مقایسه نتایج شبیه‌سازی بلور فوتونی با استفاده از روش FDTD دوبعدی بهبودیافته و FDTD سه‌بعدی

تهمینه جلالی[۱] احمد محمدی[۲]

۱- استادیار- گروه فیزیک- دانشگاه خلیج فارس- بوشهر- ایران
jalali@pgu.ac.ir
۲- استادیار- گروه فیزیک - دانشگاه خلیج فارس- بوشهر- ایران
mohammadi@pgu.ac.ir

چکیده: با استفاده ازداده‌های آزمایشگاهی، دقت روش تفاضل متناهی دامنه زمان FDTD دوبعدی بهبودیافته با روش FDTD سه بعدی مقایسه می‌گردد. برای این منظور از موجبر خمیده 60^{o} بلور فوتونی بهینه استفاده شده است. با توجه به هندسهٔ موجبر بلور فوتونی، قطبش الکتریکی عرضی در نظر گرفته شده است. این داده‌ها از تکنیک End-Fire در آزمایشگاه به دست آمده‌اند. با محاسبه‌ی گذردهی موثر در الگوریتم یی نشان می‌دهیم که روش FDTD بهبودیافته دوبعدی توافق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی سه بعدی دارد. با توجه به سادگی الگوریتم و کارایی روش دوبعدی می‌توان شبیه‌سازی ابزارهای بلور فوتونی را بر روی کامپیوترهای شخصی با سرعت قابل قبولی انجام داد. همچنین این روش قابل استفاده برای بلورهای فوتونی با هر ساختار و ماده‌ای می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن سرعت بالای روش دوبعدی در مقایسه با سه بعدی و امکان اجرای آن بر روی کامپیوترهای شخصی می‌توان از این روش دوبعدی برای مطالعات بنیادی و بهینه‌سازی ابزارهای بلور فوتونی استفاده کرد.

کلمات کلیدی: بلور فوتونی، روش تفاضل متناهی دامنه زمان، شبیه‌سازی، موجبر.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۶/۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۲۸
نام نویسنده‌ی مسئول: تهمینه جلالی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – بوشهر – خیابان شهید ماهینی – دانشگاه خلیج فارس – دانشکده‌ی علوم

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

۱- مقدمه

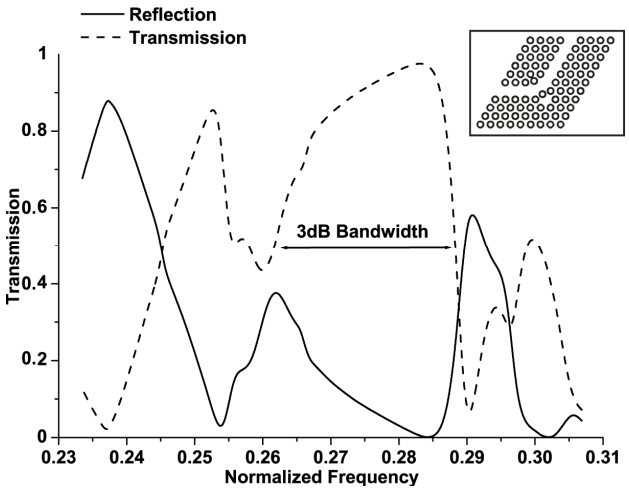
با جایگزینی المان‌های الکترونیکی توسط ابزارهای اپتیکی و به عبارت دیگر جایگزینی الکترون توسط فوتون می‌توان به سرعت و ظرفیت‌های بالاتر دسترسی پیدا کرد. در پی این تحول، علم اپتوالکترونیک به سرعت فراگیر شده و در جهت بهبود زندگی بشر به کار آمده است. در این میان بلورهای فوتونی پتانسیل بسیاری دارند که با اهمیت‌ترین قسمت وسایل تشکیل‌دهنده مدارات مجتمع فوتونی، معادل با هر ابزار الکترونیکی رایج باشند. به همین دلیل امروزه بلورهای فوتونی خود را به عنوان شاخه‌ای جدید و مورد علاقه‌ی پژوهشگران در زمینه‌های بسیاری همچون اپتوالکترونیک، مخابرات، فیزیک و ... شناسانده‌اند. بلورهای فوتونی موادی با ساختار تناوبی در یک، دو و سه بعد هستند[۱]. در بلورهای فوتونی گاف نواری (بازه بسامد ممنوعه) وجود دارد که اجازه انتشار هیچ موجی را نمی‌دهد. وجود گاف نواری فوتونی در بازه‌های بسامدی مشخص، به همراه ایجاد نقص‌های نقطه‌ای یا خطی منجر به قابلیت تنظیم خواص اپتیکی بلورهای فوتونی شده است؛ و کاربرد این بلورها را در ابزارهای اپتیکی و فوتونی بسیاری چون لیزرهای میکروکاواک، سوئیچ‌های اپتیکی با سرعت بالا یا دیودهای گسیلنده‌ی نور امکان‌پذیر می‌سازد. از گاف‌های انرژی در این بلورها برای ساخت آینه‌ها، موجبرها و میکروکاواک‌های با بازده بالا استفاده می‌شود و می‌توان مدارهای کامپیوتری تمام نوری در ابعاد مینیاتوری ساخت[۳-۱]. در حال حاضر از این ابزار قدرتمند در نمایشگرها، دیودهای نورافشان، سلول‌های خورشیدی، حسگرهای نوری، لیزرهای دیودی و ... استفاده می‌شود [۴]. کاواک‌های بلور فوتونی نور را قویا در حجم کوچکی محبوس می‌کنند و کاربردهای بسیاری از جمله، برهم‌کنش بین الکترون و فوتون، اپتیک غیرخطی، پردازش اطلاعات کوانتومی، لیزرهای با آستانه پایین و فیلترهای با دقت بالا، دارند [۵]. اخیراً بلورهای فوتونی مغناطیسی در انتشاردهنده‌های دورانی، ایزولاتورها و مبدل‌های نوری فوق سریع برای پردازش لیزری تصویر نیز به کار برده شده‌اند[۶].

در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی بر روی بلورهای فوتونی دوبعدی به علت ساخت و بهینه‌سازی ساده‌تر آنها نسبت به بلور فوتونی کاملا سه بعدی انجام یافته است [۴و۳]. با توجه به هزینه بالای ساخت ابزارهای اپتیکی بر پایه بلور فوتونی ، نیازمند طراحی دقیق و مدلسازی این ابزارها به کمک تکنیک‌های محاسباتی می‌باشیم. برای بررسی این گونه ساختارها روش‌های محاسباتی متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش FDTD[1] تکنیک محاسباتی می‌باشد که در حوزه‌های مختلفی ازجمله مهندسی، فیزیک و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور شبیه‌سازی آنتن‌ها، مدارات الکترونیکی، نانوذرات، ابزارهای بلورهای فوتونی و... روش FDTD بررسی و استفاده شده است[۱۱-۷]. از مزایای روش FDTD می‌توان به سادگی به هنگام شدن الگوریتم و رفتار قابل کنترل واگرایی با در نظر گرفتن نقاط نمونه فضایی اشاره کرد [۱۲]. موضوعی مهم در شبیه‌سازی به روش FDTD دقت بر روی مرزهای ماده است، که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. در روش FDTD تقسیم‌بندی مدل اغلب با شبکه‌بندی دکارتی انجام می‌شود، که این شبکه‌های اعمال شده بر اجسام اختیاری انحنادار، منجر به سلول‌های مربعی نیمه پر با گذردهی دی‌الکتریک متفاوت می‌شود[۱۱-۱۰]. در این جا از روش FDTD بهبودیافته برای محاسبه و اعمال کردن گذردهی در الگوریتم یی استفاده نموده‌ایم. ساختار تناوبی بلور فوتونی نواحی مرزی بسیاری را نتیجه می‌دهد. در الگوریتم یی[۱۲] در ابعاد بزرگ، اثر مرزها از اهمیت کمی برخوردار است ولی در ابعاد خیلی کوچک این اثرات بسیار با اهمیت می‌باشد. به منظور داشتن گاف ممنوعه فوتونی بزرگ، ساختار بلور فوتونی باید تضاد ضریب شکست داشته باشد. هر دو این موضوعات برای شبیه‌سازی هر نوع مسئله‌ی مرزی بسیار با اهمیت می‌باشند و مدل بسیار خوبی برای اعتبارسنجی کد FDTD بهبودیافته است.

در این مقاله، نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی عبور موجبر خمیده 60^{o} بلور فوتونی [۱۴] با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی به روش FDTD دو و سه بعدی مقایسه شده است. ساختار مقاله بدین صورت است: ابتدا ساختار موجبر خمیده 60^{o} بلور فوتونی معرفی می‌گردد. سپس روش FDTD سه بعدی و روش FDTD بهبودیافته دوبعدی ارایه می‌شود. نهایتا به تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از هر دو روش پرداخته و آنها را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌کنیم. در انتهای مقاله نتیجه‌گیری آمده است.

۲- موجبر خمیده 60^{o} بلور فوتونی

هر کدام از تغییرات در آرایش دوره‌ای بلور منجر به خلق ابزاری جدید می‌گردد. هر بلور فوتونی دارای نواری ممنوعه می‌باشند، که با ایجاد نقص خطی در بلور فوتونی، نور مجاز به عبور با بعضی طول‌موج‌های مشخص می‌شود. بره‌های بلور فوتونی دو بعدی نقش کنترل نور را بین بعد دوم و سوم دارند.



شکل (۱): عبور و انعکاس موجبرخمیده 60^{o} بلو فوتونی بهینه[۱۱]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.10- No.1 Spring & Summer 2013

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

در موجبرهای معمولی، شعاع خمیدگی محدود به چندین میلی-متر می‌باشد، ولی موجبر در بلور فوتونی به دلیل این که نور قویا توسط ساختار تناوبی هدایت می‌شود، اجازه خمش نور را در ابعاد نانو، قابل مقایسه با طول‌موج، می‌دهد. به منظور داشتن گاف نواری ممنوعه پهن طول‌موج اعمالی ۱۵۵۰ نانومتر و فاکتور پرشدگی ۳۵٪ انتخاب شده است و بلور از ماده‌ی InPGaAs\InP تشکیل یافته است. موجبر ساختار شش وجهی و خمشی با زاویه‌ی ۶۰° دارد. کل ساختار بسیار کوچک و شامل ۴×۵ ثابت شبکه است. پهنای نواری این موجبر بهینه-سازی شده تا ۲۹٪ کل گاف نواری ممنوعه افزایش یافته و بیشینه‌ی بازده عبور ۹۶٪ است(شکل ۱)[۱۳]. در این کار، با توجه به هندسهٔ موجبر بلور فوتونی، قطبش الکتریکی عرضی ($TE^{۲}$) در نظر گرفته شده است.

۳- روش عددی FDTD استاندارد

هنگامی که ابعاد ساختارها به طول‌موج اپتیکی (نانومتر) کاهش می‌یابد، اعتبار بسیاری از تقریب‌های محاسبات عددی معادله‌های الکترومغناطیسی از بین می‌رود. یکی از روش‌های مورد توجه، روشFDTD است[۱۲]. شبیه‌سازی طیف عبور موجبر بلور فوتونی به روش FDTD دوبعدی در مقالات بسیاری بررسی شده است. همچنین بعضی از مقالات به شبیه‌سازی سه بعدی طیف عبور پرداخته‌اند[۷-۳]. با توجه به این که در سه بعد مدهای اتلافی نیز به حساب می‌آید، شبیه‌سازی سه بعدی طیف عبور به واقعیت نزدیک‌تر است. در دوبعد مد نقص در بلور بدون اتلاف منتشر می‌شود، در حالی که در سه بعد انتشار مدهای نقص محدود به انعکاس داخلی در صفحه می‌شوند.

در روش FDTD، فضای شبیه‌سازی به سلول‌های مکعبی تقسیم می‌گردد و بر روی هر سلول مؤلفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی با ترتیب خاصی قرار داده می‌شوند. سپس با به کارگیری تفاضل متناهی بر روی معادلات وابسته به زمان ماکسول، مجموعه‌ای از روابط برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های مختلف میدان الکترومغناطیسی برحسب مقادیر مربوطه در زمان قبل به دست می‌آیند. در الگوریتم یی، ابتدا میدان‌های مورد بحث با شرایط اولیه‌ی مناسب مقداردهی می‌شوند و سپس در یک حلقه‌ی زمانی مقادیر جدید برای هر مؤلفه با در اختیار داشتن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مجاور در یک گام زمانی عقب‌تر به دست می‌آیند. پس از پایان یافتن زمان شبیه‌سازی، با در اختیار داشتن مقادیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در تمامی سلول‌ها، می‌توان کمیت‌های فیزیکی مورد نظر را محاسبه کرد. در روش‌های عددی مثل FDTD برای شبیه‌سازی مسایل با مرزهای باز از شرط مرزی لایه‌ای جاذب ساختگی با عنوان لایه‌ی کاملا جور شده ($PML^{۲}$) استفاده می‌شود، تا بتوان فضای محاسباتی را کوتاه کرد. همچنین با استفاده از این لایه‌های PML از انعکاس امواج الکترومغناطیسی به درون ساختار از لبه‌های فضای محاسباتی جلوگیری می‌شود.

در روش FDTD سه‌بعدی مورد استفاده از ساختاری با شبکه-بندی غیریکنواخت استفاده شده است. شبکه غیرهمگن سه‌بعدی با گره‌های شبکه مختصات یک‌بعدی بدین صورت می‌باشند.

$$\{x_i, i=1, N_x\};\quad \{y_j, j=1, N_y\};\quad \{z_k, k=1, N_z\} \qquad (۱)$$

سلول و مراکز لبه‌ها در فضای غیرخطی به صورت زیر معرفی می‌شود.

$$\begin{aligned} x_{i+1/2} &= x_i + \Delta x_i/2 \\ y_{j+1/2} &= y_j + \Delta y_j/2 \\ z_{k+1/2} &= z_k + \Delta z_k/2 \end{aligned} \qquad (۲)$$

میدان E و H در شبکه غیرخطی به صورت زیر نمایش داده می‌شوند:

$$\begin{aligned} E_x\big|^{n}_{i+1/2,j,k} &\equiv E_x\left(x_{i+1/2}, y_j, z_k, n\Delta t\right) \\ H_x\big|^{n+1/2}_{i,j+1/2,k+1/2} &\equiv H_x\left[x_i, y_{j+1/2}, z_{k+1/2}, (n+1/2)\,\Delta t\right. \end{aligned} \qquad (۳)$$

این الگوریتم براساس تقسیم‌بندی معادلات ماکسول به صورت انتگرالی انجام شده است[۱۲]. محاسبه مشتق زمانی با استفاده از تقریب تفاضل مرکزی به رابطه‌ی زیر منجر می‌شود:

$$\begin{aligned} &H_x\big|^{n+1/2}_{i,j+1/2,k+1/2} h_{x_i} - H_x\big|^{n+1/2}_{i,j-1/2,k+1/2} h_{x_i} \\ &- H_y\big|^{n+1/2}_{i+1/2,j,k+1/2} h_{y_j} + H_y\big|^{n+1/2}_{i-1/2,j,k+1/2} h_{y_j} = \\ &-\left[\varepsilon_{i,j,k+1/2}\left(\frac{E_z\big|^{n+1}_{i,j,k+1/2} - E_z\big|^{n}_{i,j,k+1/2}}{\Delta t}\right)\right. \\ &\left.+\frac{\sigma_{i,j,k+1/2}}{2}\left(\frac{E_z\big|^{n+1}_{i,j,k+1/2} + E_z\big|^{n}_{i,j,k+1/2}}{\Delta t}\right) + J\big|^{n+1/2}_{i,j,k+1/2}\right] h_{x_i} h_{y_j} \end{aligned} \qquad (۴)$$

که $h_i^x = (\Delta x_i + \Delta x_{i-1})/2; i = 2, N_x$ است. مولفه‌های دیگر میدان نیز به روش مشابه به دست می‌آیند[۱۲]. که در این رابطه $\mu_{i+1/2,j+1/2,k}$ ، $\varepsilon_{i,j,k+1/2}$ و $\sigma_{i,j,k+1/2}$ تراوایی، گذردهی و رسانایی ماده حول لبه‌های شبکه هستند. برای تولید منحنی حفره‌ها با دقت مناسب باید شبکه‌ای ریز اعمال شود که نیاز به حافظه زیاد دارد و بسیار زمان‌بر است. به طوری که شبیه‌سازی با کامپیوترهای معمولی امکان‌پذیر نیست. با توجه به زمان طولانی محاسبات، در این جا سعی شده است با بهبود روش FDTD در دوبعد نتایج شبیه‌سازی‌های دو و سه بعدی و آزمایشگاهی را به یکدیگر نزدیک کنیم.

در حالت دوبعدی میدان‌ها با دو قطبش الکتریکی عرضی و مغناطیسی عرضی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این جا، با توجه به ساختار بلور فوتونی، معادلات ماکسول در دوبعد را برای حالت قطبش الکتریکی عرضی در نظر می‌گیریم. فضای شبیه‌سازی به سلول‌های مربعی و زمان نیز با پله زمانی گسسته تقسیم می‌گردد. سپس تابع روی مرزهای شبکه در هر پله زمان معرفی می‌شود. رابطه‌های پله‌ای زمان 2D-FDTD برای مدهای TE بدین صورت نوشته می‌شود.

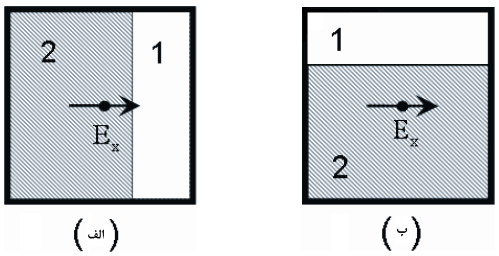
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

$$E_x\big|_{i,j}^{n+1} = \frac{\varepsilon_{i,j} - \sigma_{i,j}\,\Delta t/2}{\varepsilon_{i,j} + \sigma_{i,j}\,\Delta t/2} E_x\big|_{i,j}^{n} + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j} + \sigma_{i,j}\,\Delta t/2} \frac{H_z\big|_{i,j+1}^{n} - H_z\big|_{i,j}^{n}}{\Delta y} \qquad (۵)$$

$$E_y\big|_{i,j}^{n+1} = \frac{\varepsilon_{i,j} - \sigma_{i,j}\,\Delta t/2}{\varepsilon_{i,j} + \sigma_{i,j}\,\Delta t/2} E_y\big|_{i,j}^{n} - \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j} + \sigma_{i,j}\,\Delta t/2} \frac{H_z\big|_{i+1,j}^{n} - H_z\big|_{i,j}^{n}}{\Delta x} \qquad (۶)$$

$$H_z\big|_{i,j}^{n+1/2} = H_z\big|_{i,j}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \left(\frac{E_y\big|_{i+1,j}^{n} - E_y\big|_{i,j}^{n}}{\Delta x} - \frac{E_x\big|_{i,j+1}^{n} - E_x\big|_{i,j}^{n}}{\Delta y} \right) \qquad (۷)$$

که در آن μ ,ε وσ تراوایی، گذردهی وابسته به مکان و رسانایی ماده هستند. بالانویس n پله زمان گسسته را نشان می‌دهد و زیرنویس i, j مکان نقاط شبکه در راستای x, y را نمایش می‌دهند. Δt نمو زمان و Δx، Δy نمو مکان در راستای x,y بین دو نقطه‌ی مجاور شبکه هستند. در مقاله حاضر $\Delta t = 1/c_{max}\sqrt{\Delta x^{-2} + \Delta y^{-2}}$ به عنوان پله زمانی انتخاب شده است، تا شرایط پایداری را ارضا کند و c سرعت نور در خلا است. در این کد از شرایط مرزی لایه‌ی جور شده پیچشی CPML[۴] استفاده شده است[۱۲]. منبع موجبر با پروفایل زمانی بسته گاوسی $e^{-(t-t_0)^2/2\sigma^2}$ اعمال شده است، که σ پهنای پالس و t_0 زمان تاخیر است. پالس به گونه‌ای انتخاب شده است تا با دامنه‌ی تقریبا صفر شروع شود و پهنای آن گستره‌ی طول‌موج مورد نظر را بپوشاند.



شکل (۲): سلول نیمه پر. الف) مرز عمود و ب) مرز موازی با مؤلفه‌ی میدان الکتریکی

۴- روش عددی FDTD بهبودیافته

سطوح دی‌الکتریک با شکل اختیاری، سلول‌های FDTD نیمه پر تولید می‌کنند، که در روش معمولی این سلول‌ها با سلول‌های خالی یا کاملاً پر تقریب زده می‌شوند[۱۲]. بنابراین نمایش سلول‌ها به صورت عددی با شکل واقعی جسم متفاوت و سبب خطا در محاسبات می‌گردد. برای کاهش این گونه خطاها باید از شبکه‌ی بسیار ریز استفاده کرد که باعث افزایش زمان پردازش و حافظه‌ی مورد نیاز می‌گردد. یک روش کارا برای حل این مشکل، استفاده از گذردهی مؤثر برای سلول‌های نیمه پر است[۱۰و۱۱]. زمانی که مرز عمود و موازی به مؤلفه‌ی میدان الکتریکی باشد (شکل۲)، ثابت دی‌الکتریک مؤثر به ترتیب از رابطه‌ها ۸ و ۹ به دست آید.

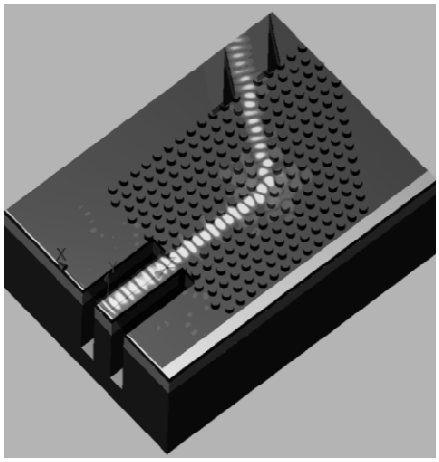
$$\varepsilon_{\parallel} = f\varepsilon_2 + (1-f)\varepsilon_1 \qquad (۸)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \left(\frac{f}{\varepsilon_2} + \frac{(1-f)}{\varepsilon_1} \right)^{-1} \qquad (۹)$$

که در آن f فاکتور پرشدگی سلول و ε_1، ε_2 به ترتیب گذردهی محیط‌های ۱و۲ می‌باشند. فرض می‌کنیم که میدان‌های الکتریکی تنها در حالت‌های موازی و عمودی نسبت به مرز قرار دارند. همچنین از پیکربندی‌هایی که در آنها کم‌تر از نیمی از سلول‌ها پر شده است، چشم پوشی کرده‌ایم. مؤلفه‌های میدان از برهم‌نهی گذردهی مؤثر عمودی و موازی با توجه به زاویه بین میدان الکتریکی و مرز، برای سطوح انحنادار به دست می‌آیند. گذردهی مؤثر با متوسط‌گیری از زاویه میدان در یک سلول به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_{\parallel} \cos^2\theta + \varepsilon_{\perp} (1 - \cos^2\theta) \qquad (۱۰)$$

که $\theta \in [0, \pi/2]$ زاویه‌ی بین میدان الکتریکی و بردار عمود بر مرز است. متوسط زاویه‌ی بین میدان الکتریکی و مرز از مرکز شعاع انحناء برای هر کدام از سلول‌ها را محاسبه می‌کنیم. گذردهی مؤثر تصویر شده برای مؤلفه‌های x و y میدان الکتریکی سلول‌های مختلف نیمه پر باید در نظر گرفته شود. در این روش نیازی به تغییر الگوریتم یی نیست و تنها با جایگزینی گذردهی با گذردهی مؤثر محاسبه شده می‌توان آن را برای هر مؤلفه میدان در الگوریتم یی اعمال کرد. در مد TE، هر کدام از پله‌های زمانی در معادله‌های ماکسول، به ترتیب از $\varepsilon_{eff\ .x}$ و $\varepsilon_{eff\ .y}$ برای محاسبه میدان‌ها استفاده شده است. برای به دست آوردن پاسخ بسامدی از تبدیل فوریه‌ی گسسته برای تبدیل کمیت‌های دامنه زمان به دامنه بسامد استفاده شده است. برای تحلیل میزان عبور در ساختار، توان شارش متوسط زمانی اندازه‌گیری می‌گردد. همچنین با انتگرال‌گیری از بردار پوئین‌تینگ بر روی سطح، میزان عبور محاسبه شده است.

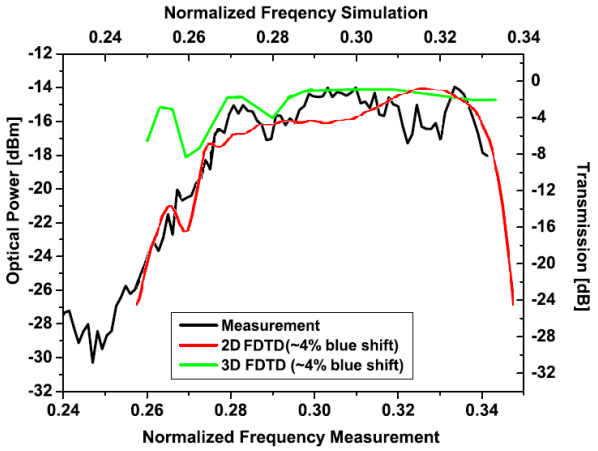


شکل (۳): پروفایل موج عبوری از موجبر خمیده ۶۰° بلور فوتونی که توسط نرم افزار SEMCADتولید شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

۵- بررسی

به منظور اندازه‌گیری میزان عبور از موجبر بلور فوتونی در آزمایشگاه از تکنیک End-fire (EF) در گروه فوتونیک مخابراتی دانشگاه ETH استفاده شده است[۱۴]. در آزمایشگاه از منبع نوری با دو لیزر همدوس استفاده شده است. این دو لیزر در گستره‌ی طول-موجی ۱۶۳۰-۱۴۷۰ nm کار می‌کنند. تار نوری متمرکز شده به موجبر جفت شده است و لیزرها نور را با قطبش TE به موجبر تزریق می‌کنند. بعد از انتشار نور از میان موجبر، سیگنال در خارج از موجبر به روش میکروسکوپی گردآوری و با توان‌سنج اندازه‌گیری شده است. فاکتور پرشدگی موجبر توسط دستگاه SEM[۵] اندازه‌گیری شده و در حدود ۳۶/۸٪ تعیین شده است[۱۴]. ابتدا موجبر قبل و بعد از بهینه-سازی شبیه‌سازی می‌گردد(شکل ۱). پروفایل موج عبوری میدان H_z از موجبر در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل (۴): مقایسه اندازه‌گیری و شبیه‌سازی دو و سه بعدی. جابجایی آبی ۴٪ بین اندازه‌گیری و شبیه‌سازی قابل مشاهده است.

نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی با روش FDTD بهبودیافته دوبعدی وFDTD سه بعدی برای شبیه‌سازی‌های بلور فوتونی مقایسه شده است. مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه با تکنیک EF توافق خوبی با شبیه‌سازی دو و سه بعدی دارند(شکل۴). در روش FDTD دوبعدی، فضای محاسباتی از سلول‌های ۳۰۰× ۱۵۰ و ۲۴ لایه CPML تشکیل شده است. رسانش در انتهای لایه‌ی CPML را ۰/۲ انتخاب کرده‌ایم. گام تقسیم‌بندی فضایی $\Delta x = \Delta y = ۶۷$ nm است. چشمه‌ی موجبر در وسط ورودی موجبر اصلی قرار گرفته است و پایین‌ترین مد TE برای بره‌ی موجبر تولید شده است. پهنای بره، به اندازه‌ی یک ردیف حفره‌های حذف شده از موجبر بلور فوتونی است، که در شکل ۳ در ورودی موجبر بلور فوتونی دیده می‌شود. پله‌های شبیه‌سازی ۴۰۰۰ مساوی با $۶/۱۹۴۸e^{-۱۲}$ s ضبط شده است. شبیه-سازی با کامپیوتر شخصی حدود ۴ ساعت طول کشیده است. شبیه-سازی تطابق بسیار خوبی در کیفیت عبور و رفتار پهنای نوار دارد که در شکل ۴ به وضوح مشاهده می‌شود. قله‌های اضافی که در ناحیه‌ی ۰/۲۵۵ - ۰/۲۶۶ ظاهر شده‌اند، به واسطه برهم‌نهی امواج عبوری و انعکاسی در روی مرز خمیدگی می‌باشند که در مرز بلور انعکاس یافته-اند. مقدار اتلاف حدود ۴ dB برای اندازه‌گیری میزان عبور از موجبر خمیده ۶۰^{o} بلور فوتونی بهینه به دست آمده است. دقت الگوریتم داده شده در مرجع ۱۱ تائید شده است [۱۱].

شبیه‌سازی FDTD سه بعدی با استفاده از نرم افزار تجاری SEMCAD در فضای محاسباتی با ۲۵۶× ۱۰۶× ۲۲۲ سلول در شبکه‌ی غیریکنواخت انجام شده است. به منظور به دست آوردن تعادل بین دقت شبیه‌سازی و منابع محاسباتی ده نقطه شبکه بر سلول واحد در نظر گرفته شده است. به منظور جفت شدن نور با موجبر بلور فوتونی، از موجبر مدلسازی شده به عنوان تار نوری استفاده می-شود(شکل ۳). چندین آشکارساز شار توان در ابتدا و انتهای ساختار متصل شده‌اند تا انتشار نور را ثبت کنند. لایه‌های PML شامل ۸ لایه با میزان انعکاس $۱e^{-۶}$ می‌باشند. محاسبات برای ۲۰۰ تناوب انجام یافته است که بر روی کلاستر حدود ۱۵ ساعت برای هر نقطه‌ی بسامدی طول می‌کشد. این شبیه‌سازی برای این که کل بازه طول موجی را با دقت خوبی پوشش دهد، زمان بسیار زیادی نیاز دارد. پهنای نوار عبور در محدوده‌ی ۰/۲۹ - ۰/۲۷ و قله مشخصه آن در بسامد حدود ۰/۲۵۴ می‌توان مشاهده کرد. میزان عبور کمتر نسبت به مدل دوبعدی واسطه پراکندگی میدان در بعد عمودی است. جابجایی کوچکی حدود ۰/۴ در بسامد قابل مشاهده است. این جابجایی بدین علت است که در شبیه‌سازی دوبعدی از ضریب گذردهی موثر و حفره-های نامعین استفاده شده است. در ساختار سه بعدی عمق حفره‌ها حدود ۳ µm در نظر گرفته می‌شود، همان گونه که در ساختار واقعی در آزمایشگاه وجود دارد. توافق خوب بین شبیه‌سازی دو و سه بعدی ما را قانع می‌سازد تا از شبیه‌سازی‌های دوبعدی برای مطالعات بنیادی ابزارهای بلور فوتونی دوبعدی استفاده شود. هنگامی توافق بهتر است که از مدل‌های پدیده‌ای برای شبیه‌سازی دوبعدی استفاده شود تا اتلاف‌ها را به واسطه پراکندگی خارج از صفحه پوشش دهد[۱۵و۱۶]. اگرچه مدل دوبعدی که برای بهینه‌سازی ساختار استفاده شده است، بسیار سریع‌تر از شبیه‌سازی کاملا سه بعدی است، ولی این شبیه-سازی‌ها دقیقا ساختار واقعی را نشان نمی‌دهند. همچنین با توجه به روش FDTD بهبودیافته، می‌توان از شبکه‌بندی‌های درشت‌تر استفاده کرد که نیاز به منابع کامپیوتری کمتری دارد[۱۱].

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، داده‌های آزمایشگاهی با شبیه‌سازی روش FDTD دوبعدی بهبودیافته و روش FDTD سه بعدی استاندارد برای موجبر خمیده ۶۰^{o} بلور فوتونی مقایسه شده است. روش FDTD دوبعدی بهبودیافته روشی ساده، کارا و سریع برای مدلسازی انتشار نور در محیط دی‌الکتریک با شکل اختیاری است. نتایج شبیه‌سازی‌های

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

دوبعدی نشان داده است که زمان پردازش و حافظه مورد نیاز کاهش می‌یابد. موجبر خمیده 60^{o} بلور فوتونی بهینه با روش FDTD دو و سه بعدی شبیه‌سازی شده است که نتایج به دست آمده توافق بسیار خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی و یکدیگر نشان می‌دهد. با توجه به رفتار مشابه خمش عبور در هر دو روش شبیه‌سازی و این که محاسبات دوبعدی بسیار سریع‌تر است و قابل انجام بر روی کامپیوترهای شخصی می‌باشد، به نظر می‌رسد که شبیه‌سازی روش FDTD دوبعدی بهبودیافته برای طراحی و بهینه‌سازی ابزارهای بلور فوتونی بسیار مناسب است. همچنین این امکان را به کاربر می‌دهد که با کامپیوتر شخصی خود مدلسازی و محاسبات را انجام دهد.

سپاسگزاری

این کار با پشتیبانی معاونت پژوهشی دانشگاه خلیج فارس در قالب طرح پژوهشی با کد PGU/FS/20-1/1390/1298 انجام شده است. همچنین از همکاری دکتر ارنی و دکتر روشر برای داده‌های آزمایشگاهی صمیمانه تشکر می‌کنیم.

مراجع

[۱] جوناپلوس، جان، مید، رابرت د.، وین، جوشا ن.، **بلورهای فوتونیک قالبی برای شارش نور**، ترجمهٔ زرگرشوشتری، مرتضی، جلالی، تهمینه، مؤسسه انتشارات دانشگاه شهید چمران ، ۱۳۸۶.

[2] Manolatou, C., Johnson, S. G., Fan, S., Villeneuve, P. R., Haus, H. A., Joannopoulos, J. D., "High-density integrated optics," J. Lightwave Technol., 17, 1682-1692, 1999.

[3] Mekis, A., Chen, J. C., Kurland, I., Fan, S., Villeneuve, P. R., and Joannopoulos, J. D., "High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides," Phys. Rev. Lett, 77,3787-3790, 1996.

[4] Schulz, S. A., O'Faolain, L., Beggs, D. M., White, T. P., Melloni, A. and Krauss, T. F., "Dispersion-engineered slow light in photonic crystals: A comparison," J. Opt. 12, 104004(10), 2010.

[5] Hong-Wei, L. and Qiang, K., "Light Extraction Enhancement of GaN LED with a Two-Dimensional Photonic Crystal Slab," CHIN. PHYS. LETT, 28, 5, 054216(3), 2011.

[6] Inoue M., Khanikaev A. B. and Baryshev A. V., "Nano-magnetophotonics,", Nanoscale magnetic materials and applications. Springer-Verlag, 2009.

[7] Yang, P., Kattawar,W., Liou, K., Lu, J., Comparison of Cartesian grid configurations for application of the finite-difference time-domain method to electromagnetic scattering by dielectric particles", Appl. Opt. , 43, 4611-4624, 2004.

[8] Yu, W. anس R. Mittra, "On the modeling of periodic structures using the finite-difference time-domain algorithm," Microw. Opt. Technol. Lett., 24, 151–155, 2000.

[9] Hajiaboli, A., Hojat-Kashani, F., "Simulation and Analysis of Inverted Patch Stacked Microstrip Antenna Using F.D.T.D. Method and Comparison with Moment Method", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, 1, 1,30-35, 2004.

[10] Mohammadi, A., Nadgaran, H. and Agio, M., "Contour-path effective permittivities for the two-dimensional finite-difference time-domain method," Opt. Express 13, 10367-10381, 2005.

[11] Jalali, T., Rauscher, K., Mohammadi, A., Erni, D., Hafner, C., Baechtold, W., Shoushtari, M.Z., "Efficient effective permittivity treatment for the 2D-FDTD simulation of photonic crystals", J. Comput. Theor. Nanosci. 4(3), 644-648, 2007.

[12] Taflove,A., Hagness,S., Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, Norwood, MA 2005.

[13] Rauscher, K., Erni, D., Smajic, J. and Hafner, C., "Improved transmission for 60° photonic crystal waveguide bends," Progr. in Electromagne. Research Symp. 43, 25-28, 2004.

[14] Strasser, P., Stark, G., Robin, F., Erni, D., Rauscher, K., Wüest, R. and Jäckel, H., "Optimization of a 60° waveguide bend in InP-based 2D planar photonic crystals", J. Opt. Soc. Am. B, 25(1), 67-73, 2008.

[۱۵] تهمینه جلالی، " **مدلسازی بره بلور فوتونیک سه بعدی با ثابت گذردهی موثر،**" کنفرانس ماده چگال ایران، شیراز، ۱۳۸۹.

[16] Ferrini, R., Houdre D. and Moosburger, J., "Radiation losses in planar photonic crystals: two-dimensional representation of hole depth and shape by an imaginary dielectric constant" Optical Socity of America, 20, 3, 469-478, 2003.

زیرنویس‌ها

[1] Finite Difference Time domain
[2] Transverse Electric
[3] Perfectly Matched Layer
[4] Convolutional Perfectly Matched Layer
[5] Scanning Electron Microscope

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]