بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

شبیه‌سازی آشکارساز فرابنفش MSM پلاسمونی مبتنی بر GaN

محمد محمدرضایی[۱]، ناصر هاتفی کرگان[۲]

دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

[1]mohammadmohammadrezai@gmail.com , [2]n.hatefi@phys.usb.ac.ir

چکیده - در عصر حاضر به علت پیچیده بودن مسائل و هندسه‌ها استفاده از روش‌های عددی برای حل مسائل بسیار گسترش یافته است. محاسبات عددی ابزار کارآمدی برای مهندسی افزاره‌های نیمرسانا می‌باشد. در این تحقیق از روش المان محدود (FEM) برای شبیه‌سازی آشکارساز MSM پلاسمونی استفاده شده است. از معادلات پایه نیمرسانا و الکترومغناطیس، برای محاسبه عملکرد این افزاره الکترونیکی استفاده شده است. در ولتاژ بایاس ۱۰ V چگالی جریان تاریک بدست آمده از ساختار شبیه‌سازی شده ۵×۱۰^{-۱۲} A/cm^۲ و جریان نوری آن ۸×۱۰^{-۵} A/cm^۲ می‌باشد. با استفاده از یک شبکه پلاسمونی بر روی سطح آشکارساز جریان نوری آشکارساز با افزایش قابل ملاحظه‌ای در ولتاژ بایاس ۱۰ V به مقدار $۱/۵\times۱۰^{-۴}$ A/cm^۲ رسید ولی تغییر در جریان تاریک قابل اغماض است.

کلید واژه- آشکارساز MSM پلاسمونی، نیمرسانای GaN، روش المان محدود

Simulation of a MSM Ultraviolet Photodetector Based on GaN

Mohammad MohammadRezaee[1], Naser Hatefi Kargan[2]

Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, University of Sistan and Baluchestan

[1]mohammadmohammadrezai@gmail.com , [2]n.hatefi@phys.usb.ac.ir

Abstract- Nowadays, numerical methods are widely used for the solution of problems due to the complexity of systems and geometries. Numerical computation is an effective tool for engineering semiconductor devices. In this research finite element method (FEM) has been used for simulation of a plasmonic MSM ultraviolet photodetector. For simulating the operation of this electronic device basic electromagnetic and semiconductor equations have been used. The results show that at a bias voltage of 10 V the dark current of the device is 5×10^{-12} A/cm^2 and the photocurrent is 1.5×10^{-4} A/cm^2. By using a plasmonic grid on the surface of the photodetector the photocurrent increased considerably, with a value of 1.5×10^{-4} A/cm^2 at a bias voltage of 10 V while the variation on the dark current is negligible.

Keywords: Plasmonic MSM photodetector, GaN semiconductor, Finite element method

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

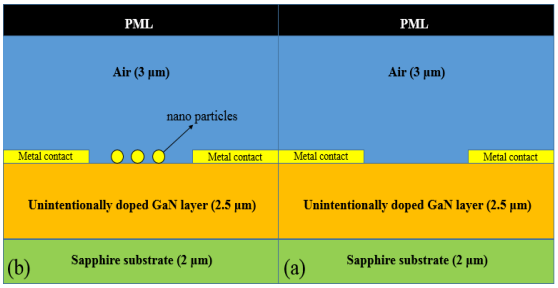
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

در گروه نیمرساناهای III-نیترید GaN به علت داشتن گاف انرژی مستقیم و عریض در دهه گذشته مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۱]. گاف نواری GaN، ۳/۴ eV بوده و به دلیل دارا بودن پایداری حرارتی و شیمیایی بالا یک انتخاب مناسب برای آشکارسازی امواج UV است [۲]. آشکارسازهای UV در گستره وسیعی از برنامه‌های کاربردی مانند نظارت بر لایه ازون، تشخیص شعله، مخابرات نوری و ستاره شناسی UV مورد استفاده قرار گرفته اند. در میان معماری‌های متفاوتی که برای ساختار آشکارسازها وجود دارد ساختار مسطح فلز-نیمرسانا-فلز (MSM) در مقایسه با سایر معماری‌ها دارای مزیت‌هایی مانند ساخت ساده، ظرفیت خازنی پایین، منطقه حساس به نور بزرگ و سرعت پاسخ بالا است [۳]. با ایجاد یک شبکه از نانوساختارهای فلزی بر روی سطح آشکارساز و به دام انداختن نور در نزدیکی سطح فلز-نیمرسانا می‌توان جریان تولیدی آشکارساز را افزایش داد. افزایش عملکرد آشکارساز با استفاده از نانوساختارهای فلزی و بهره گیری از اثرات پراکندگی پلاسمونی قبلا توسط چانگ و همکارانش در یک ساختار MSM مبتنی بر GaN گزارش شده است [۴]. در این تحقیق یک آشکارساز MSM پلاسمونی با استفاده از نرم افزار کامسول شبیه‌سازی شد.

ساختار آشکارساز MSM

مساحت سطح فعال آشکارساز شبیه‌سازی شده $۳۰\ \mu m^{۲}$ است و ضخامت لایه فعال $۲/۵\ \mu m$ از جنس GaN نوع n با چگالی ناخالصی $۱۰^{۱۴}\ cm^{-۳}$ می‌باشد، طول اتصالات فلزی و فاصله بین آنها $۱۰\ \mu m$ می‌باشد و از فلز طلا با تابع کار ۵/۱ eV برای اتصالات فلزی استفاده شده است. شکل ۱ ساختار آشکارساز پلاسمونی و معمولی شبیه‌سازی شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. ساختار معمولی (a) و پلاسمونی (b) آشکارساز MSM.

روش شبیه‌سازی

روش المان محدود یک روش محاسباتی برای یافتن حل عددی تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی می‌باشد. در این تحقیق معادلات حاکم بر اصول کار فیزیک افزاره‌های نیمرسانا با توجه به تابع توزیع ماکسول-بولتزمن جهت شبیه‌سازی آشکارساز MSM به روش المان محدود حل شدند. معادلات اساسی که برای شبیه‌سازی فیزیک نیمرسانا در آشکارساز استفاده شده است عبارت اند از معادله پواسون و معادلات پیوستگی:

$$\begin{aligned} &\nabla.(\varepsilon\nabla V) = q(p - n + N) \\ &-\nabla.J_n = -q(R_n - G) \\ &-\nabla.J_p = q(R_p - G) \end{aligned} \qquad (۱)$$

در این معادلات V پتانسیل الکترواستاتیک، q بار الکتریکی، n و p چگالی حجمی الکترون‌های آزاد و حفره‌ها و N چگالی اتم‌های ناخالصی می‌باشد. $R_{n,p}$ نرخ بازترکیب حامل‌ها و G نرخ تولید حامل‌ها است. از آنجا که نیمرسانای GaN دارای گاف نواری مستقیم است نرخ بازترکیب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} &R_n = R_p = C(np - n_i^{۲}) \\ &n_i^{۲} = \gamma_n\gamma_p\sqrt{N_{c.}N_{v.}}\exp\left(\frac{-E_g - \Delta E_g}{۲V_{th}}\right) \end{aligned} \qquad (۲)$$

در این معادله γ_n و γ_p فاکتور تبهگنی، $N_{v.}$ و $N_{c.}$ چگالی حالات موثر برای الکترون-حفره‌ها، ΔE_g مقدار باریک شدن گاف نواری بدلیل آلاییده شدن نیمرسانا، V_{th}

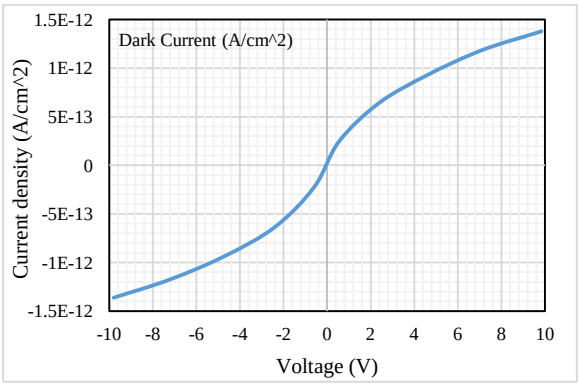
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

سرعت حرارتی و C فاکتور متوسط نرخ بازترکیب ماده GaN است که مقدار آن $۱/۱\times۱۰^{-۸}cm^{۳}s^{-۱}$ [۵] می‌باشد.

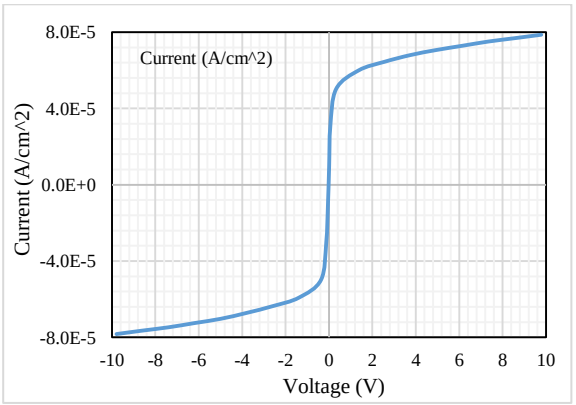
نتایج شبیه‌سازی

شکل ۲ چگالی جریان تاریک محاسبه شده برای آشکارساز معمولی را نمایش می‌دهد.



شکل ۲. چگالی جریان تاریک آشکارساز MSM معمولی.

از آنجا که نیمرسانای GaN دارای گاف نواری عریض است آشکارسازهای مبتنی بر GaN دارای جریان تاریک پایینی خواهند بود که این نتیجه در شکل ۲ مشخص است. برای اندازه گیری جریان نوری آشکارساز، تحت تابش نور با توان mW ۳ و طول موج nm ۳۴۳ قرار گرفت.

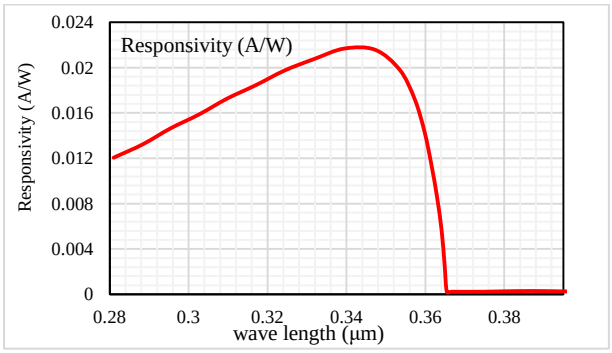


شکل ۳. چگالی جریان نوری آشکارساز MSM معمولی.

در شکل ۳ مشخص است با تابش نور به آشکارساز جریان تولید شده توسط آشکارساز افزایش می‌یابد. برای محاسبه پاسخدهی آشکارساز تحت طول موج‌های مختلف از رابطه (۳) استفاده شد.

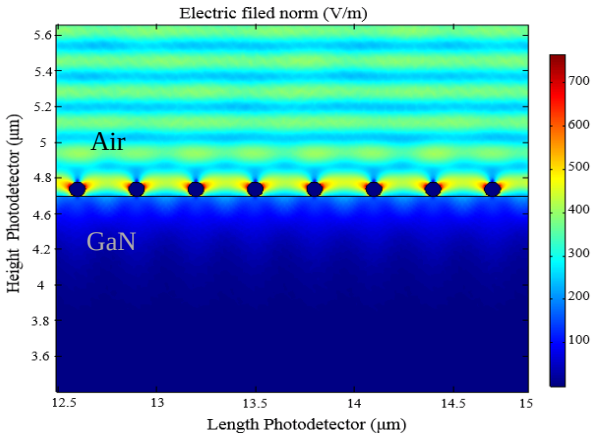
$$R = \frac{q}{h\nu}\eta \qquad (۳)$$

در این رابطه q بار الکتریکی، h ثابت پلانک و η بازده کوانتومی می‌باشد. پاسخدهی آشکارساز در ولتاژ بایاس V ۲ و ناحیه طول موجی nm ۲۸۰ تا nm ۴۰۰ در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴. پاسخدهی آشکارساز معمولی تحت ولتاژ بایاس V ۲.

همانطور که در شکل ۴ مشخص است بیشترین پاسخدهی آشکارساز مربوط به محدوده طول موجی لبه گاف نواری است و علت آن بیشتر بودن چگالی حالات در لبه گاف نواری است. با استفاده از نانو میله‌های فلزی تعبیه شده در سطح نیمرسانا می‌توان جذب نور را با تحریک پلاسمون سطحی موضعی (LSPR) افزایش داد.



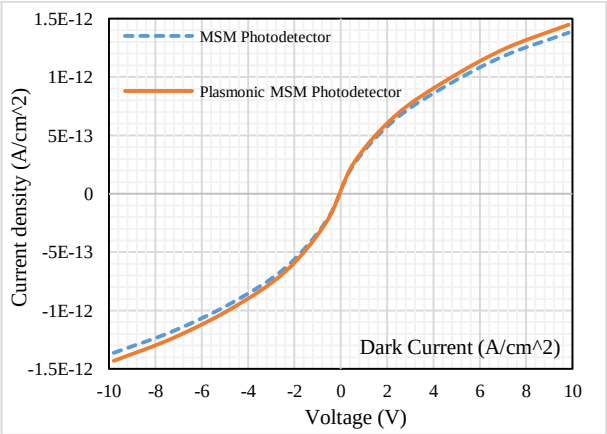
شکل ۵. اندازه میدان الکتریکی آشکارساز پلاسمونی.

همانطور که در شکل ۵ مشخص است نانومیله‌های طلا با شعاع nm ۴۰ و فاصله nm ۴۰۰ باعث تشدید میدان نور

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

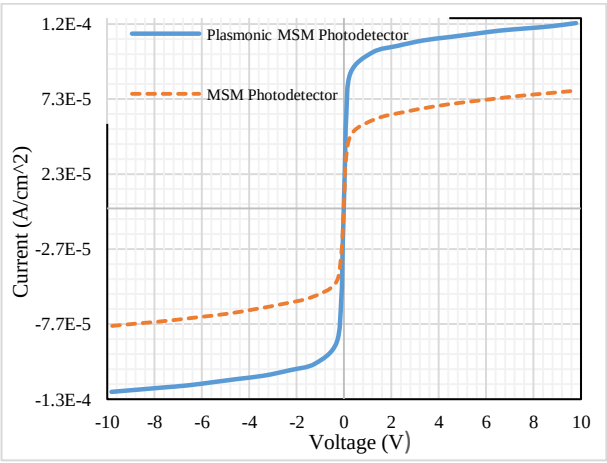
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

فرودی بر روی سطح شده اند. شکل ۶ چگالی جریان تاریک آشکارساز پلاسمونی و معمولی را مقایسه می‌کند.



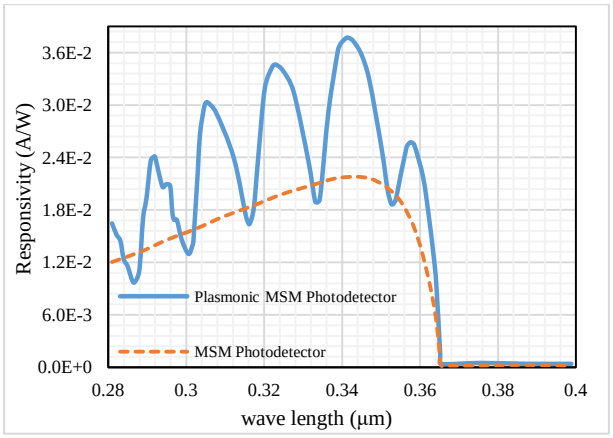
شکل ۶. چگالی جریان تاریک آشکارساز MSM پلاسمونی.

نانو میله‌های طلای روی سطح به دلیل سطح مقطع اتصال کوچک با لایه نیمرسانا رسانندگی را تغییر نداده در نتیجه تغییر اندکی در جریان تاریک آشکارساز مشاهده شد. شکل ۷ جریان نوری آشکارساز معمولی و پلاسمونی را با توان نور فرودی ۳ mW در طول موج ۳۴۳ nm مقایسه می‌کند.



شکل ۷. مقایسه جریان نوری آشکارساز معمولی و پلاسمونی.

در شکل ۷ مشخص است با ایجاد یک شبکه از نانومیله‌های فلزی بر روی سطح نیمرسانا و افزایش جذب آشکارساز جریان نوری افزایش پیدا می‌کند. پاسخدهی یکی از کمیت‌های مهم در آشکارسازها است و همانطور که در شکل ۸ مشخص است پاسخدهی آشکارساز پلاسمونی نسبت به آشکارساز معمولی افزایش پیدا کرده است. رفتار بیشینه و کمینه آشکارساز پلاسمونی ناشی از پدیده تداخل نور است.



شکل ۸. پاسخدهی آشکارساز پلاسمونی تحت ولتاژ بایاس ۲ V.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک آشکارساز MSM با روش المان محدود شبیه‌سازی شد و مشخص شد با استفاده از اثر پدیده تحریک پلاسمون سطحی موضعی (LSPR) جریان و پاسخدهی آشکارساز افزایش می‌یابد.

مرجع‌ها

[1] S. Jain, M. Willander, J. Narayan, R. V. Overstraeten, "III-nitrides: growth, characterization, and properties", J. Appl. Phys., Vol. 87, No. 3, pp. 965-1006, 2000.

[2] E. Monroy, F. Omnès, F. Calle, "Wide-bandgap semiconductor-ultraviolet-photodetectors", Semicond. Sci. Tech., Vol. 18, No. 4, pp. R33-R51, 2003.

[3] D. L. Rogers, "Integrated optical receivers using MSM detectors", J. Lightwave Technol., Vol. 9, No. 12, pp. 1635-1638, 1991.

[4] S. Chang, M. Chang, Y. Yang, "Enhanced responsivity of GaN metal–semiconductor–metal (MSM) photodetectors on GaN substrate", IEEE Photon. J., Vol. 9, No. 2, pp. 1-7, 2017.

[5] J. Muth, J. Lee, I. Shmagin, R. Kolbas, H. Casey Jr, B. Keller, U. Mishra, S. DenBaars, "Absorption coefficient, energy gap, exciton binding energy, and recombination lifetime of GaN obtained from transmission measurements", Appl. Phys. Lett., Vol. 71, No. 18, pp. 2572-2574, 1997.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]