

# مقایسه جریان ناشی از تابش اشعه فرابنفش بر دیود نوری PIN سیلیکونی و گالیوم آرسنایدی

محمد رزاقی<sup>۱</sup> هانیه کرم<sup>۲</sup>

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه کردستان- سنندج- ایران

[mrazaghi@gmail.com](mailto:mrazaghi@gmail.com)

۲- مربی- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه کردستان- سنندج- ایران

[haniyeh.karam@gmail.com](mailto:haniyeh.karam@gmail.com)

**چکیده:** تشعشع پرتو پراثرزی فرابنفش بر دیودهای نوری PIN، پارامترهای مطلوب این نوع فوتودیودها را کاهش می‌دهد. در این مقاله با ارائه مدل شبیه‌سازی، به بررسی اثرات تابش اشعه فرابنفش بر مشخصه‌ی جریان روشنی در دو نوع دیود نوری گالیوم آرسنایدی و سیلیکونی پرداخته و جهت تأیید روابط تحلیلی، به کمک نرم‌افزار سیلواکو-اتلس هر دو مدل دیودی شبیه‌سازی می‌شود. ابتدا دو مدل (سیلیکونی و گالیوم آرسنایدی) تحت تابش منبع فرابنفش با طول‌موج ۳۰۰ نانومتر قرار گرفته و سپس، به بررسی پاسخ آن‌ها در چندین بایاس معکوس پرداخته می‌شود. در نهایت مشاهده می‌شود که پس از تابش، جریان تاریکی در هر دو مدل دیود نوری، به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. همچنین جریان روشنی در دیود نوری گالیوم آرسنایدی خیلی بیشتر از مدل مشابه سیلیکونی آن است. این پدیده ناشی از حساسیت بالاتر فوتودیودهای گالیوم آرسنایدی به اشعه‌ی پراثرزی است.

**واژه‌های کلیدی:** فوتودیود، جریان تاریکی، اشعه فرابنفش، سیلیکون، گالیوم آرسناید

**نوع مقاله:** پژوهشی

---

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۵/۲۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۸/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد رزاقی

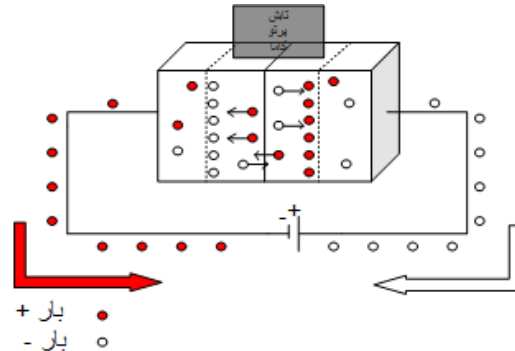
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - سنندج - بلوار پاسداران - دانشگاه کردستان - دانشکده‌ی برق

## ۱- مقدمه

آشکارسازی اشعه فرابنفش یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحقیقاتی در علوم فیزیوتراپی، ستاره‌شناسی، پزشکی و... می‌باشد [۱]. همچنین آرایش‌های دیود نوری<sup>۱</sup> به‌جای حس‌گرهای<sup>۲</sup> حساس به نور، در سیستم‌های تصویربرداری کاندیدهای مطرح و مطلوبی هستند و ساختار یکسانی با سلول‌های خورشیدی<sup>۳</sup> دارند.

دیود نوری یک قطعه نیمه‌هادی با اتصال p-n یا ساختار p-i-n (PIN) است که در آن، نور در ناحیه‌ی تخلیه جذب و جریان نوری<sup>۴</sup> تولید می‌کند. دیود نوری p-i-n مشابه با دیودهای p-n است. تفاوت این دو ساختار، وجود ناحیه‌ی تقریباً ذاتی<sup>۵</sup> مابین دو پایانه‌ی به‌شدت دوپ شده P و N در ساختار p-i-n (PIN) است [۲].

شکل (۱) سازوکار<sup>۶</sup> یک دیود نوری p-i-n را نشان می‌دهد که پس از تابش اشعه‌ی پرنرژی، زوج الکترون-حفره ایجاد شده و در حالت بایاس معکوس<sup>۷</sup>، الکترون و حفره‌ها به سمت قطب مخالف رفته و موجب تولید جریان معکوس می‌شوند.



شکل (۱): نحوه سازوکار فوتودیودها

به دلیل حساسیت<sup>۸</sup> ساخت در این فوتودیودها، هنگامی که در معرض تابش اشعه‌ای با خاصیت یونندگی قرار می‌گیرند، نقص‌هایی<sup>۹</sup> در آن‌ها ایجاد می‌شود؛ بنابراین بهتر است جهت بررسی رفتار و کیفیت دیودهای نوری در محیط‌های تابش، از مشخصه‌ی جریان-ولتاژ (I-V) استفاده کرد.

ساختار این نوع دیودها با توجه به تکنولوژی ساخت می‌تواند بسیار فشرده<sup>۱۰</sup>، سریع و خطی<sup>۱۱</sup> باشد. همچنین در ساختارهای کوانتومی دارای راندمان بالا<sup>۱۲</sup> و محدوده‌ی دینامیکی<sup>۱۳</sup> گسترده‌ای هستند. به دلیل ارزان و در دسترس بودن، آن‌ها می‌توانند در ترکیب با قطعات الکترونیکی به‌طور مناسب عمل کنند و در ساختارهای فشرده بکار برده شوند [۳]. این قطعات در ساختارهای کوانتومی با بالا رفتن دما و افزایش انرژی، راندمان بالایی دارند و حامل‌های<sup>۱۴</sup> بیشتری در ساختار آن‌ها ایجاد می‌شود. در نتیجه جریان تاریکی<sup>۱۵</sup> که ناشی از تعداد حامل‌های اقلیت است افزایش می‌یابد [۴] که در این حالت بهره دیودی

بالا رفته و استفاده از آن در سامانه‌های پیشرفته توزیع انرژی، بهینه و به‌صرفه‌تر خواهد بود [۵].

طول موج اشعه فرابنفش<sup>۱۶</sup> کوتاه و در حد نانومتر<sup>۱۷</sup> است؛ بنابراین فوتون‌های پرتو فرابنفش بسیار پرنرژی‌تر از اشعه‌ای همچون اشعه مرئی<sup>۱۸</sup> هستند. به دلیل انرژی بالا در فوتون‌های فرابنفش، آن‌ها با سرعت بسیار بالا حرکت می‌کنند و قبل از آنکه مسافت زیادی را در ماده طی کنند، آثار مخربی را در آن بجای می‌گذارند.

جهت آشکارسازی، پرتوی فرابنفش باید با قسمت فعال دیود برخورد کند تا انرژی خود را منتقل کرده و با عمل تخریب پیوندها، تولید زوج الکترون-حفره نماید [۶، ۷]. پرتوی فرابنفش به چندین روش مختلف انرژی خود را در ماده تلف می‌کند که عمده‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: پدیده فتوالکترونیک<sup>۱۸</sup> (فرآیند اصلی در تشخیص آشکارسازی و رسم طیف پرتوی فرابنفش، یونیزاسیون<sup>۱۹</sup> است که پرتو قسمتی یا تمام انرژی خود را درون حجم فعال آشکارساز از دست داده و با انتقال انرژی تولید زوج الکترون-حفره می‌کند). آسیب ناشی از تابش، در قطعه‌های نیمه‌هادی هنگامی اتفاق می‌افتد که انتقال انرژی در ناحیه حساس قطعه، موجب ایجاد جابجایی اتمی و یا یونیزاسیون الکترون-حفره شده باشد. به‌طور کلی انرژی منتقل شده موجب ایجاد نقص‌هایی همچون جابجایی<sup>۲۰</sup>، نقص‌های نقطه‌ای<sup>۲۱</sup> (مانند جای خالی و بینابینی) و همچنین نقص‌های خوشه‌ای<sup>۲۲</sup> (مانند نواحی با تراکم بالای نقص) در شبکه‌های نیمه‌هادی می‌شود.

در آزمایش انجام گرفته در این مقاله، با برخورد اولیه پرتو بر اتم، ناخالصی‌های موجود در ساختار قطعه حرکت کرده و به تدریج انرژی اضافی خود را از دست می‌دهد. در پایان مسیرهای پس‌زنی، توده‌های نقص متراکم تشکیل شده و در نتیجه نواحی بی‌نظم معمولاً به‌صورت خوشه‌ای ایجاد می‌شوند (این نواحی شامل غلظت‌های نقص بسیار بالا می‌باشند) [۸].

در ادامه، اثرات تابش فرابنفش بر دیودهای نوری سیلیکونی و گالیوم‌آرسنایدی، بر اساس یک مدل تحلیلی و شبیه‌سازی را ارائه می‌شود.

## ۲- مدل تحلیلی و روابط ریاضی

در مقاله حاضر از یک مدل دو بعدی ساده شده برای توصیف رفتار دیود نوری استفاده شده و از اثرات سطحی<sup>۲۳</sup> و غیریکنواختی‌ها<sup>۲۴</sup> در امتداد جهت جانبی<sup>۲۵</sup> (بعد سوم) صرف‌نظر می‌شوند؛ زیرا بیشترین و مهم‌ترین اثرات پرتوئی<sup>۲۶</sup> UV، تغییر در مشخصه‌های قطعات در مسیر طولی عبور سیگنال می‌باشد.

غلظت حامل‌های آزاد (الکترون و حفره) و پتانسیل الکترواستاتیکی از طریق فرمول زیر استخراج می‌شود؛ مدل دیودی شامل سه معادله‌ی اساسی نیمه‌هادی (معادله پوانسون<sup>۲۷</sup> و معادله پیوستگی<sup>۲۸</sup> برای الکترون‌ها و حفره‌ها) به ترتیب زیر، است [۸].

در معادله (۷) ارتباط میان سطوح پر شده و انرژی دریافتی نشان داده شده است:

$$f(E_T) = \frac{\tau_p \cdot n + \tau_n \cdot n_{int} \exp\left(\frac{E_i - E_T}{KT}\right)}{\tau_p \left(n + n_{int} \left(\frac{E_T - E_i}{KT}\right)\right) + \tau_n \left(p + n_{int} \left(\frac{E_i - E_T}{KT}\right)\right)} \quad (7)$$

همچنین طول عمر حامل‌های اقلیت<sup>۲۲</sup> الکترون-حفره‌ها توسط معادله‌ی (۸) نشان داده شده:

$$\tau_{p,n} = \frac{1}{C_{p,n} \cdot N_T} \quad (8)$$

همان‌طور که در فرمول‌های (۷) و (۸) می‌بینیم هر چه طول عمر حامل‌های اقلیت بیشتر باشد میزان ترکیب آن‌ها با هم کمتر و در نتیجه احتمال اشغال شدن سطوح تله بیشتر می‌شود.

در معادله‌ی (۸)،  $C_{n,p}$  معادل آهنگ برخورد<sup>۲۳</sup> الکترون و حفره‌ها با تله‌ها است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{n,p} = \sigma_{n,p} \cdot v_{n,p} \quad (9)$$

که  $\sigma_{n,p}$  سطح مقطع<sup>۲۴</sup> برای الکترون و  $v_{n,p}$  به عنوان سرعت حرارتی حامل<sup>۲۵</sup> است.

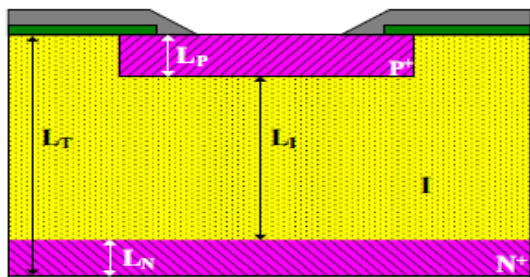
در آخر با وارد کردن اشعه فرابنفش، طول عمر حامل‌های اقلیت پس از تابش تغییر کرده و این امر موجب تغییر پارامترها در معادله شاتکی رید هال می‌شود:

$$\frac{1}{\tau_{p,n}} = \frac{1}{\tau_{p0,n0}} + K_T \phi \quad (10)$$

در این معادله  $K_T$  ثابت طول عمر حامل‌ها در شرایط تعادل است که در دو مدل مورد آزمایش در این مقاله، مقداری متفاوت و وابسته به پیوند میان ذرات دارد. پارامتر  $\phi$  مقدار نفوذ ذره برخوردی در حین آسیب<sup>۲۶</sup> است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با تابش پرتوی خارجی به ناحیه فعال دیود، طول عمر حامل‌ها تغییر می‌کند.

### ۳- مدل شبیه‌سازی

در این آزمایش با استفاده نرم‌افزار سیلواکو-اتلس، مطابق با مشخصات جدول (۱) شبیه‌سازی دیودی اجرا می‌شود:



شکل (۲): دیودهای نوری PIN شبیه‌سازی شده

جهت کاهش هزینه‌های شبیه‌سازی از جمله زمان، توان تابش را تا حدی در نظر می‌گیریم که بتوانیم به نتیجه مقایسه‌ای اکتباس کنیم.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon} [\Gamma + p + n + N_{eff}] \quad (1)$$

$$\frac{\delta n}{\delta t} = \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} - R \quad (2)$$

$$\frac{\delta p}{\delta t} = -\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} - R \quad (3)$$

که در آن  $\psi$  پتانسیل الکترواستاتیکی<sup>۲۹</sup>،  $\epsilon$  گذردهی الکتریکی<sup>۳۰</sup> ماده،  $q$  بار الکترون،  $n$  و  $p$  به ترتیب غلظت‌های الکترون و حفره،  $\Gamma$  غلظت دوپینگ<sup>۳۱</sup> خالص،  $N_{eff}$  غلظت دوپینگ مؤثر،  $J_n$  و  $J_p$  به ترتیب چگالی-چگالی‌های جریان الکترون‌ها و حفره‌ها و  $R$  آهنگ تولید-بازترکیب است. همان‌گونه که در فرمول (۱) تا (۳) مشاهده می‌شود، پتانسیل الکترواستاتیکی با غلظت الکترون، حفره و میزان دوپینگ آن‌ها نسبت مستقیم دارد. هر چه غلظت این حامل‌ها بیشتر باشد پتانسیل الکترواستاتیک که در غیاب منبع تابش ایجاد می‌شود، افزایش میابد. در معادله‌ی (۴) چگالی جریان الکترون طبق روش نفوذ-رانس برای الکترون‌ها نشان داده شده است:

$$J_n = q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} - q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \frac{d\psi}{dx} \quad (4)$$

که در آن  $\mu_n$  قابلیت تحرک الکترون<sup>۳۲</sup> و  $D_n$  ضریب نفوذ الکترون<sup>۳۳</sup> می‌باشد. به طور مشابه، چگالی جریان حفره را به کمک معادله‌ی پیوستگی (معادله (۴)) می‌توان استخراج نمود که برای به دست آوردن جریان تاریکی و جریان روشنی از معادله‌ی چگالی جریان الکترون-حفره در بایاس معکوس استفاده می‌شود. (جهت استفاده از این فرمول علامت‌های متناسب با نحوه بایاس باید لحاظ شود).

همچنین می‌توان از طریق مدل‌های مختلفی که رفتار فیزیکی نیمه‌هادی را نشان می‌دهد، مکانیسم تولید و بازترکیب حامل‌های نیمه‌هادی را توصیف کرد. فرآیند تولید-بازترکیب حرارتی از طریق تله‌ها را به کمک معادله‌ی شاتکی-رید-هال<sup>۳۴</sup> استخراج می‌شود.

$$R_{SRH} = \frac{n \cdot p - n_{int}^2}{\tau_n (p + n_{int} \exp\left(\frac{E_i - E_T}{KT}\right)) + \tau_p (n + n_{int} \exp\left(\frac{E_T - E_i}{KT}\right))} \quad (5)$$

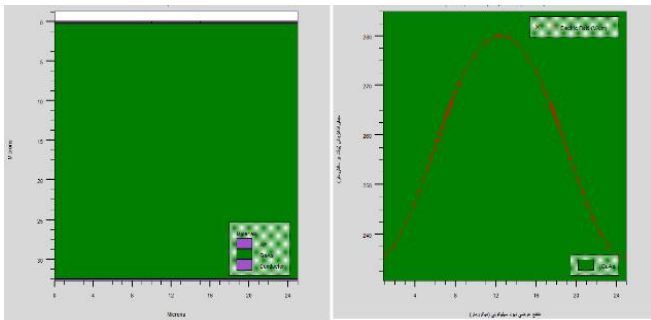
که در این معادله (۵)  $n_{int}$  غلظت حامل ذاتی<sup>۳۵</sup>،  $\tau_p$  و  $\tau_n$  به ترتیب طول عمرهای حامل اقلیت الکترون‌ها و حفره‌ها،  $E_T$  سطح انرژی تله<sup>۳۶</sup>،  $E_i$  سطح فرمی انرژی ذاتی<sup>۳۷</sup>،  $T$  دمای شبکه و  $K$  ثابت بولتزمن<sup>۳۸</sup> است؛ که با توجه به معادله مشاهده می‌شود که تولید و بازترکیب با غلظت ناخالصی‌ها نسبت مستقیم دارد.

از آنجاکه پرتوهای فرابنفش موجب آسیب قطعه‌ای می‌شود، گنجاندن آسیب وارده به کریستال‌های دیودی، برای بررسی اثر پرتو فرابنفش بر عملکرد قطعات ضروری است که از طریق ترازهای پذیرنده‌ی ممنوعه<sup>۳۹</sup> ایجاد شده در نیمه‌هادی اثرگذار هستند. این ترازها توسط غلظت دوپینگ مؤثر<sup>۴۰</sup> ( $N_{eff}$ ) در معادله (۶) تعریف شده‌اند.

$$N_{eff} = \sum N_T f(E_T) \quad (6)$$

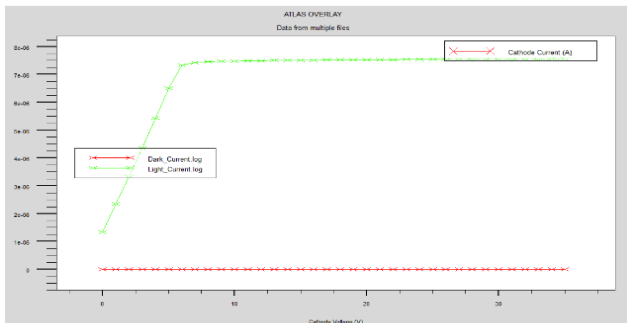
که در آن  $N_T$  تعداد سطوح تله<sup>۴۱</sup> ایجاد شده در طول پرتوافکنی و  $f(E_T)$  تابع سطوح اشغال شده توسط الکترون می‌باشد.

نوری گالیوم آرسنایدی با برش عرضی را نشان می‌دهد. طبق نمودار شکل (۵)، در ناحیه ذاتی، میدان الکتریکی داخلی دارای حداکثر مقدار است:



شکل (۵): میدان الکتریکی با کات لاین طولی در گالیوم آرسناید

شکل (۶)، مشخصه جریان-ولتاژ دیود گالیوم آرسناید را در دو حالت جریان روشنی (محور سبز رنگ) و جریان تاریکی (محور قرمز رنگ) نشان می‌دهد. هدف از نشان دادن این محور، بررسی جریان روشنی است که با تابش اشعه فرابنفش، جریان روشنی به مقدار قابل توجهی ایجاد شده است:



شکل (۶): مشخصه جریان ولتاژ دیود گالیوم آرسناید

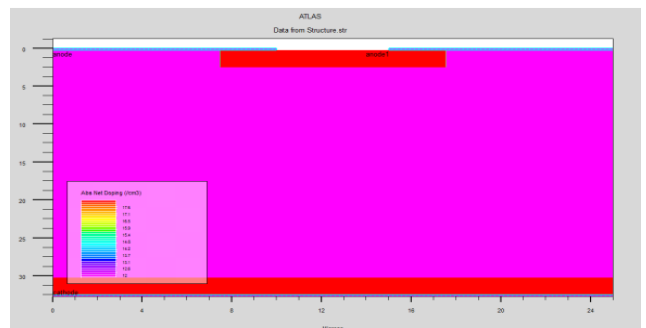
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، جریان روشنی بعد از تابش پرتو انرژی‌زا، بسیار بیشتر از جریان تاریکی بدون تابش پرتو است. در شکل (۷)، به بررسی دیود سیلیکونی پرداخته و پس از تابش پرتو، نرخ بازترکیب آن را بررسی می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نرخ بازترکیب در نوع سیلیکونی نسبت به گالیوم آرسنایدی کمتر است. کمتر بودن نرخ بازترکیب به جنس و حساسیت ساختار دیود بستگی دارد. با توجه به رابطه‌ی میان نرخ بازترکیب و جریان ایجاد شده پیش‌بینی می‌شود میزان جریان در دیود سیلیکونی از نوع مشابه گالیوم آرسنایدی کمتر باشد.

جهت شبیه‌سازی، این دیودها را در دو جنس سیلیکونی و گالیوم-آرسنایدی به صورت مجزا و با عمق کاشت مشابه جدول زیر در نظر گرفته می‌شود:

جدول (۱): غلظت و عمق ناخالصی‌ها

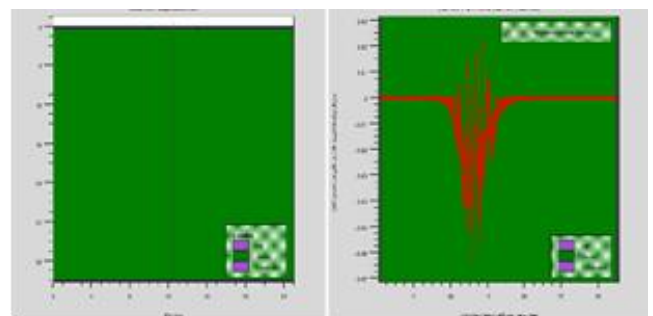
عمق [μm]	دوپینگ ناخالصی [cm] <sup>3</sup> Å	کاشت
۲۰۲۵	۱۰۱۸ × ۱	P+
۲۰۲۵	۱۰۱۸ × ۱	N+
۲۷۰۷۵	۱۰۱۴ × ۱۰۵	I

توجه شود برای ایجاد شرایط مشابه، میزان غلظت و ابعاد ناخالصی در هر دو نوع دیود یکسان در نظر گرفته می‌شود که عمق نواحی در ساختار در هر دو دیود به صورت زیر است:



شکل (۳): دیود نوری گالیوم آرسناید و سیلیکون بر اساس دوپینگ PIN شبیه‌سازی شده

پس از تابش پرتو فرابنفش و ایجاد جریان روشنی در بایاس معکوس، حامل‌های اقلیت باهم بازترکیب می‌شود. کاملاً منطقی است پس از تابش، نرخ بازترکیب در هر دو دیود در قسمت ذاتی دارای بیشترین مقدار باشد. قسمت پیک نرخ بازترکیب مربوط به محل تابش پرتو فرابنفش با توان نسبتاً بالا است.



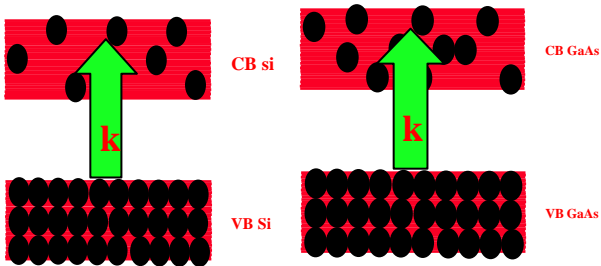
شکل (۴): نرخ بازترکیب در دیود با جنس گالیوم آرسناید با کات لاین عرضی

در هنگام عبور از پیوند یک ماده به ماده دیگر، پتانسیل الکتروستاتیک تغییر می‌کند [۹] و در نتیجه‌ی این تغییر، میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. شکل (۵) میدان الکتریکی ایجاد شده در دیود

#### ۴- نتیجه گیری

این آزمایش جهت بررسی رفتار این قطعات در معرض تابش یونندگی در کاربردهای مختلف همچون پردازش‌های تصویربرداری می‌توانند مفید باشند.

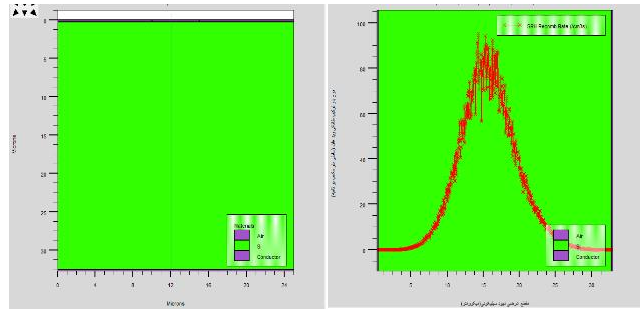
رفتار دو دیود با جنس‌ها و ساختار مختلف بسیار متفاوت است؛ زیرا عناصر گروه چهارم مانند سیلیکون و یا ژرمانیوم در لایه آخر خود ۴ الکترون دارند که به صورت کریستالی و با پیوند محکم‌تری در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند؛ اما در موادی که دارای پیوند ضعیف‌تر کووالانسی میان گروه ۳ و ۵ مانند گالیوم آرسناید هستند، موجب تولید زوج الکترون-حفره‌های آزاد بیشتری شده که همین عامل موجب افزایش جریان نسبی در این دیودهای نوری می‌شود. از سوی دیگر فوتودیود سیلیکونی دارای مزیت‌های نسبی به مدل گالیوم آرسنایدی است. به‌عنوان مثال سیلیکون وابستگی کمتری به دما دارد که این عامل موجب کنترل بیشتر بر روی جریان تولیدی می‌شود [۱۰]



شکل (۱۰): مقایسه میان حامل‌های ایجادشده در مدل سیلیکونی و گالیوم آرسنایدی در ترازهای انرژی

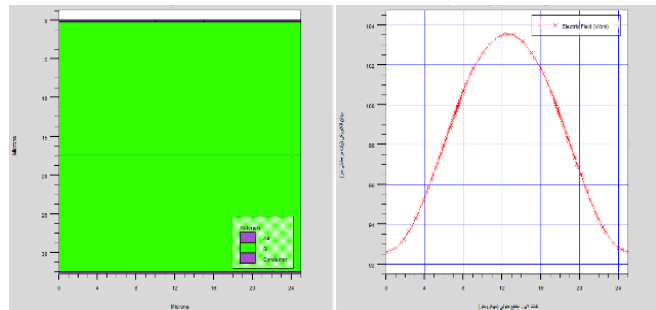
جهت تعیین رفتار و کیفیت دیودهای نوری در محیط تابش، می‌توان از مشخصه جریان برحسب ولتاژ استفاده نمود.

پرتوافکنی در دیودهای نوری می‌تواند باعث ایجاد نقص‌ها شود. در زمان تابش پرتوهای پرانرژی بر ذرات بنیادی، نقص‌های نقطه‌ای ایجاد می‌شود. در نتیجه این پرتوافکنی فرصت را برای بررسی نقص‌های نقطه‌ای ایزوله شده به صورت خوشه‌ای فراهم می‌کند و موجب ایجاد تله‌هایی در میان باند انرژی می‌شود که خود باعث افزایش سرعت بازترکیب می‌شود. همچنین مدل‌سازی تغییر طول عمر حامل‌ها و نتایجی را که از آن حاصل می‌شود، دارای اهمیت بالایی است؛ زیرا هر چه نرخ بازترکیب بالاتر رود سرعت بالا رفته و در نتیجه جریان افزایش می‌یابد. مقایسه میان دو ماده سیلیکون و گالیوم آرسناید در جریان روشنی نشان داده که حساسیت ماده گالیوم آرسناید خیلی بالاتر از مشابه سیلیکونی آن است. پس در نتایج حاصله شاهد افزایش میدان الکتریکی و نرخ بازترکیب و جریان روشنی در نمونه گالیوم آرسناید هستیم. تمامی این مشخصه‌ها با توجه به مدل تحلیلی، به ماده، متریکال و غلظت ناخالصی وابسته است.



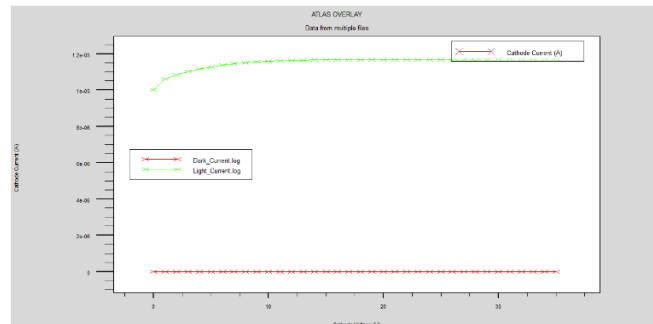
شکل (۷): نرخ بازترکیب در دیود با جنس سیلیکون با کات لاین عرضی

شکل (۸) میدان الکتریکی ایجاد شده در دیود نوری سیلیکونی با کات لاین عرضی را نشان می‌دهد. میدان الکتریکی داخلی در ناحیه ذاتی دارای حداکثر مقدار است که در شکل ۸ نشان داده است:



شکل (۸): میدان الکتریکی با کات لاین طولی در سیلیکون

مشخصه جریان ولتاژ دیود سیلیکونی که مهم‌ترین معیار هر دیود است در شکل (۹) نشان داده شده است که همانند دیود نوری گالیوم آرسنایدی مقدار جریان روشنی (محور سبز رنگ) به مقدار قابل ملاحظه‌ای از جریان تاریکی (محور قرمز رنگ) بیشتر است.



شکل (۹): مشخصه جریان ولتاژ دیود سیلیکونی

طبق نتایج، نرخ بازترکیب با جریان تاریکی نسبت مستقیم دارد. همچنین مشاهده می‌شود که میزان جریان روشنی و حساسیت نوری در دیود گالیوم آرسنایدی بسیار بیشتر از مشابه سیلیکونی آن است.

## مراجع

- <sup>23</sup> surface effects
- <sup>24</sup> non-uniformities
- <sup>25</sup> lateral direction
- <sup>26</sup> Ultraviolet
- <sup>27</sup> Poisson equation
- <sup>28</sup> continuity equation
- <sup>29</sup> electrostatic potential
- <sup>30</sup> dielectric permittivity
- <sup>31</sup> doping
- <sup>32</sup> electron mobility
- <sup>33</sup> electron diffusion coefficient
- <sup>34</sup> Shockley-Read-Hall (SRH)
- <sup>35</sup> intrinsic carrier concentration
- <sup>36</sup> trap energy level
- <sup>37</sup> intrinsic Fermi energy level
- <sup>38</sup> Boltzmann constant
- <sup>39</sup> forbidden gap
- <sup>40</sup> effective doping concentration
- <sup>41</sup> density of trap levels
- <sup>42</sup> minority carrier lifetimes
- <sup>43</sup> capture rates
- <sup>44</sup> capture
- <sup>45</sup> carrier thermal
- <sup>46</sup> lifetime damage-constant

- [1] Attwood, David, and Anne Sakdinawat. "X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications." Cambridge university press, 2017.
- [2] G.F. Della Betta, S. Ronchin, A. Zoboli, N. Zorzi. "High-performance PIN photodiodes on TMAH thinned silicon wafers", Microelectron. J. ۳۹ (۲۰۰۸) ۱۴۸۵-۱۴۹۰.
- [3] Cuzin, M, ۱۹۸۷. "Some new developments in the field of high atomic number materials. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors, and Associated Equipment, ۲۵۳(۳), pp.۴۰۷-417.
- [۴] هما زارع بیدکی، رحیم فایز. "طراحی و شبیه‌سازی سلول خورشیدی سه پیوندی بر مبنای چاه کوانتومی"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره چهارم، زمستان ۹۵
- [۵] محمدعلی یزدان پناه جهرمی، سید مسعود برکاتی. "دیدگاهی جدید در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های تجدید پذیر تولید انرژی الکتریکی"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره سوم، پاییز ۹۵.
- [6] T Yanagida. "Study of rare-earth-doped scintillators", Elsevier Optical Materials, Volume ۳۵, Issue ۱۱, September, ۲۰۱۲, Pages ۱۹۸۷-۱۹۹۲
- [7] M.Gokçen, A.Tataroglu, S.Altindal, M.M.Bülbul. "Radiation Physics and Chemistry" ۷۷ (۱) (۲۰۰۸) ۷۴.
- [8] H. Jafari, S.A.H. Feghhi. "Analytical modeling for UV radiation damage on silicon photodiodes", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, ۸۱۶, ۲۰ January, ۲۰۱۶, Pages ۶۲-۶۹
- [۹] یانس.پی.تسیویدیس. "عملکرد و مدل‌سازی ترانزیستورهای ماسفت". مرتضی فتحی پور. موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران. ۱۳۸۷. چاپ دوم. ۲۷.
- [10] Chavanelle, J. and M. Parmentier. "A CsI (TI)-PIN photodiode UV-ray probe." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment ۵۰۴, ۱ (۲۰۰۳): ۳۲۱-324.

## زیرنویس

- <sup>1</sup> Photodiode
- <sup>2</sup> Sensors
- <sup>3</sup> Solar cells
- <sup>4</sup> Light current
- <sup>5</sup> Intrinsic area
- <sup>6</sup> Mechanism
- <sup>7</sup> Reverse bias
- <sup>8</sup> Sensitivity
- <sup>9</sup> Very compressed
- <sup>10</sup> linear
- <sup>11</sup> High efficiency
- <sup>12</sup> Dynamic range
- <sup>13</sup> Carriers
- <sup>14</sup> Dark current
- <sup>15</sup> Ultraviolet ray
- <sup>16</sup> Nanometer
- <sup>17</sup> Visible ray
- <sup>18</sup> Photovoltaic phenomenon
- <sup>19</sup> Ionization
- <sup>20</sup> Handicap fault
- <sup>21</sup> Point defect
- <sup>22</sup> Cluster defect

