

Diseño de filtro óptico sintonizable en el infrarrojo cercano a temperaturas criogénicas

Luz Esther González Reyes¹
Camilo Eduardo Echeverry Naranjo²

Recepción: 05/09/2022 Aprobación: 03/11/2022 Publicación: 23/12/22



Para citar este artículo

González Reyes, L. E., & Echeverry Naranjo, C. E. (2022). Diseño de filtro óptico sintonizable en el infrarrojo cercano a temperaturas criogénicas. *Indagare*, 10, 87-96. <https://doi.org/10.35707/indagare/1009>

¹ Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Grupo de investigación Naturatu, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia. Correo electrónico: luz.gonzalez@unibague.edu.co. ORCID: 0000-0002-2302-1774.

² Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Grupo de investigación Naturatu, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia. Correo electrónico: camilo.echeverry@unibague.edu.co. ORCID: 0000-0003-2910-8229.

Resumen

En este artículo de divulgación se exponen algunos resultados del proyecto “Diseño e implementación de filtros ópticos basados en cristales fotónicos para la transmisión de información a temperaturas criogénicas”. Se presenta un estudio de la respuesta óptica de un filtro fotónico, operando en el infrarrojo cercano del espectro a temperaturas criogénicas bajo la variación del ángulo de incidencia de la luz.



Palabras claves:

Superconductores, filtros ópticos, comunicaciones ópticas, ferroeléctricos.

Introducción

El uso de ondas electromagnéticas (EM) como portadoras de información para sistemas de comunicación ha estado en vigencia durante muchos años, ya que es la longitud de onda EM la que hace posible la transmisión a grandes distancias, y al mismo tiempo la que limita la cantidad de información que puede transmitir por su frecuencia. Por consiguiente, es de gran interés la fabricación de estructuras como los cristales fotónicos que puedan transmitir a altas frecuencias y que concentren la potencia disponible dentro de la onda electromagnética transmitida (González *et al.*, 2020).

Los cristales fotónicos son estructuras periódicas artificiales, cuyo índice de refracción varía periódicamente en una o más dimensiones. Esta periodicidad da lugar a una estructura de bandas de transmisión en la cual se permite la propagación selectiva de ondas electromagnéticas de determinadas frecuencias mientras se prohíben otras.

Su uso permite controlar y sintonizar las frecuencias de ondas transmitidas, de tal forma que pueden ser usados como filtros ópticos, chips, láseres, guías de ondas, circuitos fotónicos integrados, sensores y células fotovoltaicas de película delgada, por mencionar solo algunas (Butler *et al.*, 2020; Clementi *et al.*, 2021; Delgado-Sanchez & Lillo-Bravo, 2020; Kaviani Baghbadorani & Barvestani, 2021; Li *et al.*, 2020; Mbakop *et al.*, 2020; Mehaney *et al.*, 2021; Sakata *et al.*, 2020; Shi *et al.*, 2020; Soltani *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2020).



En la actualidad existen muchos materiales usados para fabricar cristales fotónicos sintonizables como semiconductores, metales, superconductores, metamateriales y cristales líquidos, entre otros (Aly *et al.*, 2020; González *et al.*, 2018, 2020; Schlafmann & White, 2021; Segal *et al.*, 2015; Zaky & Aly, 2020).

En un trabajo previo se fabricó un cristal fotónico unidimensional basado en un superconductor de alta temperatura crítica y un ferroeléctrico para controlar la propagación de luz en la región del espectro visible (González *et al.*, 2020). Como resultado, se propone la posible implementación de estos cristales en filtros y reflectores ópticos que pueden transmitir información a altas frecuencias y operar a temperaturas criogénicas.

En la actualidad los principales medios de transmisión sin cable trabajan con ondas cuya frecuencia se encuentra en el espectro de radio-frecuencia (RF). Sin embargo, los sistemas de comunicación por infrarrojo (IR) y visible del espectro (VLC), se han convertido en una alternativa a la RF debido a funcionamiento en regiones de altas fre-

cuencia. Por consiguiente, es de gran interés la fabricación de dispositivos que puedan transmitir información en dichas regiones del espectro, al tiempo que minimizan las pérdidas durante este proceso (González *et al.*, 2020).

En el proyecto Diseño e implementación de filtros ópticos basados en cristales fotónicos para la transmisión de información a temperaturas criogénicas se evaluó teóricamente el desempeño de cristales fotónicos creados a partir de un material ferroeléctrico (BTO), un dieléctrico (Y_2O_3) y un superconductor de alta temperatura crítica (YBCO) (por debajo de los $-181.15^\circ C$). El uso de materiales superconductores presenta ventajas significativas. Primero, las pérdidas por la amortiguación de ondas electromagnéticas se pueden disminuir si se usan superconductores en lugar de metales convencionales. Segundo, la función dieléctrica de un superconductor (la cual define el comportamiento óptico del material) depende principalmente de la temperatura y el campo magnético externo (González *et al.*, 2020). Debido a esto, los materiales superconductores de alta temperatura resultan interesantes para la implementación de cristales fotónicos sintonizables en una amplia variedad de aplicaciones tales como sensores de temperatura, filtros policromáticos y biosensores, entre otros (Chen *et al.*, 2022; Hao *et al.*, 2020; Soltani *et al.*, 2021; Zaky & Aly, 2020).

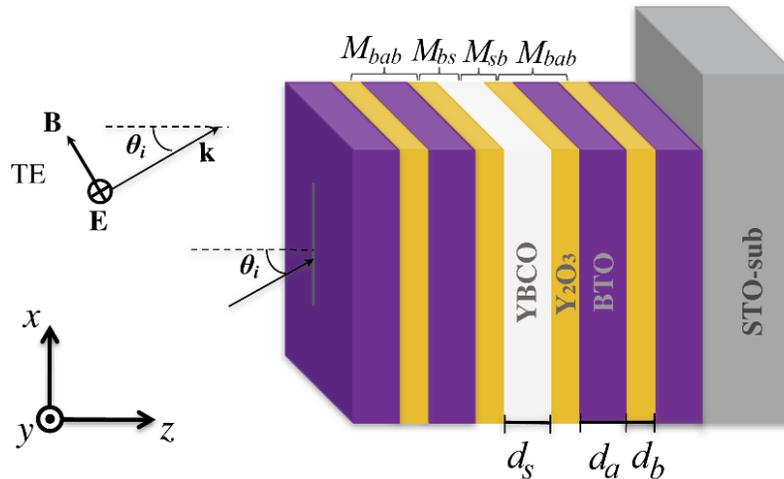
En este artículo (González *et al.*, 2022), se caracteriza y diseña computacionalmente un filtro óptico unidimensional que puede ser integrado en redes ópticas basadas en multiplexación por longitud de onda (WDM, por sus siglas en inglés), con un alto factor de calidad Q , que transmite información en el rango visible e IR cercano en ambientes de muy baja temperatura como las del espacio exterior.

En este artículo de divulgación se presentan algunos resultados de la respuesta óptica del filtro fotónico, operando en el IR cercano del espectro a temperaturas criogénicas bajo la variación del ángulo de incidencia de la luz.

Materiales y métodos

En la Figura 1 se muestra una ilustración del cristal fotónico $(BTO/Y_2O_3)_N/YBCO/(Y_2O_3/BTO)_N$ compuesto de capas alternantes de $BaTiO_3$ y Y_2O_3 que encierran una capa de $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconductora, con sus correspondientes espesores d_a , d_b y d_s .

Figura 1: Ilustración del cristal fotónico $(\text{BTO}/\text{Y}_2\text{O}_3)_N/\text{YBCO}/(\text{Y}_2\text{O}_3/\text{BTO})_N$ iluminado por un haz de luz en la dirección de su vector de onda \mathbf{k}



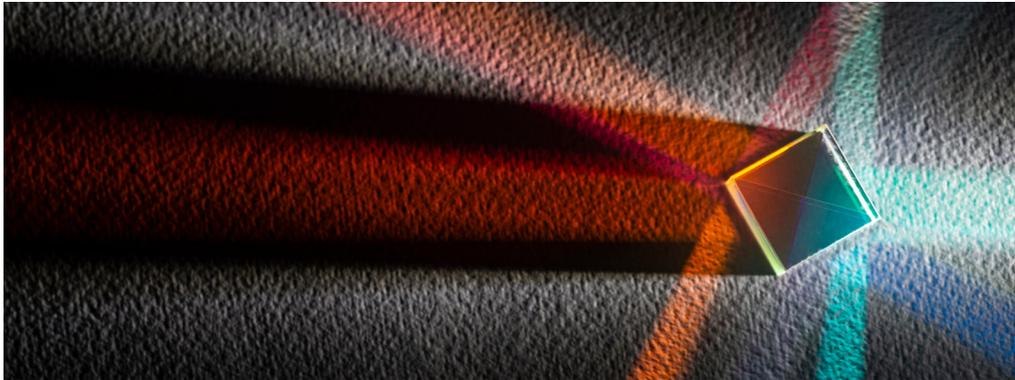
Nota: θ_i es el ángulo de incidencia del haz de luz, M_{bs} y M_{sb} son matrices de transferencia definidas más adelante.

Fuente: "A Multichannel Superconductor-Based Photonic Crystal Optical Filter Tunable in the Visible and Telecom Windows at Cryogenic Temperature" (González *et al.*, 2022, p. 3) CC BY 4.0

El objetivo es calcular los modos (frecuencias) transmitidas y reflejadas para varios ángulos de incidencia θ_i . Para ello es necesario conocer el comportamiento del campo eléctrico del haz de luz incidente que trata de propagarse a lo largo del material. Esto se logra resolviendo las ecuaciones de Maxwell dentro del material junto con las respectivas condiciones de contorno en cada interface.

Para los cálculos se consideró la forma más simple de un haz que se propaga a lo largo del eje, una onda plana linealmente polarizada $\vec{E}(z, t) = E(z)e^{-i\omega t}\hat{x}$. Aplicando las ecuaciones de Maxwell para un medio lineal e isotrópico, se encuentra que la amplitud del campo $E(z)$ debe satisfacer:

$$\frac{d}{dz} \left[\frac{1}{n(z)Z(z)} \frac{dE(z)}{dz} \right] = -\frac{n(z)}{Z(z)} \frac{\omega^2}{c^2} E(z) \quad (1)$$



Donde c es la velocidad de la luz en el vacío, $n(z) = \sqrt{\epsilon(z)}\sqrt{\mu(z)}$ y $Z(z) = \sqrt{\mu(z)}/\sqrt{\epsilon(z)}$ son el índice de refracción y la impedancia del medio para cada capa del material respectivamente.

Se consideró que en cada interface la amplitud $E(z)$ y su derivada son continuas en cada interface, lo cual se puede modelar a partir de la función de dos componentes

$$\psi(z) = \begin{pmatrix} E_z \\ \frac{1}{nZ} \frac{dE_z}{dz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

En un cristal fotónico el campo debe tener la periodicidad del cristal de tal forma que el comportamiento de $\psi(z)$ a través del material se puede modelar a partir de una matriz de transferencia M

$$\psi(z) = M_i(z - z_0)\psi(z_0) \quad (3)$$

Finalmente, la transmisión se calcula a partir de una componente de la matriz de transferencia total que es el producto de todas las matrices de transferencias M_{sb} , M_{bs} y M_{bab} .

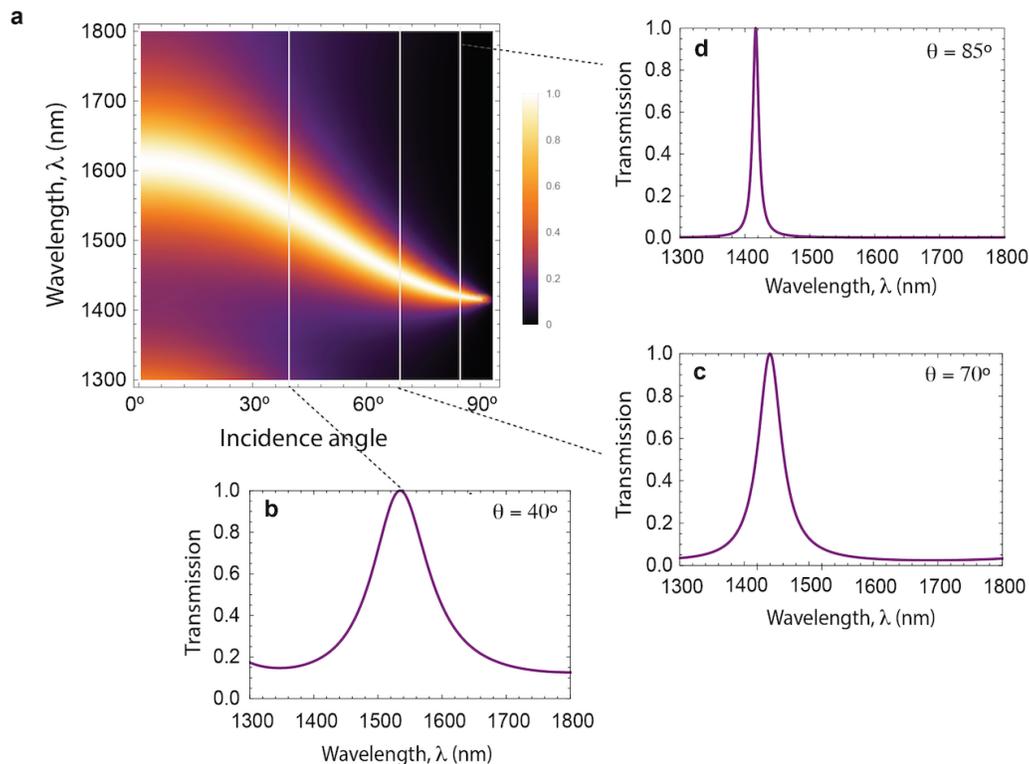
El modelo de dos fluidos de Gorter-Casimir fue usado para describir la respuesta electromagnética del superconductor.

Todos los cálculos fueron hechos con el software Wolfram Mathematica.

Resultados

El espesor de las multicapas de Y_2O_3 y BTO es diseñado como el de un reflector de Bragg donde el haz incidente forma un ángulo $\theta_i = \theta$ con el vector normal a la superficie, cuya longitud de onda de operación está centrada en 1550 nm.

Figura 2: Ondas transmitidas y reflejadas en el cristal fotónico en función del ángulo de incidencia



Fuente: "A Multichannel Superconductor-Based Photonic Crystal Optical Filter Tunable in the Visible and Telecom Windows at Cryogenic Temperature" (González *et al.*, 2022, p. 5) CC BY 4.0

La Figura 2 muestra la respuesta óptica del filtro para $N = 2$ en la región de longitud de onda de 1300 nm a 1800 nm en función de toda la gama de ángulos de incidencia para la polarización TE a $T = 80$ K y $ds = 10$ nm. En la Figura 2a, las áreas oscuras corresponden a los rangos de alta reflectancia, mientras que las áreas amarillas indican rangos de transmisión altos donde la radiación pasa a través de la estructura. Una característica interesante está relacionada con la respuesta bastante sensible al ángulo

de incidencia de la luz, como se puede observar en el desplazamiento continuo de la banda a longitudes de onda más cortas, a medida que el ángulo incidente aumenta. De hecho, surge una banda de transmisión en la región del infrarrojo cercano a 1600 nm a 0°, que disminuye continuamente a 1418 nm cerca de 90°. Mencionamos la importancia de dicha banda ya que se encuentra dentro de varias bandas espectrales utilizadas en las comunicaciones de fibra óptica (es decir, las bandas E, S, C y L) (Karothu *et al.*, 2021).

Los picos agudos mostrados en las imágenes 2b-2d muestran que la nanoestructura (BTO/ Y_2O_3)₂/YBCO/(Y_2O_3 /BTO)₂ puede ser usada como un filtro pasa-banda estrecho. También se puede observar que el ancho de la banda transmitida disminuye a medida que aumenta el ángulo de incidencia. Entonces, si el ángulo de incidencia de la luz varía en una pequeña cantidad, es posible sintonizar el paso de banda en un rango estrecho de longitudes de onda.

Potencial uso

Este trabajo permite diseñar filtros ópticos que pueden ser usados en aplicaciones tales como sensores de temperatura, filtros policromáticos (esto se puede apreciar mejor con otros resultados que se encuentran en el artículo original (González *et al.*, 2022) y biosensores, entre otros a muy bajas temperaturas (Chen *et al.*, 2022; Hao *et al.*, 2020; Soltani *et al.*, 2021; Zaky & Aly, 2020).



Ficha técnica del proyecto

Título del proyecto que lo deriva o vincula: Diseño e implementación de filtros ópticos basados en cristales fotónicos para la transmisión de información a temperaturas criogénicas.

PRIT (Programas de Investigación y Transferencia): Conservación y aprovechamiento ecoeficiente de los recursos naturales y el medio ambiente.

Grupo: Naturatu.

Investigador Principal: Luz Esther González Reyes.

Correo electrónico: luz.gonzalez@unibague.edu.co

Periodo de la investigación: 25 de febrero de 2021- 25 de febrero de 2023

Referencias

- Aly, A. H., Ghany, S. E.-S. E. S. A., B.M.Kamal, & D.Vigneswaran. (2020). Theoretical studies of hybrid multifunctional $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ photonic crystals within visible and infra-red regions. *Ceramics International*, 46(1), 365–369. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.08.270>
- Butler, S. M., Singaravelu, P. K. J., O'Faolain, L., & Hegarty, S. P. (2020). Long cavity photonic crystal laser in FDML operation using an akinetic reflective filter. *Optics Express*, 28(26), 38813. <https://doi.org/10.1364/oe.410525>
- Chen, H., Chen, Z., Yang, H., Wen, L., Yi, Z., Zhou, Z., Dai, B., Zhang, J., Wu, X., & Wu, P. (2022). Multi-mode surface plasmon resonance absorber based on dart-type single-layer grapheme. *RSC Advances*, 12(13), 7821–7829. <https://doi.org/10.1039/d2ra00611a>
- Clementi, M., Iadanza, S., Schulz, S. A., Urbinati, G., Gerace, D., O'Faloain, L., & Galli, M. (2021). Thermo-optically induced transparency on a photonic chip. *Light: Science & Applications*, 10(1), 240. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00678-4>
- Delgado-Sanchez, J. M., & Lillo-Bravo, I. (2020). Angular dependence of photonic crystal coupled to photovoltaic solar cell. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/app10051574>
- González, L. E., Ordoñez, J. E., Melo-Luna, C. A., Mendoza, E., Reyes, D., Zambrano, G., Porrás-Montenegro, N., Granada, J. C., Gómez, M. E., & Reina, J. H. (2020). Experimental realisation of tunable ferroelectric/superconductor (BTO / YBCO) N/ STO 1D photonic crystals in the whole visible spectrum. *Scientific Reports*, 10(1), 13083. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69811-4>
- González, L. E., Ordoñez, J. E., Zambrano, G., & Porrás-Montenegro, N. (2018). $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{BaTiO}_3$ 1D Superconducting Photonic Crystal with Tunable Broadband Response in the Visible Range. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 31(7), 2003–2009. <https://doi.org/10.1007/s10948-017-4427-4>
- González, L. E., Segura-Gutierrez, L. M., Ordoñez, J. E., Zambrano, G., & Reina, J. H. (2022). A Multichannel Superconductor-Based Photonic Crystal Optical Filter Tunable in the Visible and Telecom Windows at Cryogenic Temperature. In *Photonics*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/photonics9070485>
- Hao, J. J., Gu, K. Da, Xia, L., Liu, Y. J., Yang, Z. F., & Yang, H. W. (2020). Research on low-temperature blood tissues detection biosensor based on one-dimensional superconducting photonic crystal. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 89, 105299. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2020.105299>
- Karothu, D. P., Dushaq, G., Ahmed, E., Catalano, L., Polavaram, S., Ferreira, R., Li, L., Mohamed, S., Rasras, M., & Naumov, P. (2021). Mechanically robust amino acid crystals as fiber-optic transducers and wide bandpass filters for optical communication in the near-infrared. *Nature Communications*, 12(1), 1326. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21324-y>
- Kaviani Baghbadorani, H., & Barvestani, J. (2021). Sensing improvement of 1D photonic crystal sensors by hybridization of defect and Bloch surface modes. *Applied Surface Science*, 537, 147730. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147730>
- Li, H., Low, M. X., Ako, R. T., Bhaskaran, M., Sriram, S., Withayachumnankul, W., Kuhlmeier, B. T., & Atakaramians, S. (2020). Broadband Single-Mode Hybrid Photonic Crystal Waveguides for Terahertz Integration on a Chip. *Advanced Materials Technologies*, 5(7), 2000117. <https://doi.org/10.1002/admt.202000117>
- Mbakop, F. K., Tom, A., Dadjé, A., Vidal, A. K. C., & Djongyang, N. (2020). One-dimensional comparison of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ and Si/SiO_2 photonic crystals filters for thermophotovoltaic applications in visible and infrared. *Chinese Journal of Physics*, 67, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2020.06.004>
- Mehaney, A., Abadla, M. M., & Elsayed, H. A. (2021). 1D porous silicon photonic crystals comprising Tamm/Fano resonance as high performing optical sensors. *Journal of Molecular Liquids*, 322, 114978. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114978>

- Sakata, R., Ishizaki, K., De Zoysa, M., Fukuhara, S., Inoue, T., Tanaka, Y., Iwata, K., Hatsuda, R., Yoshida, M., Gellea, J., & Noda, S. (2020). Dually modulated photonic crystals enabling high-power high-beam-quality two-dimensional beam scanning lasers. *Nature Communications*, *11*(1), 3487. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17092-w>
- Schlafmann, K. R., & White, T. J. (2021). Retention and deformation of the blue phases in liquid crystalline elastomers. *Nature Communications*, *12*(1), 4916. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25112-6>
- Segal, N., Keren-Zur, S., Hendler, N., & Ellenbogen, T. (2015). Controlling light with metamaterial-based nonlinear photonic crystals. *Nature Photonics*, *9*(3), 180–184. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.17>
- Shi, C., Yuan, J., Luo, X., Shi, S., Lu, S., Yuan, P., Xu, W., Chen, Z., & Yu, H. (2020). Transmission characteristics of multi-structure bandgap for lithium niobate integrated photonic crystal and waveguide. *Optics Communications*, *461*, 125222. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.125222>
- Soltani, O., Francoeur, S., Baraket, Z., & Kanzari, M. (2021). Tunable polychromatic filters based on semiconductor-superconductor-dielectric periodic and quasi-periodic hybrid photonic crystal. *Optical Materials*, *111*, 110690. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110690>
- Soltani, O., Zaghdoudi, J., & Kanzari, M. (2020). Tunable filter properties in 1D linear graded magnetized cold plasma photonic crystals based on Octonacci quasi-periodic structure. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, *38*, 100744. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2019.100744>
- Zaky, Z. A., & Aly, A. H. (2020). Theoretical Study of a Tunable Low-Temperature Photonic Crystal Sensor Using Dielectric-Superconductor Nanocomposite Layers. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, *33*(10), 2983–2990. <https://doi.org/10.1007/s10948-020-05584-1>
- Zheng, W., Luo, X., Zhang, Y., Ye, C., Qin, A., Cao, Y., & Hou, L. (2020). Efficient Low-Cost All-Flexible Microcavity Semitransparent Polymer Solar Cells Enabled by Polymer Flexible One-Dimensional Photonic Crystals. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *12*(20), 23190–23198. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c03508>