

# پیشنهاد یک طرح جدید به منظور افزایش بازده دیود گسیل نور گالیم نیتراید مبتنی بر بلور فوتونی

سارا ساجدنی<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ محمد سروش<sup>۲</sup>، دانشیار؛ کریم انصاری اصل<sup>۳</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - s-sajjadnia@mscstu.scu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - m.soroosh@scu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - karim.ansari@scu.ac.ir

**چکیده:** بازتاب داخلی کلی نور یکی از پدیده‌هایی است که باعث کاهش بازده دیود گسیل نور می‌شود. در این مقاله، با به‌کارگیری بلورهای فوتونی مبتنی بر حفره و کاهش بازتاب داخلی کلی نشان داده شد که بازده یک دیود گسیل نور GaN را می‌توان بیش از دو برابر افزایش داد. با بهره‌گیری از روش تفاضل محدود حوزه زمان و استفاده از ۱۵ دوره تناوب با ثابت شبکه ۶۸۰ nm، ارتفاع حفره ۲۱۰ nm و نسبت طول حفره به ثابت شبکه ۰/۵ به ازای طول موج ۴۰۰ nm، بازده افزاره تا ۲/۱ برابر افزایش یافت. شبیه‌سازی و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از آن به ازای طول موج‌های ۴۰۰ و ۴۶۵ نانومتر با پژوهش‌های دیگر نشان داد که به‌کارگیری افزاره پیشنهادی، امکان دستیابی به بازده بیش‌تری را فراهم می‌سازد.

**واژه‌های کلیدی:** بلور فوتونی، تفاضل محدود حوزه زمان، دیود گسیل نور، گالیم نیتراید.

## Proposal a New Design to Efficiency Enhancement of GaN Light-Emitting Diode Based on Photonic Crystal

S. Sajjadnia<sup>1</sup>, Msc student; M. soroosh<sup>2</sup>, Associate Professor; K. Ansari -Asl<sup>3</sup>, Assistant Professor

1- Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: s-sajjadnia@mscstu.scu.ac.ir

2- Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: m.soroosh@scu.ac.ir

3- Faculty of Engineering, University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: karim.ansari@scu.ac.ir

**Abstract:** Total internal reflection of light is a phenomena which reduces the efficiency of a light emitting diode. In this paper, by using hole type photonic crystals and reducing total internal reflection, it was shown that one can increase the efficiency of a GaN light emitting diode by 2 fold. With help of finite difference time domain method and using 15 periods of air holes with lattice constant, height, length to lattice constant ratio equal to 680 nm, 210 nm and 0.5 respectively, at wavelength of 400 nm the efficiency was increased by 2.1 factor. The simulation and comparing the obtained results for wavelength of 400 and 465 nm, with previous works showed that by using the proposed device it is possible to obtain better efficiencies.

**Keywords:** Photonic crystal, finite difference time domain, light emitting diode, GaN.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۹

نام نویسنده مسئول: محمد سروش

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اهواز - اتوبان گلستان - دانشگاه شهید چمران اهواز - دانشکده مهندسی - گروه برق

## ۱- مقدمه

نانومتر، ارتفاع حفره ۱۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر و نسبت طول حفره به ثابت شبکه  $0.3/4$  تا  $0.4/4$  روی سطح LED، به  $\eta_{ext}=1/63$  دست یافتند. آن‌ها در طرح دیگری توانستند با قرار دادن بلور فوتونی دوبعدی با  $600\text{nm}$  -  $500$ ،  $a=500$ ،  $h=150-200\text{nm}$  و  $d/a=0.3$  زیر MQW،  $\eta_{ext}$  برابر  $1/71$  به دست آورند. آن‌ها همچنین در طرح دیگری با قرار دادن بلورهای فوتونی روی سطح LED و زیر MQW به صورت هم‌زمان  $\eta_{ext}$  را تا  $1/77$  افزایش دادند.

در سال ۲۰۱۱ لیو<sup>۱۱</sup> و همکارانش، یک دیود گسیل نور GaN با حفره‌های هوایی به قطر  $1\ \mu\text{m}$ ،  $a=3\ \mu\text{m}$  و  $h=300\text{nm}$  ساختند. آن‌ها در این طرح،  $\eta_{ext}$  را  $1/38$  اندازه‌گیری کردند [۱۱]. در سال ۲۰۱۰ کایا<sup>۱۲</sup> با شبیه‌سازی بلورهای فوتونی یک بعدی با  $a=500-520\text{nm}$  و  $d/a=0.6$  روی سطح LED،  $\eta_{ext}$  را برابر  $1/8$  به دست آورد [۱۲]. در سال ۲۰۱۵ جی<sup>۱۳</sup> و همکارانش از گرافن به عنوان جایگزینی برای ITO استفاده کردند و ساختاری ارائه دادند که در آن از گرافن دو لایه روی ساختار بلور فوتونی استفاده شد. آن‌ها در این ساختار، بیشینه اندازه  $\eta_{ext}$  را  $1/7$  به دست آوردند [۱۳].

با بررسی ساختارهای مختلف ارائه شده تا کنون، مشخص شد که با انتخاب مناسب پارامترهایی مانند  $a$ ،  $h$  و  $d/a$  می‌توان اندازه  $\eta_{ext}$  را افزایش داد. افزایش ارتفاع حفره و ایده‌آل نبودن فرآیند زدایش در ساخت نیم‌رساناها باعث انحراف از حالت عمود در عمق حفره می‌شود. این موضوع بر موج‌بری بلور فوتونی مؤثر است و به کاهش بازده افزاره می‌انجامد. افزایش یا کاهش اندازه  $d/a$ ، ضریب شکست مؤثر موج‌بر بلور فوتونی را به ترتیب به اندازه‌های ضریب شکست GaN و هوا نزدیک می‌کند. در نتیجه نسبت  $d/a$  بر ضریب شکست مؤثر موج‌بر بلور فوتونی مؤثر است و انتخاب اندازه مناسب برای آن بر بازده افزاره اثرگذار است. بنابراین، در این مقاله با شبیه‌سازی اثر پارامترهای گفته‌شده بر بازده دیود گسیل نور، پیشنهادی برای افزاره GaN مبتنی بر بلور فوتونی ارائه می‌شود که می‌تواند بازده افزاره با بلور فوتونی نسبت به حالت بدون بلور فوتونی را تا اندازه  $2/1$  فراهم کند. در این پژوهش، اثر تغییر مکان منبع تولید نور، ثابت شبکه، ارتفاع حفره و نسبت طول حفره مربعی به ثابت شبکه بر بازده افزاره، شبیه‌سازی خواهد شد.

در بخش ۲ به بررسی روش تفاضل محدود حوزه زمان<sup>۱۴</sup> (FDTD) و معادلات به کار رفته در شبیه‌سازی پرداخته شده است. در بخش ۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی، ارائه شده و به بررسی آنها پرداخته شده است. در بخش ۴ نیز یک نتیجه‌گیری کلی از شبیه‌سازی افزاره ارائه شده است.

## ۲- روش تفاضل محدود حوزه زمان

روش FDTD، یک روش قدرتمند برای حل معادله‌های ماکسول<sup>۱۵</sup> و محاسبه توزیع میدان‌های الکترومغناطیسی است. با این روش می‌توان تمام ساختارهای پیچیده و نامتناوب را شبیه‌سازی کرد. همچنین می‌توان از آن برای محاسبه مدهای ویژه و به دست آوردن دیاگرام باند نیز استفاده کرد.

دیودهای گسیل نور<sup>۱</sup> (LEDs) به دلیل ویژگی‌هایی مانند مصرف انرژی کم و طول عمر زیاد، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. LEDها در کاربردهای مختلفی مانند نمایشگرهای تمام رنگ، سامانه‌های ارتباط نوری، شبکه‌های محلی<sup>۲</sup> (LAN)، چراغ راهنمایی، کاربردهای پزشکی به کار می‌روند [۳-۱]. یک چالش بزرگ در گسترش فناوری LED این است که تفاوت ضریب شکست بین هوا و نیم‌رسانا زیاد است و در نتیجه نور تولیدشده در لایه فعال یا چاه کوانتومی چندلایه<sup>۲</sup> (MQW)، در فصل مشترک بین هوا و نیم‌رسانا بازتاب شده و نمی‌تواند از افزاره خارج شود و بخش بزرگی از نور در افزاره تلف می‌شود [۴].

به طور کلی بازده LEDهای GaN کم و در حدود ۱۰ درصد است [۵]. در سال‌های گذشته روش‌های مختلفی برای افزایش بازده LEDها پیشنهاد شده است. در بیش‌تر این روش‌ها با استفاده از گنبد نیم‌کره‌ای به هندسه انتشار نور پرداخته‌اند [۶]. روش‌های دیگری مانند زبری سطح<sup>۴</sup> [۷]، بستر طرح‌بندی شده<sup>۵</sup> [۸] و فیلپ چپ<sup>۹</sup> [۹] برای افزایش بازده پیشنهاد شده‌اند که به فرآیند ساخت پیچیده‌ای نیاز دارند. در سال‌های اخیر با به کارگیری بلورهای فوتونی توانسته‌اند بازده LED را افزایش دهند. در این پژوهش‌ها، با موج‌بری بلور فوتونی در راستای انتشار نور خروجی و کاهش میدان عرضی نور، بازده افزاره تا  $1/63$  برابر حالت بدون استفاده از بلور فوتونی افزایش یافت [۸]. ساختار پیشنهادی بلور در این پژوهش‌ها بر حکاری حفره‌های هوا در سطح LED مبتنی است. بهره‌گیری از بلورهای فوتونی در دیودهای گسیل نور باعث افزایش گام‌های ماسک‌گذاری در ساخت افزاره می‌شود و فرآیند ساخت را پیچیده‌تر می‌کند. همچنین ایده‌آل بودن ساخت حفره‌های کاملاً عمودی و انحراف از آن از چالش‌های مهم ساخت بلورهای فوتونی است. با این حال، با توجه به اهمیت افزایش بازده LEDها، توسعه ساختارهای مبتنی بر بلورهای فوتونی در حال انجام است و پژوهشگران سعی در ارائه ساختارهای با بازده بیش‌تر دارند.

در سال ۲۰۰۶ اریلین<sup>۷</sup> و همکارانش با ادعای بازتاب داخلی حدود  $66\%$  نور تولید شده در لایه فعال LED، ساختاری ارائه دادند که در آن از یک لایه آلومینیوم گالیم نیتراید در زیر چاه کوانتومی استفاده شد. این ساختار به همراه یک LED بدون بلور فوتونی ساخته شد. آن‌ها نشان دادند بازده ساختار مبتنی بر بلور فوتونی نسبت به ساختار بدون بلور فوتونی  $1/7$  ( $\eta_{ext}$ ) برابر است [۵]. در این سال، چو<sup>۸</sup> و همکارانش با بهره‌گیری از بلور فوتونی و استفاده از لایه اکسید قلع ایندیوم<sup>۹</sup> (ITO) در سطح LEDهای GaN، بازده افزاره را به ازای اندازه‌های مختلف طول حفره ( $h$ ) اندازه‌گیری کردند. آن‌ها نشان دادند که به ازای  $h=140\text{nm}$ ، ثابت شبکه ( $a$ ) برابر  $1200\text{nm}$  و نسبت طول حفره به ثابت شبکه ( $d/a$ ) برابر  $0.2$ ، بیشینه  $\eta_{ext}$  به اندازه  $1/25$  به دست می‌آید [۱۰].

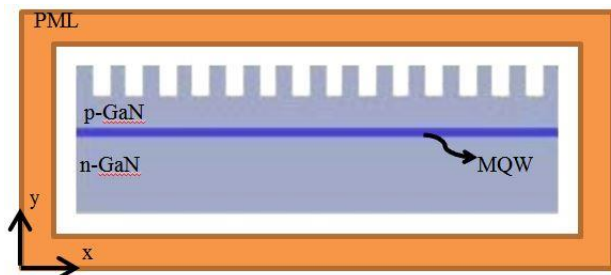
در سال ۲۰۰۹ لانگ<sup>۱۰</sup> و همکارانش به تحلیل، بهینه‌سازی و ساخت دیودهای گسیل نور GaN مبتنی بر بلور فوتونی پرداختند [۸]. آن‌ها در یک طرح با قرار دادن بلور فوتونی دوبعدی با ثابت شبکه ۴۰۰ تا ۶۰۰

گام‌های مکانی باید به اندازه کافی کوچک باشند تا کوچک‌ترین عنصر در ساختار قابل شناسایی باشد. همچنین فاصله بین گام‌ها (گام‌های مکانی) باید به اندازه کافی کوچک باشند تا کوتاه‌ترین طول موج مورد بررسی را بتوان تحلیل کرد. گام مکانی را حدود یک دهم تا یک سی‌ام  $\lambda$  انتخاب می‌کنند که  $\lambda$  کوتاه‌ترین طول موج در ناحیه با بیش‌ترین ضریب شکست است [۱۳]. در این مقاله، از نرم‌افزار تجاری لومریکال برای حل معادله‌های (۱) تا (۶) استفاده شده است.

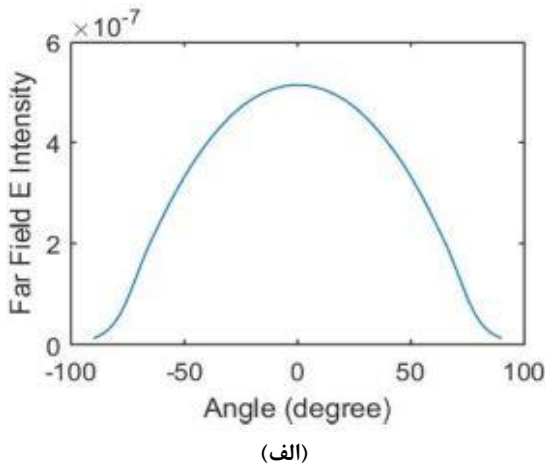
### ۳- نتایج شبیه‌سازی

شکل ۱، نمای کلی یک LED شبیه‌سازی شده با استفاده از بلور فوتونی (شانه‌ای) را نشان می‌دهد که ضخامت لایه P-GaN برابر ۲۷۰ nm است و یک MQW زیر آن قرار دارد. لایه n-GaN با ضخامت ۲۷۰ nm در شکل ۱ نشان داده شده است. ساختار بلور فوتونی با حفره‌های مربعی از هوا در لایه P-GaN طراحی شده است. در خارج از LED یک لایه کاملاً جذب<sup>۱۱</sup> (PML) برای جلوگیری از بازتاب در مرز فضای مورد محاسبه قرار داده شده است. طول موج نور برابر ۴۰۰ nm و اندازه مش‌ها در جهت x و y برابر ۱۰/۵ nm است. ضریب شکست GaN (n<sub>GaN</sub>) و هوا (n<sub>air</sub>) به ترتیب برابر ۲/۵ و ۱، طول تناوب بلور فوتونی ۶۸۰ nm و تعداد تکرار آن در جهت x برابر ۱۵ است.

یک منبع نور با طول موج ۴۰۰ nm در مرکز MQW و به ازای ۵ مکان مختلف با فاصله یک پنجم دوره تناوب از مرکز قرار داده می‌شود. پارامترهای مؤثر ساختار بلور، ثابت شبکه، ارتفاع حفره و d/a هستند. تغییر این سه پارامتر، بیشینه  $\eta_{ext}$  به ازای a=۶۸۰ nm و h=۲۱۰ nm و d/a=۰/۵ به دست آمد.



شکل ۱: ساختار GaN-LED مبتنی بر بلور فوتونی (شانه‌ای).



(الف)

در روش FDTD، ساختار با گسسته‌سازی و استفاده از سلول بی<sup>۶</sup>، در حوزه مکان بیان می‌شود و میدان‌های الکتریکی (E) و مغناطیسی (H) از تکرار معادله‌های بازگشتی ماکسول به دست می‌آیند. در محیط‌های بدون منبع خارجی، معادله‌های وابسته به زمان ماکسول را به صورت شش رابطه عددی می‌توان نوشت که در آن‌ها تغییر مکانی میدان الکتریکی و مغناطیسی به هم وابسته هستند. گسسته‌سازی روابط ماکسول، معادله‌های (۱) تا (۶) را نتیجه می‌دهد که از آن‌ها برای محاسبه میدان در هر نقطه خاص از مکان (i,j,K) می‌توان استفاده کرد که در آن‌ها  $\Delta x$ ،  $\Delta y$  و  $\Delta z$  گام‌های مکانی در راستای x، y و z هستند.  $\Delta t$  گام زمانی و  $\epsilon$  ضریب دی الکتریک ماده است [۱۳].

$$E_{x(i,j,k)}^{n+1} = E_{x(i,j,k)}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} \cdot \left( H_{z(i,j+0.5,k)}^{n+0.5} - H_{z(i,j-0.5,k)}^{n+0.5} \right) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} \left( H_{y(i,j,k+0.5)}^{n+0.5} - H_{y(i,j,k-0.5)}^{n+0.5} \right) \quad (1)$$

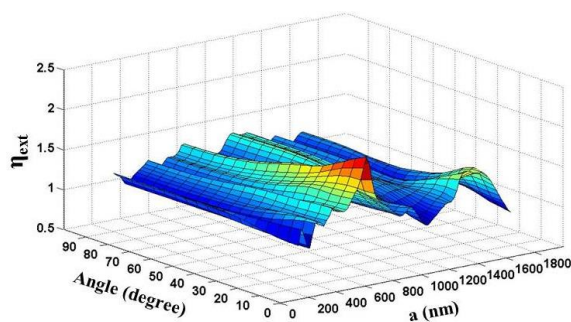
$$E_{y(i,j,k)}^{n+1} = E_{y(i,j,k)}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} \cdot \left( H_{x(i,j,k+0.5)}^{n+0.5} - H_{x(i,j,k-0.5)}^{n+0.5} \right) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} \left( H_{z(i+0.5,j,k)}^{n+0.5} - H_{z(i-0.5,j,k)}^{n+0.5} \right) \quad (2)$$

$$E_{z(i,j,k)}^{n+1} = E_{z(i,j,k)}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} \cdot \left( H_{y(i+0.5,j,k)}^{n+0.5} - H_{y(i-0.5,j,k)}^{n+0.5} \right) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} \left( H_{x(i,j+0.5,k)}^{n+0.5} - H_{x(i,j-0.5,k)}^{n+0.5} \right) \quad (3)$$

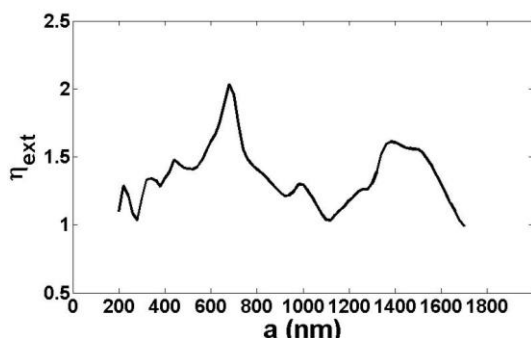
$$H_{x(i,j,k)}^{n+0.5} = H_{x(i,j,k)}^{n-0.5} + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} \cdot \left( E_{y(i,j,k+0.5)}^n - E_{y(i,j,k-0.5)}^n \right) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} \left( E_{z(i,j+0.5,k)}^n - E_{z(i,j-0.5,k)}^n \right) \quad (4)$$

$$H_{y(i,j,k)}^{n+0.5} = H_{y(i,j,k)}^{n-0.5} + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} \cdot \left( E_{z(i+0.5,j,k)}^n - E_{z(i-0.5,j,k)}^n \right) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} \left( E_{x(i,j,k+0.5)}^n - E_{x(i,j,k-0.5)}^n \right) \quad (5)$$

$$H_{z(i,j,k)}^{n+0.5} = H_{z(i,j,k)}^{n-0.5} + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} \cdot \left( E_{x(i,j+0.5,k)}^n - E_{x(i,j-0.5,k)}^n \right) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} \left( E_{y(i+0.5,j,k)}^n - E_{y(i-0.5,j,k)}^n \right) \quad (6)$$



(الف)

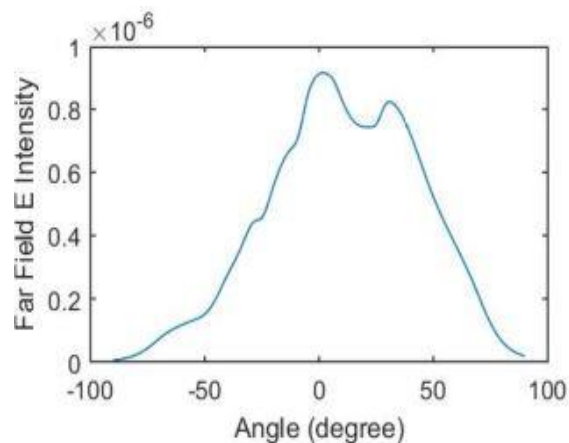


(ب)

شکل ۳: (الف) اندازه  $\eta_{ext}$  به ازای تغییر ثابت شبکه و زاویه نسبت به محور عمود بر سطح افزاره و (ب) اندازه  $\eta_{ext}$  بر حسب ثابت شبکه و به ازای زاویه ۵ درجه.

(شکل ۴-الف)  $\eta_{ext}$  را به ازای  $a=680\text{ nm}$  و  $d/a=0/5$  و تغییر ارتفاع حفره از ۳۰ تا ۲۴۰ نانومتر نشان می‌دهد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که به ازای زاویه ۵ درجه، با افزایش ارتفاع حفره،  $\eta_{ext}$  نیز افزایش می‌یابد. با توجه به برخی گزارش‌های پیشین [۸، ۱۰]، با افزایش ارتفاع حفره، دقت ساخت حفره‌ها کاهش می‌یابد و همچنین با کاهش حجم ناحیه p-GaN مقاومت افزاره افزایش می‌یابد. ساخت حفره‌های کاملاً عمودی و ثابت ماندن طول آنها یکی از مهم‌ترین چالش‌های ساخت به‌شمار می‌رود. به عبارت دیگر، زدایش عمودی نیم‌رسانا با استفاده از پرتوها یا محلول‌های مناسب با خطایی همراه است و طول حفره با پیش‌روی در عمق نیم‌رسانا ثابت نمی‌ماند. از این‌رو، با افزایش ارتفاع حفره، طول حفره تغییر می‌کند و خطای طراحی نسبت به ساخت افزایش می‌یابد. از طرفی کیفیت مرز نیم‌رسانا و هوا در عمق نیز کاهش می‌یابد که می‌تواند باعث پراکنده‌شدن بیش‌تر نور تابشی به مرز نیم‌رسانا و هوا شود. در نتیجه، بازده افزاره را کاهش می‌دهد. از این‌رو، با توجه به تجربه ساخت در مراجع ۸ و ۱۰، از اندازه پیشنهادی آنها برای ارتفاع حفره ( $h=210\text{ nm}$ ) استفاده شده است. (شکل ۴-ب) روند افزایش  $\eta_{ext}$  را بر حسب ارتفاع حفره‌ها و به ازای زاویه ۵ درجه نشان می‌دهد.

در (شکل ۵-الف) به ازای  $h=210\text{ nm}$  و  $a=680\text{ nm}$ ، توزیع  $\eta_{ext}$  بر حسب زاویه‌های مختلف و بازه تغییر  $d/a$  از ۰/۲ تا ۰/۷ شبیه‌سازی شده



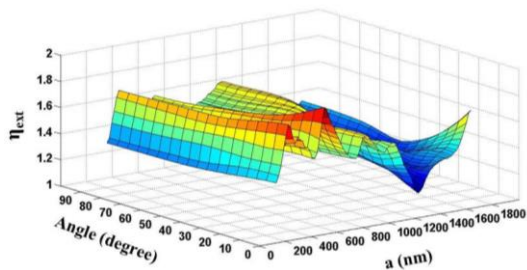
(ب)

شکل ۲: توزیع شدت میدان الکتریکی در زاویه‌های مختلف نسبت به عمود منصف سطح LED بدون استفاده از بلور فوتونی و (ب) ساختار شانه‌ای.

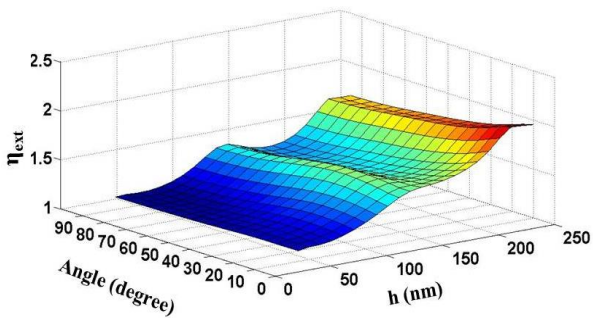
شکل ۲، توزیع شدت میدان الکتریکی را به ازای اندازه‌های گفته شده برای دو حالت بدون بلور فوتونی (شکل ۲-الف) و با استفاده از بلور فوتونی (شکل ۲-ب) نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که در بازه ۱۰- تا ۱۰+ درجه از خط عمود بر سطح LED، بیش‌ترین افزایش در توزیع شدت میدان الکتریکی رخ می‌دهد.

برای بررسی اثر تغییر ثابت شبکه بلور فوتونی بر بازده افزاره، به ازای  $h=210\text{ nm}$  و  $d/a=0/5$ ، ثابت شبکه از ۲۰۰ تا ۱۷۰۰ نانومتر تغییر داده شد. (شکل ۳-الف) نمای سه‌بعدی  $\eta_{ext}$  را به ازای زاویه‌های مختلف و بازه ثابت شبکه گفته شده نشان می‌دهد. در (شکل ۳-ب) نمای روبه‌روی (شکل ۳-الف) نشان داده شده است که به ازای ثابت شبکه  $a=680\text{ nm}$  و زاویه ۵ درجه بیشینه  $\eta_{ext}$  رخ می‌دهد. قرارگیری مستطیل‌های مرزی نیم‌رسانا و هوا باعث می‌شوند که نور بازتابیده شده از درون مستطیل بتواند بر اثر برخورد دوباره به مرز هوا و نیم‌رسانا شانس دوباره‌ای برای خروج از دیود گسیل نور داشته باشد. این موضوع به افزایش بازده افزاره کمک می‌کند. مستطیل‌های مرزی موج‌بری نور را نیز انجام می‌دهند و محدودسازی نور درون نیم‌رسانا تا زمان خروج نهایی از مستطیل‌ها مفهومی مانند موج‌بری فیبر نوری دارد که محیطی با ضریب شکست بیش‌تر در محیطی با ضریب شکست کم‌تر قرار گرفته است. درحقیقت می‌توان گفت که موج‌برهای GaN بین هوای دو طرف آنها محصور شده اند و نور گسیل شده از چاه‌های کوانتومی را در زاویه‌های نزدیک به عمود بر سطح به خارج دیود هدایت می‌کنند. بنابراین، در زاویه‌های نزدیک به صفر (عمود بر سطح کلی دیود) بیش‌ترین بازده رخ می‌دهد. به‌دست آمدن اندازه زاویه بیشینه برای ۵ درجه با انتخاب نسبت طول حفره به ثابت شبکه مرتبط است و با تغییر آن (یعنی تغییر طول موج بر مستطیلی GaN) اندکی تغییر می‌کند.

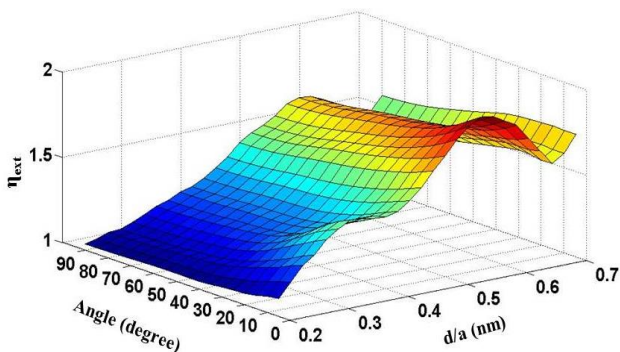
همان‌طور که در شکل‌های بالا می‌توان مشاهده کرد، به ازای پارامترهای  $a=680\text{ nm}$ ،  $h=210\text{ nm}$  و  $d/a=0.5$  به  $\eta_{\text{ext}}$  برابر  $2/1$  به دست آمد. با توجه به استفاده از بلور فوتونی در سطح افزاره به منظور موج‌بری نور و دستیابی به شدت نور بیش‌تر در زاویه‌های نزدیک به محور عمود بر سطح افزاره، پارامترهای اصلی ساختار، ثابت شبکه، ارتفاع حفره و نسبت طول حفره به ثابت شبکه هستند که در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پارامترهای دیگری که می‌توان مورد بررسی قرار داد، ضخامت لایه  $p$  ( $t_p$ )، ضخامت لایه  $n$  ( $t_n$ ) و ضریب شکست هستند. به ازای گام‌های  $5\text{ nm}$  برای  $t_p$  و  $t_n$  و بازه تغییر  $100$  تا  $600$  نانومتر و  $400$  تا  $900$  نانومتر به ترتیب برای  $t_p$  و  $t_n$  شبیه‌سازی‌ها تکرار شد. با انتخاب گام‌های  $0.5$  برای ضریب شکست، شبیه‌سازی‌ها به ازای ضریب شکست  $2/4$  تا  $2/7$  انجام شد و بیشینه اندازه  $\eta_{\text{ext}}$  به ترتیب  $1/92$ ،  $1/79$ ،  $1/71$ ،  $2/3$ ،  $1/97$ ،  $1/93$  و  $1/87$  به دست آمد. به منظور مقایسه با مراجع [۸] و [۱۱]، شبیه‌سازی‌ها در طول موج  $465\text{ nm}$  نیز انجام شد. این نتایج در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶: نمای سه‌بعدی توزیع  $\eta_{\text{ext}}$  به ازای تغییر ثابت شبکه و زاویه.

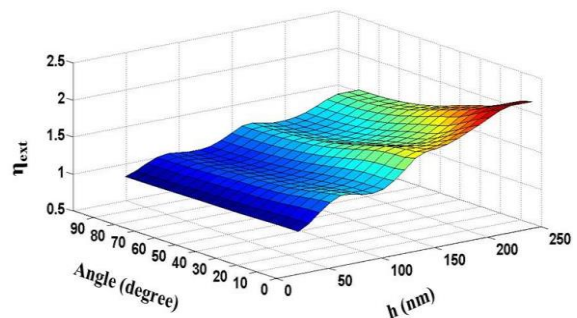


شکل ۷: نمای سه‌بعدی توزیع  $\eta_{\text{ext}}$  به ازای تغییر ارتفاع حفره و زاویه.

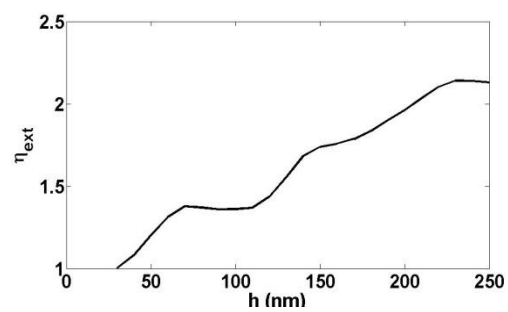


شکل ۸: نمای سه‌بعدی توزیع  $\eta_{\text{ext}}$  به ازای تغییر  $d/a$  و زاویه.

می‌توان در (شکل ۵-ب) مشاهده کرد که در زاویه  $5^\circ$  درجه و  $d/a=0.5$  بیش‌ترین  $\eta_{\text{ext}}$  به دست آمده است.

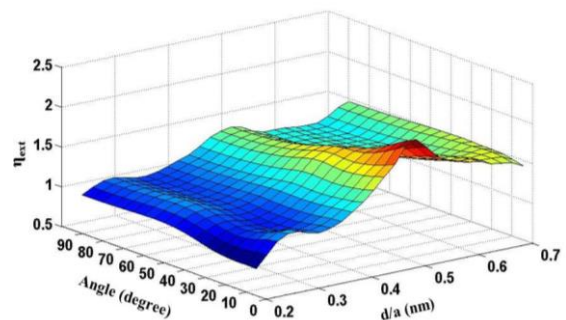


(الف)

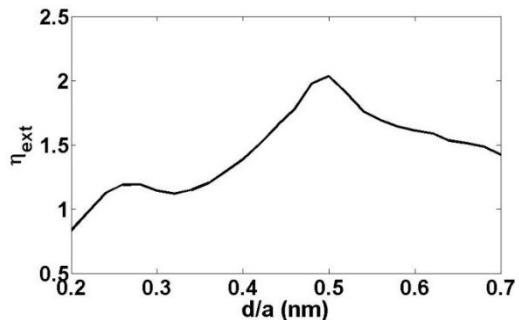


(ب)

شکل ۴: (الف) توزیع  $\eta_{\text{ext}}$  بر حسب زاویه و ارتفاع حفره و (ب)  $\eta_{\text{ext}}$  به ازای زاویه  $5^\circ$  درجه و اندازه‌های مختلف ارتفاع حفره.



(الف)



(ب)

شکل ۵: (الف) اندازه  $\eta_{\text{ext}}$  به ازای تغییر  $d/a$  و زاویه و (ب) تغییر اندازه  $\eta_{\text{ext}}$  به ازای زاویه  $5^\circ$  درجه و تغییر اندازه  $d/a$ .

پیشنهادی در این طول موج برابر ۲/۱ محاسبه شده است که عملکرد بهتر طرح پیشنهادی را تأیید می‌کند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با بهره‌گیری از بلورهای فوتونی مبتنی بر حفره‌های مربعی طرحی ارائه شد که بازده افزاره دیود گسیل نور گالیم نیتراید را به ازای طول موج‌های ۴۰۰ و ۴۶۵ نانومتر به ترتیب تا ۲/۱ و ۱/۹۳ برابر افزایش داد. شبیه‌سازی‌های مبتنی بر روش تفاضل محدود حوزه زمان نشان داد با به‌کارگیری ۱۵ دوره تناوب بلور با ثابت شبکه ۶۸۰ نانومتر، ارتفاع حفره ۲۱۰ نانومتر و نسبت طول حفره به ثابت شبکه ۰/۵ می‌توان در طول موج ۴۰۰ نانومتر در زاویه ۵ درجه نسبت به عمود منصف سطح افزاره به بیش‌ترین افزایش نور خروجی دست یافت. با تغییر ثابت شبکه به ۵۷۴ نانومتر و نسبت طول حفره به ثابت شبکه برابر ۰/۵۴ نیز می‌توان بیشینه شدت نور خروجی در طول موج ۴۶۵ نانومتر را به‌دست آورد.

همان‌طور که در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ مشاهده می‌شود به ازای پارامترهای  $a=574\text{nm}$ ،  $h=210\text{nm}$  و  $d/a=0.54$ ،  $\eta_{\text{ext}}$  برابر ۱/۹۳ به دست آمد. جهت ارزیابی کارکرد طرح پیشنهادی با پژوهش‌های پیشین، پارامترهای ساختار مانند  $t_n$ ،  $t_p$  و ضریب شکست GaN در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

با توجه به جدول ۱، در مرجع [۸] با پارامترهای ساختار  $t_p=200\text{nm}$  و  $t_n=800\text{nm}$  و پارامترهای بلور فوتونی  $a=400-600\text{nm}$ ،  $d/a=0.3-0.4$  و  $h=150-200\text{nm}$ ،  $\eta_{\text{ext}}$  برابر ۱/۶۳ و در مرجع [۱۱] با پارامترهای بلور فوتونی  $a=3\mu\text{m}$ ،  $h=300\text{nm}$  و  $d/a=0.33$  در طول موج ۴۶۰nm،  $\eta_{\text{ext}}$  برابر ۱/۳۸ به‌دست آمده است. با شبیه‌سازی طرح پیشنهادی در طول موج ۴۶۵nm،  $\eta_{\text{ext}}$  برابر ۱/۹۳ به‌دست آمد که نشان می‌دهد طرح پیشنهادی در این طول موج عملکرد بهتری نسبت به طرح‌های پیشین دارد. در مرجع [۱۲] با پارامترهای ساختار  $t_p=270\text{nm}$  و  $t_n=100\text{nm}$  و پارامترهای بلور فوتونی گفته‌شده به ازای طول موج ۴۰۰nm،  $\eta_{\text{ext}}$  برابر ۱/۸ به‌دست آمده است که  $\eta_{\text{ext}}$  طرح

جدول ۱: مقایسه طرح پیشنهادی با پژوهش‌های پیشین.

$\eta_{\text{ext}}$	$n_{\text{GaN}}$	$\lambda$ (nm)	$d/a$	$h$ (nm)	$a$ (nm)	$t_n$ (nm)	$t_p$ (nm)	مرجع
۱/۶۳	۲/۴۲	۴۶۵	۰/۳-۰/۴	۱۵۰-۲۰۰	۴۰۰-۶۰۰	۸۰۰	۲۰۰	[۸]
۱/۳۸	۲/۴	۴۶۰	۰/۳۳	۳۰۰	۳۰۰۰	-	-	[۱۱]
۱/۸	۲/۷	۴۰۰	۰/۶	-	۵۰۰-۵۲۰	۱۰۰	۲۷۰	[۱۲]
۱/۹۳	۲/۵	۴۶۵	۰/۵۴	۲۱۰	۵۷۴	۲۷۰۰	۲۷۰	طرح پیشنهادی
۲/۱	۲/۵	۴۰۰	۰/۵	۲۱۰	۶۸۰	۲۷۰۰	۲۷۰	طرح پیشنهادی

[6] W. N. Carr and G. E. Pittman, "One-watt GaAs p-n junction infrared source," Applied Physics Letters, vol. 3, no. 10, pp. 173-175, 1963.

[7] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. P. DenBaars and S. Nakamura, "Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening," Applied Physics Letters, vol. 84, no. 6, pp. 855-857, 2004.

[8] D. H. Long, I. k. Hwang and S. W. Ryu, "Design Optimization of Photonic Crystal Structure for Improved Light Extraction of GaN LED," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 15, no. 4, pp. 1257-1263, 2009.

[9] J. J. Wierer, M. R. Krames, J. E. Epler, N. F. Gardner, J. R. Wendt, M. M. Sigalas, S. R. J. Brueck, D. Li and M. Shagam, "III-nitride LEDs with photonic crystal structures," Proc. SPIE, vol. 5739, pp. 102-107, Bellingham, WA, 2005.

[10] H. K. Cho, J. Jang, J.-H. Choi, J. Choi, J. Kim, J. S. Lee, B. Lee, Y. H. Cho, K.-D. Lee, S. H. Kim, K. Lee, S.-K. Kim and Y.-H. Lee, "Light extraction enhancement from nanoimprinted photonic crystal GaN-based blue light-emitting diodes," Optics Express, vol. 14, no. 19, pp. 8654-8660, 2006.

[11] H. W. Liu, Q. Kan, C. X. Wang, H. Y. Hu, X. S. Xu and H. D. Chen, "Light Extraction Enhancement of GaN LED with a Two-Dimensional Photonic Crystal Slab," Chinese Physics Letters, vol. 28, no. 5, p. 054216, 2011.

[12] A. G. Kaya, *Enhancing Light Extraction Efficiency of InGaN/GaN Multi Quantum Well Light Emitting Diodes With Embedded Two Dimensional Photonic Crystal Structures*, Msc Thesis, University of Bilkent, Ankara, Turkey, 2010.

#### مراجع

[۱] یاسر عظیمی، وحید هاشمی‌فرد و جمشید باقرزاده، «تشخیص توزیع شده و مشارکتی حمله کرم‌چاله در شبکه‌های حسگر بی‌سیم»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۲۰۶-۱۹۶، ۱۳۹۵.

[۲] سعید پاشازاده، «مطالعه تحلیلی دو رویکرد حرکت عملگرها در شبکه‌های حسگر و عملگر بی‌سیم»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۶۴-۵۰، ۱۳۹۵.

[3] H. L. Ge, C. Xu, K. Xu, M. Xun, J. Wang and J. Liu, "Enhanced performance of photonic crystal GaN light-emitting diodes with graphene transparent electrodes," Nanoscale Research Letters, vol. 10, no. 1, pp. 1-5, 2015.

[4] Y. Fan and X. Wang, "High Light Extracting Efficiency of Gan-based LED Based on Photonic Crystal," Procedia Engineering, vol. 29, pp. 2332-2336, 2012.

[5] D. Aurélien, F. Tetsuo, S. Rajat, M. Kelly, N. Shuji, S. P. Denbaars, H. Evelyn L., W. Claude and B. Henri, "Photonic-crystal GaN light-emitting diodes with tailored guided modes distribution," Applied Physics Letters, vol. 88, no. 6, p. 061124, 2006.

- [13] D. M. Sullivan, *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*, 2ed, Wiley-IEEE Press, 2013.

## زیر نویس ها

<sup>10</sup> Long

<sup>11</sup> Liu

<sup>12</sup> Kaya

<sup>13</sup> Ge

<sup>14</sup> Finite Difference Time Domain (FDTD)

<sup>15</sup> Maxwell

<sup>16</sup> Yee

<sup>17</sup> Perfectly Matched Layer

<sup>1</sup> Light -Emitting Diode

<sup>2</sup> Local Area Network

<sup>3</sup> Multi Quantum Well (MQW)

<sup>4</sup> Surface Roughening

<sup>5</sup> Patterned Substrate

<sup>6</sup> Flip-Chip

<sup>7</sup> Aurélien

<sup>8</sup> Cho

<sup>9</sup> Indium Tin Oxide