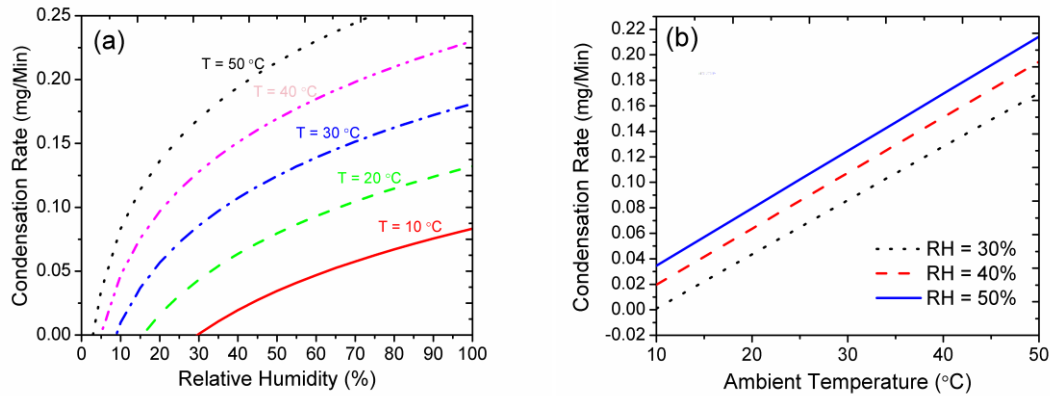


Figure 4. 2: (a) Theoretical dependence of water vapor condensation rate on ambient RH, obtained using Eq. (4.3), with fixed ambient temperatures of 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, and 50°C. (b) Dependence of water vapor condensation rate on ambient temperature with ambient RHs of 30%, 40%, and 50%.

Figure 4.2(a), which was generated using Eq. (4.3), illustrates the dependence of the water vapor condensation rate on the ambient RH when the ambient temperature is 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, and 50°C. As shown, the higher the ambient RH, the higher the condensation rate. We employed Eq. (4.3) again while varying the ambient temperature and leaving the ambient RH fixed to obtain the results presented in Figure 4.2(b), which illustrates the dependence of the condensation rate on the ambient temperature when the ambient RH is 30%, 40% and 50%. As shown, the higher the temperature, the higher the condensation rate when the ambient RH is constant. This finding implies that air contains more evaporated water molecules, i.e., has higher absolute humidity, at higher temperatures. In the following sections, we demonstrate how this relationship between condensation rate and ambient RH, i.e., Eq. (4.3), can be employed to obtain the ambient RH.

4.4 Results and Discussion

4.4.1 Measurement Setup

Our SPR fiber optic sensor uses a standard multimode fiber (62/125 μm), where up to a 15 mm length the fiber is side-polished, with a remaining cladding thickness of 1–2 μm . A

45-nm-thick layer of gold is coated on the polished area. To study the humidity response of the sensor, we established the setup depicted in Figure 4.3, which included a light source (a red light-emitting diode (LED)), a sensor, an environmental chamber, a control and data acquisition (DAQ) module, and some electro-optic devices. The environmental chamber was equipped with the required environmental sensors, which were used to obtain reference measurements, and a conditioning module consisting of a heater, an ultrasonic air humidifier, an air dryer, and a thermoelectric cooler.

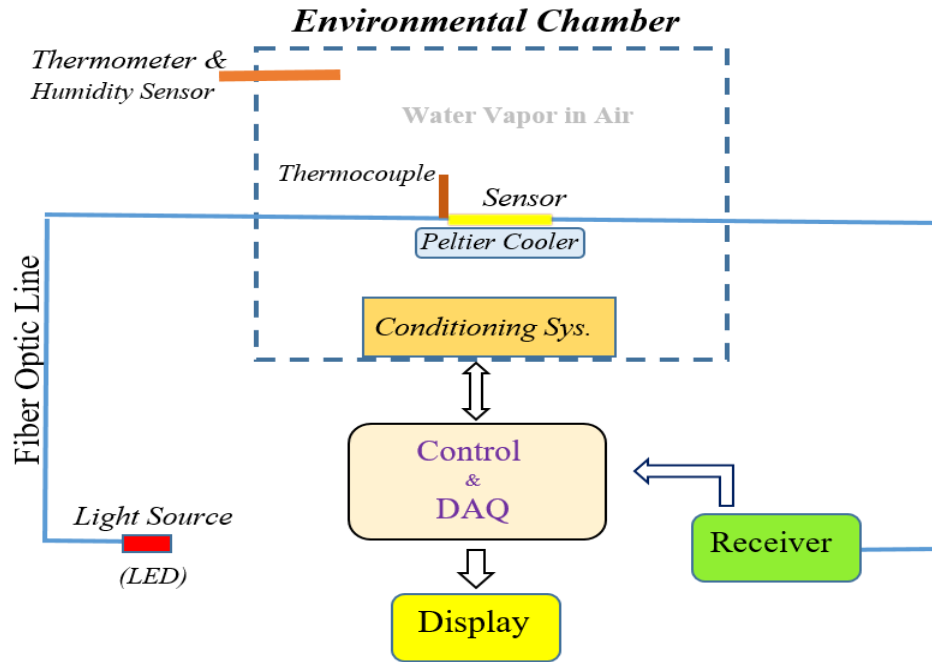


Figure 4. 3: Scheme of our experimental setup including a light source (red LED), a sensor, an environmental chamber, and a control and DAQ module. The conditioning module consisted of a heater, an ultrasonic air humidifier, an air dryer, and a thermoelectric cooler.

The first experiment was performed at room temperature and atmospheric pressure but with different ambient RHs. To determine T_{dew} , T_s was reduced from the ambient temperature until a thin layer of water formed on top of the gold layer, as illustrated in Figure 4.1(b), indicating that T_{dew} had been reached. The physical effect of this moisture formation was that the refractive index of the adjacent dielectric medium changed from 1 to approximately 1.33, causing SPR excitation and, consequently, loss of the transmitted light.

4.4.2 Real-time measurements

By monitoring the transmitted light intensity, water layer thickness changes on the submicron scale can be detected. Figure 4.4 shows the real-time measurements obtained while increasing the ambient RH from 10% to 80%, as measured by a reference electrical humidity sensor (iTHXD-OMEGA Inc.) and shown by the dotted-dashed green curve in the diagram. In addition, T_s was decreased to T_D and is represented by the dotted black curve, while T was fixed at 23°C. The dramatic decreases in the transmitted light intensity, represented by the solid blue curve, occur when T_s reached T_D , at which point condensation began. By using the known values of T_D and T and employing Eq. (4.2), the ambient RHs could be obtained.

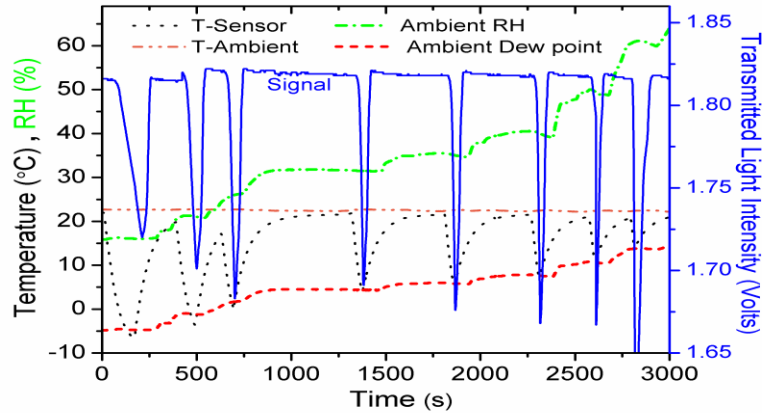


Figure 4. 4: Real-time measurements obtained inside the environmental chamber: ambient RH measured by the reference humidity sensor (dotted-dashed green curve); T_s (dotted black curve), ambient temperature (double-dashed orange curve), transmitted light signal (solid blue curve), and T_{dew} (dashed red curve).

The RHs acquired using this method were then compared with those measured by the reference humidity sensor installed inside the environmental chamber. The results of this comparison are presented in Figure 4.5, where the estimated ambient RHs are represented by the filled-in red circles and the measured reference ambient RHs are indicated by the black squares, with a standard error of 1.3% throughout the depicted RH range. To enable local comparisons to be made within the RH range, the normalized error is also shown (thin blue curve). Based on the statistical definition of normalized error,

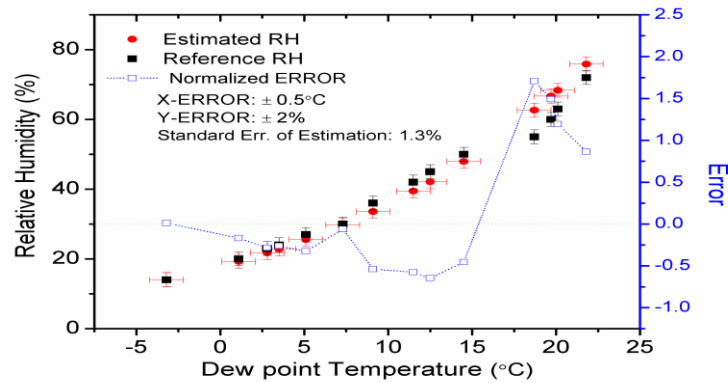


Figure 4. 5: Comparison between estimated (filled-in red circles) and reference (black squares) RHs inside the chamber.

normalized errors between -1 and +1 indicate acceptable accuracy. Thus, high accuracy is evident, especially in the RH range from 10% to 50%. Although the exact signal-to-noise ratio of our sensor is not presented here, Figs. 4, 6, and 9 clearly indicate that it is high since the change in the transmitted light intensity due to condensation (signal) is significantly greater than the light intensity fluctuations (noise).

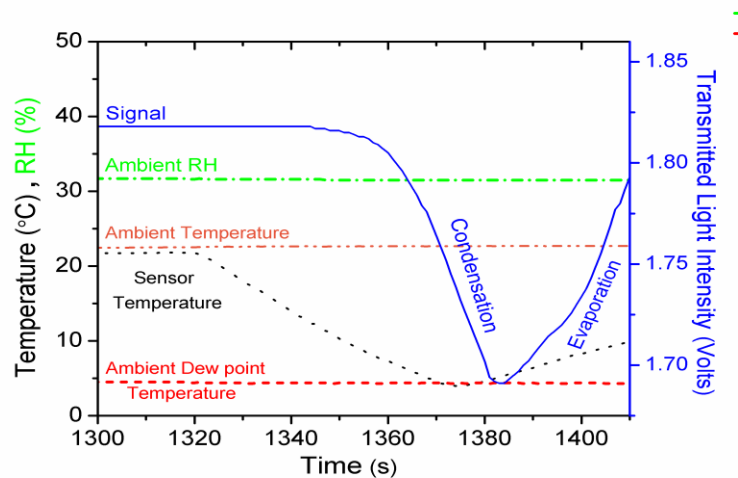


Figure 4. 6: Real-time measurements obtained by the sensor inside the environmental chamber for the interval time from 1300 s to 1400 s.

To perform a more thorough investigation, we separately considered the transmitted light variation again in the time interval from 1300 s to 1400 s, which is depicted in Figure 4.6, in the case in which the ambient RH and temperature were 32% and 23°C, respectively, and T_s was reduced to $T_D = 4.8^\circ\text{C}$. As Figure 4.6 demonstrates, the transmitted light

intensity decreases rapidly due to the SPR loss during condensation and then increases back to its initial value due to evaporation when $T_s > T_D$. This diagram contains valuable information about the ambient humidity; by extracting this information, the RH of the environment in which the sensor is placed can be obtained, as explained in Section 3.3.

4.4.3 Dependence of transmission reduction rate on ambient RH

It is obvious that slope of the transmitted light intensity as it decreases is directly related to the water vapor condensation rate. Furthermore, the condensation rate is related to the ambient RH through Eq. (4.3). Thus, the transmission reduction rate should be related to the ambient RH. This point was verified by investigating the decreases in transmitted light intensity with different ambient RHs. Our experimental measurements, which are presented in Figure 4.7(a), clearly demonstrate that the transmitted light intensity decreases faster when the ambient RH is higher, as suggested by the theoretically obtained diagram in Figure 4.2. Figure 4.7(b) depicts the relationship between the transmission reduction rate and ambient RH during moisture formation. Hence, the light transmitted into the sensor offers a powerful tool for measuring ambient humidity.

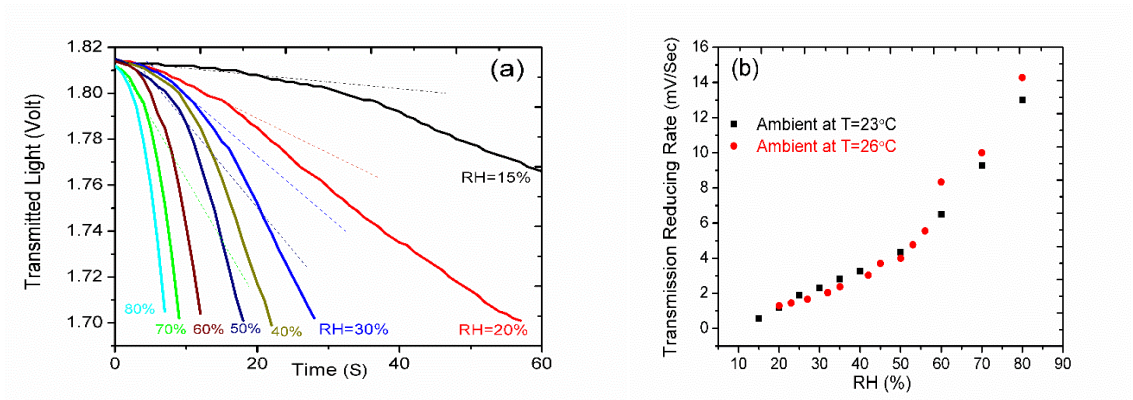


Figure 4. 7: (a) Transmitted light intensity reduction during moisture formation, which demonstrates that the slope, i.e., the condensation rate, increases significantly as the ambient RH increases. (b) Dependence of transmission reduction rate on the ambient RH at two different ambient temperatures.

In addition, Figure 4.2(b) suggested that the condensation rate was related to the ambient temperature. We investigated this point in greater detail by measuring the vapor condensation rate at different ambient temperatures while leaving the ambient RH

constant. Figure 4.8 shows the transmitted light intensity at temperatures of 10°C, 20°C, 30°C, and 40°C when the ambient RH was fixed around 30%. Clearly, the transmitted light intensity decreases more rapidly when the ambient temperature is higher. The inset in Figure 4.8 also demonstrates that the relationship between the transmission reduction rate and the ambient temperature is approximately linear, as theoretically suggested by Figure 4.2(b).

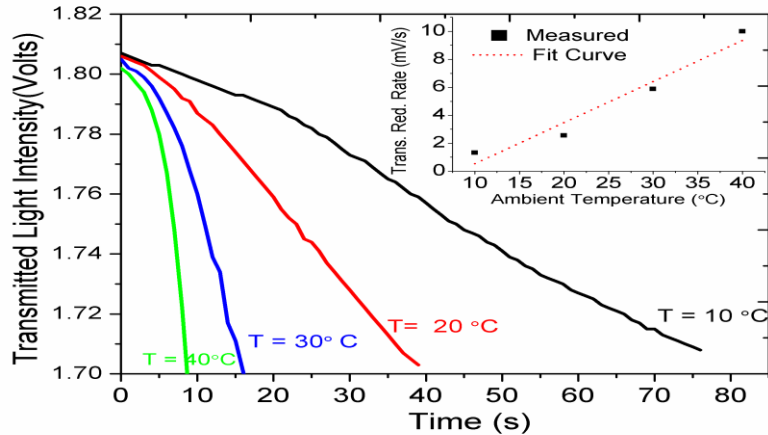


Figure 4. 8: Transmitted light intensity during moisture formation at temperatures of 10°C, 20°C, 30°C, and 40°C when the ambient RH was fixed near 30%. The inset shows an approximately linear relationship between the transmission reduction rate and the ambient temperature.

4.4.4 Sensor response to breath exposure

Finally, we analyzed the response of our proposed sensor to breath exposure. The results, which were obtained using an ambient RH and a temperature of 43% and 22°C, respectively, are presented in Figure 4.9. To perform a more thorough evaluation, we also obtained the response of the commercial reference sensor, whose probe was adhered to that of the proposed sensor. We simultaneously brought the probes of our fiber optic sensor and the commercial one close to the mouth of a person for breath exposure. Since some humid, warm air is released from the mouth while exhaling, some moisture formed on the surface of each sensor due to condensation and then evaporated into the ambient air. This phenomenon is typically revealed by transmitted light intensity fluctuations. Figure 4.9 demonstrates that our proposed fiber optic sensor can respond as much as 8 s faster than the commercial one to the same breath exposure.

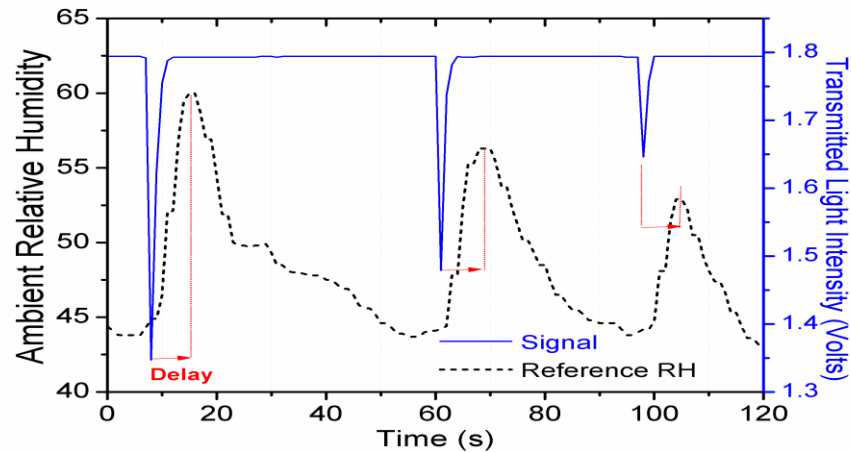


Figure 4. 9: Response of the proposed sensor to human breath exposure when placed at different distances from the mouth of a person. The dashed black curve represents the response of a commercial humidity sensor when used in the same conditions as the proposed sensor.

It can also be deduced that our proposed optical sensor has a higher reversibility than the commercial sensor, because its peaks are narrower. Furthermore, Figure 4.9 demonstrates that the response of our sensor is proportional to amount of moisture released from the mouth, which depends on the distance of the probe from the mouth, reflecting the accuracy of the proposed fiber optic humidity sensor.

4.5 Conclusion

In this article, we presented an SPR-based fiber optic sensor for performing ambient RH measurements using water vapor condensation. We started with a brief discussion of the sensitivity of surface plasmon waves to moisture formation on top of a metal layer. Next, we provided a theoretical description of the dependences of vapor condensation on the ambient humidity and temperature. Then, experimental results were presented that agreed well with the theory and indicate the effectiveness of our proposed idea, because the ambient RH could be determined with a standard error of only 1.3%. Finally, we introduced a novel method of measuring the ambient RH using the relationship between the vapor condensation rate and the ambient RH. Thus, the ambient RH can be determined by monitoring the light transmission reduction rate in our sensor. The obtained

experimental results demonstrate the good performance of our fiber optic humidity sensor in terms of response speed, precision, repeatability, and reversibility.

CHAPITRE 5 (ARTICLE 4)

MULTI-CHANNEL FIBER OPTIC DEW AND HUMIDITY SENSOR

CAPTEUR D'HUMIDITÉ ET DE MOUVEMENT À FIBRE OPTIQUE MULTICANAL

Hamid E Limodehi^{1,*}, Morteza Mozafari², Hesam Amiri², François Légaré¹

Les résultats de cet article ont été publiés dans la référence suivante:

Hamid E Limodehi, Morteza Mozafari, Hesam Amiri and François Légaré, "Multi-channel Fiber Optic Dew and Humidity Sensor," *Journal of Optical Fiber Technology*, 41 (2018) 89–94.

¹ Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-EMT, 1650 Blv. Lionel-Boulet, Varennes, Québec, Canada.

² Niroo Research Institute (NRI), Punak Bakhtari, Tehran, Iran.

5.1 Abstract

In this article, we introduce a multi-channel fiber optic dew and humidity sensor which works using a novel method based on relation between surface plasmon resonance (SPR) and water vapor condensation. The proposed sensor can instantly detect moisture or dew formation through its fiber optic channels, separately situated in different places. It enables to simultaneously measure the ambient Relative Humidity (RH) and dew point temperature of several environments with accuracy of 5%.

Keywords: Fiber Optic Sensor, Surface Plasmon Resonance, Humidity and Dew Sensing

5.2 Introduction

The Moisture monitoring is essential to prevent potentially catastrophic consequences and poor end-product quality in various industries. Hence, there is extensive demands for high-efficiency environmental sensors in market, especially for humidity controlling for microclimate systems that are individually distributed in combustible or hazardous industrial locations, clinics, clean rooms, museums, combustible or hazardous places, homes, and in nature [3, 5]. In fact, current electrical based humidity sensors in market have difficulties to be used in environments with stringent limitations on physical space, and also chemical conditions, due to restrictions of their probes in term of size and structure. Fiber optic based technologies offer features such as ultra-fast, lightweight, non-intrusive, flexible and remote sensing capabilities. Hence numerous investigations have been conducted on the use of optical and fiber optic based technologies for humidity sensing applications [2, 4, 234, 235, 236]. In general, these sensors utilize direct spectroscopic [237], evanescent wave [238], in-fiber grating [239, 240], interferometry, or hybrid [241–244] methods to measure humidity.

It is often argued that optical based humidity sensors can be substituted with the electrical based sensors in markets because of their privileges. But in spite of the all efforts done over the past quarter century, this expectation has been not realized yet. One of main obstacles for developing and substituting of the optical based sensors with their electrical counterparts is that their price are not cost-effective. Most of previously introduced optical technologies, e. g. Fiber Bragg Grating (FBG) based sensors, use

relatively expensive optical components such as probes, light sources and detectors. Hence it seems the electronic sensors is likely to remain the technology of choice for the vast majority of sensing applications in the market, unless the cost of the optical based sensors is essentially reduced. To reduce the price, it requires to design optical fiber sensors that use cost-effective components including light source, transducer, and detector.

In this paper we propose a Multi-channel Optical Dew & Humidity Sensor (MODHS), as an efficient and cost-effective solution. A developed MODHS enables to simultaneously monitor dew point and humidity of a suite of microclimate systems in hard-to-access industrial locations, museums, archive rooms, libraries, laboratories, and etc. Thanks to innovative design used in our sensor in both technical and conceptual aspects, the proposed sensor has some remarkable advantages and features. It employs simple photoconductive cells or photodiodes for detection, instead to use expensive spectrometers. Also the sensor employs a simple LED, as the light source, to simultaneously supply measuring light of several fiber optic channels. In the conceptual aspect, the MODHS employs a novel sensing method, based on surface plasmon resonance (SPR) and water vapor condensation [245, 246], thereby, the sensor is exempted to have any moisture absorbent layer, in contrast with other humidity sensors.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 begins with a demonstration about the proposed system embodiment, including general layout and its components. In section 3, we discuss how ambient relative humidity is measured in our MODHS via two techniques, the tradition and our proposed method. Finally, the conclusion comes in section 4 of this article.

5.3 Instrument Description

5.3.1 General Lay out

In this section we describe our proposed MODHS system and Figure 5.1 (a) shows its general layout. The system comprising light transmitter, controller, receiver, and a plurality of optical fibers each comprising a first end fed the measuring light, and a transducer positioned along a length thereof.

Each optical fiber is connected to a light transmitter at one end and a receiver at another end. The transmitter and receiver are connected to and under the control of a controller. The transducers are situated inside a wet area whose dew point temperature and humidity level are to be measured. Referring to Figure 5.1(b), the controller comprises a microcontroller (CPU), a data store, a user input and a display. The receiver comprises a Fiber Channel Angled Physical Contact (FC/APC) mating sleeve, a photoconductive cell, an amplifier 40x-Gain, and an analog to digital (A to D) converter, illustratively a 24-bit analog to digital converter. A user would use the user input to activate the light source via the CPU.

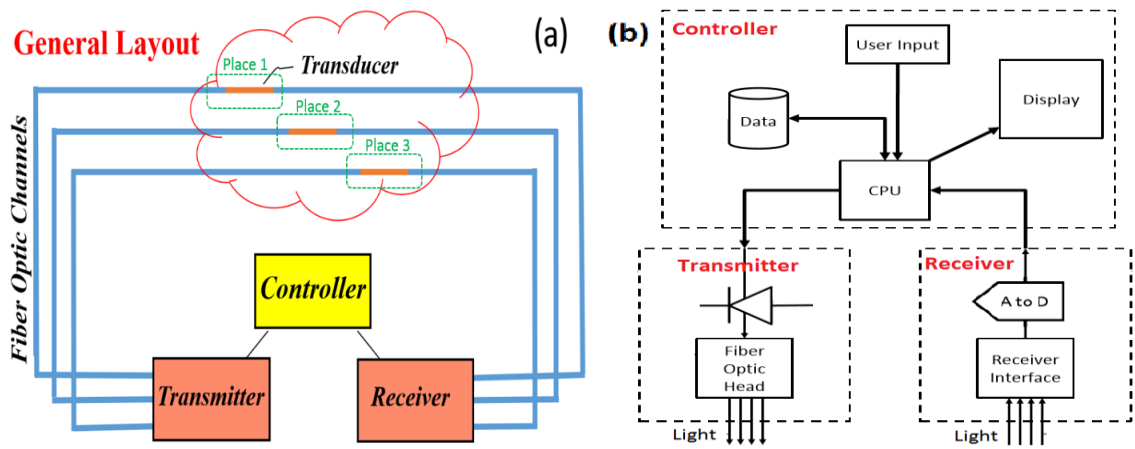


Figure 5. 1: (a) A general layout of multi-channel optical dew and humidity sensing (MODHS) system. (b) A schematic diagram of the MODHS including: transmitter, receiver and controller.

The measuring light would then be modified via the transducers before returning via the plurality of optical fibers to the receiver by a FC/APC type connector. The optical power of the received measuring light, illustratively measured in microwatts, would then be converted into an electrical signal, illustratively DC voltage, using the photoconductive cell, the electrical signal then amplified by the amplifier. The amplified electrical signal is then converted into a digital signal using the A to D converter, the newly converted digital signal sent back to the CPU for analysis, the results of which would appear on the display and be stored in the data store for further comparison and analysis purposes. As described,

the system includes of optical and electronic modules. We intent to only investigate its optical sections, such as transducer and the transmitter, in the following sections.

5.3.2 Light Transmitter

The transmitter comprises a light source, illustratively a red LED, and a fiber optic head connected to the plurality of optical fibers, as schematically shown in Figure 5.2a. The light source is a simple low-cost super bright LED, in red color, and it is power supplied by DC-voltage of 3 volts. The emitted light from the LED should maximally be lunched into the fiber optic head resulting a better signal-to-noise ratio. Hence we polished the LED to form a smooth flat surface on its tip to make a perfect physical contact and also adjust the optimum distance between the LED and the fiber optic head to get a maximum light coupling.

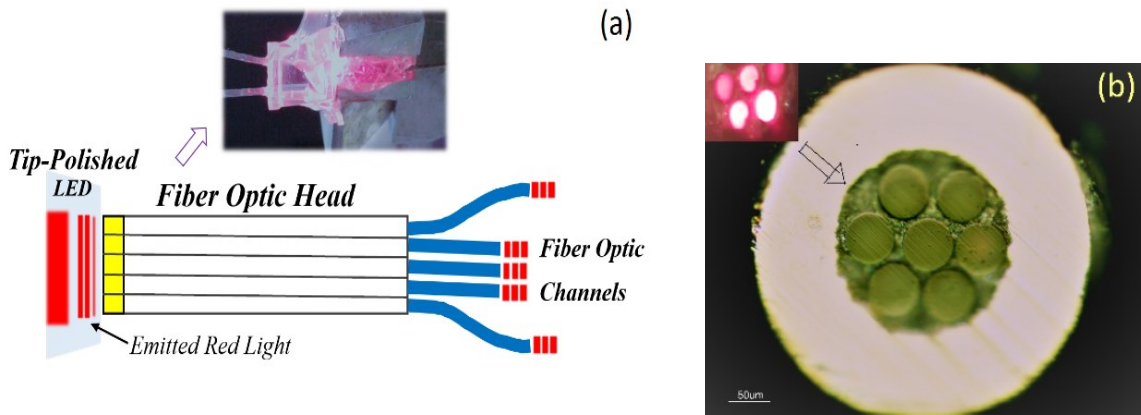


Figure 5. 2: (a) Scheme of the transmitter comprises a light source, illustratively a red LED, and a fiber optic head connected to the plurality of optical fibers, inset is a real picture in which the tip-polished LED was stuck to fiber optic head by glue. (b) A cross-sectional image of our fiber optic head supporting seven channels for seven transducers, inset image is when it is fed by the LED light.

5.3.3 Moisture Transducer and Sensing Mechanism

The transducer is a SPR based fiber optic sensor comprising a portion of fiber optic wherein the fiber is side-polished, 17mm in length, and coated by a thin gold layer,

thickness of 45nm. Surface Plasmons are appeared on the gold surface upon phase-matching condition is occurred, i. e. equality of propagation constants between SP waves and the core guided light in the fiber. This condition can be realized whenever a small amount of moisture forms on the surface of the sensor due to water vapor condensation as soon as the sensor temperature reaches to the ambient dewpoint ($T_s=T_{dew}$). Since surface plasmons are lossy waves, then a measurable decrease in transmission light intensity is observed because of SPR effect. Using this concept, we developed a fiber optic humidity sensor based on relation of the SPR and vapour condensation phenomena. The transducer modifies an intensity of the measuring light dependent on an ambient humidity by detecting changes in a thickness of a layer of water on the polished portion.

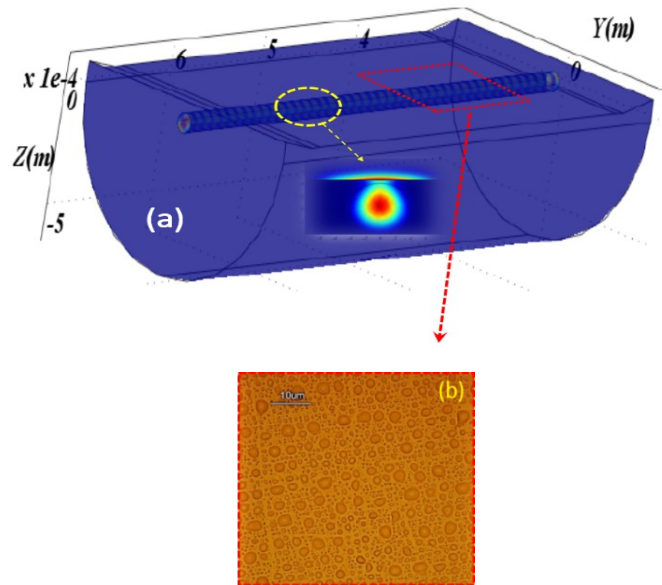


Figure 5. 3: (a) Simulation for a portion of fiber optic channel which is side-polished and coated by a layer of metal to act as a transducer to detect ambient humidity. The inset image is when moisture forms on the polished surface, resulting the SPR effect and coupling between transmitting light and surface plasmons. (b) A top view of the sensing area, where the surface is wet due to condensation of water molecules in the adjacent air.

In our case, the transducer uses a standard multimode fiber (62/125 μm), where up to a 15 mm length the fiber is side-polished, with a remaining cladding thickness of 1–2 μm . A 45-nm-thick layer of gold is coated on the polished area. Figure 5.3(b) presents a top view of the sensing area in our sensor, where the surface is wetted due to condensation of water molecules, contained in the adjacent air. As shown, the size of water droplets are in the range from a few hundred nanometers to a few microns, implying that the thickness of the water layer on the surface of the sensing area should be in submicron scale. Hence, our SPR-based fiber optic sensor enables the immediate detection of moisture formation and its thickness variations.

5. 4 Results and Discussion

5.4.1 Test of Multi-Channel Optical Dew and Humidity Sensor (MODHS) in Traditional Regime

Although our fabricated optical head can support seven transducers in seven channels, but here we present the measurement results only for three channels because of equipment considerations in our measurement system. The current platform can be developed to a prototype system with more than 50 channels. Figure 5.4a shows real-time measurement of optical transmission of three transducers in three channels No. 1, 2, and 3, situated in three different chambers. The chambers have transparent acrylic walls, and are also equipped by air conditioning and measurement equipment. The level of the ambient humidity inside each chamber is changed by flowing moist air using ultrasonic humidifiers and then after exhausting the humidified air, in atmospheric pressure and room temperature condition.

We separately depict transmission light intensity along with RH variation for each chamber in figures 5.4(b), 5.4(c), and 5.4(d). As these diagrams show, when ambient RH inside the chambers are increased, the transmission light intensity are decreased, and vice versa. The reason is that the humidifier releases tiny droplets into the chamber to be suspended in air.

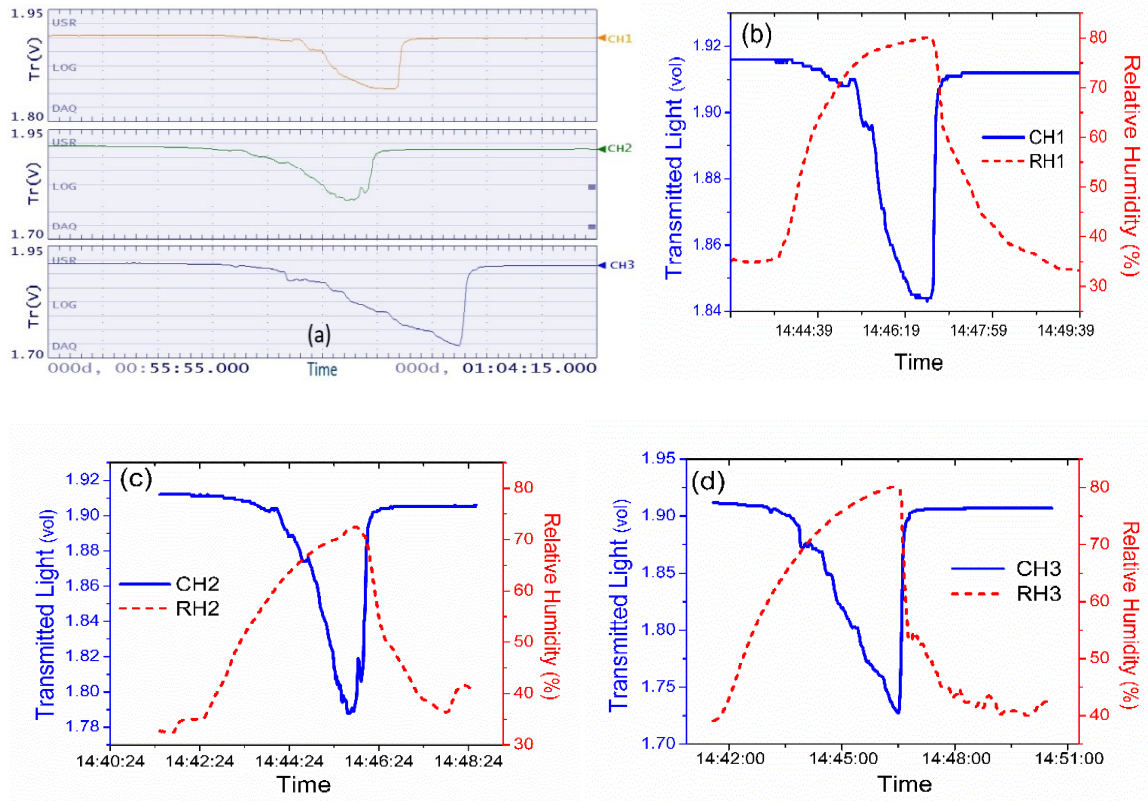


Figure 5. 4: (a) Transmission light intensity of three transducers for three channels No. 1, 2, and 3 in the real-time measurement, for which, the transducers are situated in three different chambers. (b), (c), and (d) transmission light intensity along with RH variation versus time for each chamber.

These droplets rapidly sit on the sensing surface of the transducer leading to the SPR effect, or plasmonic loss, revealed by a decrease of transmission light intensity. In contrast, by exhausting the humidified air outward the chamber and replacing with drier air, the deposited droplets on the sensing surface are evaporated into the air resulting the SPR elimination, thereby the transmission light intensity increases back to its initial value.

Although our proposed system enables to simultaneously monitor ambient RH of different places even the humidity is changed rapidly, but the system accurately operate only in the steady state and not when there is airflow or turbulence in the measuring environment. Hence, we propose a new method enables to resolve the mentioned drawback in the next section.

5.4.2 Test of Multi-channel Optical Dew and Humidity Sensor (MODHS) in our proposed method

To determine ambient dew point (T_{dew}) in our proposed method, each sensor's temperature (T_s) is reduced using a Peltier cooler from the ambient temperature (T) until a thin drop-wise layer of water is formed on top of the gold layer, as illustrated in Figure 5.3(b), indicating that T_{dew} had been reached. The physical effect of this moisture formation was that the refractive index of the adjacent dielectric medium changed from 1 to approximately 1.33, causing surface plasmon excitation and, consequently, attenuation of the transmitted light. Whenever a dramatic decrease in transmitted light intensity is observed, the cooler is switched off and the sensor temperature automatically increases back to the ambient temperature.

By monitoring the transmitted light intensity, water layer thickness changes on the submicron scale can be detected. Figure 5.5 shows the real-time measurements during the ambient RH was changed from 10% to 80%, measured by a reference electrical humidity sensor (iTHXD-OMEGA Inc.) and shown by the dotted-dashed green curve. In addition, T_s was decreased to reach T_{dew} and is represented by the dotted black curve, while T was fixed at 23°C. The dramatic decreases in the transmitted light intensity, represented by the solid blue curve, occur when T_s reached T_{dew} , at which dew formation began. Using the known values of T_{dew} and T and employing the following Magnus equation [223], the ambient RHs can be obtained.

$$T_{dew} = \frac{243.04 \left[\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17.62T}{243.04 + T} \right]}{17.62 - \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17.62T}{243.04 + T}} \quad (5.1)$$

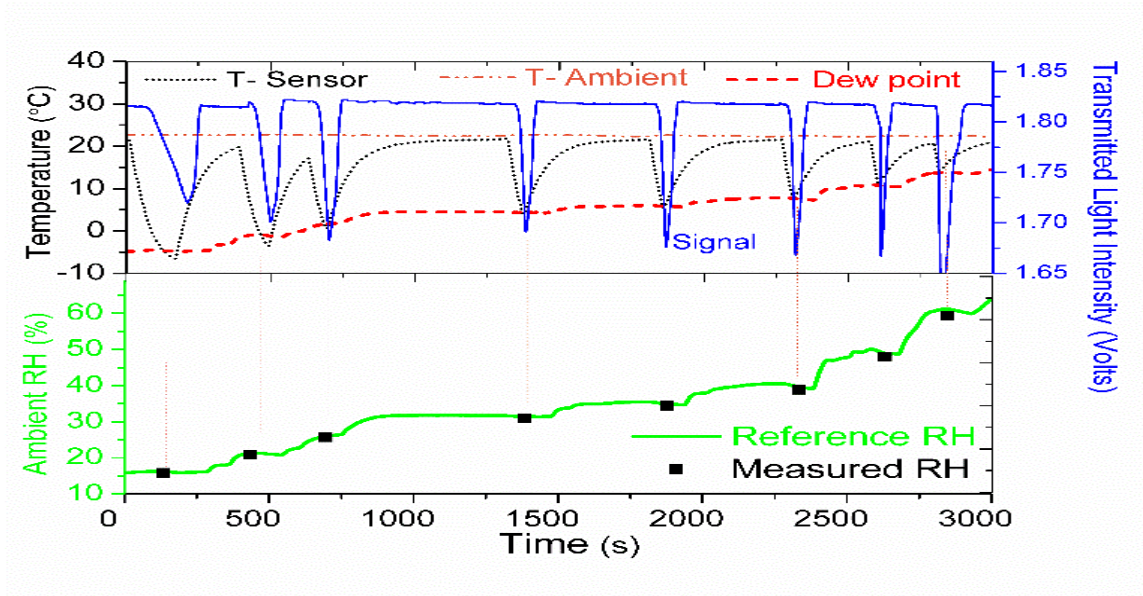


Figure 5. 5: Real-time measurements obtained inside the environmental chamber: ambient RH measured by the reference humidity sensor (green curve); T_s (dotted black curve), ambient temperature (double-dashed orange curve), transmitted light signal (solid blue curve), and T_{dew} (dashed red curve).

The acquired RHs using this method were then compared with those measured by the reference humidity sensor, installed inside the environmental chamber. The results of this comparison are presented in Figure 5.5, where the estimated ambient RHs are represented by the filled-in black squares, indicating a very good accuracy with a standard error of 1% throughout the depicted RH range. Furthermore, although the exact signal-to-noise ratio of our sensor is not presented here, but Figure 5.5 clearly indicate that it is high since the change in the transmitted light intensity due to condensation (signal) is significantly greater than the light intensity fluctuations (noise).

As described, the probing manner here is based on scrolling (Alternatively lowering and raising) temperature of the transducer (T_s) to directly touch the ambient dew point (T_{dew}) during ambient RH variation. We tested this innovative method for our proposed MODHS system, as displayed in upper plot of Figure 5.6(a), while the ambient temperatures were around 22°C in the all chambers. The corresponding transmission light intensities are also displayed in the bottom of Figure 5.6(a) which show the probing procedure for each channel.

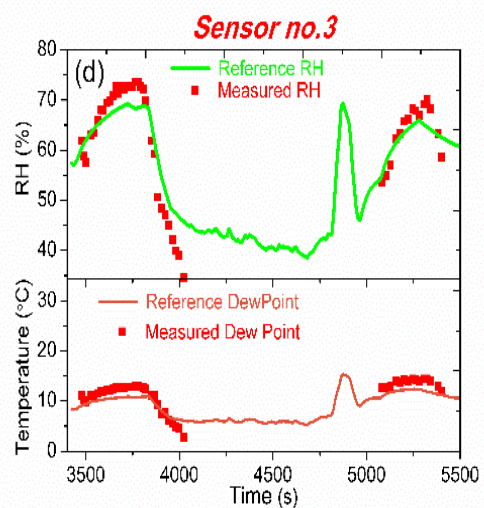
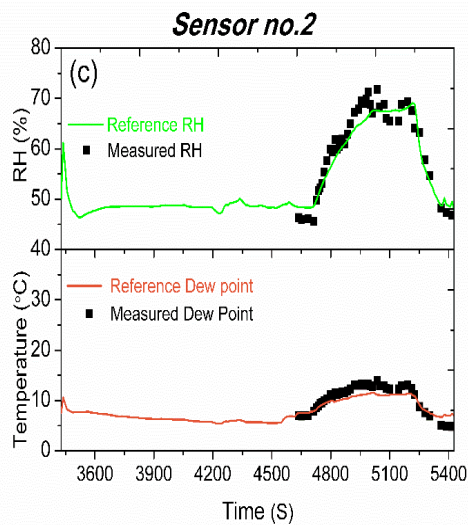
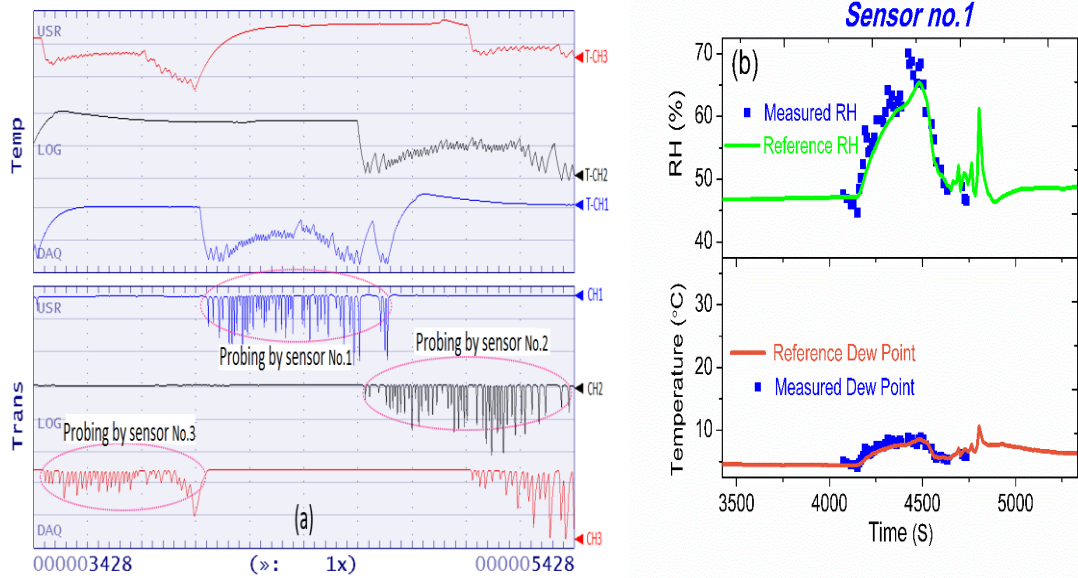


Figure 5. 6: (a) Upper plot: alternatively lowering and raising, or probing the temperature of the transducers (Ts) to directly measure the ambient dew point (T_{dew}) during ambient RH variation for three channels No. 1 (blue color), 2 (black color), and 3 (red color). Bottom: The corresponding transmission light intensity of the three transducers for those three channels. (b), (c), and (d) variation trend for ambient RH (green curves in the top), and T_{dew} (red curves in the bottom), in which, we depict the obtained values of the ambient RH and T_{dew} as filled-in squares.

To illustratively investigate their performance, we separately depict diagrams for each chamber in figures 5.6(b), 5.6(c), and 5.6(d), in which, we compare our obtained values of the ambient dew point and RH with those that measured by the reference sensors. We know from Eq. (5.1), the ambient RH and dew point (T_{dew}) are related together. Hence, when we change the ambient RH inside the chambers at a fixed temperature, we observe a similar variation trend for both ambient RH (green curve in the top), and T_{dew} (red curve in the bottom), as depicted in figures 5.6b, 5.6c, and 5.6d. We also depict the obtained values of T_{dew} and ambient RH as filled-in squares, respectively, in the bottom and upper plots of each channel in figures 5.6(b), 5.6(c), and 5.6(d). As the figures show, the obtained values in our method are mostly close to the reference ones with standard errors of 1.7% and 3.2% for the obtained T_{dew} and the RHs, respectively.

It can be seen from diagrams in Figure 5.6(b), 5.6(c), and 5.6(d) the fitting situation for dew point values (red-colored curves in the lower plots) is slightly better than the RH (green-colored curves in the upper plots), probably due to accuracy lack of Magnus equation, Eq. (5.1), in non-steady state conditions. We believe its coefficients need to be corrected to reach the best fitting for non-steady state conditions. Furthermore, although the results depicted in Figure 5.6.6 render a true map of the T_{dew} and RH's variation trend for the all three sensors, nevertheless, we see that the agreement between the obtained and reference values are slightly less than the measurement done in Figure 5.5. A precise observing of the diagrams in Figure 5.6(b) to 5.6(d), indicates that the discrepancy is revealed when the ambient RH variation trend in the chambers is inverted, like as a fluctuation or unsteady state condition. To properly track the change of the ambient RH for unsteady state condition in our method, it needs to scroll the sensor temperature fast enough, leading to removing of discrepancy between reference and obtained values. It is feasible through enhancing performance of thermo-electric coolers in the measurement system. Finally, we mention that the measurements were done in the RH range of 10% to 80% due to limitation of measurement equipment, otherwise there is no restriction for our fiber optic transducer to work in a wider ambient RH range.

5.5 Conclusion

This article reports design, fabrication and test of a multi-channel fiber optic dew and humidity sensor system. The proposed system can instantly detect moisture formation

through its in-line transducers, incorporated within each fiber optic channel. It also enables to simultaneously measure the ambient RH and dew/frost point for different environments with accuracy of 5% using a method based on the SPR and water vapor condensation. The proposed sensor measures the ambient RH when it is more than 40% using ordinary probing technique. But there is no limitation for operating range using our proposed probing technique, i. e. scrolling. To reach a better accuracy for RH measuring, it needs to increase speed of scrolling through improving the technology, the task we are going to do as the scope for future.

Chapitre 6

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

6.1 Conclusions de la thèse

L'objectif principal poursuivi dans cette thèse est d'introduire une solution à base de fibre optique efficace et rentable pour les applications de détection environnementale. En comparaison aux technologies antérieures, la méthode développée dans cette thèse se base sur la mesure simple de l'intensité du signal à la sortie de la fibre. Le milieu typiquement analysé peut être liquide, appelé analyte, et voir même gazeux. Dans l'ensemble, les quatre chapitres/articles portent sur le développement d'une technologie pour la détection environnementale incluant les milieux liquides et gazeux. Dans le premier article, chapitre 2, nous avons focalisé notre effort sur le développement d'un capteur optique fibré utilisant une source dans la gamme spectrale proche infrarouge et visible basée sur un supercontinuum. Ce capteur optique est basé sur une résonance de plasmon et est sensible à l'indice de réfraction de l'analyte. Dans les autres chapitres, nous avons poursuivi le développement de la technologie et les mesures d'humidité relative ont été faites en remplaçant la source supercontinuum dispendieuse et complexe par une simple diode laser opérant à 630 nm. Dans le deuxième article, nous avons démontré que le capteur plasmonique est sensible au taux d'évaporation lequel est une fonction de l'humidité relative. Dans le troisième article, au lieu du taux d'évaporation, nous avons montré que la mesure du taux de condensation permet aussi de mesurer l'humidité relative. Enfin, dans le quatrième article, nous avons montré que cette technologie peut-être multiplexée avec plusieurs capteurs fibrés utilisant une même diode pour la détection simultanée de l'humidité relative à plusieurs endroits.

En tant que premier auteur sur ces quatre articles, j'ai réalisé le développement du capteur plasmonique, l'intégration avec la fibre, le remplacement de la source supercontinuum par la diode laser, ainsi que toutes les mesures et leur analyse. De plus,

comme premier auteur, j'ai écrit la première version des quatre articles. Mes co-auteurs m'ont aidé dans la prise des mesures ainsi que pour la révision des manuscrits avant soumission aux différents journaux.

Dans le cas des liquides, les milieux aquatiques, qui présentent avec une plage dynamique de 1,32 UIR à 1,35 UIR, sont les plus importants en raison de leurs rôles importants dans les procédés biologiques et naturels de la vie. Il est donc souvent important de pouvoir mesurer la concentration d'un matériau soluble dans une solution aqueuse. Dans le cas des environnements gazeux, le cas le plus important est l'air ambiant. Par conséquent, il est généralement nécessaire de connaître les paramètres environnementaux tels que l'humidité ambiante, la température et la pression atmosphérique en raison de leur rôle dans notre vie quotidienne. Ainsi, il est essentiel de pouvoir mesurer ces paramètres environnementaux pour une variété d'applications allant des soins à domicile à des applications industrielles.

L'objectif principal de cette thèse était donc d'aborder ces sujets et de trouver une solution efficace pour mesurer en continu les paramètres environnementaux, en particulier l'humidité ambiante en raison de son importance dans l'industrie, la nature et la vie humaine. Pour cela, nous avons présenté une solution basée sur la fibre optique, en raison de ses nombreux avantages, tels que la capacité de télédétection non invasive, pour mesurer et surveiller simultanément l'humidité absolue et relative à différents endroits. Pour réaliser cet objectif, il était nécessaire d'essayer des idées novatrices dans tous ses aspects, y compris les processus de conception, de fabrication et d'essais.

D'abord, un état de l'art des technologies de détecteurs d'humidité, optiques et non optiques, a été présenté au chapitre 1. Les technologies non-optiques incluent des technologies mécaniques et électriques. Dans les méthodes optiques, nous avons étudié les différents types de capteurs d'humidité à fibre optique dont les capteurs 1.1 spectroscopiques, FBG, et les capteurs à base de RLP. Nous avons aussi examiné la théorie de la résonance plasmonique de surface pour les applications de détection dans les fibres optiques conventionnelles et microstructurées. Finalement, nous avons décrit les méthodologies qui sont utilisées pour atteindre les objectifs.

Comme mentionné précédemment, la surveillance des changements de l'indice de réfraction du liquide (IRL) joue un rôle majeur dans les applications chimiques et de bio-détection. Par conséquent, un article scientifique du chapitre 2 explique pourquoi il est

nécessaire d'améliorer à la fois les procédés de fabrication et de mesure pour obtenir un capteur à fibre optique de haute précision pour la réfractométrie.

Pour la fabrication, nous avons utilisé un procédé de polissage hybride contrôlable pour enlever de la gaine des fibres monomodes standards. Cela nous a permis de fabriquer des fibres en forme de D de haute qualité avec l'épaisseur de gaine résiduelle souhaitée (δ). Pour la caractérisation, on a essayé de réduire le bruit d'intensité de la source lumineuse dans le système de mesure. Pour cela, un supercontinuum a été utilisé dans le système de mesure pour atteindre de meilleures précisions.

Les capteurs fabriqués ont été testés dans des solutions liquides dont l'indice de réfraction variait entre 1,32 et 1,37, ce qui nous a permis d'obtenir la sensibilité spectrale de 5200 nm.RIU-1 avec une limite de détection de $5,8 \times 10^{-6}$ RIU. En outre, après avoir minimisé le bruit d'intensité, jusqu'à $RIN = 0,0011$, on peut obtenir un rapport signal sur bruit (SNR) de 12,6 dB avec une résolution de limite de détection de $3,7 \times 10^{-6}$ RIU pour le capteur. Ainsi, avec l'approche mesurant l'intensité, nous avons finalement réussi une amélioration de 57% par rapport à la mesure spectrale.

Dans le chapitre 3, nous avons étudié un capteur de rosée à fibre optique plasmonique dans lequel une sonde de profondeur à plasmon de surface est utilisée pour détecter la formation de rosée et le taux d'évaporation. Les mécanismes de détection de ce dispositif pour mesurer le point de rosée et l'humidité relative sont présentés dans ce chapitre. Ces mécanismes ont été construits sur la base des relations entre la résonance plasmonique de surface et le phénomène d'évaporation / condensation de l'eau sur une surface solide. Le capteur proposé permet de mesurer l'humidité relative ambiante en utilisant le concept de la dépendance du taux d'évaporation par rapport à l'humidité relative ambiante. Il serait intéressant de poursuivre cette étude lorsque la vapeur d'eau est remplacée par des gaz inflammables.

Le chapitre 4 a été consacré à un capteur à fibre optique basé sur la RPS qui nous permet d'effectuer des mesures d'humidité relative ambiante en utilisant la condensation de la vapeur d'eau. Nous avons commencé par une brève discussion sur la sensibilité des ondes plasmoniques de surface à la formation d'humidité à la surface d'une couche de métal. Ensuite, nous avons fourni une description théorique des dépendances de la condensation de vapeur à l'humidité et à la température ambiantes. Enfin, les résultats expérimentaux ont été présentés et s'accordent bien avec la théorie, confirmant l'efficacité

de la méthode que nous proposons, parce que l'humidité relative ambiante a été déterminée avec une erreur type de seulement 1,3%. C'est ainsi qu'une nouvelle méthode de mesure de l'humidité relative ambiante a été proposée, permettant de relier le taux de condensation de la vapeur à l'humidité relative en déterminant le taux de réduction de la transmission lumineuse dans notre capteur. Les résultats expérimentaux obtenus démontrent les bonnes performances de notre capteur d'humidité à fibre optique en termes de vitesse de réponse, de précision, de répétabilité et de réversibilité.

Dans le chapitre 5, nous avons décrit la conception, la fabrication et l'essai d'un système multicanal de capteurs de rosée et d'humidité à fibre optique. Le système proposé nous permet de détecter instantanément la formation d'humidité à travers ses transducteurs en ligne, incorporés dans chaque canal de fibre optique. Il permet également de mesurer simultanément l'humidité relative et le point de rosée/gel pour différents environnements avec une précision de 5% en utilisant notre méthode proposée basée sur la SPR et la condensation de la vapeur d'eau. Le capteur proposé mesure l'humidité relative ambiante lorsqu'elle est supérieure à 40% en utilisant une technique de sondage ordinaire. Cependant il n'y a pas de limitation de gamme de fonctionnement en utilisant notre technique de sonde, c'est-à-dire la technique de défilement.

6.2 Perspectives d'avenir

Ici, nous discutons brièvement de plusieurs directions potentielles pour des futures recherches, considérées comme étant pertinentes par l'auteur. L'une des caractéristiques remarquables de notre capteur d'humidité optique (MODHS) proposé dans cette thèse est sa capacité à mesurer l'humidité ambiante, même dans des conditions instables, ce que les capteurs d'humidité électriques actuels ne peuvent pas faire. Mais comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, il y avait un léger écart entre les valeurs de référence et les valeurs obtenues dans des conditions non-stationnaires. Pour corriger cet écart, il faut faire défiler la température du capteur assez rapidement, en améliorant les performances des refroidisseurs thermoélectriques du système de mesure. Une fois que les performances recherchées des refroidisseurs seront atteintes, celles du capteur MODHS seront nettement améliorées.

Notre système proposé de capteurs est un capteur d'humidité qui permet de mesurer la rosée ambiante et l'humidité à l'aide de ses transducteurs à fibre optique. Il serait intéressant de développer les MODHS pour pouvoir mesurer d'autres paramètres environnementaux, comme la température ambiante et la pression atmosphérique. Heureusement, la plate-forme des MODHS que nous avons conçu a la capacité d'être améliorée pour intégrer d'autres fonctionnalités comme un thermomètre ou un baromètre. S'il était possible d'ajouter quelques transducteurs à fibre optique comme des capteurs de température dans le système, le premier avantage notable serait de pouvoir retirer les fils de thermocouple du système de détection. L'objectif que nous tenterons de réaliser est d'introduire un nouveau transducteur thermo-optique dans les canaux MODHS.

Dans le cas de la barométrie, les variables environnementales telles que la pression atmosphérique (P), la température ambiante (T) et l'humidité relative (HR) sont inter-dépendants. Par conséquent, si on mesure la température et l'humidité ambiante avec notre capteur multicanal à fibres optiques, il devient alors possible de mesurer la pression atmosphérique. Cette dernière peut être déterminée empiriquement par la relation $P = f(T, RH)$ pendant la procédure d'étalonnage. Cet aspect pourrait l'objet de recherches complémentaires dans le futur.

REFERENCES

1. Z. Chen and C. Lu, Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms, *Sensor Letter* 3, (2005) 274–295.
2. T.L. Yeo, T. Sun, K.T.V. Grattan, Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement, *Sensors and Actuators A* 144 (2008) 280–295.
3. H. Farahani, R. Wagiran, and M. Nizar Hamidon, Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review, *Sensors* 14 (2014) 7881-7939.
4. L. Alwis, T. Sun, K.T.V. Grattan, Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement; Review of recent progress, *Measurement* 46 (2013) 4052–4074.
5. S. Sikarwar, B.C. Yadav, Optoelectronic humidity sensor: A review, *Sensors and Actuators A* 233 (2015) 54–70.
6. T.A. Blank, L.P. Eksperiandov, K.N. Belikov, Recent trends of ceramic humidity sensors development: A review, *Sensors and Actuators B* 228 (2016) 416–442.
7. B.H. Dijkink, M.M. Tomassen, J.H.A. Willemsen, W.G. Doorn, Humidity control during bell pepper storage, using a hollow fiber membrane contactor system, *Postharvest Biology and Technology* 32 (2004) 311–320.
8. S.W. Pixton, S. Warburton, Moisture content/relative humidity equilibrium of some cereal grains at different temperatures, *Journal of Stored Products Research* 6 (1971) 283–293.
9. V. Stojceska, P. Ainsworth, A. Plunkett, S. Ibanoglu, The effect of extrusion cooking using different water feed rates on the quality of ready-to-eat snacks made from food by-products, *Food Chemistry* 114 (2009) 226–232.
10. J.M. Arimi, E. Duggan, M. O’Sullivan, J.G. Lyng, E.D. O’Riordan, Effect of moisture content and water mobility on microwave expansion of imitation cheese, *Food Chemistry* 121 (2010) 509–516.
11. M.J. Mateo, D.J. O’Callaghan, C.D. Everard, M. Castillo, F.A. Payne, C.P. O’Donnell, Evaluation of on-line optical sensing techniques for monitoring curd moisture content and solids in whey during syneresis, *Food Research International* 43 (2010) 177–182.

12. A. Monti, A. Zatta, Root distribution and soil moisture retrieval in perennial and annual energy crops in Northern Italy, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 132 (2009) 252–259.
13. J.U.H. Eitel, P.E. Gessler, A.M.S. Smith, R. Robberecht, Suitability of existing and novel spectral indices to remotely detect water stress in *Populus* spp, *Forest Ecology and Management* 229 (2006) 170 – 182.
14. D.A. Sims, J.A. Gamon, Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features *Remote Sensing of Environment* 84 (2003) 526–537.
15. M. Ruiz-Altisent, L. Ruiz-Garcia, G.P. Moreda, R. Lu, N. Hernandez-Sanchez, E.C. Correa, B. Diezma, B. Nicolaï, J. García-Ramos, Sensors for product characterization and quality of specialty crops—a review, *Computers and Electronics in Agriculture* 74 (2010) 176–194.
16. M. Kaya, P. Sahay, C. Wang, Reproducibly reversible fiber loop ring down water sensor embedded in concrete and grout for water monitoring, *Sensors and Actuators B* 176 (2013) 803–810.
17. T. Sun, K.T.V. Grattan, S. Srinivasan, P.A.M. Basheer, B.J. Smith, H.A.Viles, Building stone condition monitoring using specially designed compensated optical fiber humidity sensors, *IEEE Sensors* 12 (2012) 1011–1017.
18. A. MacLean, W.C. Michie, S.G. Pierce, G. Thursby, B. Culshaw, C. Moran, N.B. Graham, Hydrogel/fibre optic sensor for distribution measurement of humidity and pH value, *SPIE Proceedings* 3330 (1998) 134–144.
19. M. Previati, D. Canone, I. Bevilacqua, G. Boetto, D. Pognant, S. Ferraris, Evaluation of wood degradation for timber check dams using time domain reflectometry water content measurements, *Ecological Engineering* 44 (2012) 259–268.
20. Y. Nara, K. Morimoto, N. Hiroyoshi, T. Yoneda, K. Kaneko, P.M. Benson, Influence of relative humidity on fracture toughness of rock: implications for subcritical crack growth International, *Journal of Solids and Structures* 49 (2012) 2471–2481.
21. A. Fujita, R. Kurose, S. Komori, Experimental study on effect of relative humidity on heat transfer of an evaporating water droplet in air flow, *International Journal of Multiphase Flow* 36 (2010) 244–247.

22. R. D. Koster et al., Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation, *Science* 305 (2004) 1138–1140.
23. M. Bacci, C. Cucci, A.A. Mencaglia, A.G. Mignani, Innovative sensors for environmental monitoring in museums, *Sensors* 8 (2008) 1984–1985.
24. M. Blanco, J. Coello, H. Iturriaga, S. MasPOCH, M. Rovira, Determination of water in ferrous lactate by near infrared reflectance spectroscopy with a fibre-optic probe, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 16 (1997) 255–262.
25. E. Shotton, N. Harb, The effect of humidity and temperature on the cohesion of powders, *Journal of Pharmacy and Pharmacology* 18 (1966) 175–178.
26. Y. Kang, H. Ruan, Y. Wang, F.J. Arregui, I.R. Matias, R.O. Claus, Nanostructured optical fibre sensors for breathing airflow monitoring, *Measurement Science Technology* 17 (2006) 1207–1210.
27. F.C. Favero, J. Villatoro, V. Pruneri, Microstructured optical fiber interferometric breathing sensor, *Journal of Biomedical Optics* 17 (2012) 037006.
28. O.S. Wolfbeis, Fiber-optic chemical sensors and biosensors, *Analytical Chemistry* 76 (2004) 3269–3284.
29. T. Cho, K. Choi, D. Seo, I. Kwon, J. Lee, Novel fiber optic sensor probe with a pair of highly reflected connectors and a vessel of water absorption material for water leak detection, *Sensors* 12 (2012) 10906–10919.
30. R.J.L. Ramsey, G.R. Stephenson, J.C. Hall, A review of the effects of humidity, humectants, and surfactant composition on the absorption and efficacy of highly water-soluble herbicides, *Pesticide, Biochemistry and Physiology* 82 (2005) 162–175.
31. Frost and Sullivan K14A report Global Humidity and Moisture Sensors Market, Forecast to 2023” (March 2017) <http://www.frost.com/sublib/display-report.do?id=K14A-01-00-00-00>
32. S. Pokhrel, B. Jeyaraj, K.S. Nagaraja, Humidity-Sensing Properties of ZnCr₂O₄-ZnO Composites, *Mater. Lett.* 22 (2003) 3543–3548.
33. Y.S. Chen, Y. Li, M.J. Yang, Humidity Sensitive Properties of NaPSS/MWNTs Nanocomposites, *J. Mater. Sci.* 40 (2005) 5037–5039.

34. Y. Zhang, K. Yu, D. Jiang, Z. Zhu, H. Geng, L. Luo, Zinc Oxide Nanorod and Nanowire for Humidity Sensor, *Appl. Surf. Sci.* 242 (2005) 212–217.
35. Q. Kuang, C.Lao, Z. L. Wang, Z. Xie, L. Zheng, High-Sensitivity Humidity Sensor Based on a Single SnO₂ Nanowire, *J. Am. Chem. Soc.* 129 (2007) 6070–6071.
36. A. Kassas, Humidity Sensitive Characteristics of Porous Li-Mg-Ti-O-F Ceramic Materials, *Am. J. Anal. Chem.* 04 (2013) 83–89.
37. K. Wang, X. Qian, L. Zhang, Y. Li, H. Liu, Inorganic-Organic P-N Hetero-junction Nano-tree Arrays for a High-Sensitivity Diode Humidity Sensor, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 5 (2013) 5825–5831.
38. Q.A. Shams, C.G. Burkett, T.S. Daniels, G. Tsoucalas, T. Comeaux, B.S. Sealey, M.L. Fox, Characterization of Polymer-Coated MEMS Humidity Sensors for Flight Applications NASA/TP (2005) 213770.
39. P.R. Wiederhold, *Water Vapor Measurements Marcel Dekker* (1997).
40. Z.M. Rittersma, Recent achievements in miniaturized humidity sensors a review of transduction techniques, *Sens. Actuators A* 96 (2002) 196–210.
41. S. Sikarwar and B.C. Yadav, *Sens. and Actuat. A* 233 (2015) 54-70.
42. Y. Sakai, Y. Sadaoka, M. Matsuguchi, Humidity Sensors Based on Polymer Thin Films *Sens. Actuators B Chem.* 35 (1996) 85–90.
43. N. Yamazoe, Y. Shimizu, Humidity Sensors: Principles and Applications, *Sens. Actuators A* 10 (1986) 379–398.
44. S.G. Reddy, B. B. Narakathu, M.Z. Atashbar; M. Rebros, E. Rebrosova, M. K. Joyce, Fully Printed Flexible Humidity, *Sensor Procedia Eng.* 25 (2011)120–123.
45. Z. Ahmad, Q. Zafar, K. Sulaiman, R. Akram, K. S. Karimov A Humidity Sensing Organic-Inorganic Composite for Environmental Monitoring, *Sensors* 13 (2013) 3615–3624.
46. A. Salehi, D. Kalantari, A. Goshtasbi, Rapid Response of Au/Porous-GaAs Humidity Sensor at Room Temperature.” In Proceedings of 2006 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices Perth, Australia, December (2006) 125–128.
47. C. Kao and G. Hockham, Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies, *Proc. IEEE* 113 (1966) 1151–1158.

48. L. N. Binh, Digital processing optical transmission and coherent receiving techniques, Boca Raton, FL: CRC Press (2014).
49. B.C. Yadav, C. Ramesh Yadav, K. Prabhat Dwivedi, Sol-gel processed (Mg-Zn-Ti) oxide nanocomposite film deposited on prism base as anopto-electronic humidity sensor, *Sens. Actuators B* 148 (2010) 413–419.
50. R. Prakash, A.K. Somani, R.C. Viswanath, S. Aiyer, Charge transfer complex-forming dyes incorporated in solid polymer electrolyte for optical humidity sensing, *Sens. Actuators B* 80 (2001) 141–148.
51. B.C. Yadav, M. Singh, C.D. Dwivedi, Optical characterization and humidity sensing properties of praseodymium oxide, *Sen. Trans. J.* 125 (2011) 68–75.
52. J. Yi-Jun, L. Meng, J. H. Chao, Single dielectric columnar thin film as a humidity sensor *Sens. Actuators B* 149 (2010) 67–70.
53. P. Mohan, R. Shinta, J. Fujiwara, H. Takahashi, D. Mott, Y. Matsumura, et al., Boehmite nanorod/gold nanoparticle nano-composite film for an easy-to-use optical humidity sensor, *Sens. Actuators B* 168 (2012) 429–435.
54. A. K. Sharma, A. Gupta, Design of a plasmonic optical sensor probe for humidity-monitoring, *Sens. Actuators B* 188 (2013) 867–871.
55. J. J. Steele, C. Andy Popta, M. Matthew Hawkeye, C. Jeremy Sit, J. M. Brett, Nanostructured gradient index optical filter for high-speed humidity sensing, *S Sens. Actuators B* 120 (2006) 213–219.
56. Y. J. Liu, J. Shi, F. Zhang, H. Liang, J. Xu, A. Lakhtakia, High-speed optical humidity sensors based on chiral sculptured thin films, *Sens. Actuators B* 156 (2011) 593–598.
57. J. Dominic, J. Wales, R. M. Parker, J. C. Gates, M. C. Grossel, P. G. R. Smith, An investigation into relative humidity measurement using analumino silicate sol-gel thin film as the active layer in an integrated optical Bragg grating refractometer, *Sens. Actuators B* 188 (2013) 857–866.
58. W. Zhang, L. Chen, Z. Yang, J. Peng, An optical humidity sensor based on Li₃PO₄ hollow nanospheres, *Sens. Actuators B* 155 (2011) 226–231.

59. W. Zhang, C. Feng, Z. Yang, An inward replacement/etching route to controllable fabrication of zinc sulfide nanotube arrays for humidity sensing, *Sens. Actuators B* 165 (2012) 62–67.
60. B.C. Yadav, Sol-gel processed Titania films on prism substrates as an optical moisture *Sensors Sens. Trans J.* 79 (2007) 1217–1224.
61. B.C. Yadav, N.K. Pandey, R. Srivastava, P. Sharma, Study of optical humidity sensor based on titania films fabricated by sol-gel and thermal evaporation methods, *MeasureSci. Technol.* 18 (2007) 1–5.
62. K.R. Kribich, R. Copperwhite, H. Barry, B. Kolodziejczyk, J.-M. Sabattié, K.O'Dwyer, B.D. MacCraith, Novel chemical sensor/biosensor platform based on optical multimode interference (MMI) couplers, *Sens. Actuators B* 107 (2005) 188–192.
63. B.C. Yadav, R.K. Shukla, L.M. Bali, Sol-gel Processed TiO₂ films on U-shaped glass-rods as Optical Humidity Sensor, *J. Pure Appl. Phys.* 43 (2005) 51–55.
64. B.C. Yadav, N. Verma, S. Singh, Nanocrystalline SnO₂-TiO₂ thin film deposited on the base of equilateral prism as an opto-electronic humidity sensor, *Optics Laser Technol.* 44 (2012) 1681–1688.
65. I.R. Matias, F.J. Arregui, R.O. Claus, Optical fibre sensors, *Encycl. Sens.* 7 (2006) 163–181.
66. Hill, K.O.; Meltz, G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. *J. Light. Technol.* 15 (1997) 1263–1276.
67. Z. Zhou, W. Liu, Y. Huang, H. Wang, H. Jianping, M. Huang, O. Jinping, Optical fiber Bragg grating sensor assembly for 3D strain monitoring and its case study in highway pavement, *Mech. Syst. Signal Process.* 28 (2012) 36–49.
68. N. A. David, P. M. Wild, N. Djilali, Parametric study of a polymer-coated fibre-optic humidity sensor, *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012) 35103-35109.
69. G. Berruti, M. Consales, M. Giordano, L. Sansone, P. Petagna, S. Buontempo, G. Breglio, A. Cusano, Radiation hard humidity sensors for high energy physics applications using polyimide-coated fiber Bragg gratings sensors, *Sens. Actuators B Chem.* 177 (2013) 94–102.

70. Y. Lin, Y. Gong, Y. Wu, H. Wu, Polyimide-coated fiber Bragg grating for relative humidity sensing, *Photonic Sensors* 5 (2015) 60–66.
71. S. F. H. Correia, P. Antunes, E. Pecoraro, P. P. Lima, H. Varum, L. D. Carlos, R.A.S. Ferreira, P. S. André, Optical Fiber Relative Humidity Sensor Based on a FBG with a Di-Ureasil Coating, *Sensors* 12 (2012) 8847–8860.
72. A. J. Swanson, S. G. Raymond, S. Janssens, R. D. Breukers, M. D. Bhuiyan, Lovell-Smith, J.W. Waterland, M.R. Development of novel polymer coating for FBG based relative humidity sensing, *Sens. Actuators A Phys.* 249 (2016) 217–224.
73. B. N. Shivananju, S. Yamdagni, R. Fazuldeen, A. Kumar, S. P. Nithin, M.M. Varma, S. Asokan, Highly Sensitive Carbon Nanotubes Coated Etched Fiber Bragg Grating Sensor for Humidity Sensing, *IEEE Sens.* 14 (2014) 2615–2619.
74. Y. Wang, C. Shen, W. Lou, F. Shentu, C. Zhong, X. Dong, L. Tong, Fiber optic relative humidity sensor based on the tilted fiber Bragg grating coated with graphene oxide. *Appl. Phys. Lett.* 109 (2016) 31107.
75. S. W. James, R. P. Tatam, Optical fibre long-period grating sensors: Characteristics and application, *Meas. Sci. Technol.* 14 (2003) 49-55.
76. A. D. Kersey, M.A. Davis, H.J. Patrick, M. LeBlanc, K.P. Koo, C. G. Askins, M.A. Putnam, E.J. Friebele, Fiber grating sensors, *J. Light. Technol.* 15 (1997) 1442–1463.
77. M. Consales, G. Berruti, A. Borriello, M. Giordano, S. Buontempo, G. Breglio, A. Makovec, P. Petagna, A. Cusano, Nanoscale TiO₂-coated LPGs as radiation-tolerant humidity sensors for high-energy physics applications, *Opt. Lett.* 39 (2014) 4128–4131.
78. A.M. Vengsarkar, P.J. Lemaire, J.B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, J.E. Sipe, Long-period fiber gratings as band-rejection filters, *J. Light. Technol.* 14 (1996) 58–65.
79. T. Venugopalan, T. Sun, K.T.A Grattan, Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring, *Sens. Actuators A Phys.* 148 (2008) 57–62.
80. A. Cusano, A. Iadicicco, P. Pilla, L. Contessa, S. Campopiano, A. Cutolo, M. Giordano, Mode transition in high refractive index coated long period gratings, *Opt. Express* 14 (2006) 19–34.
81. Y. Liu, L. Wang, M. Zhang, D. Tu, X. Mao, Y. Liao, Long-Period Grating Relative Humidity Sensor with Hydrogel Coating, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 19 (2007) 880–882.

82. K.M. Tan, S.C. Tjin, C.C. Chan, H. Rahardjo, High relative humidity measurements using gelatin coated long-period grating sensors, *Sens. Actuators B Chem.* 110 (2005) 335–341.
83. M. Konstantaki, S. Pissadakis, S. Pispas, N. Madamopoulos, N.A. Vainos, Optical fiber long-period grating humidity sensor with poly (ethylene oxide)/cobalt chloride coating, *Appl. Opt.* 45 (2006) 4567–4571.
84. M. Fu, Y. Lin, W. Liu, C. Wu, Fiber-optic humidity sensor based on an air-gap long period fiber grating, *Opt. Rev.* 18 (2011) 93–95.
85. B.H. Lee, Y.H. Kim, K.S. Park, J.B. Eom, M.J. Kim, B.S. Rho, H.Y. Choi, Interferometric fiber optic sensors, *Sensors* 12 (2012) 2467–2486.
86. H. Fu, X. Shu, A. Zhang, W. Liu, L. Zhang, S. He, I. Bennion, Implementation and characterization of liquid-level sensor based on a long-period fiber grating Mach–Zehnder interferometer, *IEEE Sensors Journal* 11 (2011) 2878–2882.
87. O. Frazão, L.M. Marques, S. Santos, J.M. Baptista, J.L. Santos, Simultaneous measurement for strain and temperature based on a long-period grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror, *IEEE Photonics Technology Letters* 18 (2006) 2407–2409.
88. A. Wang, H. Xiao, J. Wang, Z. Wang, W. Zhao, R.G. May, Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors, *Journal of Lightwave Technology* 19 (2001) 1495.
89. Short, S.X.; De Arruda, J.U.; Tselikov, A.A.; Blake, J.N. Elimination of birefringence induced scale factor errors in the in-line Sagnac interferometer current sensor, *J. Light. Technol.* 16 (1998) 1844–1850.
90. J. Wang, H. Liang, X. Dong, Y. Jin, A Temperature-Insensitive Relative Humidity Sensor by using Polarization Maintaining Fiber-Based Sagnac Interferometer, *Microw. Opt. Technol. Lett.* 55 (2013) 2305–2307.
91. L.P. Sun, J. Li, L. Jin, Y. Ran, B.O. Guan, High-birefringence microfiber Sagnac interferometer based humidity sensor, *Sens. Actuators B Chem.* 231 (2016) 696–700.
92. L.H. Chen, T. Li, C.C. Chan, R. Menon, P. Balamurali, M. Shaillender, B. Neu, X.M. Ang, P. Zu, W.C. Wong, K.C. Leong, Chitosan based fiber-optic Fabry–Perot humidity sensor, *Sensors and Actuators B* 169 (2012) 167–172.

93. J. Ascorbe, J. Corres, F. J. Arregui, I. R. Matias, S. C. Mukhopadhyay, High Sensitivity Optical Structures for Relative Humidity Sensing. In *Sensors for Everyday Life*; Springer International Publishing: Gewerbestrasse, Switzerland, (2017) 55–79.
94. C. Huang, W. Xie, D. Lee, C. Qi, M. Yang, M. Wang, J. Tang, Optical Fiber Humidity Sensor with Porous TiO₂/SiO₂/TiO₂ Coatings on Fiber Tip, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 27 (2015) 1495–1498.
95. C. Huang, W. Xie, M. Yang, J. Dai, B. Zhang, S. Member, Optical Fiber Fabry–Pérot Humidity Sensor Based on Porous Al₂O₃ Film, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 27 (2015) 2127–2130.
96. J. S. Santos, I. M. Raimundo, C. M. B. Cordeiro, C. R. Biazoli, C. Gouveia, P. Jorge, Characterisation of a Nafion film by optical fibre Fabry–Perot interferometry for humidity sensing, *Sens. Actuators B Chem.* 196 (2014) 99–105.
97. C. Wang, B. Zhou, H. Jiang, S. He, Agarose Filled Fabry–Perot Cavity for Temperature Self-Calibration Humidity Sensing, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 28 (2016) 2027–2030.
98. P.S.J. Russell, Photonic-Crystal Fibers, *J. Light. Technol.* 24 (2006) 4729–4749.
99. D. Lopez-Torres, C. Elosua, J. Villatoro, J. Zubia, M. Rothhardt, K. Schuster, F. J. Arregui, Photonic crystal fiber interferometer coated with a PAH/PAA nanolayer as humidity sensor, *Sens. Actuators B* 242 (2017) 1065–1072.
100. J. Mathew, Y. Semenova, G. Farrell, Experimental demonstration of a high-sensitivity humidity sensor based on an Agarose-coated transmission-type photonic crystal fiber interferometer, *Appl. Opt.* 52 (2013) 3884–3890.
101. J. Mathew, Y. Semenova, G. Farrell, Effect of coating thickness on the sensitivity of a humidity sensor based on an Agarose coated photonic crystal fiber interferometer, *Opt. Express* 21 (2013) 73–78.
102. T. Li, X. Dong, C.C. Chan, K. Ni, S. Zhang, P.P. Shum, Humidity Sensor with a PVA-Coated Photonic Crystal Fiber Interferometer, *IEEE Sens.* 13 (2013) 2214–2216.
103. J.M. Corres, F. Arregui, I.R. Matías, Sensitivity optimization of tapered optical fiber humidity sensors by means of tuning the thickness of nanostructured sensitive coatings, *Sens. Actuators B Chem.* 122 (2007) 442–449.

104. J.M. Corres, J. Bravo, I.R. Matias, F.J. Arregui, Nonadiabatic tapered single-mode fiber coated with humidity sensitive nanofilms, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 18 (2006) 935–937.
105. A.B. Socorro, I. del Villar, J.M. Corres, F.J. Arregui, I.R. Matias, Tapered Single-Mode Optical Fiber pH Sensor Based on Lossy Mode Resonances Generated by a Polymeric Thin-Film, *IEEE Sens.* 12 (2012) 2598–2603.
106. Y. Tan, L.P. Sun, L. Jin, J. Li, B.O. Guan, Temperature-Insensitive Humidity Sensor Based on a Silica Fiber Taper Interferometer, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 25 (2013) 2201–2204.
107. Fu, H.; Jiang, Y.; Ding, J.; Zhang, J. Low Temperature Cross-Sensitivity Humidity Sensor Based on a U-Shaped Microfiber Interferometer, *IEEE Sens.* 17 (2017) 644–649.
108. M. R. K. Soltanian, A. S. Sharbirin, M. M. Ariannejad, I. S. Amiri, Variable Waist-Diameter Mach–Zehnder Tapered-Fiber Interferometer as Humidity and Temperature Sensor, *IEEE Sens.* 16 (2016) 5987–5992.
109. S. Silva, E.G.P. Pachon, M.A.R. Franco, J.G. Hayashi, F.X. Malcata, O. Frazão, P. Jorge, C.M.B. Cordeiro, Ultrahigh-sensitivity temperature fiber sensor based on multimode interference, *Appl. Opt.* 51 (2012) 3236–3242.
110. J. An, Y. Jin, M. Sun, X. Dong, Relative Humidity Sensor Based on SMS Fiber Structure with Two Waist-Enlarged Tapers, *IEEE Sens.* 14 (2014) 2683–2686.
111. Miao, Y.; Ma, X.; He, Y.; Zhang, H.; Zhang, H.; Song, B.; Liu, B.; Yao, J. Low-temperature-sensitive relative humidity sensor based on tapered square no-core fiber coated with SiO₂ nanoparticles. *Opt. Fiber Technol.* 29 (2016) 59–64.
112. I. Del Villar, A. B. Socorro, J. M. Corres, F. J. Arregui, I. R. Matias, Optimization of Sensors Based on Multimode Interference in Single-Mode–Multimode–Single-Mode Structure, *J. Light. Technol.* 31 (2013) 3460–3468.
113. B. Gu, M. Yin, A.P. Zhang, J. Qian, S. He, Optical fiber relative humidity sensor based on FBG incorporated thin-core fiber modal interferometer, *Optics Express* 19 (2011) 4140–4146.

114. C.C. Lam, R. Mandampambil, T. Sun, K.T.V. Grattan, S.V. Nanukuttan, S.E. Taylor, P.A. Basheer, Optical fiber refractive index sensor for chloride ion monitoring, *IEEE Sensors Journal* 9 (2009) 525–532.
115. L. Alwis, T. Sun, K.T.V. Grattan, Optimization of a long period grating distal probe for temperature and refractive index measurement, *Procedia Engineering* 47 (2012) 718–721.
116. Zheng, Y.; Dong, X.; Zhao, C.; Li, Y.; Shao, L.; Jin, S. Relative Humidity Sensor Based on Microfiber Loop Resonator, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 13 (2013) 1–4.
117. Wang, P.; Gu, F.; Zhang, L.; Tong, L. Polymer microfiber rings for high-sensitivity optical humidity sensing, *Appl. Opt.* 50 (2011) 7–10.
118. A. K. Mallik, D. Liu, V. Kavungal, Q. Wu, G. Farrell, Y. Semenova, Agarose coated spherical micro resonator for humidity measurements, *Opt. Express* 24 (2016) 21216–21227.
119. K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt (Eds.), *Optical Fiber Sensor Technology, Volume 4: Chemical and Environmental Sensing*, Kluwer Academic Publishers (1999).
120. S. Tao, C.B. Winstead, R. Jindal, J.P. Singh, Optical-fiber sensor using tailored porous sol-gel fiber core, *IEEE Sens.* 4 (2004) 322–328.
121. M. Ando, T. Kobayashi, M. Harutu, Humidity-sensitive optical absorption of CO₃O₄ film, *Sens. Actuators B* 32 (1996) 157–160.
122. M. Hernández, C.R. Zamarreño, I.R. Matías, F.J. Arregui, Optical fiber humidity sensor based on surface plasmon resonance in the infra-red region, *J. Phys. Conf. Ser.* 178 (2009) 12019.
123. C.R. Zamarreño, M. Hernaez, I. del Villar, I.R. Matias, F.J. Arregui, Tunable humidity sensor based on ITO-coated optical fiber, *Sens. Actuators B Chem.* 146 (2010) 414–417.
124. P. Sanchez, C.R. Zamarreño, M. Hernaez, I.R. Matias, F.J. Arregui, Optical fiber refractometers based on Lossy Mode Resonances by means of SnO₂ sputtered coatings, *Sens. Actuators B Chem.* 202 (2014) 154–159.
125. J. Ascorbe, J.M. Corres, I.R. Matias, F.J. Arregui, High sensitivity humidity sensor based on cladding-etched optical fiber and lossy mode resonances, *Sens. Actuators B Chem.* 233 (2016) 7–16.

126. M. Hernández, I. del Villar, C.R. Zamarreño, F.J. Arregui, I.R. Matias, Optical fiber refractometers based on lossy mode resonances supported by TiO₂ coatings, *Appl. Opt.* 49 (2010) 3980–3985.
127. Zubiarte, P.; Zamarreño, C.R.; del Villar, I.; Matias, I.R.; Arregui, F.J. D-shape optical fiber pH sensor based on Lossy Mode Resonances (LMRs). In Proceedings of the 2015 IEEE Sensors, Busan, Korea, November (2015).
128. P. Sanchez, C.R. Zamarreño, M. Hernaez, I. del Villar, C. Fernandez-Valdivielso, I.R. Matias, F.J. Arregui, Lossy mode resonances toward the fabrication of optical fiber humidity sensors, *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012) 14002.
129. P.J. Rivero, A. Urrutia, J. Goicoechea, F.J. Arregui, Optical fiber humidity sensors based on Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) and Lossy-mode resonance (LMR) in overlays loaded with silver nanoparticles, *Sens. Actuators B Chem.* 173 (2012) 244–249.
130. A. K. Sharma, A. Gupta, Design of a plasmonic optical sensor probe for humidity-monitoring, *Sens. Actuators B* 188 (2013) 867–871.
131. P. Mohan, R. Shinta, J. Fujiwara, H. Takahashi, Y. Matsumura, Boehmite nanorod/gold nanoparticle/nanocomposite film for an easy-to-use optical humidity sensor, *Sens. Actuators B* 168 (2012) 429–435.
132. M. Hernández, C. R. Zamarreño, I. R. Matías, F. J. Arregui, Optical fiber humidity sensor based on surface plasmon resonance in the infrared region, *Journal of Physics: Conference Series* 178 (2009) 012019.
133. E. Kretschmann, and Z. H. Raether, Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light, *Phys. Sci.* 23 (1968) 2135–6.
134. S.F. Wang, M.H. Chiu, J.C. Hsu, R.S. Chang and F.T. Wang theoretical analysis and experimental evaluation of D-type optical fiber sensor with a thin gold film, *Opt. Com.* 253 (2005) 283–9.
135. M. Kanso, S. Cuenot and G. Louarn, Sensitivity of optical fiber sensor based on surface plasmon resonance: modeling and experiments, *Plasmonics* 3 (2008) 49–57.
136. R. C. Jorgenson and S. S. Yee Control of the dynamic range and sensitivity of a surface plasmon resonance based fiber optic sensor, *Sensors Actuators A* 43(1994) 44–8.

137. Y.J. Chang, Y.C. Chen, H.L. Kuo and P.K. Wei Nanofiber optic sensor based on the excitation of surface plasmon wave near fiber tip, *J. Biomed. Opt* 11 (2006) 014032.
138. R. K. Verma, A. K. Sharma, and B.D. Gupta Surface plasmon resonance based tapered fiber optic sensor with different taper profiles, *Opt. Com.* 281 (2008) 1486–1491.
139. A. Hassani and M. Skorobogatiy Design criteria for microstructured-optical-fiber-based surface-plasmon-resonance sensors, *J. Opt. Soc. Am. B* 24 (2007) 1423–1429.
140. W. Brutsaert, *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications*, Dordrecht, Holland, (1982).
141. F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th ed. John Wiley and Sons* (2007).
142. Y. C. Lin, Characteristics of optical fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance, *Microwave & optical technology letters* 55 (2013) 574-576.
143. M.H. Yang, H.L. Liu, D.H. Zhang, X.L. Tong, Hydrogen sensing performance comparison of Pd layer and Pd/WO₃ composite thin film coated on side-polished single and multimode fibers, *Sens. Actuators B* 149 (2010) 161–164.
144. J. Senosiain, I. Díaz, A. Gastón, and J. Sevilla, High Sensitivity Temperature Sensor Based on Side-Polished Optical Fiber, *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement* 50 (2001) 1656-1660.
145. F. Villuendas, J. Pelayo, Optical fibre device for chemical sensing based on surface plasmon excitridon, *Sens & Actuaors A* 23 (1990) 1142–1145.
146. R. Slavík, J. Homola, E. Brynda, A miniature fiber optic surface plasmon resonance sensor for fast detection of staphylococcal enterotoxin, *Biosensors and Bioelectronics* 17 (2002) 591-595.
147. X. Fan, I. M. White, S. I. Shopova, H. Zhu, Y. Su, Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: A review, *Analytica Chimica Acta* 620 (2008) 8–26.
148. A. Gaston, I. Lozano, F. Perez, F. Auza, and J. Sevell Evanescent Wave Optical-Fiber Sensing (Temperature, Relative Humidity, and pH Sensors), *IEEE Sensors Journal* 3 (2000) 67-72.
149. S.M. Tseng, C.L. Chen, Side-polished fibers, *Appl. Opt.* 31 (1992) 3438–3447.

150. M. Tseng, S. Pin Ma, High-performance Side polished Fibers and applications as liquid crystal clad fiber polarizers, *Lightwave Technology* 15 (1997) 1554-1558.
151. H. Esmailzadeh, E. Arzi, M. Mozafari, A. Hassani, A broadband optical fiber based inline polarizer for telecom wavelength range, *Sensors and Actuators A* 185 (2012) 59-65.
152. R.K. Varshney, A. Singh, K. Pande, B.P. Pal, Side-polished fiber based gain flattening filter for erbium doped fiber amplifiers, *Opt. Com.* 271 (2007) 441-444.
153. R. Verma and B. D. Gupta, A novel approach for simultaneous sensing of urea and glucose by SPR based optical fiber multianalyte sensor, *Analyst* 139 (2014) 1449-1455.
154. N. Cennamo, G. D'Agostino, R. Galatus, L. Bibbò, M. Pesavento, L. Zeni, Sensors based on surface plasmon resonance in a plastic optical fiber for the detection of trinitrotoluene, *Sensors and Actuators B*, 188 (2013) 221- 226.
155. M.J.F. Digonnet, J.R. Feth, L.F. Stokes, H.J. Shaw, Measurement of the core proximity in polished fiber substrates and couplers, *Opt. Lett.* 10 (1985) 463-465.
156. H. Raether, Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings, *Springer-Verlag, Berlin, New York* (1988).
157. H. Esmailzadeh, E. Arzi, F. Légaré, A. Hassani, Controllable Hybrid Side-Polishing Method (CHPM) for Optical Fibers by Combination of Polishing and Etching, *Journal of Modern Optics* 60 (2013) 37-41.
158. A. Yariv, Optical Electronics in Modern Communications, 5th edition, *Oxford Univ. Press*, Ch. 10 (1997).
159. B. R. Biedermann, W. Wieser, C. M. Eigenwillig, T. K. and R. Huber, Dispersion, coherence and noise of Fourier domain mode locked lasers, *Optics Express* 17 (2009) 9947-9961.
160. D. Wiedenmann, P. Schnitzer, C. Jung, M. Grabherr, R. Jager, R. Michalzik, and K. J. Ebeling, Noise characteristics of 850 nm single-mode vertical cavity surface emitting lasers, *Applied Physics Letters* 73 (1998) 717-719.
161. G. E. Obarski and P. D. Hale, How to measure relative intensity noise in lasers, *Laser Focus World* 35 (1999) 273-278.
162. N. R. Newbury, B. R. Washburn, and K. L. Corwin, Noise amplification during supercontinuum generation in microstructure fiber, *Optics Letters* 28 (2003) 944-946.

163. F. Quinlan, T. M. Fortier, H. Jiang, A. Hati, C. Nelson, Y. Fu, Exploiting shot noise correlations in the photodetection of ultrashort optical pulse trains, *Nature Photonics* 7 (2013) 290-293.
164. U. Møller, S. T. Sørensen, C. Jakobsen, J. Johansen, P. M. Moselund, C. L. Thomsen, and O. Bang, Power dependence of supercontinuum noise in uniform and tapered PCFs, *Optics Express* 20 (2012) 2851-2857.
165. J. Homola, "Electromagnetic Theory of Surface Plasmons," Berlin Springer, chapter 1 (2006).
166. H. S. Jang, K. N. Park, C. D. Kang, J. P. Kim, S. J. Sim, K. S. Lee, Optical fiber SPR biosensor with sandwich assay for the detection of prostate specific antigen, *Optics Communications* 282 (2009) 2827–2830.
167. H.-Yu Lin, W.-Hu Tsai, Yu-C. Tsao, and B.-C. Sheu, Side-polished multimode fiber biosensor based on surface plasmon resonance with halogen light, *Applied Optics* 46 (2007) 800-806.
168. N. D. Herrera, O. Esteban, M.-C. Navarrete, A. G.-Cano, E. Benito-Penad, G. Orellana, Improved performance of SPR sensors by a chemical etching of tapered optical fibers, *Optics and Lasers in Engineering* 49 (2011) 1065–1068.
169. Y. H. Huang, H. P. Ho, S. Y. Wu, and S. K. Kong, Detecting Phase Shifts in Surface Plasmon Resonance: A Review, *Advances in Optical Technologies* 2012 (2011) 1-12.
170. J. Homola, R. Slavik, J. Čtyroký, Interaction between fiber modes and surface plasmon waves: spectral properties, *Optics Letters* 22 (1997) 1403-1405.
171. B. Lee, S. Roh, J. Park, Current status of micro- and nano-structured optical fiber sensors *Optical Fiber Technology* 15 (2009) 209–221.
172. L. Mescia and F. P. enzano, Advances on Optical Fiber Sensors, *Fibers* 2 (2014) 1-23.
173. B. Sciacca, A. Francois, P. Hoffmann, T. M. Monro, Multiplexing of radiative-surface plasmon resonance for the detection of gastric cancer biomarkers in a single optical fiber, *Sensors and Actuators B* 183 (2013) 454-458.
174. J. L. Monteith, Dew Quart, *J. Roy. Meteorol. Soc.* **83** (1957) 322–341.
175. L. Buck, New equations for computing vapor pressure and enhancement factor, *J. Appl. Meteorol.* 20 (1981) 1527–1532.

176. M. G. Lawrence, The relationship between relative humidity and the dew point temperature in moist air: A simple conversion and applications *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 86 (2005) 225–233.
177. C. Y. Lee and G. B. Lee, Humidity sensors: A review, *Sens. Lett.* 3 (2005) 1–14.
178. Z. M. Rittersma, Recent achievements in miniaturized humidity sensors- a review of transduction techniques, *Sens. Actuators A* 96 (2002) 196–210.
179. T. L. Yeo, T. Sun, and K. T. V. Grattan, Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement, *Sens. Actuators A* 144 (2008) 280–295.
180. L. Alwis, T. Sun, and K. T. V. Grattan, Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: Review of recent progress, *Measurement* 46 (2013) 4052–4074.
181. S. J. Glenn, B. M. Cullum, R. B. Nair, D. A. Nivens, C. J. Murphy, and S. M. Angel, Lifetime-based fiber-optic water sensor using a luminescent complex in a lithium-treated Nafion membrane, *Anal. Chim. Acta* 448 (2001) 1–8.
182. M. Bedoya, M. T. Diez, M. C. Moreno-Bondi, and G. Orellana, Humidity sensing with a luminescent Ru(II) complex and phase-sensitive detection, *Sens. Actuators B* 113 (2006) 573–581.
183. Y. Liu, Y. Zhang, H. Lei, J. Song, H. Chen, and B. Li, Growth of well arrayed ZnO nanorods on thinned silica fiber and application for humidity sensing, *Opt Express* 20 (2012) 19404–19411.
184. J. Mathew, Y. Semenova, and G. Farrell, A fiber bend based humidity sensor with a wide linear range and fast measurement speed, *Sens. Actuators A* 174 (2012) 47–51.
185. S. F. H. Correia, P. Antunes, E. Pecoraro, P. P. Lima, H. Varum, L. D. Carlos, R. A. S. Ferreira, and P. S. André, Optical fiber relative humidity sensor based on a FBG with a di-ureasil coating, *Sensors* 12 (2012) 8847–8860.
186. T. Venugopalan, T. Sun, and K. T. V. Grattan, Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring, *Sens. Actuators A* 148 (2008) 57–62.
187. M. Consales, A. Buosciolo, A. Cutolo, G. Breglio, A. Irace, S. Buontempo, P. Petagna, M. Giordano, and A. Cusano, Fiber optic humidity sensors for high-energy physics applications at CERN, *Sens. Actuators B* 159 (2011) 66–74.

188. J. Mathew, Y. Semenova, and G. Farrell, Fiber optic hybrid device for simultaneous measurement of humidity and temperature, *IEEE Sensors* 13 (2013) 1632–1636.
189. J. Mathew, Y. Semenova, and G. Farrell, Photonic crystal fiber interferometer for dew detection, *J. Lightwave Technol* 30 (2012) 1150–1155.
190. S. M. Kostritskii, A. A. Dikevich, Yu. N. Korkishko, and V. A. Fedorov, Dew point measurement technique utilizing fiber cut reflection, *Proc. SPIE*, (2009) 7356–73561.
191. B. Bao, H. Fadaei, and D. Sinton, Detection of bubble and dew point using optical thin-film interference, *Sens. Actuators B* 207 (2015) 640–649.
192. J. Homola, Optical fiber sensor based on surface plasmon excitation, *Sens. Actuators B* 29 (1995), 401–5.
193. W. B. Lin, N. Jaffrezic-Renault, and H. Gagnaire, The effects of polarization of the incident light-modeling and analysis of a SPR multimode optical fiber sensor, *Sens. Actuators A* 84 (2000) 198–204.
194. A. Hassani and M. Skorobogatiy, Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics, *Opt. Express* 14 (2006) 1616–11621.
195. H. Esmailzadeh, E. Arzi, F. Légaré, and A. Hassani, Boundary integral method to calculate the sensitivity temperature error of microstructured fiber plasmonic sensors, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46 (2013) 325103.
196. P. J. Rivero, A. Urrutia, J. Goicoechea, and F. J. Arregui, Optical fiber humidity sensors based on Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) and Lossy-mode resonance (LMR) in overlays loaded with silver nanoparticles, *Sens. Actuators B* 173 (2012) 244–249.
197. K. Iwamia, S. Kanekoa, R. Shintab, J. Fujiharaa, H. Nagasakia, Y. Matsumurab, and N. Umedaa, Plasmon-resonance dew condensation sensor made of gold-ceramic nano-composite and its application in condensation prevention, *Sens. Actuators B* 184 (2013) 301–305.
198. M. Rothmaier, M. P. Luong, and F. Clemens, Textile pressure sensor made of flexible plastic optical fibers, *Sensors* 8 (2008) 4318–4329.

199. J. S. Heo, J. H. Chung, and J. J. Lee, Tactile sensor arrays using fiber Bragg grating sensors, *Sens. Act. A Phys.* 126 (2006) 312–327.
200. T. Allsop, K. Carroll, G. Lloyd, D. J. Webb, M. Miller, and I. Bennion, Application of long-period-grating sensors to respiratory plethysmography, *J. Biomed. Opt.* 12 (2007) 064003.
201. L. C. Gerhardt, R. Lottenbach, R. M. Rossi, and S. Derler, Tribological investigation of a functional medical textile with lubricating drug-delivery finishing, *Colloids and Surfaces B: Bio* 108 (2013) 103–109.
202. W. R. Habel and K. Krebber, Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering, *Photonic Sensors* 1 (2011) 268–280.
203. M. Harlin, M. Mäkinen, and A. Vuorivirta, Development of polymeric optical fiber fabrics as illumination elements and textile displays, *J. of Autex Research Journal* 3 (2003) 1–8.
204. W. Alduchov and R. E. Eskridge, Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure, *J. Appl. Meteor.* 35 (1996) 601–609.
205. J. Tanny, S. Cohen, S. Assouline, F. Lange, A. Grava, D. Berger, and M. B. Parlange, Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates, *J. Hydrol* 351 (2008) 218–229.
206. H. Esmaeilzadeh, E. Arzi, F. Légaré, and A. Hassani, Controllable Hybrid Side-Polishing Method (CHPM) for optical fibers by combination of polishing and etching, *J. Modern Optics* 60 (2013) 1–8.
207. H. Esmaeilzadeh, E. Arzi, F. Légaré, M. Rivard, and A. Hassani, A super continuum characterized high-precision SPR fiber optic sensor for refractometry, *Sens. Actuators A* 229 (2015) 8–14.
208. J. R. Garratt and M. Segal, The contribution of an atmospheric moisture to dew formation Boundary-Layer, *Meteorology* 45 (1988) 209–236.
209. A. Hassani and M. Skorobogatiy, Photonic crystal fiber-based plasmonic sensors for the detection of biolayer thickness, *J. Opt. Soc. Am. B* 26 (2009) 1550–1557.
210. C. Y. Lee and G. B. Lee, Humidity sensors: A review, *Sens. Lett.* 3 (2005) 1–14.
211. Z. M. Rittersma, Recent achievements in miniaturized humidity sensors- a review of transduction techniques, *Sens. Actuators A* 96 (2002) 196–210.

212. T. L. Yeo, T. Sun, and K. T. V. Grattan, Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement, *Sens. Actuators A* 144 (2008) 280–295.
213. L. Alwis, T. Sun, and K. T. V. Grattan, Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: Review of recent progress, *Measurement* 46 (2013) 4052–4074.
214. S. A. Kolpakov, N. T. Gordon, C. Mou, and K. Zhou, Toward a new generation of photonic humidity sensors, *Sensors* 14 (2014) 3986–4013.
215. M. Bedoya, M. T. Diez, M. C. Moreno-Bondi, and G. Orellana, Humidity sensing with a luminescent Ru(II) complex and phase-sensitive detection, *Sens. Actuators B* 113 (2006) 573–581.
216. Y. Liu, Y. Zhang, H. Lei, J. Song, H. Chen, and B. Li, Growth of well arrayed ZnO nanorods on thinned silica fiber and application for humidity sensing, *Opt Express* 20 (2012) 19404–19411.
217. S. F. H. Correia, P. Antunes, E. Pecoraro, P. P. Lima, H. Varum, L. D. Carlos, R. A. Ferreira, and P. S. André, Optical fiber relative humidity sensor based on a FBG with a diureasil coating, *Sensors* 12 (2012) 8847–8860.
218. T. Venugopalan, T. Sun, and K. T. V. Grattan, Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring, *Sens. Actuators A* 148 (2008) 57–62.
219. M. Consales, A. Buosciolo, A. Cutolo, G. Breglio, A. Irace, S. Buontempo, P. Petagna, M. Giordano, and A. Cusano, Fiber optic humidity sensors for high-energy physics applications at CERN, *Sens. Actuators B* 159 (2011) 66–74.
220. J. Mathew, Y. Semenova, and G. Farrell, Fiber optic hybrid device for simultaneous measurement of humidity and temperature, *IEEE Sensors* 13 (2013) 1632–1636.
221. J. Mathew, Y. Semenova, and G. Farrell, Photonic crystal fiber interferometer for dew detection, *J. Lightwave Technol.* 30 (2012) 1150–1155.
222. H. Esmailzadeh, M. Rivard, E. Arzi, F. Légaré, and A. Hassani, "A super continuum characterized high-precision SPR fiber optic sensor for refractometry, *Sens. Actuators A* 229 (2015) 8–14.

223. M. H. Yang, H. L. Liu, D. H. Zhang, and X. L. Tong, Hydrogen sensing performance comparison of Pd layer and Pd/WO₃ composite thin film coated on side-polished single- and multimode fibers, *Sens. Actuators B* 149 (2010) 161–164.
224. J. Senosiain, I. Díaz, A. Gastón, and J. Sevilla, High sensitivity temperature sensor based on side-polished optical fiber, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 50 (2001) 1656–1660.
225. F. Villuendas and J. Pelayo, Optical fibre device for chemical sensing based on surface plasmon excitation, *Sens. Actuators A* 23 (1990) 1142–1145.
226. R. Slavík, J. Homola, and E. Brynda, A miniature fiber optic surface plasmon resonance sensor for fast detection of staphylococcal enterotoxin B, *Biosens. Bioelectron.* 17 (2002) 591–595.
227. X. Fan, I. M. White, S. I. Shopova, H. Zhu, and Y. Su, Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: A review, *Anal. Chem. Acta* 620 (2008) 8–26.
228. A. Gaston, I. Lozano, F. Perez, F. Auza, and J. Sevil, Evanescent wave optical-fiber sensing (temperature, relative humidity, and pH sensors), *J. IEEE Sens.* 3 (2000) 67–72.
229. J. Homola, Optical fiber sensor based on surface plasmon excitation, *Sens. Actuators B* 29, (1995) 401–405.
230. P. J. Rivero, A. Urrutia, J. Goicoechea, and F. J. Arregui, Optical fiber humidity sensors based on localized surface plasmon resonance (LSPR) and Lossy-mode resonance (LMR) in overlays loaded with silver nanoparticles, *Sens. Actuators B* 173 (2012) 244–249.
231. E. Klantsataya, P. Jia, H. Ebendorff-Heidepriem, T. M. Monro, and A. François, Plasmonic fiber optic refractometric sensors: From conventional architectures to recent design trends *J. Sensors* 17 (2017) 1–23.
232. A. K. Sharma, R. Jha, and B. D. Gupta, Fiber-optic sensors based on surface plasmon resonance: A comprehensive review, *IEEE Sens.* 7 (2007) 1118–1129.
233. H. Esmailzadeh, M. Rivard, E. Arzi, F. Légaré, and A. Hassani, Smart textile plasmonic fiber dew sensors, *Opt. Express* 23 (2015) 14981–14992.
234. S. A. Kolpakov, N. T. Gordon, C. Mou, and K. Zhou, Toward a new generation of photonic humidity sensors, *Sensors* 14 (2014) 3986–4013.

235. W. Yuan, L. Khan, D. J. Webb, K. Kalli, H. K. Rasmussen, A. Stefani, O. Bang, Humidity insensitive TOPAS polymer fibre Bragg grating sensor, *Opt. Express* 19 (2011) 19731.
236. G. Woyessa, K. Nielsen, A. Stefani, C. Markos, O. Bang, Temperature insensitive hysteresis free highly sensitive polymer optical fibre Bragg grating humidity sensor, *Opt. Express* 24 (2016) 1206.
237. M. Bedoya, M. T. Diez, M. C. Moreno, and G. Orellana, Humidity sensing with a luminescent Ru (II) complex and phase-sensitive detection, *Sens. Actuators B* 113 (2006) 573–581.
238. Y. Liu, Y. Zhang, H. Lei, J. Song, H. Chen, and B. Li, Growth of well arrayed ZnO nanorods on thinned silica fiber and application for humidity sensing, *Opt. Express* 20 (2012) 19404–19411.
239. S. F. H. Correia, P. Antunes, E. Pecoraro, P. P. Lima, H. Varum, L. D. Carlos, R. A. S. Ferreira, and P. S. André, Optical fiber relative humidity sensor based on a FBG with a diureasil coating, *Sensors*, 12 (2012) 8847–8860.
240. T. Venugopalan, T. Sun, and K. T. V. Grattan, Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring, *Sens. Actuators A* 148 (2008) 57–62.
241. J. Mathew, Y. Semenova, and G. Farrell, Fiber optic hybrid device for simultaneous measurement of humidity and temperature, *IEEE Sensors* 13 (2013) 1632–1636.
242. N. Alberto, C. Tavares, M. F. Domingues, S. F. H. Correia, C. Marques, P. Antunes, J. L. Pinto, R. A. S. Ferreira, P. S. André, Relative humidity sensing using micro-cavities produced by the catastrophic fuse effect, *Optical and Quantum Electronics* 48 (2016) 1 – 8.
243. S. Liehr, M. Breithaupt and K. Krebber, Distributed Humidity Sensing in PMMA Optical Fibers at 500 nm and 650 nm Wavelengths *Sensors* 17 (2017) 1-6.
244. P. J. Thomas, J. O. Hellevan, A fully distributed fiber optic sensor for relative humidity measurements, *Sen. and Act. B* 247 (2017) 284–289.
245. H. Esmaeilzadeh, M. Rivard, E. Arzi, F. Légaré, and A. Hassani, Smart textile plasmonic fiber dew sensors, *Opt Express* 23 (2015) 14981–14992.
246. H. E. Limodehi and F. Légaré, Fiber Optic Humidity sensor using Water Vapor Condensation, *Opt Express* 25 (2017) 15313-15321.