



بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه خوارزمی،  
تهران، ایران.  
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸



## اثر تابش گاما با نرخ دز بسیار کم بر آشکارساز فرابنفش GaN برای کاربردهای فضایی

لیلا برغمادی<sup>۱</sup>، شهاب نوروزیان علم<sup>۱</sup>، سیدحسن صدیقی<sup>۲</sup>، بیژن غفاری<sup>۱</sup>

۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده - آشکارساز نوری فرابنفش MSM بر پایه لایه هم‌بافته GaN نوع n ساخته شده است. تاثیر تابش گاما از منبع  $^{60}\text{Co}$  با نرخ تابش بسیار کم  $0.0001 \text{ rad(Si)/s}$  در دمای اتاق بر جریان الکتریکی آشکارساز مورد بررسی قرار گرفته است. برخلاف مشاهدات قبلی، افزایش و سپس کاهش تدریجی جریان تاریک با افزایش دز تابش گاما به وضوح مشاهده شد. با به کار گیری سازوکار انتقال حامل‌ها در حالت‌های جایگزیده، تولید حامل‌ها توسط تابش و سپس به دام افتادن آن‌ها در نقص‌های شبکه، یک توضیح پیشنهادی برای رفتار نمودار مشخصه ولتاژ-جریان آشکارساز ارائه گردید. نتایج حاصله برای درک چگونگی برهم‌کنش فوتون‌های گاما با لایه هم‌بافته n-GaN بسیار مهم است.

کلید واژه- آشکارساز نوری، GaN، گاما، جریان تاریک

## Effect of $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ -irradiation at very low dose rate on n-GaN UV photodetector for space applications

Leyla Barghamadi<sup>1</sup>, Shahab Norouzian Alam<sup>1</sup>, Seyed Hassan Sedighy<sup>2</sup>, Bijan Ghafary<sup>1</sup>

1-Physics Department , Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- School of Advanced Tecnologies, , Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

**Abstract-** GaN MSM UV photodetector were fabricated on n-GaN epitaxial layer. The effect of room temperature  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -radiation at very low dose rate ( $0.0001 \text{ rad(Si)/s}$ ) on the electric current of photodetector was studied. In contrast to earlier observations, by increasing the gamma dose, an initial increasing of the dark current followed by the gradual decrease has been observed. The abnormal behavior of the voltage-current characteristic of the photodetector can be explained by considering the carriers transfer mechanism in localized states, which is very common in III-Nitride semiconductors. The results presented here are found to be important in understanding the mechanism of interaction of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -irradiation with n-GaN epilayer.

Keywords: photodetector, GaN, gamma, dark current.

## مقدمه

فضای بالای جو به دلیل وجود انواع پرتوهای یون ساز، برای ماهواره‌ها و تجهیزات الکترونی آنها یک محیط تشعشعی محسوب می‌شود. با قرار گرفتن تجهیزات در این محیط، در قطعات نیمه‌رسانا و عایق‌ها منجر به یونیزش ماده، ایجاد نقص در ساختار کریستالی از طریق جابه‌جایی اتم‌ها در شبکه یا منجر به تشکیل باندهای اضافی رسانشی در نیمه‌رساناها و دی‌الکتریک‌ها می‌شود. جابه‌جایی ولتاژ آستانه، افزایش جریان نشتی و نیز خاموش نشدن قطعه (در زمانی که به آن ولتاژ اعمال نمی‌شود) از جمله آسیب‌های تشعشعی محسوب می‌گردد. این آسیب‌ها به صورت تدریجی عملکرد قطعه را با افت کیفیت مواجه می‌کنند. بنابراین بررسی اثر تشعشعات بر مجموعه تجهیزاتی که در محیط‌های تشعشعی قرار می‌گیرند، بسیار مهم است [۱]. یکی از تجهیزاتی که امروزه در در برخی ماموریت‌های فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، آشکارسازهای نور فرابنفش می‌باشند. از جمله کاربردهای آشکارسازی UV در فضا می‌توان به تهیه عکس‌های نجومی و نیز بررسی شدت نور UV در شفق قطبی سیاره‌های منظومه شمسی و بررسی اثرات آن بر تغییرات شرایط آب‌وهوایی سیاره‌ها اشاره کرد. در این مقاله اثر تابش گاما را بر مشخصات نوری آشکارساز فرابنفش MSM گالیوم‌نیتريد نوع n بررسی می‌شود.

## آشکارساز UV گالیوم‌نیتريد

گالیوم‌نیتريد و آلیاژهای آن  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  و  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  به دلیل کاربردهای بی‌شمار در زمینه جذب و گسیل نور UV در جامعه نیمه‌رساناها بسیار مورد توجه است. گاف انرژی پهن (۳/۴ eV)، ولتاژ شکست بالا، پایداری حرارتی، پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر تشعشعات، از ویژگی‌های GaN است. مزیت استفاده از GaN پهنای باند زیاد و در نتیجه کور بودن نسبت به طول‌موج‌های بالاتر از فرابنفش (نور مرئی و IR) است [۲]. تاکنون مطالعات بسیاری در مورد اثر تشعشعات بر GaN صورت گرفته است. مثلاً در

مرجع [۳] سازوکار آسیب تابش پروتونی بر فتودیود بهمنی GaN بررسی شده و نشان داده شده است که با افزایش شار پروتونی، به دلیل برخورد پروتون‌ها با الکترون‌ها و انتقال انرژی به آنها، منجر به تولید حامل‌های بار و افزایش چگالی جریان تاریک می‌شود. همچنین در [۴] اثر تابش گاما بر ترابرد الکترونی آشکارساز شاتکی GaN آلاییده نوع n با نرخ تابش‌دهی  $1 \text{ kGy/hr}$  تا دز  $50 \text{ kGy}$  بررسی شده است. برخلاف مشاهدات قبلی، در اینجا نشان داده شده که چگالی حامل‌ها پیوسته با افزایش دز تابش، افزایش می‌یابد. این افزایش بیان می‌کند که هیچ نقص شبکه‌ای توسط تابش گاما حتی در دز  $50 \text{ kGy}$  ایجاد نمی‌شود، بلکه افزایش حامل‌ها ناشی از فعال شدن ناخالصی Si در توده GaN است.

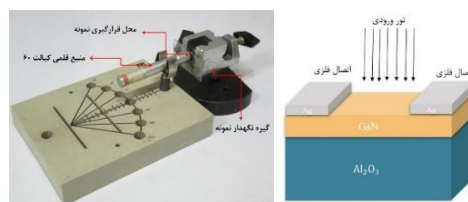
## جزئیات آزمایش و نتایج

لایه نازک هم‌بافته GaN آلاییده نوع n با ضخامت  $1/5 \mu\text{m}$  و ناحیه فعال  $4 \text{ mm}$  تا  $6 \text{ mm}$  (در  $1/3 \times 1 \text{ cm}^2$ ) به روش رسوب‌دهی بخار شیمیایی آلی-فلزی (MOCVD) رشد هم‌بافته داده شده است. چگالی آلایندگی در n-GaN برابر  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  می‌باشد. به منظور برقراری اتصالات از چسب نقره استفاده شده است. ساختار آشکارساز MSM می‌باشد. به وسیله منبع قلمی  $^{60}\text{Co}$  با فعالیت اولیه  $2 \mu\text{Ci}$  و نرخ تابش  $0/1 \text{ mrad(Si)/s}$  تابش‌دهی در دمای مانند شکل (۱) اتاق انجام شد. در ابتدا نمونه با ناحیه فعال  $4 \text{ mm}$  به مدت ۲ ساعت پیوسته (معادل  $0/72 \text{ rad(Si)}$ ) و سپس در سه مرحله نیم ساعته (معادل  $0/18 \text{ rad(Si)}$ ) تابش‌دهی شد. پس از پایان هر نیم ساعت، بلافاصله جریان الکتریکی اندازه‌گیری شد (شکل ۲). بعد از پایان مرحله نهایی، نمونه در دمای اتاق تا ۲۴ ساعت بازپخت و سپس جریان مجدداً اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

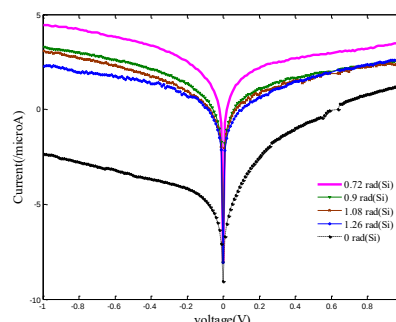
مدت ۲ ساعت، پیوسته تابش‌دهی شد. در این حالت جریان تا حدود ۱۵۰ برابر، نسبت به حالت قبل از تابش و نیز نسبت به جریان پس از ۲/۵ ساعت تابش گام‌به‌گام، افزایش یافت (شکل ۴). شایان ذکر است که عدم تقارن در رفتار نمودار ولتاژ-جریان ناشی از تفاوت جزئی در شکل الکترودهاست.

## تحلیل و بحث

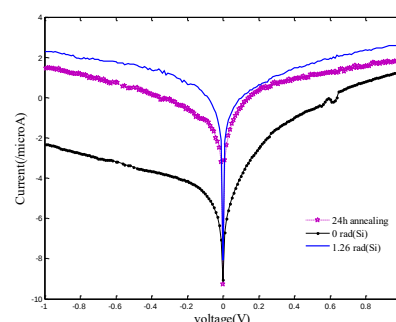
تاکنون مطالعات بسیاری مبنی بر اثرات تشعشعات با نرخ دز بسیار پایین تا  $0.001 \text{ rad(Si)/s}$  بر قطعات نیمه‌هادی صورت گرفته‌است. این بررسی به دلیل رفتارهای غیرعادی قطعات در تابش‌دهی با نرخ بسیار کم مهم شده‌است. در اینجا نرخ دز تا  $0.0001 \text{ rad(Si)/s}$  کاهش داده شده و رفتار غیرعادی تغییرات جریان تاریک آشکارساز مورد بررسی قرار گرفته است. برای توجیه این رفتار از سازوکار انتقال حامل‌ها در حالت‌های جایگزیده که در تحلیل رفتار دیودهای نوری که بر اثر تغییرات دما و توان تحریکی اتفاق می‌افتد، ایده گرفته شده‌است [۵]. ما در اینجا سازوکار حرارتی را به رفتار الکترون‌های GaN پس از مراحل تابش‌دهی گاما با نرخ دز کم، نسبت می‌دهیم. زیرا تابش گاما به اندازه کافی پرنرژی است که در مواجهه با ماده، انرژی اضافی قابل توجهی در آن برجای بگذارد. مطابق با این سازوکار، با تابش‌دهی پیوسته آشکارساز تا ۲ ساعت، حامل‌های بار در نیمه‌هادی GaN تولید می‌شود و چگالی حامل‌ها افزایش می‌یابد. فرآیند افزایش چگالی حامل‌ها ناشی از تولید فوتوالکترتون‌ها و نیز افزایش چگالی جاهای خالی نیتروژن (نقص نیتروژن) است که سبب افزایش حامل‌ها در توده GaN می‌شود [۶و۴]. بخشی از این حامل‌ها در نقص‌های شبکه به دام می‌افتند و بخش بزرگی، حالت‌های جایگزیده در توده GaN را پر می‌کنند. با برقراری ولتاژ خارجی به آشکارساز، الکترون‌هایی که در اثر تابش در حالت‌های جایگزیده جمع‌آوری شده‌اند، تحت



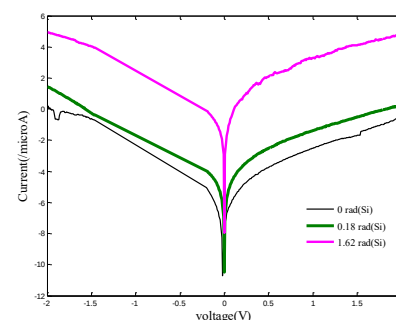
شکل ۱- ساختار آشکارساز نوری MSM گالیوم‌نیتريد با ضخامت  $1.5 \mu\text{m}$  و ناحیه فعال  $4 \text{ mm}$  تا  $6 \text{ mm}$  (در  $1 \times 1/3 \text{ cm}^2$ ) و (ب) تابش‌دهی آشکارساز با منبع قلمی  $^{60}\text{Co}$



شکل ۲- مشخصه ولتاژ-جریان، در قبل و پس از تابش‌دهی گاما



شکل ۳- ماندگاری اثر دز گاما بر مشخصه ولتاژ-جریان



شکل ۴- مقایسه جریان تاریک قبل و پس از تابش‌دهی: نیم ساعت اول و دو ساعت تابش‌دهی پیوسته.

برای بررسی وابستگی رفتار نمودار جریان به مدت زمان تابش‌دهی و افزایش میزان دز، نمونه‌ی دیگری با ناحیه فعال  $6 \text{ mm}$  به مدت  $2/5$  ساعت در پنج مرحله نیم ساعته تحت تابش گرفت. پس از اندازه‌گیری جریان، نمونه به

نسبت به حالت قبل از تابش یا نسبت به حالت‌های تابش-دهی کوتاه مدت، افزایش چشم‌گیری را نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری در شکل (۴) با این سازوکار هم‌خوانی دارد.

### نتیجه‌گیری

اثر تابش گاما با منبع  $^{60}\text{Co}$  و با نرخ دز بسیار کم بر رفتار نمودار ولتاژ-جریان آشکارساز نوری MSM بر پایه GaN نوع n مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که تابش‌دهی سبب افزایش جریان تاریک در آشکارساز می‌شود و این اثری ماندگار است. اگر آشکارساز در محیط تشعشعی با دز کم به‌طور مداوم قرار گیرد، میزان تغییر جریان محسوس خواهد بود. با به کارگیری مدل سازوکار انتقال حامل‌ها در حالت‌های جایگزیده پتانسیل حالت‌های جایگزیده، این مشاهدات توجیه‌پذیر می‌باشد.

### مرجع‌ها

[1] زمانی مقدم، "شبیه‌سازی اثر تشعشعی دز یونیزان کل بر ماهواره مخابراتی با جعبع ابزار GEANT4"، مجله سنجش و ایمنی پرتو، ۱۳۹۵.

- [2] A. Y. Polyakov, *Radiation Effects in GaN*.
- [3] G. P. Liu, X. Wang, "Effects of high-energy proton irradiation on separate absorption and multiplication GaN avalanche photodiode," *Nucl. Sci. Tech.*, 2018.
- [4] A. Chatterjee, S. K. Khamari, S. Porwal, S. Kher, and T. K. Sharma, "Effect of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -irradiation on the nature of electronic transport in heavily doped n-type GaN based Schottky photodetectors," *J. Appl. Phys.*, 2018.
- [5] Q. Wang *et al.*, "Influences of excitation power and temperature on photoluminescence in phase-separated InGa<sub>N</sub> quantum wells," *Chinese Phys. B*, 2015.
- [6] Piezospectroscopy and first-principles calculations of the nitrogen-vacancy center in gallium arsenide *Journal of Applied Physics*, 2018.

میدان الکتریکی حرکت می‌کنند و چگالی جریان الکتریکی افزایش می‌یابد. در مرحله بعد که نمونه برای مدت زمان نیم ساعت تحت تابش قرار می‌گیرد، مجدداً مقداری از حامل‌ها به دلیل برخورد فوتون‌های پرنرژی گاما تولید می‌شوند. اما هم‌زمان برخی الکترون‌هایی که در حالت‌های جایگزیده انباشته‌اند می‌توانند انرژی دریافت کرده و از پتانسیل حالت‌ها خارج شوند. هم‌چنین دام‌های نقوص شبکه که پس از اشباع به دلیل افزایش انرژی الکترون‌های به دام افتاده و اتلاف حرارتی فعال شده‌اند، می‌توانند الکترون‌های دیگری را به دام بیندازند. بدین ترتیب بخشی از حامل‌های تولید شده و نیز حامل‌هایی که با دریافت انرژی حالت‌های جایگزیده را ترک کرده‌اند، در دام‌های شبکه مستقر می‌شوند. پس از اعمال ولتاژ، الکترون‌های باقی‌مانده در شارش جریان الکتریکی شرکت می‌کنند. این تفسیر با کاهش جریان در مرحله دوم تا چهارم سازگار است (شکل ۲). پس از گذشت یک روز از آخرین مرحله تابش‌دهی، درصدی از کل حامل‌های تولید شده بازترکیب کرده، بخشی از حامل‌ها در هم‌چنان در حالت‌های جایگزیده انباشته شده‌اند. هنگامی که جریان الکتریکی مجدد اندازه‌گیری می‌شود، مشاهده می‌شود که جریان نسبت به قبل کاهش یافته‌است (شکل ۳). هنگامی که آشکارساز به‌طور پیوسته (۲ ساعت) تحت تابش‌دهی قرار می‌گیرد، زمان کافی برای تولید بیش‌ترین حامل‌ها و به تعادل رسیدن فرآیندهای تولید-بازترکیب در دسترس است. در این فاصله الکترون‌های تولید شده فرصت خواهند داشت تا بارها حالت‌های جایگزیده را پر کنند، انرژی دریافت کرده و آن را ترک کنند، به دام بیافتند و با حفره‌ها بازترکیب کنند. در واقع می‌توان گفت که در حالت تابش-دهی طولانی مدت نرخ تولید حامل‌هایی که بعداً در شارش جریان الکتریکی شرکت می‌کنند از نرخ بازترکیب و یا فعال شدن دام‌ها بیش‌تر است. بدین ترتیب جریان الکتریکی که پس از این تابش‌دهی اندازه گرفته می‌شود،