

شبیه‌سازی و تحلیل رفتار آشکارساز نوری بهمنی $Al_{0.4}Ga_{0.6}N$ با روش مونت کارلو

محمد سروش^۱، محمد کاظم مروج فرشی^۲ و کامیار ثقفی^۳

^۱دانشگاه شهید چمران اهواز، m.soroosh@scu.ac.ir

^۲دانشگاه تربیت مدرس، farshi_k@modares.ac.ir

^۳دانشگاه شاهد، saghafi@shahed.ac.ir

چکیده - در این مقاله با استفاده از روش مونت کارلو ضریب‌های یونیزاسیون الکترون و حفره در $Al_{0.4}Ga_{0.6}N$ با ساختار وورتزایت را محاسبه می‌کنیم و نشان می‌دهیم که در $Al_{0.4}Ga_{0.6}N$ ضریب یونیزاسیون برخوردی الکترون بزرگتر از حفره است. بر همین اساس بهره یک آشکارساز نوری بهمنی همگون ساخته شده با $Al_{0.4}Ga_{0.6}N$ را محاسبه می‌کنیم و با بهره اندازه‌گیری شده مطابقت می‌دهیم، در ادامه ضریب نویز اضافی، ولتاژ شکست و میدان شکست این افزاره را نیز محاسبه و تحلیل می‌کنیم. همچنین با تغییر طول ناحیه تکثیر تغییرات این پارامترها را تحلیل می‌کنیم.

کلید واژه- آشکارساز نوری بهمنی، مونت کارلو، $Al_xGa_{1-x}N$

موج ۲۸۰ نانومتر هستند. یکی از کاربردهای رایج آشکارسازهای $Al_xGa_{1-x}N$ سنجش تخریب لایه ازن است. این آشکارسازها با توجه به محدوده آشکارسازی‌شان، نیازی به بکارگیری صافی طول موجی جانبی ندارند. بنابراین هزینه ساخت دستگاه سنجش تخریب لایه ازن با استفاده از ترکیب‌های $Al_xGa_{1-x}N$ به طور چشمگیری کاهش یافته است [۵ تا ۷].

پراکندگی و رانش حامل‌های الکتریکی و یونیزاسیون برخوردی سازوکارهای مهم درون آشکارساز نوری بهمنی هستند که ماهیت تصادفی دارند. به همین دلیل روش مونت کارلو ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی رفتار حامل‌های درون افزاره است. این روش می‌تواند تصویری میکروسکوپی از حامل‌های الکتریکی در حوزه زمان و مکان ارائه دهد.

در این مقاله با استفاده از روش مونت کارلو ضریب‌های یونیزاسیون الکترون و حفره را محاسبه می‌کنیم و با مقادیرهای بدست آمده آزمایشگاهی مطابقت می‌دهیم [۸]. سپس با استفاده از ضریب‌های یونیزاسیون تنظیم شده، بهره و ضریب نویز اضافی یک آشکارساز نوری بهمنی همگون ساخته شده را محاسبه می‌کنیم [۶]. در ادامه، بهره، ضریب نویز اضافی، ولتاژ شکست و میدان شکست افزاره را به ازای طول‌های مختلف ناحیه تکثیر شبیه‌سازی و تحلیل می‌کنیم.

۱- مقدمه

اولین عنصر در بخش گیرنده نوری، آشکارساز نوری است. این افزاره نور تابیده شده را به جریان الکتریکی متناسب با نور دریافتی تبدیل می‌کند. وجود بهره پارامتر مهمی است که استفاده از آشکارساز نوری بهمنی را توصیه می‌کند.

گالیم نیتراید (GaN) یا به نوعی ترکیب‌های $Al_xGa_{1-x}N$ به دلیل شکاف انرژی بزرگی که دارند گزینه مناسبی برای آشکارسازی طول موج‌های فرابنفش هستند. این آشکارسازها در دماهای نسبتاً زیاد کار می‌کنند و جریان تاریک (نشتی) کمی دارند [۱].

آشکارسازهای فرابنفش نسبت به آشکارسازهای سایر طول موج‌ها ولتاژ بایاس بیشتری دارند که ناشی از شکاف انرژی بزرگ آن‌ها است. ترکیب‌های $Al_xGa_{1-x}N$ از لحاظ شکاف انرژی بازه وسیع ۳/۴eV تا ۶/۲eV را پوشش می‌دهند. در این بازه، به ازای ساختار وورتزایت و همه کسرهای مولی x شکاف انرژی مستقیم است [۲].

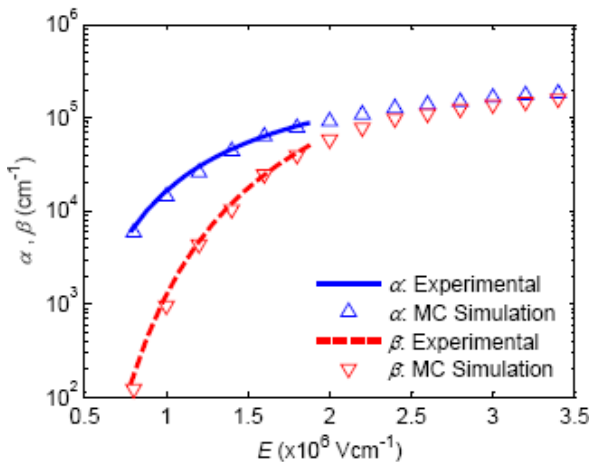
گزارش‌های متعددی از ساخت این ترکیب‌ها با روش بخار لایه‌نشانی منتشر شده است که آن‌ها را بر روی زیرلایه SiC با کیفیت مناسب رشد داده‌اند [۳ و ۴]. این ترکیب‌ها گزینه مناسبی برای آشکارسازی نور فرابنفش اشعه خورشید در محدوده طول

۲- روش مونت کارلو

برای محاسبه میدان شکست و ولتاژ شکست، ولتاژ بایاس معکوس را تا جایی زیاد می‌کنیم که یونیزاسیون برخوردی حامل‌های الکتریکی به طور مداوم ادامه پیدا کند و تعداد حامل‌های درون افزاره به صورت پایان‌ناپذیر زیاد شود. این ولتاژ، ولتاژ شکست است و بیشینه شدت میدان الکتریکی ناحیه تکثیر، میدان شکست افزاره خواهد بود.

۳- شبیه‌سازی و تحلیل

شکل ۱ ضرب‌های یونیزاسیون الکترون (α) و حفره (β) بدست‌آمده از شبیه‌سازی برای $Al_{0.4}Ga_{0.6}N$ را به ازای مقدارهای مختلف شدت میدان الکتریکی (E) با داده‌های بدست‌آمده از آزمایش مقایسه می‌کند [۸]. تطابق بهتر نتیجه شبیه‌سازی α و β با داده‌های بدست‌آمده از آزمایش باعث می‌شود که خطای محاسبه بهره و ضرب نويز اضافی نیز کمتر شود.



شکل ۱: ضرب‌های یونیزاسیون الکترون و حفره برحسب مقدارهای مختلف شدت میدان الکتریکی. نشانه‌ها و خط‌ها به ترتیب نتیجه‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی [۸] را نشان می‌دهند.

جدول ۱ اطلاعات مربوط به لایه‌های مختلف یک افزاره همگون ساخته‌شده از $Al_{0.4}Ga_{0.6}N$ را ارائه می‌دهد [۶].

جدول ۱: اطلاعات مربوط به لایه‌های مختلف افزاره همگون $Al_{0.4}Ga_{0.6}N$ [۶].

ناحیه	طول (nm)	غلظت (cm^{-2})
n^-	۲۰۰	$1/45 \times 10^{17}$
n^+	۳۰۰	10^{18}

شکل ۲ بهره برحسب ولتاژ بایاس (V_{bias}) و ضرب نويز اضافی برحسب بهره افزاره ارائه‌شده در جدول ۱ را نشان می‌دهد. افزایش ولتاژ بایاس افزاره باعث بیشتر شدن شدت میدان

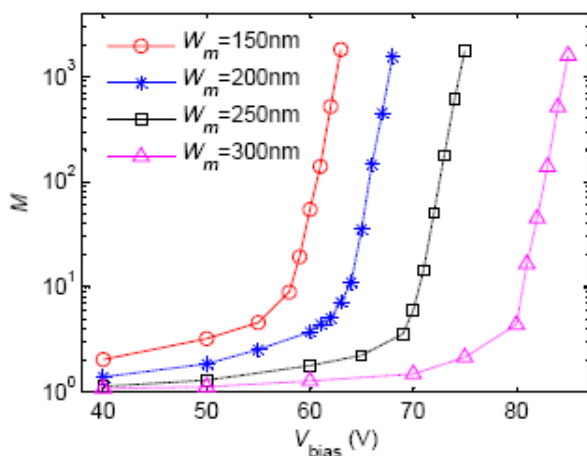
در مدلی که استفاده کرده‌ایم باندهای انرژی را به صورت غیر سهمی‌گون در نظر گرفته‌ایم. برای الکترون‌ها از مدل دو دره-ای و برای حفره‌ها از مدل دو باندهای استفاده کرده‌ایم. نرخ یونیزاسیون برخوردی را با تقریب کلدیش در نظر گرفته‌ایم و آن را به عنوان یک سازوکار پراکندگی لحاظ کرده‌ایم. مهمترین سازوکارهای پراکندگی افزاره آشکارساز نوری بهمنی را در قالب-های فونونی، ناخالصی و یونیزاسیون برخوردی لحاظ کرده‌ایم [۹]. برای محاسبه ضرب یونیزاسیون حامل الکتریکی، حامل را به یک ناحیه تکثیر با میدان الکتریکی معلوم تزریق می‌کنیم. انرژی جنبشی حامل الکتریکی بر اثر رانش ناشی از میدان الکتریکی بیشتر می‌شود تا جایی که پدیده یونیزاسیون برخوردی رخ می‌دهد. فاصله طی‌شده بین دو یونیزاسیون برخوردی متوالی را ثبت می‌کنیم. این کار را 10^4 بار تکرار می‌کنیم و میانگین فاصله طی‌شده بین دو یونیزاسیون برخوردی را بدست می‌آوریم. عکس میانگین این فاصله ضرب یونیزاسیون حامل است [۱۰].

برای محاسبه بهره، مسیر حرکت حامل الکتریکی از ناحیه جذب تا انتهای ناحیه تکثیر را دنبال می‌کنیم تا پس از تکرار پروسه‌های رانش ناشی از میدان الکتریکی و پراکندگی‌های مختلف یونیزاسیون برخوردی انجام دهد. در نتیجه دو ذره جدید (یک الکترون و یک حفره) به وجود می‌آید. حامل الکتریکی اولیه و حامل‌های جدید سازوکارهای رانش و پراکندگی را به طور مستقل تکرار می‌کنند تا یونیزاسیون برخوردی انجام دهند. برای همه حامل‌های الکتریکی مسیرهای حرکت آن‌ها را شبیه‌سازی می‌کنیم تا جایی که از ناحیه تکثیر خارج شوند. مجموع تعداد کل حامل‌های الکتریکی که از ناحیه تکثیر خارج می‌شوند معادل بهره افزاره خواهد بود. این رویه را به ازای 10^4 بار انجام می‌دهیم و میانگین بهره‌ها (M_i) را بدست می‌آوریم. این میانگین، بهره آشکارساز نوری بهمنی ($\langle M \rangle$) است [۱۰].

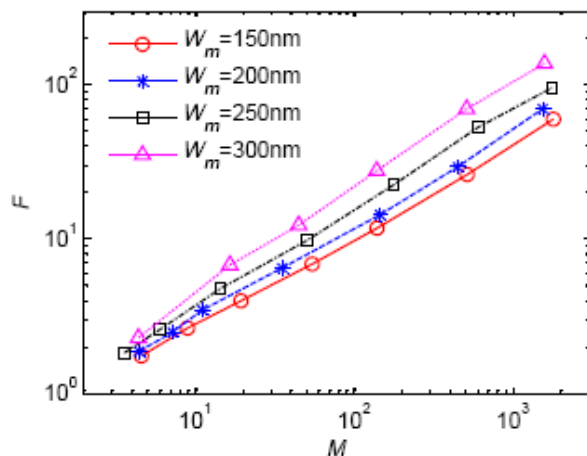
ضرب نويز اضافی به طور همزمان با میانگین بهره افزاره قابل محاسبه است. به عبارت دیگر زمانی که به ازای تزریق 10^4 حامل الکتریکی به ناحیه تکثیر، بهره متناسب با آن را بدست می‌آوریم برداری به طول 10^4 می‌سازیم که سلول‌های آن مقدارهای مختلف بهره به ازای تزریق هر یک از حامل‌های الکتریکی است. مقدارهای بردار را در رابطه (۱) قرار می‌دهیم تا ضرب نويز اضافی (F) را محاسبه کنیم [۱۱].

$$F = \frac{\langle M_i^2 \rangle}{\langle M \rangle^2} \quad (1)$$

افزایش ضریب نویز اضافی می‌شود. در حالتی که بهره معینی (یا میانگین تعداد یونیزاسیون معینی) در نظر داشته باشیم، افزایش طول ناحیه تکثیر به معنای وجود طول بیشتر برای حامل‌های الکتریکی است تا تعداد یونیزاسیون معین را انجام دهند. افزایش طول ناحیه تکثیر برای یونیزاسیون حامل‌ها معادل افزایش میانگین طول یونیزاسیون (یا کاهش شدت میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر) است. با افزایش میانگین طول یونیزاسیون تعداد پراکندگی‌های حامل قبل از یونیزاسیون برخوردی هم زیاد می‌شود و باعث می‌شود که پراکندگی طول یونیزاسیون نسبت به میانگین بیشتر شود. این امر باعث افزایش ضریب نویز اضافی می‌شود.



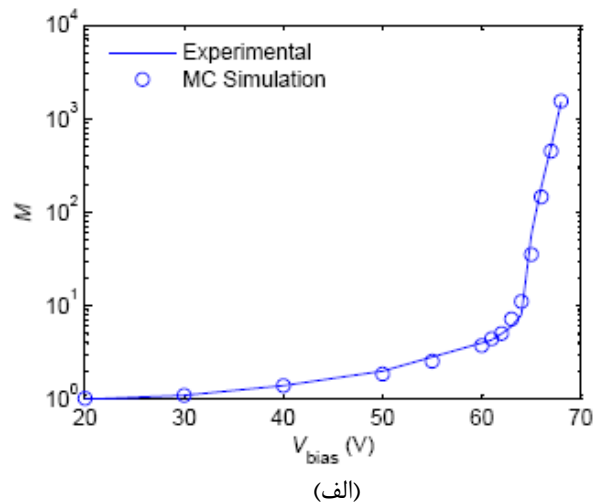
شکل ۳: تغییرات بهره بر حسب ولتاژ بایاس معکوس به ازای طول‌های مختلف ناحیه تکثیر.



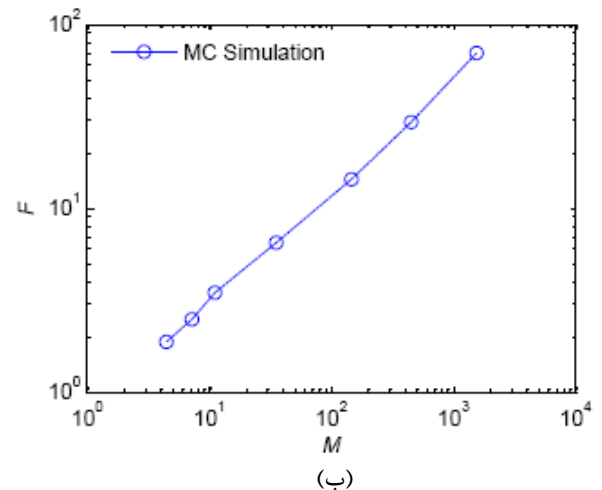
شکل ۴: تغییرات ضریب نویز اضافی بر حسب بهره به ازای طول‌های مختلف ناحیه تکثیر.

شکل ۵: ولتاژ شکست افزاره (V_{br}) به ازای طول‌های مختلف

الکتریکی ناحیه تکثیر می‌شود. در نتیجه میانگین طول یونیزاسیون حامل‌ها کمتر و بهره افزاره زیادتر می‌شود. افزایش بهره متناظر با افزایش تعداد یونیزاسیون‌های برخوردی است. با افزایش تعداد یونیزاسیون‌ها توزیع طول یونیزاسیون‌ها پهن‌تر می‌شود و ضریب نویز اضافی افزاره هم بیشتر می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۲: الف) مقایسه بهره بدست‌آمده از شبیه‌سازی و داده‌های عملی [۶] بر حسب ولتاژ بایاس افزاره و ب) ضریب نویز اضافی بر حسب بهره بدست‌آمده از شبیه‌سازی.

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب تغییرات بهره و ضریب نویز اضافی به ازای طول‌های مختلف ناحیه تکثیر (W_m) را نشان می‌دهند. با افزایش طول ناحیه تکثیر در صورتی که اندازه بایاس معکوس ثابت بماند شدت میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر کاهش می‌یابد و بهره هم کم می‌شود. بنابراین برای داشتن بهره بیشتر باید با افزایش طول ناحیه تکثیر، بایاس معکوس قوی‌تری به افزاره اعمال کنیم.

به ازای یک بهره برابر، افزایش طول ناحیه تکثیر باعث

می‌شود چون مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا حامل الکتریکی تولیدشده در ناحیه جذب به اتصال‌های کناری افزاره برسد. همچنین شکل ۳ نشان داد که بزرگتر شدن ناحیه تکثیر باعث می‌شود که افزاره به ولتاژ بایاس بزرگتری برای یک بهره معین نیاز داشته باشد که این موضوع افزایش توان مصرفی افزاره را نتیجه می‌دهد. لازم به یادآوری است افزاره‌های آشکارساز نوری که از مواد با شکاف انرژی بزرگ ساخته می‌شوند ولتاژ بایاس بزرگی دارند. بنابراین توان مصرفی یکی از موارد مهم در این آشکارسازها است.

در شکل ۴ نشان داده شد که ضریب نویز اضافی با بزرگتر شدن ناحیه تکثیر بیشتر می‌شود. این موضوع باعث نوسان‌های قابل توجه بهره به ازای مقدار بهره‌های زیاد خواهد شد که مطلوب نیست. بنابراین می‌توان گفت که کاهش طول ناحیه تکثیر تا حد ممکن مطلوب است. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های کاهش طول ناحیه تکثیر میانگین طول مورد نیاز برای یک یونیزاسیون برخوردی است. از طرفی به ازای طول‌های کم، رفتار حامل الکتریکی در میدان‌های قوی بالستیکی خواهد بود یعنی حامل بدون پراکندگی رانش الکتریکی انجام می‌دهد و انرژی جنبشی آن به سرعت افزایش می‌یابد.

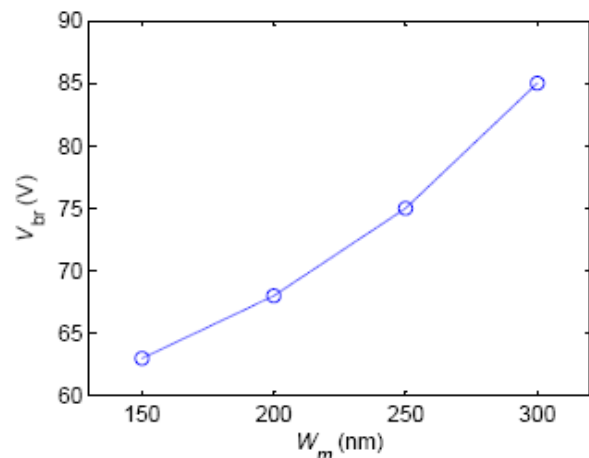
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهره، ضریب نویز اضافی، ولتاژ و میدان شکست یک آشکارساز نوری بهمینی همگون ساخته‌شده از $Al_{0.4}Ga_{0.6}N$ را به ازای طول‌های مختلف ناحیه تکثیر شبیه‌سازی و تحلیل کردیم. نتیجه‌های شبیه‌سازی نشان داد که کاهش طول ناحیه تکثیر باعث کاهش ضریب نویز اضافی، ولتاژ بایاس و افزایش میدان شکست افزاره می‌شود. در نتیجه توان مصرفی افزاره کمتر می‌شود و پایداری بهره نیز افزایش می‌یابد.

مراجع

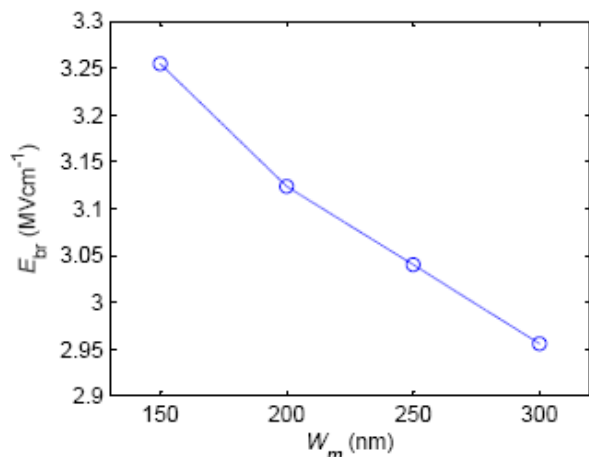
- [1] M. Razeghi and A. Rogalski, "Semiconductor ultraviolet detectors," *J. Appl. Phys.*, vol. 79, pp. 7433-7473, 1996.
- [2] J. P. R. David and C. H. Tan, "Material considerations for avalanche photodiodes," *IEEE J. of Selected Topics in Optics in Quantum Electronics*, vol. 14, pp. 998-1009, 2008.
- [3] S. C. Shen, Y. Zhang, D. Yoo, J. Limb, J. H. Ryou, P. D. Yoder, and R. D. Dupuis, "Performance of deep ultraviolet GaN avalanche photodiodes grown by MOCVD," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, pp. 1744-1746, 2007.
- [4] H. D. Liu, X. Guo, D. McIntosh, and J. C. Campbell, "Demonstration of ultraviolet 6H-SiC PIN avalanche photodiodes," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, pp. 2508-2510, 2006.
- [5] D. Yoo, J. Limb, J. H. Ryou, Y. Zhang, S. C. Shen, R. D. Dupuis, D. Hanser, E. Preble, and K. Evans, " $Al_xGa_{1-x}N$ ultraviolet

ناحیه تکثیر را نشان می‌دهد. افزایش طول ناحیه تکثیر باعث افزایش طول افزاره می‌شود در نتیجه ولتاژ بایاس - به ازای یک بهره معین - و ولتاژ شکست افزاره نیز افزایش می‌یابند.



شکل ۵: ولتاژ شکست افزاره به ازای طول‌های مختلف ناحیه تکثیر.

شکل ۶ تغییرات میدان شکست افزاره (E_{br}) به ازای طول‌های مختلف ناحیه تکثیر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است با افزایش طول ناحیه تکثیر میدان شکست افزاره کمتر می‌شود. در حالی که طول ناحیه تکثیر بیشتر می‌شود محدوده مکانی برای یونیزاسیون‌های برخوردی هم بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، حامل‌های الکتریکی در بازه طولی بیشتری می‌توانند یونیزاسیون برخوردی انجام دهند در نتیجه تعداد حامل‌های الکتریکی بیشتر می‌شود. بنابراین همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود در افزاره‌ای که ناحیه تکثیر بزرگتری دارد شدت میدان کمتری می‌تواند باعث شکست افزاره شود.



شکل ۶: میدان شکست افزاره به ازای طول‌های مختلف ناحیه تکثیر.

افزایش طول ناحیه تکثیر باعث کنشدن سرعت پاسخ افزاره

- [9] K. Tomizawa, *Numerical Simulation of Submicron Semiconductor Devices*, Artech House Press, 1993.
- [10] Y. L. Goh, D. J. Massey, A. R. J. Marshall, J. S. Ng, C. H. Tan, W. K. Ng, G. J. Rees, M. Hopkinson, J. P. R. David, and S. K. Jones, "Avalanche multiplication in InAlAs," *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. 54, pp. 11-16, 2007.
- [11] Y. L. Goh, A. R. J. Marshall, D. J. Massey, J. S. Ng, C. H. Tan, M. Hopkinson, J. P. R. David, S. K. Jones, C. C. Button, and S. M. Pinches, "Excess avalanche noise in $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 43, pp. 503-507, 2007.
- avalanche photodiodes grown on GaN substrates," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, pp. 1313-1315, 2007.
- [6] Tut, B. Butun, M. Gokkavas, and E. Ozbay, " $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -based avalanche photodiodes with high reproducible avalanche gain" *phys. stat. sol. (c)*, vol. 5, pp. 2316-2319, 2008.
- [7] T. Tut, B. Butun, M. Gokkavas, and E. Ozbay, "High performance $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -based avalanche photodiodes," *J. Photonics and Nanostructures*, vol. 5, pp. 140-144, 2007.
- [8] T. Tut, M. Gokkavas, B. Butun, S. Butun, E. Ulker, and Ekmel Ozbay, "Experimental evaluation of impact ionization coefficients in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ based avalanche photodiodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, pp. 183524-1 – 183524-3, 2006.