عملکرد یک نانوحس‌گر در ساختار تلفیقی بلور فوتونی- میکرودیسک

رقیه حمیدی، احمدرضا دارائی، عاطفه محسنی‌فرد

زاهدان: دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده علوم، گروه فیزیک، کد پستی ۶۷۴- ۹۸۱۳۵

چکیده - یکی از ویژگی‌های بلورهای فوتونی، محبوس‌سازی مدهای نوری در حجم مدی کوچک و با فاکتور کیفیت بسیار زیاد است. از جمله ساختار هندسی این بلورها، میکرودیسک بوده که مدهای محبوس در آن تحت نام ویسپرینگ گالری شناخته شده و در نزدیکی جداره داخلی دیواره دیسک تمرکز می‌یابند. در این مقاله، به ارائه ساختار تلفیقی یک میکرودیسک با یک آرایه دایروی از حفره‌های هوا مکعبی که در نزدیکی پیرامون آن تعبیه شده و تشکیل یک بلور فوتونی حلقوی را برای کنترل بیشتر مدها می‌دهد ، پرداخته می‌شود. این حفره‌های هوای مکعبی توسط شیارهایی با عمقی برابر با کسری از ضخامت دیسک به هم مرتبط شده‌اند برای کاربرد یک نانوحس‌گر، طراحی و مهندسی می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی با روش المان محدود نشان می‌دهد که حجم مدی به اندازه $0.077(\lambda/n)^3$ در ناحیه یک شیار مرکزی، قابل حصول است. ویژگی حس‌گری برای هندسه‌های مختلف دیسک، آرایه بلور فوتونی و ابعاد شیارهای متصله مورد آنالیز قرار گرفته و حساسیت قابل قبولی برابر با (نانومتر بر واحد ضریب شکست) *100 nm/RIU* ، قابل دسترسی است.

کلید واژه- بلور فوتونی، نانوحس‌گر، نانوساختار، میکرودیسک.

Operation of a Nano-Sensor in the Joined Photonic Crystal-Microdisk Structure

S. Roghaye Hamidi, Ahmadreza Daraei, Atefeh Mohsenifard

Dept. of Physics, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, P. O. Box: 98135-674, Zahedan

Abstract- One of the characteristics of the photonic crystals is the confinement of light in a small modal volume with high quality factor. The microdisk geometry is one the photonic crystal structures that confine modes are known as the whispering gallery modes which are located near the marginal volume of the disk. In this paper, we present a combined microdisk system with a single circular array of cubical air-holes near its periphery to form an embedded circular photonic crystal and to provide a better control of the modes. These cubical air-holes are connected with grooves to a depth equal to a fraction of the thickness of the microdisk, designed and engineered for application of a nano-sensor. The finite element simulation results show that the modal volume can be as large as $0.077(\lambda/n)^3$ in a region of a central groove. Sensor characteristics are analyzed for various disk geometries, photonic crystal arrays, and dimensions of the connecting slots. Acceptable sensitivities equal to 100 nm/RIU (refractive index unit) are accessible.

Keywords: Photonic Crystal, Nano-Sensor, Nano-Structure, Microdisk.

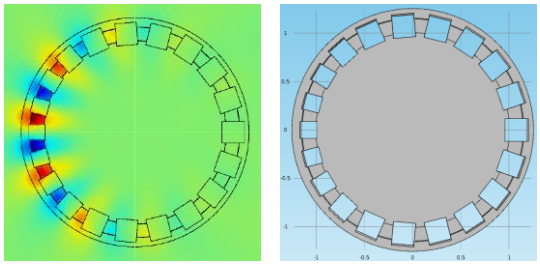
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

بلورهای فوتونی به خاطر ویژگی‌های نوری و کاربردهایی که دارند بالاخص در دهه گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند[۱-۳]. یکی از ویژگی‌های بلورهای فوتونی، محبوس‌سازی مدهای نوری در حجم مدی کوچک و داشتن فاکتور کیفیت بالای مدها است[۴-۶]. این ویژگی‌ها باعث کارآیی بهتر ادواتی شده که برای کاربردهای خاص خود، به محبوس کردن نور در حجم کوچک نیاز دارند. از جمله این ادوات، حس‌گرهای نوری است که دارای گستره مصارف بسیاری از جمله حس‌گرهای شیمیایی و زیستی هستند[۷-۱۰]. ساختارهای مورد مصرف برای این منظور، دارای فیزیک و هندسه متنوعی هستند. در این‌جا حس‌گرهای بر مبنای کاواک نوری که بر پایه تغییر ضریب شکست کار می‌کنند، به خاطر داشتن حساسیت بالا، مورد توجه است[۷].

در این مقاله، به ارائه ساختار کاواک نوری پرداخته شده که تلفیقی از یک مشدد میکرودیسک با یک آرایه از حفره‌های هوای مکعبی در یک مسیر دایروی است. این آرایه در نزدیکی پیرامون میکرودیسک طراحی و اچینگ شده و بنابراین تشکیل یک بلور فوتونی تک‌آرایه حلقوی را می‌دهد. این حفره‌های هوای مکعبی به توسط شیارهایی با عمقی برابر با کسری از ضخامت دیسک به هم مرتبط شده‌اند، و برای کاربرد به‌عنوان یک نانوحس‌گر، طراحی و مهندسی می‌شوند. در شکل ۱، طرحواره‌ای از یک نمونه طراحی‌شده و مد ویسپرینگ گالری (whispering gallery mode) شبیه‌سازی‌شده در این مقاله، دیده می‌شود.



(ب) (الف)

شکل ۱: الف) یک طرحواره از تلفیق مشدد دیسک-بلور فوتونی بعلاوه شیارهای متصل‌کننده، برای کنترل و تمرکز بهتر مدهای ویسپرینگ گالری، نشان داده شده در (ب).

به این ترتیب همان‌طوری که در شکل ۱ (ب) دیده می‌شود، با این‌گونه تلفیق مشدد دیسک-بلور فوتونی بعلاوه شیارهای متصل‌کننده، کنترل و تمرکز مدها بهتر صورت می‌پذیرد، که در بخش‌های بعدی با جزئیات بیشتر به سازوکار آن و نتایج مستخرج از آن پرداخته می‌شود.

۲- ساختار نمونه مورد بررسی

ساختار پایه نمونه مورد شبیه‌سازی در این مقاله، در مرحله اول یک ساختار هندسی به فرم یک میکرودیسک ساده، بوده است. مدهای محبوس در آن تحت نام ویسپرینگ گالری شناخته شده و در نزدیکی جداره داخلی دیواره دیسک تمرکز می‌یابند. میکرودیسک با جداره‌های با هندسه‌های مختلف می‌توانند در کنترل تمرکز مدی نقش داشته باشند. بعلاوه، تمرکز مدهای مورد بحث می‌تواند در ناحیه‌ای از فضای دیسک به صورت موج‌های میراشونده جهت استفاده به‌عنوان حس‌گرهای زیستی، مورد بهره‌برداری قرار گیرند[۷]. برای این منظور، با حفر (اچینگ) یک شیار در مسیر تشکیل این مدها، این ناحیه از امواج الکترومغناطیسی متمرکز انباشته می‌گردند. بهینه‌سازی به توسط تغییر مکان شعاعی شیار و پهنا و عمق آن صورت می‌پذیرد.

حال در این مقاله، این ساختار پایه مشدد نوری، با به‌کارگیری یک آرایه از حفره‌های هوای مکعبی در یک مسیر دایروی، که به صورت تلفیقی از یک مشدد میکرودیسک با تک‌آرایه بلور فوتونی حلقوی ظاهر می‌شود، بهبود داده شده است. این آرایه حفره‌های هوای مکعبی در نزدیکی پیرامون میکرودیسک طوری طراحی و اچینگ شده که به توسط شیارهایی با عمقی برابر با کسری از ضخامت دیسک به هم مرتبط شده‌اند. به این ترتیب، با بهره‌مندی از این آرایش هندسی، تمرکز مدی بسیار بهتر با حجم مدی V_m بسیار کوچک حاصل می‌گردد. در این مبحث، حجم مدی V_m به توسط رابطه زیر تعریف می‌گردد[۶]:

$$V_m \equiv \left(\int_V \varepsilon(\vec{r}) \left| \vec{E}(\vec{r}) \right|^2 d^3\vec{r} \right) \Big/ \max\left(\varepsilon(\vec{r}) \left| \vec{E}(\vec{r}) \right|^2 \right) \quad (۱)$$

که در آن، $\varepsilon(\vec{r})$ ثابت دی‌الکتریک و $\vec{E}(\vec{r})$ میدان الکتریکی مد است.

۳- شبیه‌سازی و آنالیز داده‌ها

برای شبیه‌سازی در این مقاله، ابتدا به بهینه‌سازی مدهای

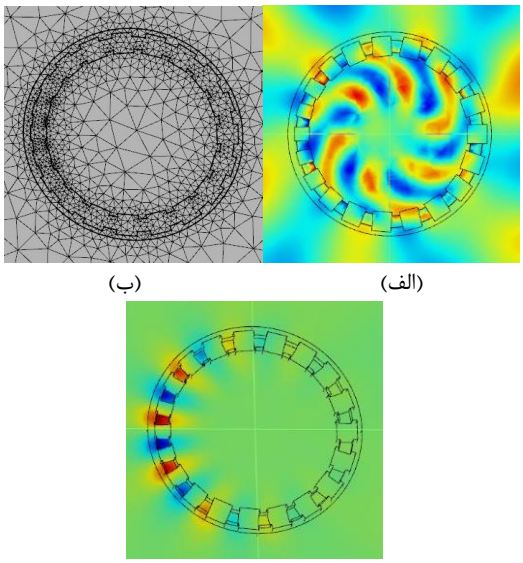
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]

ویسپرینگ گالری محبوس‌شده در ساختار پایه نمونه میکرودیسک ساده، پرداخته شده است. مدها به ناحیه حدود پنجره سوم مخابراتی (۱۵۵۰ nm) تنظیم طیفی شدند. در اینجا، از مد عرضی الکترومغناطیسی که با علامت $TE_{p,m}$ مشخص شده (p عدد مرتبه شعاعی و m عدد مرتبه سمتی)، برای مد مرتبه اول شعاعی (p=۱) و مرتبه بالاتر سمتی (m=۱۰و۱۱)، استفاده گردیده است. تغییرات طول موج این مد برای شعاع‌های مختلف میکرودیسک، مورد بررسی قرار گرفته و بهینه شد.

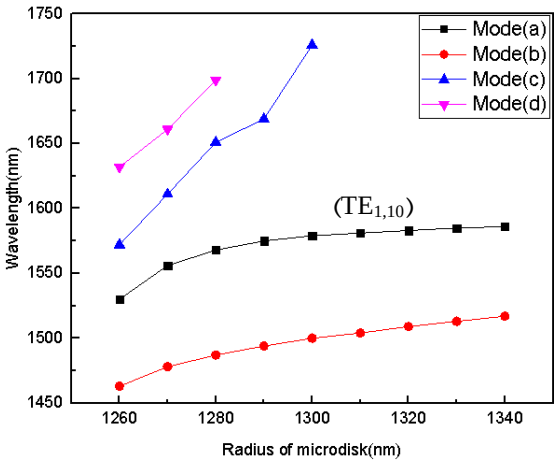
در ادامه، یک آرایه از حفره‌های-هوای مکعبی در مسیر دایروی در نزدیکی پیرامون دیسک در مسیر تشکیل مدهای ویسپرینگ گالری، در نظر گرفته شد. بنابراین با این ترکیب، که متشکل از تلفیق یک بلور فوتونی حلقوی در نزدیکی جداره میکرودیسک با خود مشدد میکرودیسک میزبان است، مدهای تشدیدی جایگزیده‌تر شدند. سپس، این حفره‌های-هوای مکعبی به توسط شیارهایی با عمقی برابر با کسری از ضخامت دیسک به هم مرتبط شدند تا امواج میرایی که در ناحیه شیار مرکزی بیشتر تمرکز یافته‌اند، برای منظور نانوحس‌گری مورد بهره‌برداری قرار گیرند. شکل ۲ ب، یک نمونه مش‌بندی مورد استفاده در شبیه‌سازی با روش المان محدود (Finite element method - FEM) را نشان می‌دهد. در شکل ۲ ب، یک نمونه الگوی توزیع مدی (پروفیل سطحی مد) به نمایش گذاشته شده است که معرف پراکندگی زیاد و عدم دستیابی به مد محبوس ناحیه‌ای است. در حالی‌که بعد از بهینه‌سازی ناحیه مطلوب با شدت موج الکترومغناطیسی ماکزیمم، مطابق شکل ۲ ج، بدست آمده است.

این ناحیه با شدت ماکزیمم، برای منظور حس‌گری مواد بیولوژیکی و شیمیایی می‌تواند، ویژگی‌شناسی (characterize) گردد. بدین ترتیب باید ناحیه شیار بین حفره‌های-هوای مکعبی در مسیر دایروی جداره داخلی میکرودیسک را بهینه‌سازی نمود. وقتی یک نمونه از این‌گونه مواد در این ناحیه قرار می‌گیرد، باعث تغییر در ضریب شکست این ناحیه از ساختار می‌گردد و در نتیجه طول موج مد تنظیمی مقداری جابه‌جا می‌گردد. این جابه‌جایی طول موج به ازای تغییر در ضریب شکست را می‌توان با رابطه $S\equiv\Delta\lambda/\Delta n$ برای حس‌گری (S) با واحد نانومتر بر تغییر واحد ضریب شکست (nm/RIU) معرفی نمود.



شکل ۲: الف) یک نمونه مش‌بندی برای بدست آوردن ب) و ج) الگوی توزیع مدی؛ در (ب) پراکندگی چشمگیر بوده در حالی‌که در (ج) تمرکز مدی در ناحیه شیار بین حفره‌های-هوای مکعبی در یک مسیر دایروی، مشهود است.

همان‌طوری که ذکر شد، قبل از این مراحل باید طول موج مدهای بهینه مطلوب تعیین شوند. برای این منظور، تغییرات طول موج مدهای مورد نظر با تغییرات شعاع میکرودیسک در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: تغییرات طول موج مدها ازجمله مورد نظر ($TE_{1,10}$) با تغییرات شعاع میکرودیسک.

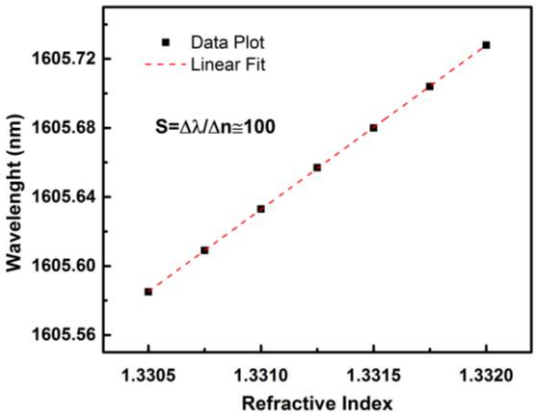
البته تحقیق شد که عموماً با افزایش شعاع دیسک و شماره سمتی مد، پرتوهای مدهای ویسپرینگ گالری به دیواره دیسک فشرده‌تر شده و در نتیجه ، کاهش حجم

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]

مدی را به دنبال خواهد داشت. در مرحله طراحی ساختار با ۲۰ حفره-هوای مکعبی در حاشیه میکرودیسک، افزایش ابعاد حفره، در حالی‌که شعاع میکرودیسک ثابت است، کاهش حجم مدی را نتیجه می‌دهد. در ادامه بررسی، با وجود شیارهایی بین حفره‌های-هوا تغییرات طول موج، حجم مدی و الگوی توزیع شدت مد محبوس شده بررسی گردیدند. مدهای مورد بررسی به گونه‌ای باید انتخاب گردند که کماکان بعد از تغییرات در یکی از پارامترها، همچنان در نواحی مورد نظر به‌طور مطلوب متمرکز باقی بمانند. با دستکاری پهنای شیار، افزایش تمرکز مد و یا به‌عبارتی کاهش بیشتر حجم مدی برای یک مد ویسپرینگ گالری، تا حدود $0.077(\lambda/n)^3$ حاصل می‌گردد که در آن، λ طول موج مد مربوطه و n ضریب شکست مؤثر میکرودیسک است.

برای مصارف کاربردی، از نظر عمل حس‌گری، با تغییرات ماده‌ای که قسمت مرکزی شیار را پر کرده، حساسیتی به میزان 100 nm/RIU به‌دست آمده است. شکل ۴، یک نمودار تغییرات طول موج مد را بر حسب تغییرات ماده پرکننده شیار، نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمودار تغییرات طول موج مد بر حسب تغییرات ماده پرکننده شیار.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

محبوس‌سازی مدهای نوری با فاکتور کیفیت بسیار زیاد و حجم مدی کوچک یکی از خصوصیات بلورهای فوتونی با هندسه‌های متفاوت، است. از جمله ساختارهای هندسی این بلورها، مشدد نوری میکرودیسک بوده که مدهای محبوس در آن به نام ویسپرینگ گالری معروف بوده و در نزدیکی جداره داخلی دیواره جانبی دیسک تمرکز می‌یابند. این میکرودیسک‌ها دارای ضخامتی کمتر از نصف طول موج هستند، تا امواج را در صفحه دیسک محدود کنند. در این مقاله، برای کنترل بیشتر مدها به طراحی و شبیه‌سازی ساختار تلفیقی از یک میکرودیسک و یک آرایه دایروی از حفره‌های هوا مکعبی که در نزدیکی پیرامون آن تعبیه شده و تشکیل یک آرایه بلور فوتونی را می‌هد، پرداخته شده است. برای مقاصد کاربردی مثلاً یک نانوحس‌گر، شیارهایی با عمقی برابر با کسری از ضخامت میکرودیسک، این حفره‌های هوای مکعبی را به هم مرتبط نمودند، تا مدهای مهندسی‌شده در اختیار قرار گیرند. نتایج شبیه‌سازی با روش المان محدود برای این ساختارها نشان می‌دهند که حجم مدی به اندازه $0.077(\lambda/n)^3$ در ناحیه یک شیار مرکزی، قابل حصول است. خصوصیت حس‌گری برای هندسه‌های مختلف میکرودیسک، که با آرایه بلور فوتونی تلفیق یافته و ابعاد شیارهای متصله متغیر در نظر گرفته شدند، مورد آنالیز قرار گرفته و حساسیت قابل قبولی برابر با (نانومتر بر واحد ضریب شکست) 100 nm/RIU ، قابل ثبت است.

مراجع

[1] B. E. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, Wiley Series in Pure and Applied Optics, John Wiley & Sons, Inc., 2nd Ed. 2007.

[2] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade, *Photonic Crystals - Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, 2nd Ed., 2008.

[3] E. Yablonovitch, "Photonic band-gap crystals", J. Phys. Condens. Matter 5(16), 2443, 1993.

[4] D. Sanvitto, A. Daraei, A. Tahraoui, M. Hopkinson, P. W. Fry, D. M. Whittaker, M. S. Skolnick, "Observation of ultrahigh quality factor in a semiconductor microcavity", Appl. Phys. Lett. 86, 191109, 2005.

[5] M. I. Cheema, A. G. Kirk, "Accurate determination of the quality factor and tunneling distance of axisymmetric resonators for biosensing applications", Opt. Express 21(7), 8724-8735, 2013.

[6] K. Srinivasan, M. Borselli, O. Painter, A. Stintz, S. Krishna, "Cavity Q, mode volume, and lasing threshold in small diameter AlGaAs microdisks with embedded quantum dots", Opt. Express 14(3), 1094-1105, 2006.

[7] A. Daraei, M. E. Daraei, "Thin cylindrical slot in an optical microdisk cavity for sensing biomaterials", Applied Physics A, 123(4), p. 216, 2017.

[8] J. M. Lourtioz, H. Benisty, V. Berger, J. M. Gérard, D. Maystre, A. Tchelnokov, *Photonic Crystals: Towards Nanoscale Photonic Devices*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2nd Ed., 2008.

[9] Cicek, K., Eryürek, M. and Kiraz, A., "Single-slot hybrid microring resonator hydrogen sensor", JOSA B, 34(7), pp.1465-1470, 2017.

[10] S. M. Grist, S. A. Schmidt, J. Flueckiger, V. Donzella, W. Shi, S. T. Fard, J. T. Kirk, D. M. Ratner, K. C. Cheung, L. Chrostowski, "Silicon photonic micro-disk resonators for label-free biosensing", Opt. Express 21(7), 7994-8006, 2013.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]