



Modelado y simulación de un sensor de fibra óptica basado en la onda evanescente

Alberto Daniel López Bermúdez^a

Primavera Argüelles Lucho^b

Luis Zamora Peredo^c

Francisco López Huerta^d

Resumen – El desarrollo y avance en los sensores de fibra óptica (SFO) se debe a las ventajas únicas que poseen sobre los sensores basados estado sólido, sus principales ventajas son: inmunidad a las interferencias electromagnéticas, alta sensibilidad y posibilidad de sensado distribuido, por lo cual han encontrado aplicaciones en una gran variedad de campos debido a que la mayoría de las variables físicas y químicas pueden ser monitoreadas con los SFO. Uno de los principales mecanismos de detección es la absorción de ondas evanescentes, por lo que es importante conocer los parámetros que determinan el comportamiento de esta en los SFO. En este trabajo se describe el modelado matemático y simulación para determinar los parámetros como la absorción de la onda evanescente y la profundidad de penetración. De acuerdo con los resultados numéricos se obtuvo una absorción de la onda evanescente de 0.2×10^{-3} ua, y profundidad de penetración de $2 \mu\text{m}$.

Palabras clave – Absorción, Ecuaciones de Maxwell, Onda evanescente, Sensores de fibra óptica.

Abstract – The development and progress in fiber optic sensors (SFO) is due to the unique advantages they have over solid-state sensors, their main advantages are: immunity to electromagnetic interference, high sensitivity and possibility of distributed sensing, so they have found applications in a variety of fields because most of the physical and chemical variables can be monitored with SFO. One of the main detection mechanisms is the absorption of evanescent waves, so it is important to know the parameters that determine the behavior of this in SFOs. In this work we present the mathematical modeling and simulation to determine the parameters such as evanescent wave absorption and penetration depth. According to the numerical results, an evanescent wave absorption of 0.2×10^{-3} ua and a penetration depth of $2 \mu\text{m}$ were obtained.

Keywords – Absorption, Maxwell equations, Evanescent wave, Fiber optic sensor.

CÓMO CITAR HOW TO CITE:

López-Bermúdez, A. D., Argüelles-Lucho, P., Zamora-Peredo, L., & López-Huerta, F. (2023). Modelado y simulación de un sensor de fibra óptica basado en la onda evanescente. *Interconectando Saberes*, (15), 1-8.

<https://doi.org/10.25009/is.v0i15.2771>

Recibido: 24 de junio de 2022

Aceptado: 19 de enero de 2023

Publicado: 21 de marzo de 2023

^a Universidad Veracruzana, México. E-mail: prarlu@gmail.com

^b Tecnológico Nacional de México campus Veracruz, México. E-mail: prarlu@gmail.com

^c Universidad Veracruzana, México. E-mail: luiszamora@uv.mx

^d Universidad Veracruzana, México. E-mail: frlopez@uv.mx



INTRODUCCIÓN

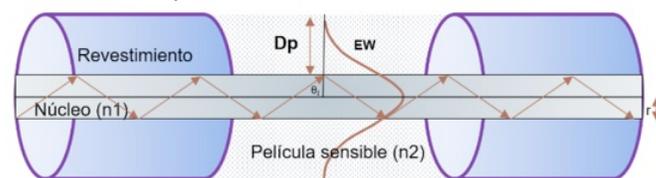
Actualmente, el desarrollo de los sensores de fibra óptica (SFO) está teniendo un crecimiento significativo en el diagnóstico médico y en la detección de parámetros físicos, biológicos y ambientales (Ding and Brambilla, 2015; Sharma and Gupta, 2018). Debido a que los SFO ofrecen varias ventajas sobre los sensores convencionales basados en cables conductores tales como: su inmunidad a la interferencia electromagnética, el tamaño pequeño, pasividad eléctrica, alta biocompatibilidad y sensibilidad, una respuesta rápida, la posibilidad de detección distribuida en un mismo hilo de fibra óptica y la capacidad de operar en ambientes peligrosos como zonas de altos voltajes (Botewad et al., 2018; Nurulain et al., 2017).

Los SFO han encontrado principalmente aplicaciones en el monitoreo de la calidad del agua, el pH, el oxígeno, metales pesados y bacterias como *Escherichia coli* (Jiao et al., 2020). Este tipo de sensores utilizan las características de la luz como su polarización o su intensidad para tener una relación con el parámetro de interés. La interacción entre el parámetro de interés y la luz pueden generar los fenómenos de fluorescencia, absorción, dispersión, reflexión y transmisión lo que conlleva a cambios medibles en la intensidad de la luz (Pathak et al., 2017). Uno de los mecanismos más simples y utilizados en el diseño de SFO es la absorción por ondas evanescentes (Sinha et al., 2020; Sharma et al., 2019). La luz es confinada en el núcleo de una fibra óptica a través de la reflexión total interna, esta reflexión es la que produce la onda evanescente (EW) en el límite entre el núcleo y el revestimiento (Hui, 2020).

La aplicación principal de una fibra óptica son las comunicaciones por lo que en su diseño se minimiza la influencia de un medio externo con el núcleo. En el diseño de los sensores de onda evanescente, un fragmento del revestimiento de la fibra óptica es sustituido por una película sensible a la especie química o biológica que se desee analizar para provocar la interacción entre el campo evanescente y el material sensible (Correia et al., 2018), como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Sensor de fibra óptica de onda evanescente



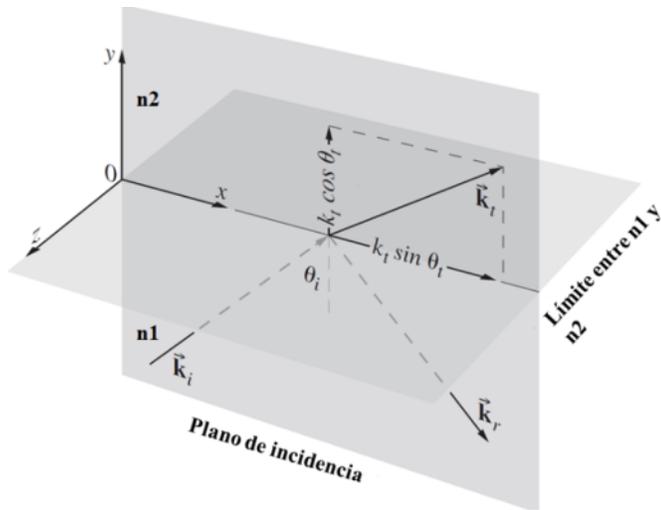
El rendimiento de estos sensores depende directamente de la potencia evanescente en la zona de la película sensible. La absorción de la onda evanescente es determinada por la profundidad de penetración (D_p), la cual indica la capacidad que tiene la luz para introducirse en la película sensible. La D_p depende de variables como el ángulo de incidencia de la luz, el índice de refracción de la fibra óptica y de la película sensible y la longitud de onda incidente (Zhang et al., 2020; Li, 2020). Sin embargo, existen pocos trabajos que analicen el comportamiento de la profundidad de penetración para favorecer la interacción entre la onda evanescente y la película delgada para mejorar el rendimiento de este tipo de sensores.

Como la luz es una onda electromagnética, se realizaron modelados matemáticos utilizando la teoría electromagnética de Maxwell y la óptica geométrica, considerando las características del sensor de onda evanescente. A través de la óptica geométrica se conoce la absorción de la onda evanescente y la profundidad de penetración. Con las ecuaciones de Maxwell, se realizan simulaciones numéricas de la distribución del campo electromagnéticos en la fibra óptica y sus modos de propagación.

METODOLOGÍA

La óptica geométrica estudia a la luz como una onda plana a través de sus vectores de propagación como se muestra en la figura 2.

Figura 2
Vectores de propagación en la reflexión total interna



Las condiciones iniciales de la reflexión total interna indican que el índice de refracción del núcleo (n1) sea mayor que el índice de refracción del revestimiento y de la película sensible (n2) y que el ángulo de incidencia θ_i supere al ángulo crítico, expresado por la ecuación 1 (Pahurkar, et al., 2015; Hecht, 2017):

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \tag{1}$$

Considerando el vector transmitido \vec{k}_t de una onda plana (ecuación 2) propagándose en el plano xy (figura 2).

$$\vec{E}_t = A_t e^{j(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega t)} \tag{2}$$

Al no haber componente de k en z, el producto escalar resulta en la ecuación 3.

$$\vec{k}_t \cdot \vec{r} = k_t \sin \theta_t x + k_t \cos \theta_t y \tag{3}$$

Utilizando la identidad trigonométrica $\sin^2 \theta_t + \cos^2 \theta_t = 1$ se obtiene $\cos \theta_t$ en términos de $\sin \theta_i$, expresado por la ecuación 4.

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_i / n^2} \tag{4}$$

Sin embargo, la ecuación 4 es limitada por las condiciones de la reflexión total interna por lo que el resultado es un número complejo (ecuación 5).

$$\cos \theta_t = j \sqrt{\sin^2 \theta_i / n^2 - 1} = \pm j \beta \tag{5}$$

Donde β se conoce como el coeficiente de atenuación. El producto escalar del vector de transmisión y de posición resulta en la ecuación 6.

$$\vec{k}_t \cdot \vec{r} = k_t (\sin \theta_i / n x \pm j \beta y) \tag{6}$$

El campo eléctrico (2) se expresa con el resultado de (6) obteniendo una onda que se propaga por el eje x y una onda que se atenúa en dirección de y (7)

$$\vec{E}_t = A_t \left(e^{jk_t(\sin \theta_i/nx - \omega t)} e^{\pm \beta y} \right) \quad (7)$$

En $e^{\pm \beta y}$, la parte exponencial positiva es físicamente imposible ya que implica un incremento infinito, la parte negativa da como solución una onda cuya amplitud decae exponencialmente a medida que se propaga en el medio de menor índice de refracción como una onda de frontera o evanescente.

La amplitud del campo \vec{E} evanescente decae exponencialmente desde su valor máximo en la interfase ($y = 0$), a $1/e$ de ese valor a una distancia dentro del medio de menor n de $y = 1/\beta$. Esta relación da paso a la profundidad de penetración, expresado por la ecuación 8.

$$Dp = 1/\beta = \lambda / \left(2\pi n_2 \sqrt{\sin^2 \theta_i/n^2 - 1} \right) \quad (8)$$

En donde λ_0 es la longitud de onda de la luz incidente, θ_i es el ángulo de incidencia en la interfaz núcleo-revestimiento y $n = n_2/n_1$. En los sensores ópticos de ondas evanescentes, es importante optimizar la profundidad de penetración para lograr una mayor sensibilidad. Por lo tanto, es importante saber la relación de este parámetro con las variables que lo definen. El campo eléctrico que se propaga por el material de menor índice de refracción definiéndolo en la ecuación 9.

$$\vec{E}_t = A_t e^{-(y/Dp)} \quad (9)$$

En la ecuación 9, y representa la distancia normal a la interfase, pero para los SFO representa el grosor del recubrimiento sensible.

Un análisis más riguroso es mediante las ecuaciones de Maxwell, donde es necesario la solución de las ecuaciones de onda de Helmholtz para el campo eléctrico y magnético, las soluciones a estas ecuaciones son campos vectoriales que representa la distribución electromagnética dentro de la fibra óptica. Las ecuaciones 10 y 11 representa las ecuaciones de onda de Helmholtz para el campo eléctrico y magnético (Iizuka, 2002):

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \epsilon \mu \vec{E} = 0 \quad (10)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \epsilon \mu \vec{H} = 0 \quad (11)$$

Para analizar las distribuciones de los campos electromagnéticos y satisfacer la ecuación de onda de Helmholtz en las fibras ópticas, se utiliza la simetría cilíndrica definida por la ecuación 12.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + (nk_0)^2 E_z = 0 \quad (12)$$

La componente E_z es función tanto de r, ϕ, z para su resolución, se considera una onda estacionaria en la dirección azimutal y una onda propagándose en la dirección longitudinal, entonces las variables se pueden separar como en la ecuación 13.

$$E_z(r, \phi, z) = R(r)\Phi(\phi)Z(z) \quad (13)$$

Solucionado la ecuación diferencial 13 por el método de separación de variables, se tiene como resultado la ecuación 14.

$$\left[R''(r) + \frac{1}{r}R'(r) + ((nk_0)^2 - \beta^2)R(r) \right] - l^2 \frac{R(r)}{r^2} = 0 \quad (14)$$

La ecuación 14 es conocida como ecuación de Bessel debido a que su solución se expresa en funciones de Bessel. Existen dos soluciones dependiendo del signo del factor $[(nk_0)^2 - \beta^2]$, si se considera positivo es una oscilación representada por funciones de Bessel de primera especie y segunda especie la cual también es conocida como funciones de Neumann. Cuando el factor se considera negativo es una atenuación exponencial representada por funciones de Bessel modificadas de primera y segunda especie también llamada funciones de Henkel.

Para la región del núcleo se considera una oscilación y se selecciona un valor positivo de $[(nk_0)^2 - \beta^2]$, obteniendo la solución para la ecuación 14.

$$R(r) = eJ_l(Kr) + fN_l(Kr) \quad (15)$$

Donde $K^2 = (n_1k_0)^2 - \beta^2$, k es el número de onda, $J_l(Kr)$ y $fN_l(Kr)$ son funciones de Bessel de primera y segunda especie. La primera condición de frontera indica que las ondas no pueden ser discontinuas en la frontera entre dos medios, por lo tanto, el factor $fN_l(Kr)$ es eliminado por representar una discontinuidad en r y la

solución de E_z y H_z (ecuación 13) en cualquier punto r, ϕ, z resulta en las ecuaciones 16 y 17.

$$E_z(r, \phi, z) = AJ_l(Kr)e^{J\beta z + Jl\phi} \quad (16)$$

$$H_z(r, \phi, z) = BJ_l(Kr)e^{J\beta z + Jl\phi} \quad (17)$$

A y B son constantes que satisfacen las condiciones de frontera. La solución para la región del revestimiento resulta en la ecuación 18.

$$R(r) = eI_l(\gamma r) + fK_l(\gamma r) \quad (18)$$

Donde $-\gamma^2 = (n_2k_0)^2 - \beta^2$, $I_l(\gamma r)$ y $K_l(\gamma r)$ son funciones de Bessel modificadas de primera y segunda especie. La solución en esta región es una atenuación, el término $eI_l(\gamma r)$ es eliminado pues crece con cada incremento en r y la condición de frontera es que la amplitud del campo debe ser cero lejos del núcleo y las ecuaciones 19 y 20 son las soluciones de E_z y H_z para cualquier punto r, ϕ, z

$$E_z(r, \phi, z) = CK_l(\gamma r)e^{J\beta z + Jl\phi} \quad (19)$$

$$H_z(r, \phi, z) = DK_l(\gamma r)e^{J\beta z + Jl\phi} \quad (20)$$

C y D son las constantes encargadas de satisfacer las condiciones de frontera de la fibra óptica.

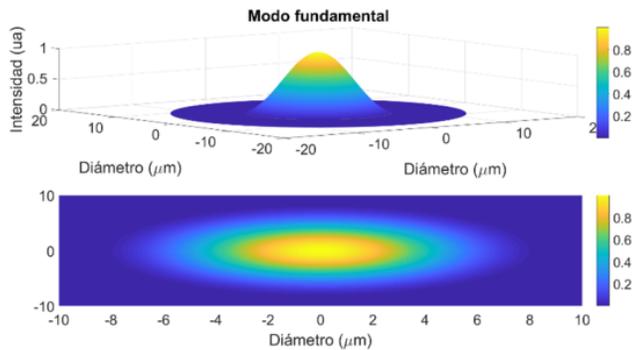
RESULTADOS

Para las simulaciones numéricas se consideró un índice de refracción para el núcleo $n_1 = 1.55$ y un diámetro de $9 \mu\text{m}$. La primera simulación realizada fue la ecuación de Bessel, donde se obtuvo el modo fundamental para todos los tipos de fibra óptica. En la figura 3, se observa que la densidad electromagnética se concentra en el

núcleo de la fibra óptica y se va extinguiendo exponencialmente hacia el revestimiento, por lo que solo ciertos valores de K y γ cumplen con las condiciones de frontera.

Figura 3

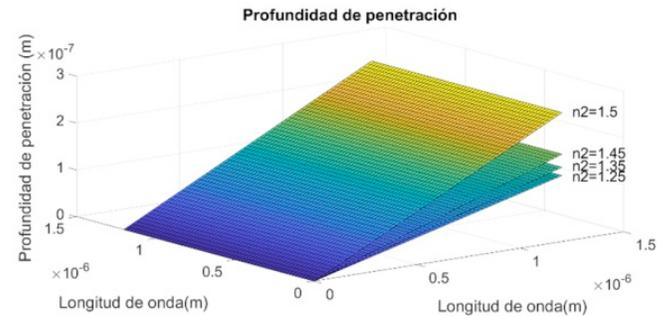
Modo fundamental de la fibra óptica



Con la ecuación 8, se realizó una simulación para diferentes índices de refracción variando la longitud de onda incidente. Considerando índices de refracción para $n_2 = 1.25, 1.35, 1.45$ y 1.5 . Se observa en la figura 4, los índices de refracción cercanos a los valores de n_1 se alcanzan la mayor profundidad de penetración, además, de que dichos valores se encuentran en las longitudes de onda más altas. Para favorecer a la penetración de la onda evanescente es conveniente utilizar la longitud de onda más alta y materiales con índices de refracción cercanos a n_1 . Los valores de D_p nunca son mayores a la longitud de onda empleada.

Figura 4

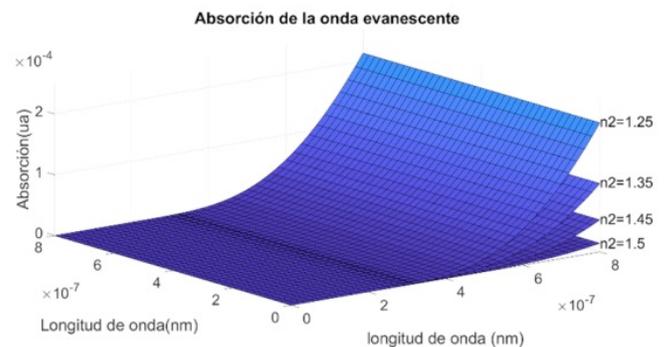
Profundidad de penetración respecto longitud de onda



La amplitud del campo eléctrico se ve atenuada dependiendo de D_p y el espesor del recubrimiento sensible, para un espesor de 200 nm se obtuvieron las curvas del decaimiento del campo eléctrico. La mayor atenuación sucede para el material de menor índice de refracción (figura 5)

Figura 5

Absorción de la onda evanescente

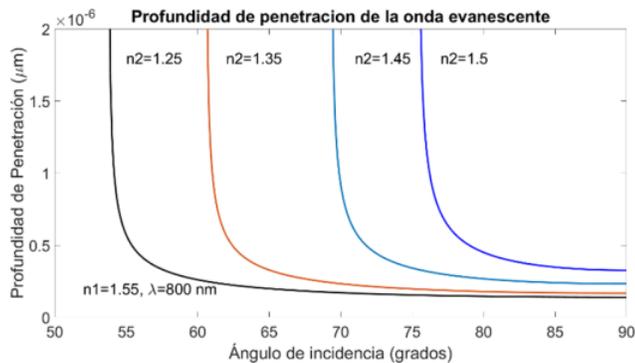


Se utilizó una simulación numérica para observar el comportamiento de la profundidad de penetración respecto al ángulo de incidencia para diferentes índices de refracción a una longitud de onda de 800 nm. Se observa en todos los materiales que la mayor profundidad de penetración se alcanza para los ángulos

cercanos al ángulo crítico θ_c . El índice de refracción n_2 del medio absorbente determina el ángulo crítico y, por lo tanto, el ángulo de incidencia óptimo para lograr la mayor penetración de la onda evanescente y mejorar la sensibilidad y funcionamiento del sensor óptico.

Figura 6

Profundidad de penetración respecto el ángulo de incidencia



CONCLUSIONES

Mediante el modelado matemático para un sensor de fibra óptica basado en el fenómeno de absorción de la onda evanescente, se calculó la profundidad de penetración de la onda evanescente en la película sensible n_2 y analizó su comportamiento variando del índice de refracción n_2 , longitud de onda y el ángulo de incidencia θ_i . Los valores más cercanos al θ_c y al índice de refracción del núcleo, favorecieron a la penetración de la onda evanescente y la absorción de esta. Mediante el modelado matemático a través de la teoría electromagnética de Maxwell se visualizó el modo fundamental polarizado, observando su distribución óptica, conociendo la intensidad del campo evanescente en la región del núcleo y revestimiento.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), México, a través de la beca n° 747995

REFERENCIAS

- Botewad, S. N., Paturkar, V. G., & Muley, G. G. (2018). Fabrication and evaluation of evanescent wave absorption based polyaniline-cladding modified fiber optic urea biosensor. *Optical Fiber Technology*, 40, 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.11.002>
- Correia, R., James, S., Lee, S.-W., Morgan, S. P., & Korposh, S. (2018). Biomedical application of optical fibre sensors. *Journal of Optics*, 20(7), 073003. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aac68d>
- Ding, M., & Brambilla, G. (2015). Optical fibres and sensors for biomedical applications. *Biophotonics for Medical Applications*, 53–78. <https://doi.org/10.1016/b978-0-85709-662-3.00003-8>
- Hecht, E. (2017). *Optics*.
- Hui, R. (2020). *Introduction to Fiber-Optic Communications*
- Iizuka, K. (2002). *Elements of photonics*. Wiley series in pure and applied optics, vol. II.
- Jiao, L., Zhong, N., Zhao, X., Ma, S., Fu, X., & Dong, D. (2020). Recent advances in fiber-optic evanescent wave sensors for monitoring organic and inorganic pollutants in water. *TRAC Trends in Analytical Chemistry*, 127, 115892. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115892>
- Kumar, V. V., Shanmugaprasak, M., Aravind, J., & Namasivayam, S. K. R. (2012). Pilot-scale study of efficient vermicomposting of agro-industrial wastes. *Environmental Technology*, 33(9), 975–981. <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.604856>
- Li, J. (2020). A review: Development of novel fiber-optic platforms for bulk and surface refractive index sensing applications. *Sensors and Actuators Reports*, 2(1), 100018. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2020.100018>
- Nurulain, S.M., Mazlee, N.N., SalimM., R., & Hadi, M.Y. (2017). A Review on Optical Fibre Sensor Topology and Modulation Technique. *International Journal of Engineering Technology And Sciences (IJETS)*, 7 (1). pp. 1-7. <http://umpir.ump.edu.my/id/eprint/17900/>

- Pahurkar, V. G., Tamgadge, Y. S., Gambhire, A. B., & Muley, G. G. (2015). Evanescent wave absorption based polyaniline cladding modified fiber optic intrinsic biosensor for glucose sensing application. *Measurement*, 61, 9–15.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.10.029>
- Pathak, A. K., & Singh, V. K. (2017). Fabrication and characterization of down-tapered optical fiber pH sensor using sol-gel method. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 149, 288–294.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.09.051>
- Sharma, A. K., & Gupta, J. (2018). Graphene based chalcogenide fiber-optic evanescent wave sensor for detection of hemoglobin in human blood. *Optical Fiber Technology*, 41, 125–130.
<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.01.012>
- Sharma, A. K., Gupta, J., & Ishika. (2019). Fiber optic evanescent wave absorption-based sensors: A detailed review of advancements in the last decade (2007-18). *Optik*.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.104>
- Sinha, S., Lohia, P., & Dwivedi, D. K. (2020). Recent advancements in fiber-optics biosensors. *3rd International conference on condensed matter and applied physics (ICC-2019)*.
<https://doi.org/10.1063/5.0001245>
- Zhang, Y., Sun, Y., Cai, L., Gao, Y., & Cai, Y. (2020). Optical fiber sensors for measurement of heavy metal ion concentration: A review. *Measurement*. 158,
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107742>