

طراحی و شبیه‌سازی یک ساختار Woodpile با فرکانس میانی 1.3 GHz

وحید کشمیری**، بهنام امیریان*، سید حسین کشمیری*
* آزمایشگاه تحقیقاتی میکروالکترونیک، دانشگاه فردوسی مشهد
** موسسه آموزش عالی سجاد مشهد

چکیده: ساختار سه بعدی Woodpile به دلیل برخورداری از نوار ممنوع کامل فوتونیکی¹ کاربردهای فراوانی در قطعات مخابرات نوری از جمله مالتی پلکسرها، گیرنده‌ها و انتقال دهنده‌های نوری دارد. در این مقاله نتایج طراحی و شبیه‌سازی ساختار Woodpile در فرکانس میانی 1.3 GHz نشان داده شده است. طراحی ساختار با میله‌های آلومینا² که دارای ثابت دی الکتریک 9.5 و گزینه‌ای مناسب جهت کاهش تلفات در قطعه طراحی شده می‌باشد، انجام گرفته است. محاسبات و شبیه‌سازی ساختار نوار، طیف نوار ممنوع و نقشه نوارها³ با استفاده از نرم افزار RSoft CAD و تکنیک بسط موج سطحی PWE⁴ انجام شده است.

Design and simulation of a Woodpile Structure With Midgap Frequency of 1.3 GHz

Behnam Amirian*, Vahid Keshmiri**, Sayyed-Hosein Keshmiri*

* Microelectronic Research Laboratory, Ferdowsi university of Mashhad
** Sadjad University of Higher Education

Abstract – The Woodpile 3D structure as a result of its complete photonic band gap has many applications in optical communication devices such as multiplexers, transceivers and optical transmitters. In this paper, results of design and fabrication of a Woodpile structure with midgap frequency of 1.3 GHz are demonstrated. The structure has designed with Alumina rods, which have a dielectric constant of 9.5, and is an appropriate selection for dissipation reduction in the designed device. Calculation and simulation of band structure, photonic

¹ Complete Photonic Band Gap
² Alumina Rods
³ Gap Map
⁴ Plane Wave Expansion

bandgaps, and gap maps are performed with Rsoft CAD Software and Plane Wave Expansion method (PWE).

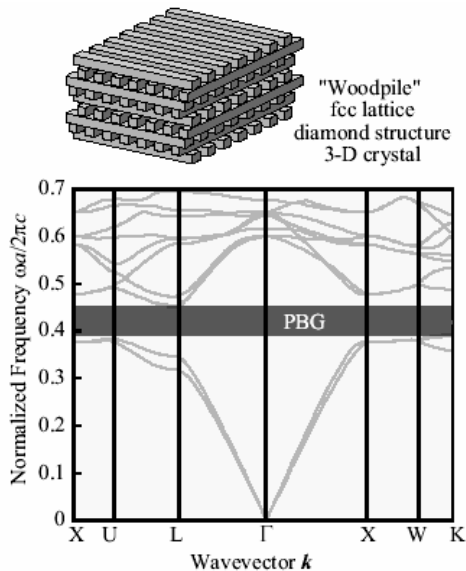
Keywords: Alumina, Photonic BandGap, Photonic Crystals, Woodpile Structure.

کلمات کلیدی: آلومینا، بلور فوتونیک، ساختار Woodpile، نوار ممنوع فوتونیک.

۱- مقدمه:

در دو دهه گذشته موضوع جدید کنترل ویژگیهای نوری یک ماده با هدفی مشابه مطالعات انجام شده در نیمه هادیها مطرح گردید. این امر منجر به طراحی و ساخت کلاسی جدید از مواد با نام "بلورهای فوتونیک" گردید که انقلابی عظیم را در زمینه‌های مختلف علمی و کاربردی و به ویژه در صنعت مخابرات باعث شد. برای مثال، لیزرها، انواع فیلترهای مخابرات نوری، فرستنده-گیرنده‌های نوری، رایانه‌های نوری نسل جدید از کاربردهای این مواد می‌باشند. بلورهای فوتونیک شامل یک آرایش تناوبی از اتم‌ها یا مولکول‌ها است که با استفاده از ویژگی‌های ساختاری خود، اجازه انتشار نور در امتدادها و فرکانس‌های خاص را می‌دهند. ساختارهای بلورهای فوتونیک می‌توانند یک بعدی، دو بعدی، سه بعدی و به صورت مربعی، مثلثی، شش ضلعی، و یا شانه‌عسلی^۵ طراحی شوند [1]. یکی از مهمترین ساختارهای سه بعدی که توسط ییلونوویچ^۶ در سال ۱۹۸۷ ساخته شد، ساختار Woodpile است که به دلیل برخورداری از ساختار الماسی دارای نوار ممنوع نسبتاً بزرگی می‌باشد. همچنین آرایش نسبتاً پیچیده این شبکه یک گزینه مناسب جهت کاربردهای بلورهای فوتونیک در امواج میلیمتری می‌باشد [2].

۲- تشریح تئوری ساختار woodpile:

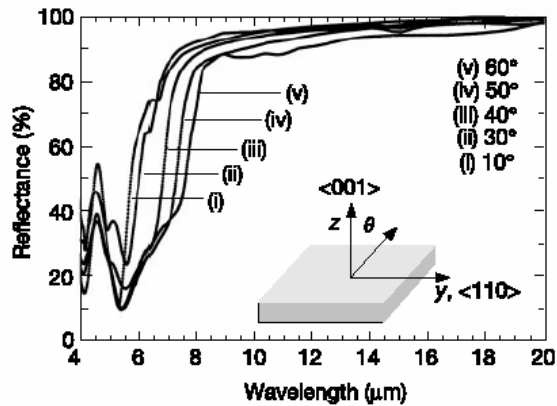


اغلب بلورهای فوتونیک سه بعدی به دلیل آرایش شبکه‌ای مناسب و نسبت بالای ثابت‌های دی الکتریک دارای نوار ممنوع کامل می‌باشند (اختلاف ثابت‌های دی الکتریک معمولاً به صورت مناطق با نسبت ثابت‌های دی الکتریک بالا و پایین $\frac{\epsilon_{high}}{\epsilon_{low}}$ نشان داده می‌شود).

نوار ممنوع کامل سبب می‌شود تا نور تابیده با هر زاویه تابشی در گستره فرکانسی واقع نوار ممنوع، از بلور عبور نکرده و منعکس شود. البته درصد این بازتاب با کاهش زاویه تابش، افزایش می‌یابد. شکل (۲) این ویژگی را نمایش می‌دهد.

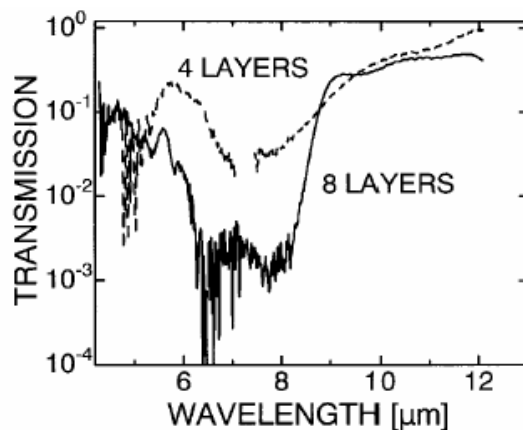
شکل ۱: ساختار نوار یک بلور فوتونیک سه بعدی woodpile [5].

⁵ Honeycomb
⁶ Yablonovitch



شکل ۲: نمودار درصد بازتاب ساختار Woodpile بر حسب طول موج در زوایای مختلف تابش [3].

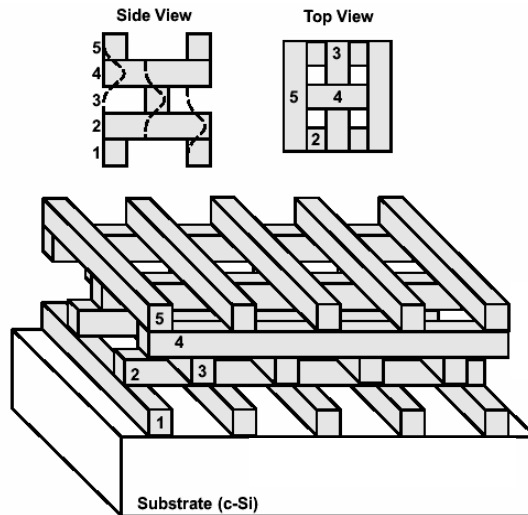
بنابراین درصد عبور در این نوع ساختارها در گستره نوار ممنوع تقریباً صفر و بازتاب نزدیک به ۱۰۰٪ می‌باشد. علاوه بر این، تغییر تعداد لایه‌ها و تغییر ضخامت میله‌های آلومینا هم می‌تواند در تغییر درصد بازتاب موثر باشد. بطور مثال درصد بازتاب ساختار چهار لایه حدود ۹۸٪ و ساختار هشت لایه حدود ۹۹/۹٪ می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است [3].



شکل ۳: مقایسه نمودار عبور بر حسب طول موج هنگامی که ساختار ۴ لایه یا ۸ لایه باشد [4].

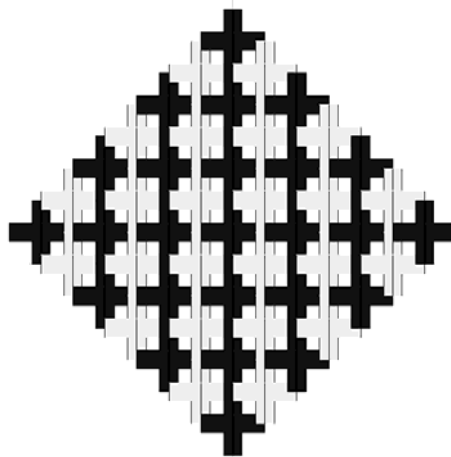
۳- طراحی و شبیه‌سازی ساختار Woodpile

در این شبیه‌سازی از نرم افزار Rsoft CAD که ابزاری قدرتمند جهت محاسبه، طراحی و شبیه‌سازی قطعات در ساختارهای بلورهای فوتونیک است و از روش PWE استفاده شده است. طراحی ساختار به این ترتیب است که آرایه‌های تناوبی از میله‌های دی‌الکتریک روی آرایه دیگری از میله‌ها که عمود بر یکدیگر می‌باشند، قرار داده می‌شوند.



شکل ۴: نحوه قرار گرفتن میله‌های آلومینا در یک بلور فوتونیک با ساختار woodpile [6].

آرایه ردیف سوم با یک انتقال به اندازه $\frac{1}{2}a$ (a ثابت شبکه یا فاصله مراکز هر دو میله دی‌الکتریک می‌باشد) نسبت به آرایه ردیف اول، بر روی آرایه ردیف دوم قرار می‌گیرد و آرایه ردیف چهارم هم به همین ترتیب با یک انتقال به اندازه $\frac{1}{2}a$ نسبت به آرایه ردیف دوم جایگذاری شده، و این تناوب ادامه می‌یابد. شکل (۴) نمونه‌ای از کار را نشان می‌دهد، و شکل (۵) بیانگر پیاده‌سازی این ساختار در نرم افزار مورد اشاره می‌باشد. طراحی ساختار با میله‌های آلومینا مطابق آنچه ذکر شد، انجام گرفت. ساختار طراحی شده در امتداد محورهای افقی x و عمودی z است، محور y عمود بر صفحه می‌باشد.



شکل ۵: نمایش ساختار woodpile طراحی شده در نرم افزار Rsoft.

مشخصات ساختار طراحی شده به قرار زیر می‌باشد:

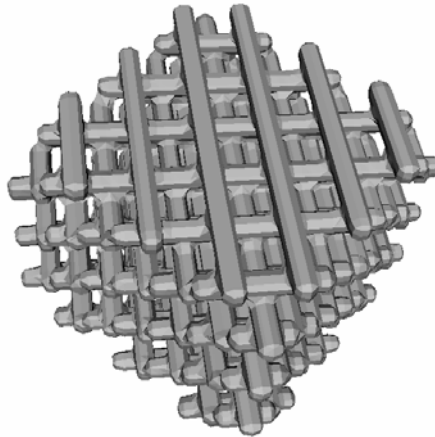
طول میله‌های دی‌الکتریک: ۶۶۲ میکرومتر

طول موج مطلوب: ۰/۲۳ متر

ضخامت میله‌های دی‌الکتریک: ۲۷/۴ میکرومتر

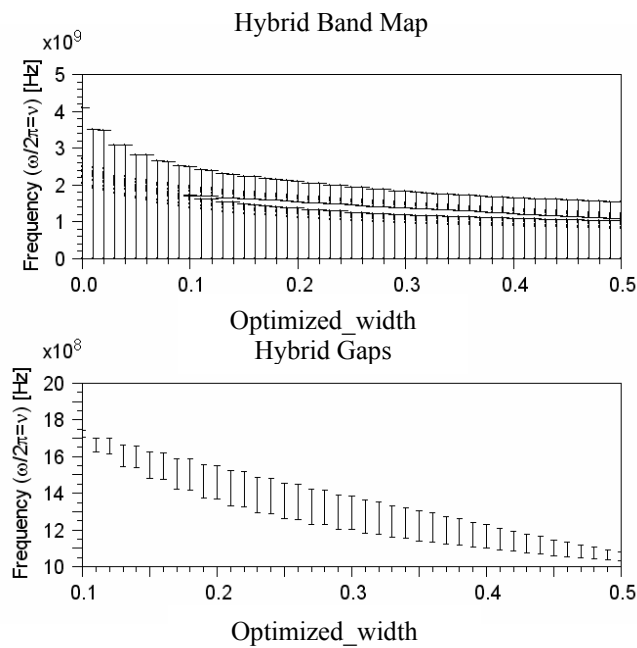
فرکانس میانی نوار ممنوع مطلوب: ۱/۳ GHz

ثابت شبکه (فاصله بین مراکز میله‌ها): ۹۴ میلی‌متر



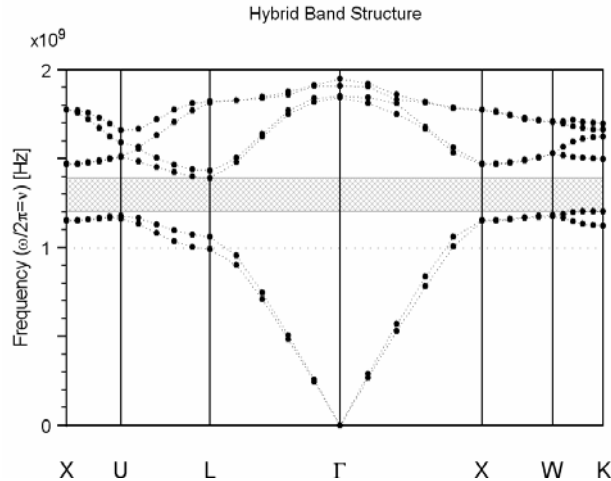
شکل ۶: نمایش ساختار طراحی شده با نرم افزار Mayavi که یک نمایشگر سه‌بعدی است.

جهت حصول نوار ممنوع با بزرگترین پهنا، متغیری با نام `optimized_width` را در نرم افزار تعریف نموده و با رویش این متغیر در گستره فرکانس ۱ GHz تا ۵ GHz، مقدار مطلوب `optimized_width = ۰/۲۹` را به دست آوردیم.



شکل ۷: نمودار حاصل از رویش متغیر `optimized_width` بر حسب فرکانس.

پس از شبیه سازی به روش بسط موج سطحی (PWE)، ساختار نوار شکل (۸) حاصل می‌شود که دارای فرکانس میانی ۱/۳ GHz و عرض نوار ممنوع ۱۴/۵۹٪ کل ساختار نوار می‌باشد. لازم به ذکر است چنانچه فرکانس میانی کار را افزایش دهیم، می‌توانیم ساختار نواری با نوارهای ممنوع با پهنای بزرگتر را هم به دست آوریم.



شکل ۸: نمودار ساختار نوار با فرکانس مرکزی نوار ممنوع ۱/۳ GHz.

۴- مزایای این طراحی:

- موجود بودن و در دسترس بودن فرکانس کار ۱/۳ GHz در آزمایشگاه جهت ساخت و انجام آزمایش به صورت تجربی.
- محقق شدن نوار ممنوع کامل به دلیل تداخل کامل پلاریزاسیون TE و TM که در شکل (۸) نشان داده شد.
- انعطاف پذیری روش به کار گرفته شده در طراحی جهت رسیدن به نوارهای ممنوع بزرگتر
- استفاده از تکنیک بسط موج سطحی (PWE) به جای روش حوزه زمانی اختلاف محدود (FDTD)^۷ که دارای مزایایی از قبیل محاسبه مدهای ساختار بدون نیاز به تخمین و خطای اضافی و نمایش نوارهای تبهگن^۸ می باشد (در کاربردهای تجاری از ترکیب این دو روش استفاده می کنند).

۵- نتیجه:

شبیه سازی انجام شده نشان می دهد که چنانچه فرکانس میانی کار را افزایش دهیم، قادر به رسیدن به نوارهای ممنوع با گستره فرکانسی بزرگتر نیز می باشیم. همچنین چنانچه یک دستگاه آزمایشگاهی شامل یک منبع موج (دیود گان^۹)، هورن^{۱۰}، و آشکارساز موج فراهم شود، می توان با هدایت نور در فرکانس مذکور به سمت ساختار پدیده شکست منفی را مورد مطالعه قرار داد. این خصوصیت کاربرد فراوانی در مخابرات به ویژه در توسعه میدان دریافت گیرنده های نوری دارد.

۶- سپاسگذاری:

از آقای جواد زربخش از دانشگاه Linz اتریش که نرم افزار Rsoft را جهت انجام محاسبات و شبیه سازی های مربوط به این پروژه در اختیار قرار دادند، تشکر و قدردانی می شود.

⁷ Finite-Difference Time-Domain

⁸ Degenerate

⁹ Gunn diode

¹⁰ Horn

- [1] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, "*Photonic Crystals – Molding the flow of light*", Princeton University Press, 1995.
- [2] R. Gajic, R. Meisles, J. Radovanovic, F. Kuchar, K. Hingerl, J. Zarbakhsh, "*Physics and Materials Aspects of Photonic Crystal for Microwave and millimeter Wave*", **Carl hanser Verlag**, Munich, Germany, pp. 618-623, 2004.
www.hanser.de/mk
- [3] J. G. Fleming, S. Y. Lin, I. El-Kady, R. Biswas & K. M. Ho, "*All-metallic three-dimensional Photonic crystals with a large infrared bandgap*", **Nature**, Vol. 417, 2 May 2002.
- [4] S. Noda, N. Yamamoto, M. Imada, H. Kobayashi, M. Okano, "*Alignment and Stacking of Semiconductor Photonic Bandgaps by Wafer-Fusion*" **Journal of Lightwave Technology**, Vol. 17, No. 11, November 1999
- [5] Toshihiko Baba, "*Photonic Crystals: An Introduction*", www.Jsps.go.jp/english/e-jafos/abstract/abst08.pdf
- [6] Michiel de Dood, "*Silicon Photonic Crystals and Spontaneous Emission*", Ph.D. thesis, Utrecht University of Holland, April 2002. www.amolf.nl/publications/theses/dood/cap12.pdf

