

طراحی لایه بار آشکارساز نوری بهمنی InGaAs/InAlAs با روش مونت کارلو برای کاهش ضریب نویز اضافی

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 بهره و ضریب نویز اضافی یک آشکارساز نوری بهمنی ساخته شده با ناحیه جذب InGaAs و ناحیه های بار و تکثیر InAlAs را محاسبه می کنیم. سپس طول و غلظت ناخالصی لایه بار را به گونه ای طراحی می کنیم که میانگین انرژی حامل های تزریقی به ناحیه تکثیر اندکی کمتر از انرژی آستانه یونیزاسیون برخوردی در ناحیه تکثیر باشد تا ضریب نویز اضافی افزاره کم شود. همچنین ولتاژ شکست و زمان گذر حامل از افزاره را نیز بررسی می کنیم. کلید واژه - آشکارساز نوری بهمنی، ضریب نویز اضافی، مونت کارلو.

حامل ها در مکان های مختلف درون افزاره را ارائه می دهد [۲]. برای کاهش ضریب نویز اضافی از یک لایه بار با غلظت ناخالصی زیاد استفاده می شود که میدان الکتریکی تقریباً متوسط ناحیه جذب را به میدان الکتریکی قوی در ناحیه تکثیر مرتبط می کند. طول این ناحیه کم و تغییر میدان الکتریکی در آن زیاد است. این ناحیه انرژی حامل های تزریقی به ناحیه تکثیر را کنترل می کند. با انتخاب طول و غلظت ناخالصی مناسب برای ناحیه بار، حامل های پر انرژی پس از ورود به ناحیه تکثیر با طی کردن مسافت اندکی یونیزاسیون برخوردی انجام می دهند. در نتیجه تفاوت و ناهماهنگی انرژی حامل های تزریقی به ناحیه تکثیر اثر کمتری بر تفاوت طول اولین یونیزاسیون برخوردی آن ها دارد و ضریب نویز اضافی افزاره کمتر می شود.

در این مقاله با استفاده از روش مونت کارلو به شبیه سازی بهره و ضریب نویز اضافی افزاره آشکارساز نوری بهمنی با لایه بار می پردازیم [۳]. ناحیه جذب افزاره InGaAs است که گزینه مناسبی برای آشکارسازی پنجره ۱/۵۵ میکرومتر است. برای ناحیه بار و تکثیر از InAlAs استفاده می شود. ثابت شبکه این ماده با InGaAs تطابق خوبی دارد.

در ادامه برای کاهش ضریب نویز اضافی، طول و غلظت ناخالصی لایه بار را تغییر می دهیم و یک لایه بار مناسب برای افزاره ساخته شده در مرجع [۳] طراحی می کنیم. در طراحی لایه

۱- مقدمه

آشکارساز نوری اولین عنصر در بخش گیرنده نوری است که اطلاعات نوری را به سیگنال متناظر الکتریکی تبدیل می کند. نویز این افزاره باعث کاهش کیفیت اطلاعات دریافتی می شود. یونیزاسیون برخوردی در آشکارساز نوری بهمنی باعث افزایش تعداد حامل های الکتریکی می شود. در نتیجه مقدار جریان الکتریکی افزاره به ازای توان نوری تابیده شده به آشکارساز زیادتر می شود. نتیجه این سازوکار را بهره آشکارسازی گویند [۱].

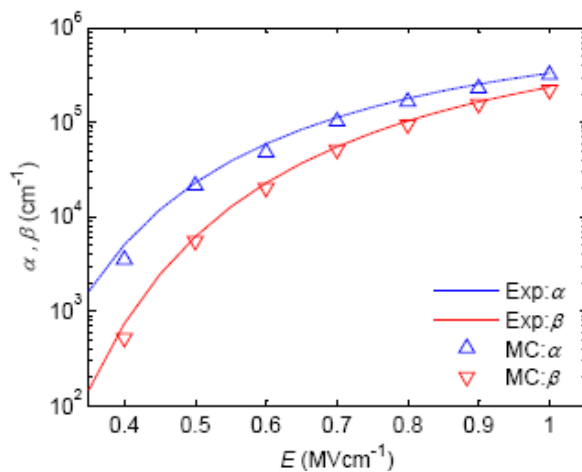
افزایش بهره مطلوب است چون می تواند نیاز به استفاده از تقویت کننده پس از آشکارساز را مرتفع کند. به دلیل ماهیت تصادفی یونیزاسیون برخوردی، زیاد شدن بهره همراه با آشفتگی و ناهماهنگی بیشتری در طول یونیزاسیون برخوردی حامل ها است. در نتیجه به ازای یک ولتاژ بایاس معلوم مقدار بهره ثابت نیست و حول مقدار بهره میانگین نوسان می کند. این مفهوم به عنوان ضریب نویز اضافی شناخته می شود. به عبارت دیگر افزایش بهره همراه با افزایش ضریب نویز اضافی است.

به دلیل ماهیت تصادفی سازوکارهای مختلف افزاره آشکارساز نوری بهمنی مانند پراکندگی و رانش حامل ها و یونیزاسیون برخوردی، روش مونت کارلو (MC) گزینه مناسبی برای شبیه سازی است. این روش تصویری میکروسکوپی از رفتار

بهره به ازای تزریق هر یک از حامل‌های الکتریکی است. مقادیرهای بردار را در رابطه (۱) قرار می‌دهیم تا ضریب نویز اضافی (F) را محاسبه کنیم [۵ و ۴].

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

شکل ۱ ضریب‌های یونیزاسیون برخوردی بدست‌آمده از شبیه‌سازی را همراه با داده‌های آزمایشگاهی [۴] برحسب میدان الکتریکی (E) برای الکترون (α) و حفره (β) در $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نتیجه‌های بدست‌آمده از شبیه‌سازی مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند.



شکل ۱: ضریب‌های یونیزاسیون الکترون و حفره برحسب میدان الکتریکی در $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$. خط‌ها و نشانه‌ها به ترتیب داده‌های بدست‌آمده از نتیجه‌های آزمایشگاهی [۴] و نتیجه‌های شبیه‌سازی را نشان می‌دهند.

جدول ۱ اطلاعات مربوط به دو افزاره آشکارساز نوری بهمنی با لایه بار مختلف A و B را نشان می‌دهد [۳].

جدول ۱: اطلاعات مربوط به لایه‌های مختلف افزاره‌های A و B [۳].

لایه	ماده	طول (nm)	غلظت (cm^{-3})
p^+	InAlAs	۱۰۰۰	2×10^{18}
جذب	InGaAs	۱۵۰۰	10^{15}
بار	InAlAs	۱۰۰	$N_A = 3/7 \times 10^{17}$ $N_B = 2/6 \times 10^{17}$
تکثیر	InAlAs	$W_A = 200$ $W_B = 500$	10^{15}
n^+	InAlAs	۱۰۰۰	2×10^{18}

شکل ۲ بهره افزاره‌ها به ازای مقادیر مختلف ولتاژ بایاس معکوس (V_{bias}) را نشان می‌دهد [۳]. همان‌طور که در شکل دیده

بار، میزان پهن‌شدگی توزیع انرژی حامل‌های تزریقی به ناحیه تکثیر را هم بررسی می‌کنیم چون پهن‌تر شدن این توزیع باعث افزایش ضریب نویز اضافی آشکارساز نوری بهمنی می‌شود. زمان گذر حامل از افزاره و ولتاژ شکست پارامترهای دیگر طراحی هستند.

۲- شبیه‌سازی افزاره $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$

در روش مونت کارلو برای الکترون‌ها از مدل دو دره‌ای و برای حفره‌ها از مدل دو بانندی استفاده می‌کنیم. باندهای انرژی را غیر سهمی‌گون در نظر می‌گیریم. پراکندگی‌های فونونی، ناخالصی و یونیزاسیون برخوردی را برای حامل‌های الکتریکی لحاظ می‌کنیم. تقریب کلدیش را برای نرخ یونیزاسیون برخوردی در نظر می‌گیریم [۲].

برای محاسبه ضریب 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 طی شده بین دو یونیزاسیون برخوردی متوالی را ثبت می‌کنیم. این کار را 10^4 بار تکرار می‌کنیم و میانگین فاصله طی شده بین دو یونیزاسیون برخوردی را بدست می‌آوریم. عکس میانگین این فاصله ضریب یونیزاسیون حامل است [۵ و ۴].

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 مرتبه انجام می‌دهیم و میانگین بهره‌ها (M_i) را بدست می‌آوریم. این میانگین بهره آشکارساز نوری بهمنی ($\langle M \rangle$) است [۵ و ۴].

ضریب نویز اضافی به طور همزمان با میانگین بهره افزاره قابل محاسبه است. به عبارت دیگر زمانی که به ازای تزریق هر حامل الکتریکی به ناحیه تکثیر، بهره متناسب با آن را بدست می‌آوریم برداری می‌سازیم که سلول‌های آن مقادیرهای مختلف

ناخالصی بیشتر در لایه بار ضریب نویز افزاره به ازای بهره‌های معلوم و ثابت کاهش می‌یابد. با جذب نور در ناحیه جذب، الکترون‌ها و حفره‌ها بر اثر رانش ناشی از میدان الکتریکی به ترتیب به سمت ناحیه بار و ناحیه p^+ حرکت می‌کنند. زمانی که الکترون‌ها وارد لایه بار می‌شوند انرژی‌های مختلفی دارند در نتیجه طول یونیزاسیون برخوردی آن‌ها در ناحیه تکثیر افزاره هم متفاوت است. این ناهماهنگی که از سازوکارهای تصادفی مختلف درون افزاره ناشی می‌شود باعث افزایش ضریب نویز اضافی می‌شود.

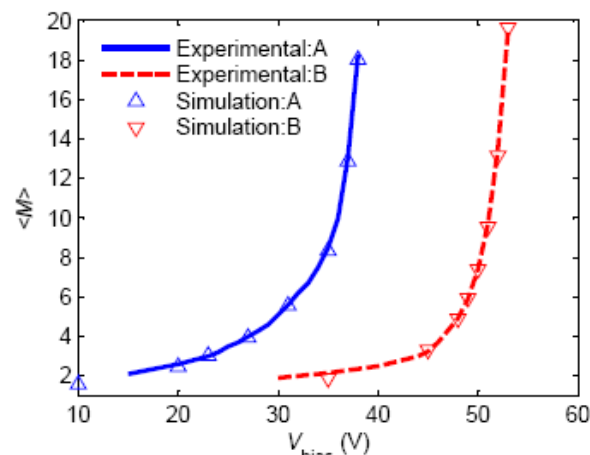
وجود لایه بار نازک با غلظت ناخالصی زیاد باعث تغییر دامنه زیادی در شدت میدان الکتریکی این ناحیه می‌شود. به عبارت دیگر، الکترون‌ها با طی مسافت کمی به سرعت انرژی جنبشی زیادی پیدا می‌کنند. این موضوع باعث می‌شود تا در انتهای لایه بار الکترون‌های پرنرژی به طول کمی برای یونیزاسیون برخوردی در ناحیه تکثیر نیاز داشته باشند.

اگر طول و غلظت ناخالصی مناسبی برای لایه بار در نظر گرفته شود میانگین انرژی جنبشی الکترون‌ها در تزریق به ناحیه تکثیر اندکی کمتر از انرژی آستانه یونیزاسیون برخوردی در InAlAs خواهد بود و الکترون‌ها با طی مسافت کمی در ناحیه تکثیر احتمال یونیزاسیون برخوردی خواهند داشت. می‌توان گفت که اولین یونیزاسیون برخوردی تقریباً هماهنگ الکترون‌ها در ناحیه تکثیر اثر انرژی‌های مختلف الکترون‌ها بر ضریب نویز اضافی را کمتر می‌کند. با این ایده به طراحی پارامترهای پیش‌گفته برای لایه بار می‌پردازیم.

۳- طراحی لایه بار InAlAs

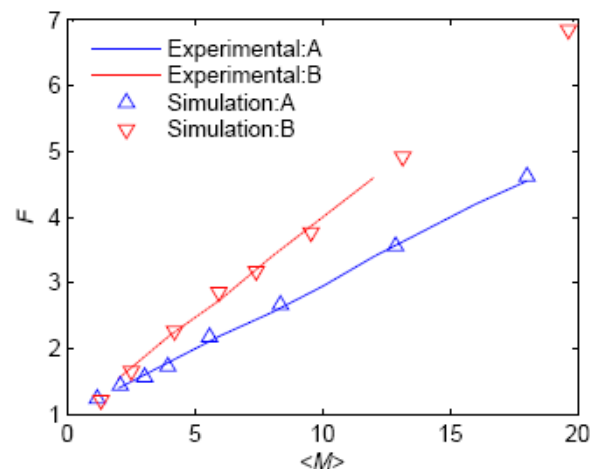
شکل ۴ پهنای میانی تابع توزیع $(FWHM)$ انرژی الکترون‌ها در انتهای لایه بار به ازای طول‌های مختلف این ناحیه (W_C) را نشان می‌دهد. غلظت ناخالصی در لایه بار $(N_C) \approx 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ و میانگین بهره تقریباً ۱۷ است. کاهش طول ناحیه بار باعث کاهش $FWHM$ می‌شود ولی همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است میزان کاهش $FWHM$ به ازای گستره طول ناحیه بار از ۶۰ تا ۱۰۰ نانومتر فقط ۰/۰۶ eV است. نتیجه شبیه‌سازی نشان داد که به ازای بهره حدود ۱۷، با کاهش طول ناحیه بار از ۱۰۰ nm تا ۶۰ nm ضریب نویز اضافی فقط ۰/۱۱ کم می‌شود. بنابراین کوچک‌شدن طول ناحیه بار به تنهایی نمی‌تواند ضریب نویز اضافی را به طور موثری کاهش دهد. بنابراین غلظت ناخالصی ناحیه بار نیز باید در نظر گرفته شود.

می‌شود با افزایش طول لایه بار ولتاژ بایاس و ولتاژ شکست افزاره هم بیشتر می‌شوند. با افزایش ولتاژ بایاس میدان الکتریکی ناحیه شکست هم مقدار بیشتری دارد و باعث می‌شود میانگین طول یونیزاسیون برخوردی حاملها کمتر شود. در نتیجه تعداد یونیزاسیون برخوردی بیشتر می‌شود و بهره افزاره نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۲: بهره افزاره برحسب ولتاژ بایاس معکوس به ازای لایه بار A و B داده شده در جدول ۱. خط‌ها و نشانه‌ها به ترتیب داده‌های آزمایشگاهی [۳] و نتیجه‌های شبیه‌سازی را نشان می‌دهند.

بر اساس نوشته‌های بخش ۲، ضریب نویز اضافی افزاره را همراه با بهره آن می‌توان محاسبه کرد. شکل ۳ مقدار ضریب نویز اضافی متناظر با بهره‌های بدست‌آمده در شکل ۲ را برای لایه بار A و B نشان می‌دهد [۳].



شکل ۳: ضریب نویز اضافی برحسب مقدارهای مختلف بهره بدست‌آمده در شکل ۲ و به ازای لایه بار A و B داده‌شده در جدول ۱. خط‌ها و نشانه‌ها به ترتیب داده‌های آزمایشگاهی [۳] و نتیجه‌های شبیه‌سازی را نشان می‌دهند.

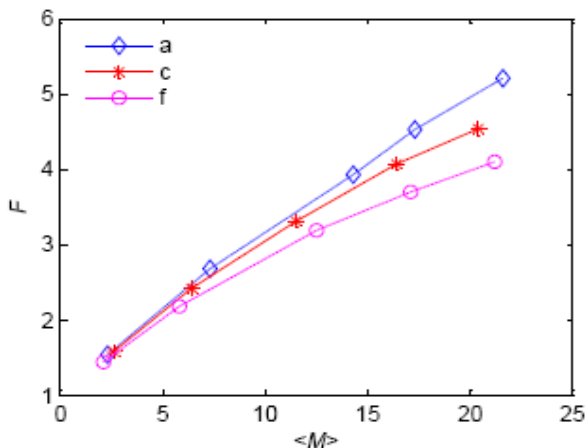
شکل ۳ نشان می‌دهد که به ازای طول کمتر و غلظت

بر اساس شکل‌های ۴ و ۵ برای کاهش ضریب نویز اضافی افزاره باید همزمان طول ناحیه بار را کم کنیم و غلظت ناخالصی این ناحیه را افزایش دهیم. جدول ۲ $FWHM$ و ضریب نویز اضافی را به ازای لایه‌های بار مختلف و بهره میانگین ۱۷ نشان می‌دهد. کمینه ضریب نویز اضافی در جدول ۲ به ازای طول ۵۰nm و غلظت ناخالصی $۸ \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ بدست می‌آید.

جدول ۲: $FWHM$ و ضریب نویز اضافی به ازای لایه‌های بار مختلف و بهره میانگین ۱۷.

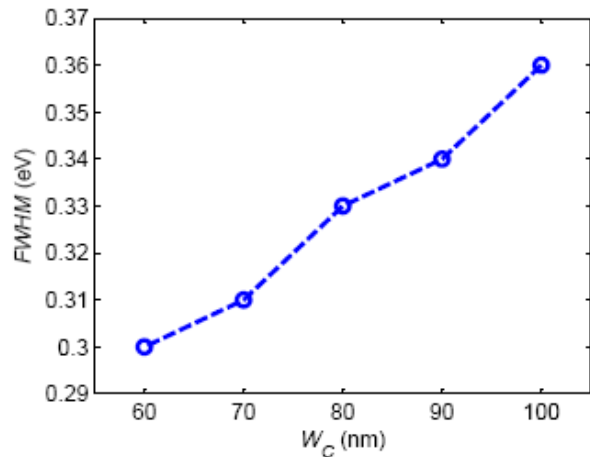
نتیجه شبیه‌سازی		ناحیه بار		
F	$FWHM$ (eV)	N_C ($\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)	W_C (nm)	نام
۴/۵۳	۰/۳۷	۳	۱۰۰	a
۴/۳۷	۰/۳۲	۴	۹۰	b
۴/۱۵	۰/۲۶	۵	۸۰	c
۳/۹۹	۰/۲۱	۶	۷۰	d
۳/۷۸	۰/۱۷	۷	۶۰	e
۳/۷۰	۰/۱۴	۸	۵۰	f

شکل ۶ ضریب نویز اضافی افزاره را به ازای سه لایه بار مختلف a، c و f داده شده در جدول ۲ نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود افزاره f ضریب نویز اضافی کمتری دارد.



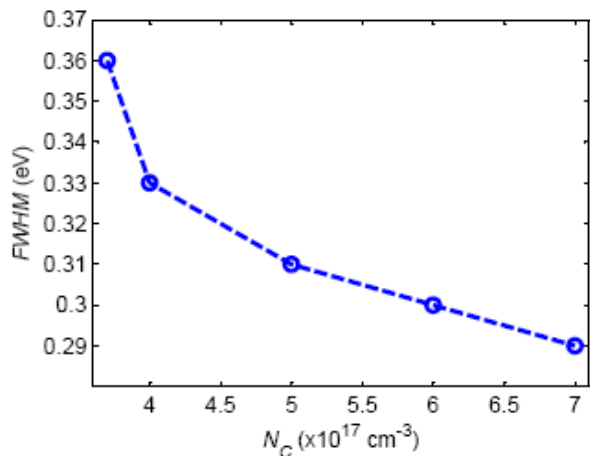
شکل ۶: ضریب نویز اضافی برحسب بهره به ازای لایه‌های بار a، c و f داده شده در جدول ۲.

ولتاژ شکست و زمان پاسخ پارامترهای مهم دیگری هستند که باید به آن‌ها هم توجه داشت. کاهش طول ناحیه بار باعث می‌شود که ولتاژ بایاس افزاره کم شود. افزایش غلظت ناخالصی در ناحیه بار باعث کاهش زمان عبور الکترون‌ها از این ناحیه می‌-



شکل ۴: پهنای میانی تابع توزیع انرژی الکترون‌ها در انتهای ناحیه بار به ازای طول‌های مختلف لایه بار. غلظت ناخالصی این ناحیه $۳/۷ \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ است.

شکل ۵ $FWHM$ را به ازای غلظت‌های مختلف ناحیه بار نشان می‌دهد. طول ناحیه بار ۱۰۰nm و میانگین بهره تقریباً ۱۷ است. این شکل نشان می‌دهد که به ازای تغییر غلظت ناحیه بار از $۳/۷ \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ تا $۷ \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ، فقط $FWHM$ $۰/۰۷ \text{ eV}$ کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش غلظت ناخالصی ناحیه بار به تنهایی مناسب نیست و باعث می‌شود که تفاوت شدت میدان الکتریکی بین ناحیه جذب و تکثیر به طور نامطلوبی زیاد شود. با توجه به این که شدت میدان الکتریکی بحرانی محدودکننده بیشینه میدان الکتریکی در ناحیه شکست است از این رو تفاوت زیاد میدان الکتریکی بین ناحیه‌های جذب و تکثیر باعث می‌شود که میدان الکتریکی ضعیفی در ناحیه جذب حاکم باشد. این موضوع باعث افزایش زمان پاسخ افزاره می‌شود و پهنای باند را به شدت کم می‌کند.



شکل ۵: پهنای میانی تابع توزیع انرژی الکترون‌ها در انتهای ناحیه بار به ازای غلظت‌های ناخالصی مختلف این ناحیه. طول ناحیه بار ۱۰۰nm است.

5×10^{17} ولتاژ شکست افزاره $3/3$ ولت کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با کاهش 100 درصدی طول و افزایش 166 درصدی غلظت ناخالصی ناحیه بار، ولتاژ شکست افزاره 8 درصد کم می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش مونت‌کارلو بهره و ضریب نویز اضافی یک آشکارساز نوری بهمنی ساخته‌شده با لایه بار را شبیه‌سازی کردیم که لایه جذب افزاره $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ و لایه-های بار و تکثیر آن $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ است. همچنین نشان دادیم که کاهش طول و افزایش غلظت ناخالصی در لایه بار باعث کاهش ولتاژ شکست و ضریب نویز اضافی شود اما زمان گذر حامل از افزاره را ممکن است افزایش دهد. برای طراحی لایه بار افزاره، بسته به اهمیت ولتاژ بایاس، پاسخ زمانی و ضریب نویز اضافی باید بین این پارامترها مصالحه کرد.

مراجع

- [1] H. S. Nalwa, *Photodetectors and Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [2] K. Tomizawa, *Numerical Simulation of Submicron Semiconductor Devices*, Artech House Press, 1993.
- [3] J. S. Ng, C. H. Tan, and J.P.R. David, "Multiplication and excess noise of avalanche photodiodes with InGaAs absorption layer," *IEEE J. Optoelectronics*, vol. 153, pp. 191-194, 2006.
- [4] 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.
- [5] 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.

شود اما زمان رسیدن الکترون‌ها به ناحیه بار را می‌افزاید. برآیند این دو اثر پاسخ افزاره را تعیین می‌کند. بنابراین بسته به کاربرد مورد نظر افزاره باید بین ضریب نویز اضافی، ولتاژ بایاس و زمان پاسخ مصالحه کرد.

جدول ۳ میانگین زمان گذر الکترون از تولید در ناحیه جذب تا رسیدن به اتصال ناحیه n^+ (τ_{tr}) را به ازای لایه‌های مختلف داده‌شده در جدول ۲ و بهره ۱۷ ارائه می‌کند. همچنین ولتاژ شکست (V_{br}) افزاره محاسبه شده است.

جدول ۳: میانگین زمان گذر الکترون از افزاره به ازای بهره ۱۷ و ولتاژ شکست به ازای لایه‌های بار مختلف داده‌شده در جدول ۲.

ناحیه بار	τ_{tr} (fs)	V_{br} (V)
a	۱۲۲	۴۰/۳
b	۱۱۹	۳۹/۱
c	۱۲۶	۳۸/۶
d	۱۳۷	۳۷/۹
e	۱۴۹	۳۷/۴
f	۱۶۸	۳۷

جدول ۳ نشان می‌دهد که به ازای لایه بار b کمینه τ_{tr} بدست می‌آید. افزایش شیب تغییر میدان الکتریکی در لایه بار به ازای ولتاژ بایاس ثابت باعث می‌شود که میدان الکتریکی ناحیه جذب ضعیف‌تر شود. در نتیجه با توجه به طول زیاد ناحیه جذب در مقایسه با ناحیه بار کاهش شدت میدان الکتریکی در ناحیه جذب اثر زیادی بر پاسخ افزاره دارد.

ولتاژ شکست افزاره با کاهش طول ناحیه بار کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که به ازای کاهش 50nm در طول ناحیه بار و افزایش غلظت ناخالصی ناحیه بار به اندازه cm^{-3}