

(علمی - ترویجی)

# بررسی مروری آشکارساز VUV مبتنی بر نیمه‌هادی آلومینیم نیتريد (AlN) در کاربردهای فضایی

آشکارسازی نور فرابنفش در علوم نجوم و هواشناسی به دلیل اطلاعات مفیدی که در اختیار می‌گذارد، مورد توجه قرار دارد. CCD هایی که بر پایه آشکارساز فرابنفش ساخته می‌شود، به انواع فیلترهای طول موج‌های بلندتر نیاز ندارد. در این صورت، نور فرابنفش به‌طور مستقیم آشکارسازی می‌شود و از این رو می‌توان گفت که حساسیت مؤثر این نوع CCD نسبت به نور فرابنفش بیش‌تر است. علاوه بر پارامترهای اساسی آشکارساز، مثل بازدهی کوانتومی، جریان تاریک و جریان نوری، حد تحمل در برابر تشعشعات پرانرژی، به‌خصوص برای آشکارسازهایی که جهت کاربرد در محیط فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اهمیت زیادی دارد. محیط‌های تشعشعی با تأثیر و تغییر در مشخصات مواد و قطعات تشکیل‌دهنده آشکارسازهای نوری به‌تدریج عملکرد آن‌ها را با افت کیفیت مواجه کرده و باعث عملکرد نامناسب و محدودیت‌هایی در استفاده از آشکارسازها می‌شود. در این مقاله، ابتدا انواع آشکارسازهای فرابنفش و مشخصات عمومی آن‌ها بررسی می‌شود. سپس، آشکارساز مبتنی بر نیمه‌هادی AlN معرفی و اثر تشعشعات بر پارامترهای آن بررسی می‌شود. در انتها، به مطالعه چند نوع از آشکارسازهای طیف VUV جهت استفاده در کاربردهای فضایی پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آشکارساز نوری، VUV، کاربردهای فضایی

لیلا برغمادی<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران  
سید حسن صدیقی<sup>۲</sup>، دانشیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران  
بیژن غفاری<sup>۳</sup>، استاد، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران  
شهاب نوروزیان علم<sup>۴\*</sup>، استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

\*نویسنده مخاطب: آدرس: تهران، کدپستی: ۱۶۸۴۶-۱۳۱۱۴

## An Overview of Aluminum Nitride (AlN) Based VUV Detectors in Space Applications

Ultraviolet light detection is of interest in astronomy and meteorology because of the useful information it provides. CCD's based on UV detectors do not require any longer wavelength filters. In this case, UV light can be directly detected and therefore the effective sensitivity of CCD can be effectively increased. The high radiation tolerance is a very critical factor (especially for the detectors used in outer space) in addition to other basic detector parameters, such as quantum efficiency, dark current, and optical current. Radiative environment, by changing the properties of the materials and devices that create the photodetector, can gradually deteriorate its performance and therefore causes malfunction and limitation in the application of photodetectors. In this article, we initially deal with different types of UV detectors and their general characteristics, then the AlN based photodiode and the effect of radiation on its parameters is introduced and discussed. Eventually, a few types of VUV photo-detectors, used in space applications, will be reviewed.

Keywords: Photodetector, VUV, Space Applications

L. Barghamadi<sup>1</sup>, M.Sc. Student, Department of Physics, Iran University of Science and Technology

S.H. Sedighy<sup>2</sup>, Associate Professor, School of Advanced Technologies, Iran University of Science and Technology

B. Ghafari<sup>3</sup>, Professor, Department of Physics, Iran University of Science and Technology

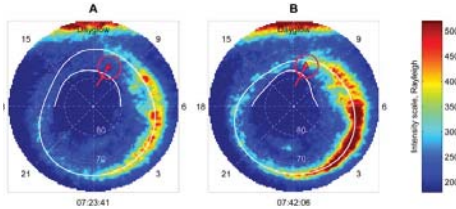
Sh. Norouzian Alam<sup>4\*</sup>, Assistant Professor, Department of Physics, Iran University of Science and Technology

\* Corresponding Author, Postal Code: 16846-13114, Tehran, IRAN  
norouzian@iust.ac.ir

## ۱- مقدمه

ناحیه فرابنفش شامل ۴ دسته طیف (۳۰۰-۴۰۰nm) NUV، (۲۰۰-۳۰۰nm) MUV، (۱۰۰-۲۰۰nm) FUV و (۱۰۰-۱۰۰nm) EUV است. در نام‌گذاری دیگر برحسب محدوده طول موج به ۴ دسته (۱۰۰-۲۰۰nm) VUV، (۳۵۰-۱۹۰) DUV، (۳۲۰-۴۰۰nm) UVA و (۲۸۰-۳۲۰nm) UVB طبقه‌بندی می‌شود. مطالعات مربوط به تابش فرابنفش در نیمه دوم قرن ۱۹ میلادی یعنی زمان کشف این تابش در طیف گسیلی خورشید شروع شد. کمی بعد مشخص شد که اتمسفر زمین تحقیقات UV را محدود می‌کند. در واقع لایه اوزون طول موج‌های کم‌تر از ۳۰۰nm در طیف خورشید را جذب کرده و به سطح زمین نمی‌رسد [۱].

اگرچه آشکارسازی طیف فرابنفش ساعت شده از منابع داغ مثل خورشید یا دیگر اجرام کیهانی بر روی سطح زمین امکان‌پذیر نیست، اما آشکارسازی آن در خارج از سطح زمین اطلاعات مفیدی در اختیار دانشمندان قرار می‌دهد که برای درک بسیاری از پدیده‌های نجومی و پیش‌بینی برخی رخدادهای فضایی از اهمیت زیادی برخوردار است. از جمله کاربردهای آشکارسازی UV در فضا می‌توان به عکس‌برداری فرابنفش از کهکشان‌ها جهت تخمین سرعت حرکت آن‌ها، تهیه عکس‌های نجومی، پایش طوفان‌های خورشیدی، بررسی شدت نور فرابنفش در شفق قطبی سیاره‌های منظومه شمسی و ارزیابی ارتباط بین تشعشعات و اثرات آن بر تغییرات شرایط آب‌وهوایی سیاره‌ها اشاره کرد [۲-۳]. یکی از کاربردهای ماهواره‌های تصویربرداری کنترل شرایط آب‌وهوایی کره زمین است که با پایش شفق قطبی صورت می‌پذیرد. برخورد پرتوهای کیهانی به یونوسفر زمین سبب برانگیختن ذرات آن و ایجاد نور DUV و اشعه ایکس نرم<sup>۲</sup> در آن ناحیه می‌شود و دوربین‌های کنترل از شدت این پرتوها، تغییرات یونوسفر را نقشه‌برداری می‌کنند. شکل ۱ تصویر شفق قطبی زمین (گرفته شده توسط ماهواره ایمیج<sup>۳</sup>) را قبل و پس از ضربه ناگهانی طوفان خورشیدی را نشان می‌دهد [۳]. شفق قطبی در پاسخ به ضربه ناگهانی ناشی از فشار دینامیکی باد خورشیدی به مگنتوسفر زمین ایجاد می‌شود. بررسی این پدیده امکان درک تغییر میدان‌های الکتریکی و جریان‌های را می‌دهد. همچنین، با اطلاعات حاصل شده می‌توان به‌طور پیوسته میدان مغناطیسی زمین را کنترل کرده و تغییرات پلاسما مگنتوسفر و تأثیر آن بر دمای کره زمین و میزان بارش را اندازه‌گیری نمود [۴].



شکل (۱): تصاویر UV از ماهواره ایمیج، (A) قبل و (B) پس از ورود ناگهانی ضربه طوفان خورشیدی [۳].

بیش از ۲۰ سال است که طراحان قطعات الکترونی به دنبال توسعه آشکارسازهای فرابنفش با ابعاد کوچک و توان مصرفی کم برای جایگزین آشکارسازهای میکروکانال قدیمی با توان مصرفی بالا و پاسخ‌دهی کم هستند. در ابتدا CCD هایی که برای تصویربرداری ساخته می‌شد، به‌طور عمومی بر پایه سیلیسیم بود. در سیستم‌هایی که سیلیسیم در آن‌ها به کار می‌رفت، آشکارسازی طول موج‌هایی تا ۲۰۰nm قابل رصد شدن بود [۵]. این آشکارسازی از طریق پوششی از جنس فسفر که جلوی CCD را می‌پوشاند، انجام می‌شد. به این صورت که با دریافت تابش فرابنفش توسط صفحه فسفر، فوتون‌های مرئی (رنگ سبز) تولید و سپس این فوتون‌ها توسط CCD دریافت و آشکارسازی می‌شد. اگرچه این تکنیک ساده و از نظر هزینه به‌صرفه بود، اما زمان احساس شدن نیاز به آشکارسازی طول موج‌های کم‌تر از ۲۰۰nm، این تکنیک کارآمد نبود. زیرا طول موج‌های بسیار بالا از صفحه فسفر عبور می‌کرد. همچنین، عمر محدود این سیستم به دلیل تخریب در برابر آن دسته از تابش‌های دارای انرژی بالا، اتلاف انرژی، نویز بالا و پایین بودن سرعت ثبت و انتقال داده‌ها از دیگر نقاط ضعف این روش بود [۵-۶]. برای حذف این مشکلات استفاده از نیمه‌هادی‌های پهن-باند<sup>۴</sup> نظیر الماس مصنوعی، SiC، گروه‌های III-نیتريد و ترکیبات گروه VI-II مثل ZnO پیشنهاد شد. این مواد از نظر حالت شیمیایی و تعادل گرمایی پایدارند و برای محیط‌هایی با گرادیان دمای بالا مثل محیط‌های فضایی بسیار مناسب‌اند [۹-۷]. CCDهایی که بر پایه آشکارسازی این مواد پهن باند ساخته می‌شود، می‌تواند فوتون‌های فرابنفش را مستقیماً و بدون اتلاف کم‌تر (ناشی از وجود انواع فیلترها)، دریافت کند و بنابراین تصاویر با نویز کم‌تر و در نتیجه وضوح بهتر تهیه شود [۲]. همچنین، این مواد به دلیل پهنای بلند گاف انرژی، در برابر تشعشعات و پرتوهای کیهانی مقاوم‌تر است. زیرا همان‌طور که در ادامه خواهیم گفت، میزان تأثیرپذیری و آسیب ناشی از تشعشعات تابع خطی از گاف انرژی در نیمه‌هادی است و با افزایش گاف انرژی، آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد [۱۰].

1. Aurora  
2. Soft X-ray  
3. IMAGE

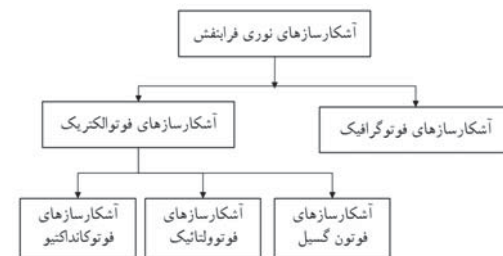
4. Wide Band Gap Material (WBG)

## ۲- انواع آشکارساز نوری

آشکارسازهای نوری<sup>۵</sup> قطعات نیمه‌هادی هستند که یک سیگنال نوری تصادفی را به یک سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. هر آشکارساز نوری به محدوده خاصی از طیف الکترومغناطیسی حساس است که این حساسیت به ماده تشکیل‌دهنده آشکارساز و ساختار آن (گاف انرژی) بستگی دارد. سازوکار یک آشکارساز به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- ۱) جذب انرژی و تولید زوج الکترون-حفره،
- ۲) حرکت حامل‌ها در سراسر ناحیه جذب توسط فرآیند رانش و انتشار و
- ۳) جمع‌آوری حامل‌ها به وسیله یک مدار خارجی و تولید جریان نوری.

آشکارسازها بر اساس سازوکاری که به نور ورودی پاسخ می‌دهد به دو گروه (۱) آشکارسازهای فوتونی و (۲) آشکارسازهای حرارتی تقسیم می‌شود. در آشکارسازهای فوتونی، فوتون‌های ورودی بر اثر واکنش با الکترون‌ها جذب می‌شود و سیگنال الکتریکی مشاهده شده ناشی از توزیع انرژی الکترونیکی تغییر یافته است. آشکارسازهای فوتونی میزان ورود فوتون‌ها را اندازه می‌گیرد و به طول موج نور ورودی وابسته است. در آشکارسازهای حرارتی بر اثر حرارت نور، دمای ماده تابش دیده افزایش می‌یابد و برخی خواص الکتریکی آن تغییر می‌کند [۱۱]. مطابق شکل ۲، آشکارسازهای فوتونی خود به دو دسته آشکارسازهای فوتوگرافیک و فوتوالکتریک طبقه‌بندی می‌شود.

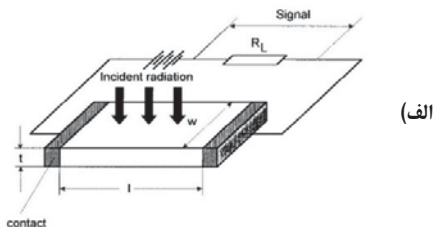


شکل (۲): طبقه‌بندی آشکارسازهای فوتونی.

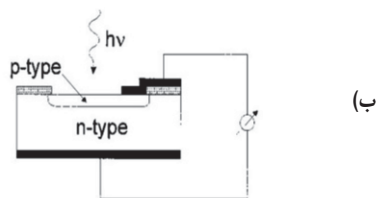
آشکارسازهای فوتوگرافیک دارای ظرفیت جمع‌آوری و ذخیره مقادیر زیادی داده از سیگنال تابش است. این آشکارسازها محدودیت‌هایی نظیر حساسیت کم (نسبت به آشکارسازهای فوتوالکتریک)، محدوده دینامیکی محدود، خطی نبودن پاسخ‌دهی در یک طول موج معین و حساسیت به طیف گسترده طول موج را دارد. آشکارسازهای فوتوالکتریک نسبت به آشکارسازهای فوتوگرافیک حساس‌تر و با پاسخ‌دهی بهتر است و به سه دسته:

۱) آشکارسازهای فوتوکنداکتیو، ۲) آشکارسازهای فوتولتائیک و ۳) آشکارسازهای فوتون گسیل<sup>۶</sup> دسته‌بندی می‌شود. در آشکارسازهای فوتون گسیل، فوتون به سطح فلزی برخورد کرده و فوتوالکترتون‌ها در محیط خلاء تولید می‌شود (اثر فوتوالکتریک). فوتوالکترتون‌ها توسط فرایند انتشار ثانویه<sup>۷</sup> تکثیر می‌شود و با اعمال ولتاژ بین کاتد و آند، متناسب با شار فوتون‌های نور ورودی، فوتوالکترتون‌ها جریان می‌یابد. در آشکارسازهای نیمه‌هادی (فوتوکنداکتیو و فوتولتائیک)، فوتون‌های ورودی در ماده نیمه‌هادی جذب شده و زوج الکترون-حفره تولید می‌شود. در آشکارساز فوتولتائیک زوج الکترون-حفره به وسیله میدان الکتریکی در ناحیه p-n، سد شاتکی یا خازن‌های فلز-عایق-نیمه‌هادی از هم جدا نگاه داشته شده است. پس از اعمال ولتاژ جریانی متناسب با شار فوتون‌های ورودی شارش پیدا می‌کند.

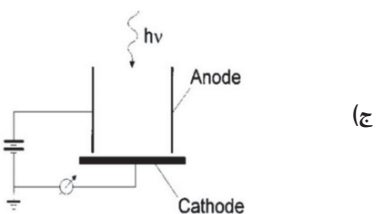
آشکارساز فوتوکنداکتیو در واقع یک مقاومت حساس به نور است. در اینجا نیز هنگامی که فوتون انرژی لازم جهت غلبه به گاف انرژی ماده نیمه‌هادی را داشته باشد، جذب شده و زوج الکترون-حفره تولید کرده و مقاومت الکتریکی ماده را تغییر می‌دهد. پس از اعمال ولتاژ، حامل‌های تولید شده توسط الکترونها مانند شکل ۳-ج جمع‌آوری می‌شوند. در شکل ۳ عملکرد دو آشکارساز فوتوشیمیایی و فوتولتائیک نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۳): عملکرد آشکارسازهای (الف) فوتوکنداکتیو، (ب) آشکارساز فوتولتائیک و (ج) فوتون گسیل [۱].

6. Photomissive  
7. Secondary Emission

5. Photodetectors (PDs)

### ۳- آشکارساز نوری آلومینیم نیترید

در ادامه این مقاله ما در به بررسی آشکارسازهای مبتنی بر ماده نیمه‌هادی آلومینیم نیترید می‌پردازیم.

#### ۳-۱- پارامترهای اساسی

AIN با گاف انرژی بسیار پهن  $2/6 \text{ eV}$  حساس به طول موج (VUV)  $180-195 \text{ nm}$  است [۱۲]. ولتاژ شکست بالا، تحرک‌پذیری الکترونی  $100,1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  در دمای اتاق، پایداری شیمیایی عالی، پایداری حرارتی و مقاومت بسیار زیاد در برابر تشعشعات سبب شده تا AIN برای استفاده در محیط‌های تشعشعی و با گرادپان دمای بالا مثل محیط‌های فضایی بسیار مناسب باشد [۱۶-۱۳]. استفاده به‌عنوان سنسور MEMS پیزوالکتریک در جدارهٔ محفظهٔ سوخت‌های هسته‌ای [۱۷]، آشکارسازی طول موج VUV در ردیاب‌های نظامی، ردیاب‌های خورشیدی [۱۵]، سنسورهای پالسی-موجی [۱۱]، CCDهای مبتنی بر آشکارسازهای خورشید-کور، AIN جهت تصویربرداری‌های نجومی، مشاهدات خورشیدی و کنترل شفق قطبی از کاربردهای این نیمه‌هادی است [۳].

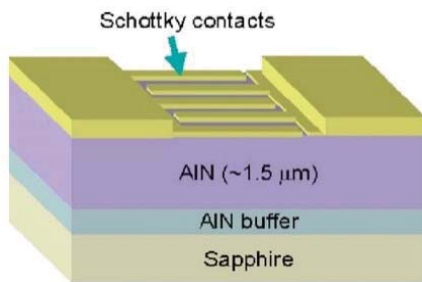
مزیت استفاده از این نیمه‌هادی پهن باند این است که آشکارسازهای مبتنی بر این ماده به‌طور مؤثری نسبت به طول موج‌های بالاتر از  $200 \text{ nm}$  نانومتر کور است. زیرا فوتون‌های طول موج‌های بالاتر انرژی لازم برای برانگیختن الکترون از تراز ظرفیت به تراز رسانش را ندارد و بنابراین آشکارساز مبتنی بر AIN به فیلتر طول موج‌های بالاتر نیاز ندارد. اما برای استفاده از AIN نیاز است که توسط عناصر آلاینده نظیر C، Ge یا Si آلیش شود تا آشکارسازی توسط آن به‌طور مؤثری صورت گیرد. این امر برای ایجاد خمش گاف انرژی جهت تأثیر بر تحرک‌پذیری الکترون‌ها مهم است [۱۸].

#### ۳-۲- ساخت آشکارساز نوری VUV بر پایه AIN

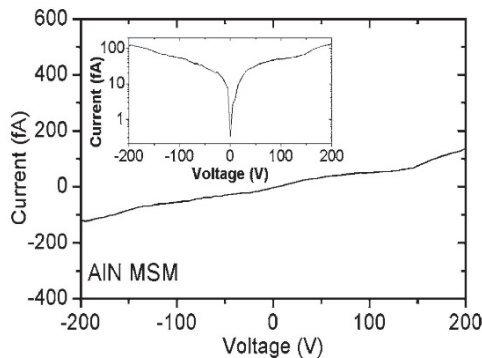
عملکرد قطعات نیمه‌هادی وابستگی زیادی به ابعاد، کیفیت و خلوص مواد سازندهٔ آن دارد. انحراف در ساختار بلوری و یا حضور عناصر ناخالصی در بلور نیمه‌هادی بر رفتار الکترون‌ها اثر گذاشته و عملکرد قطعه را مختل می‌کند. مثلاً نقص در ساختار بلوری با انتشار یا به دام اندازی الکترون‌ها، تحرک آن را در طول بلور کاهش داده و سرعت پاسخدهی قطعه کاهش می‌یابد. همچنین، عناصر خارجی مثل اکسیژن می‌تواند گذارهای الکترونی اضافی در داخل گاف انرژی ایجاد کند. اغلب این نقایص به‌دلیل کاربرد مواد نامناسب زیرلایه یا روش رشد نامناسب ایجاد می‌شود. ساخت پر دردرس لایه با کیفیت و گران بودن تجهیزات رشد، از جمله مشکلات ساخت لایه AIN است.

AIN پس از لایه‌نشانی به روش‌های مختلف، باید در دمای بالاتر از  $1,200$  درجهٔ سانتیگراد جهت پخت<sup>۸</sup> در کوره قرار بگیرد. همچنین، AI بسیار واکنش‌پذیر بوده و به سرعت با اکسیژن هوا واکنش می‌دهد و اکسید آلومینیوم تولید می‌کند که این واکنش‌پذیری باعث ایجاد انحرافات ساختاری و کاهش کیفیت لایه در حال رشد می‌شود [۲۰-۱۹]. تاکنون پژوهش‌های بسیاری برای ساخت آشکارساز AIN صورت گرفته است. از بین روش‌های تولید ساختارهای نیترید آلومینیوم، کمترین دمای مورد نیاز برای سنتز AIN مربوط به روش‌های نیتریداسیون و روش‌های مبتنی بر رسوب شیمیایی فاز بخار (CVD) مانند MOCVD است [۲۰].

در مرجع [۲۱] آشکارساز MSM بر پایهٔ لایهٔ نازک با کیفیت AIN آلیش نشده به ضخامت  $1/5 \mu\text{m}$  بر زیرلایهٔ آلومینا رشد هم‌پافته<sup>۹</sup> داده‌شده است (شکل ۴). اتصالات شاتکی از طریق الکترودهای از جنس Au/Pt ایجاد شده است. مطابق با شکل ۵، مشخصهٔ ولتاژ-جریان برای آشکارساز به‌دست‌آمده و ماکزیمم جریان تاریک مقدار  $100 \text{ fA}$  در ولتاژ  $\pm 200 \text{ V}$  اندازه‌گیری شده است. همچنین در شکل ۶، ماکزیمم پاسخدهی آشکارساز در طول موج  $200 \text{ nm}$  است.



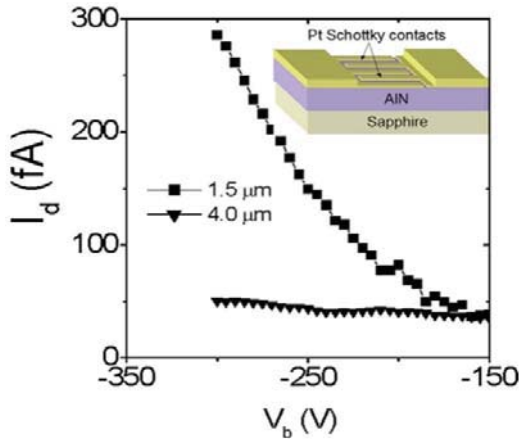
شکل (۴): ساختار آشکارساز MSM نیمه‌هادی AIN [۲۱].



شکل (۵): مشخصه جریان-ولتاژ آشکارساز MSM [۲۱].

8. Annieling  
9. Epitaxy

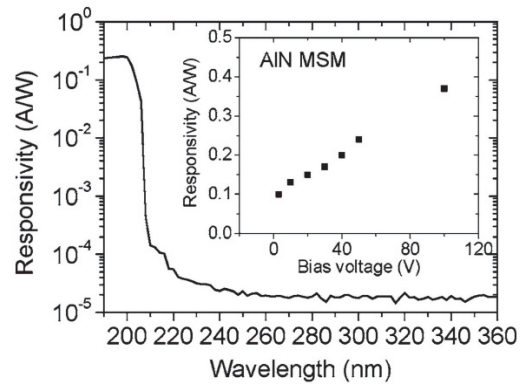
بهینه ضخامت لایه اپیتکسیال AlN است و این نتیجه توسط بنیاد ملی علوم<sup>۱۰</sup> تأیید شده است.



شکل (۷): مشخصه جریان تاریک آشکارساز MSM بر پایه AlN در دو ضخامت ۱/۵ و ۴ μm لایه اپیتکسیال AlN (سطح آشکارساز: ۸۰ μm<sup>2</sup> و در الکترودها عرض/فاصله=۴/۲) [۲۲].

### ۳-۳- اثر تشعشعات بر آشکارساز AlN

فضای بالای جو به دلیل وجود پرتوهای یون‌ساز برای ماهواره‌ها و تجهیزات الکترونی آنها یک محیط تشعشی است. انواع واکنش‌ها در این محیط بر عملکرد و طول عمر دستگاه‌ها و تجهیزات آنها بسیار تأثیرگذار است. قرار گرفتن تجهیزات در محیط تشعشی، در قطعات نیمه‌رسانا و عایق از جمله اکسیدها، منجر به تولید حامل‌های بار و یونیزش ماده، ایجاد نقص در ساختار کریستالی از طریق جابه‌جایی اتم‌ها در شبکه، شارژ کردن به دلیل به‌دام‌افتادن بارها در عایق‌ها و یا منجر به تشکیل باندهای اضافی رسانی در نیمه‌رساناها و دی‌الکتریک‌ها می‌شود. تغییر ولتاژ آستانه، افزایش جریان نشتی و جریان تاریک و خاموش نشدن قطعه (در زمان اعمال نشدن ولتاژ خارجی به آن)، از جمله آسیب‌های تشعشی محسوب می‌شود. این آسیب‌ها به‌صورت تدریجی عملکرد قطعه را با افت کیفیت مواجه کرده و مشخصات مواد تشکیل‌دهنده قطعه را تغییر می‌دهد. بنابراین، بررسی اثر تابش‌های هسته‌ای بر مجموعه تجهیزات که در محیط‌های تشعشی قرار می‌گیرد، بسیار مهم است [۲۳-۲۴]. در مرجع [۲۵] واکنش آشکارساز MSM بر پایه AlN آلاینده نشده و الکترودهای Ni/Mo/Au به تغییر شار پروتون‌هایی که توسط شتاب‌دهنده تا انرژی ۱۴/۴ eV شتاب گرفته‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد این آشکارساز جریان تاریکی بسیار ناچیز ۰/۲ تا ۰/۴ پیکوآمپر را در ولتاژ ۱۵۷ عبور می‌دهد. این



شکل (۶): طیف پاسخدهی آشکارساز MSM مبتنی بر AlN (در ولتاژ ۳۰۷ پاسخدهی تابعی از ولتاژ است) [۲۶].

این پژوهش که مورد تأیید ناسا قرار گرفته (Contract No. NNG06LA43C)، توانسته با کیفیت‌ترین لایه AlN را بر پایه رشد اپیتکسی AlN به روش MOCVD بر روی لایه حائل AlN و زیرلایه آلومینا تولید کند. جریان تاریک بسیار کم و طول موج قطع (بسیار تیز) در حدود ۲۰۷ nm، ولتاژ شکست بسیار بالا و حساسیت بالا به VUV از ویژگی‌های برجسته این آشکارساز است. همچنین، در مرجع [۱۵] تأثیر جنس الکترودها بر جریان تاریکی و نیز جریان نوری آشکارساز AlN مورد بررسی قرار گرفته است. الکترودها از جنس سه فلز Al، Ti و Pt می‌باشد. نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول (۱): مقایسه رانش فوتونی در الکترودهای مختلف در ولتاژ ۱۰۰۷ [۱۵].

| Electrode Material | Dark Current (A)      | Photo Current (A)     |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| Al                 | $2.8 \times 10^{-12}$ | $4.4 \times 10^{-11}$ |
| Pt                 | $4 \times 10^{-14}$   | $1.3 \times 10^{-11}$ |
| Ti                 | $5 \times 10^{-14}$   | $7.7 \times 10^{-13}$ |

داده‌های جدول ۱ نشان می‌دهد که فلزهای Al و Pt گزینه مناسبی به عنوان الکترودها برای رانش فوتوالکترون‌ها هستند، زیرا آشکارساز بر پایه این الکترودها علاوه بر جریان تاریک بسیار کم، جریان نوری بهتری را عبور می‌دهد.

در مرجع [۲۲] ارتباط بین خصوصیات نوری آشکارساز MSM بر پایه AlN و ضخامت لایه هم‌بافته AlN بررسی شده است. در شکل ۷ نمودار جریان تاریک بر حسب ولتاژ برای آشکارسازهای با ضخامت‌های مختلف لایه AlN (در سه ضخامت ۱/۵، ۳ و ۴ میکرومتر) به دست آمده است. به عنوان یک نتیجه، کاهش قابل توجه جریان تاریک نشان می‌دهد که یکی از راه‌های مؤثر برای افزایش کارایی آشکارساز، افزایش

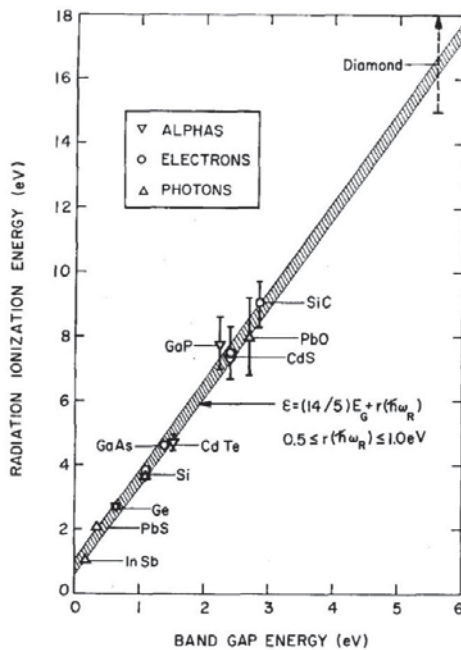
(علمی-ترویجی)

لیلا برغمندی، سید حسن صدیقی، بیژن غفاری و شهاب نوروزیان علم

کلین<sup>۱۱</sup> در سال ۱۹۶۸ در مقاله‌ای با معرفی یک مدل ساده از تولید حامل‌ها توسط تابش‌های یونیزان، رابطه متوسط انرژی لازم از تابش یونیزان برای تولید زوج الکترون-حفره در ماده نیمه‌هادی را با گاف انرژی آن ماده محاسبه کرد. این انرژی حداقل انرژی لازم جهت شروع تخریب ماده نیمه‌هادی توسط تشعشع است. براساس این مدل فرض شده که مقدار انرژی منتقل شده از تابش به هر زوج شامل سه بخش: (۱) انرژی لازم برای غلبه بر گاف انرژی، (۲) انرژی جنبشی زوج الکترون-حفره و (۳) تلفات فونونی شبکه است. اگر تلفات گرمایی (انرژی جنبشی زوج و تلفات فونونی) ناشی از تولید زوج‌هایی باشد که قادر به ایجاد یونیزاسیون بیشتر در ماده نیست و در نتیجه مجبور به تبدیل انرژی باقی‌مانده خود به ارتعاشات شبکه است. این انرژی با انرژی آستانه تولید زوج متناسب خواهد بود. در این صورت متوسط انرژی تابش برای تولید زوج به صورت رابطه (۲) خواهد بود.

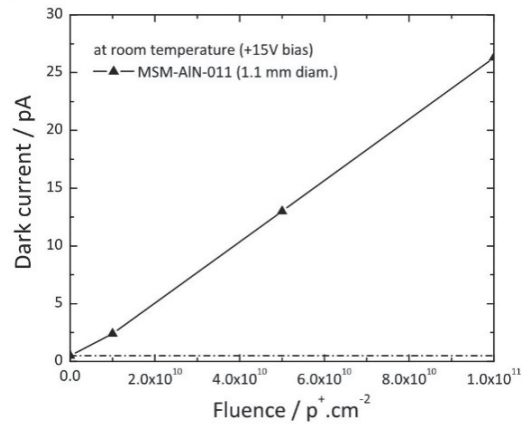
$$\mathcal{E} = (3/2 + \Delta) E_g + r(\hbar W_R), \quad (2)$$

که در آن،  $E_g$  گاف انرژی ماده نیمه‌هادی و  $r(\hbar W_R)$  انرژی بیش‌ترین پراکندگی فونونی در شبکه است. شکل ۹ وابستگی متوسط انرژی لازم جهت یونیزاسیون به گاف انرژی ماده هدف را برای چند نمونه ماده نیمه‌هادی نشان می‌دهد [۱۰].



شکل (۹): انرژی یونیزان ورودی (تابش پروتون یا الکترون، تابش گاما، ذرات آلفا و غیره) برحسب گاف انرژی ماده نیمه‌هادی [۱۰].

جریان متناسب با چگالی جریان تاریکی  $3-6 \text{ pA.cm}^{-2}$  است. پس از تابش دهی، جریان تاریک برای نمونه با ناحیه فعال  $1/1$  میلیمتری برحسب تغییرات شار پروتونی اندازه‌گیری شده است. شکل ۸ نشان می‌دهد که جریان تاریک با افزایش شار پروتونی، افزایش می‌یابد.



شکل (۸): افزایش چگالی جریان تاریک آشکارساز AIN با افزایش شار پروتون‌های ورودی در دمای اتاق [۲۵].

با برخورد پروتون‌ها (و سایر تشعشعات مثل فوتون‌های گاما، الکترون‌های پرنانرژی و یون‌های سنگین) با الکترون‌ها و اتم‌ها در توده ماده، جابه‌جایی و انتقال انرژی به آن‌ها، منجر به تولید حامل‌های بار و افزایش چگالی جریان تاریکی می‌شود. اما با افزایش انرژی پروتون‌ها (و سایر تشعشعات)، به دلیل سرعت حرکت زیاد پروتون‌ها (انرژی زیاد) در ماده و زمان کم‌تر برای ماندن و اندرکنش با ماده، مقدار جریان تاریک کاهش می‌یابد [۲۶]. در اینجا مشاهده شد که در یک ولتاژ معین با افزایش شار پروتونی، جریان تاریک افزایش می‌یابد. در واقع دز یونیزان کل که به معنای مقدار انرژی به جا گذاشته شده ناشی از یونیزاسیون در ماده است، به شار ذرات یونیزان بر طبق رابطه زیر وابسته است [۲۳]:

$$\text{Dose} = (1/\rho)(dE/dx) \cdot \Phi \cdot (1.602 \times 10^{-8}) \text{krad}, \quad (1)$$

که در آن،  $dE/dx$  مقدار انرژی به جا گذاشته شده در ماده هدف (که سبب یونیزاسیون در ماده می‌شود)،  $\Phi$  شار ذرات یونیزان و  $\rho$  چگالی ماده هدف است. میزان آسیب‌پذیری از دز یونیزان کل در محیط تشعشعی به مقدار انرژی و آهنگ برهم‌کنش پرتو، ضخامت و نوع و کیفیت ساختاری ماده هدف بستگی دارد. در ادامه به بررسی ساده‌ای از وابستگی مقدار جذب انرژی یونیزان پرتوی ورودی به گاف انرژی ماده هدف نیمه‌هادی می‌پردازیم.

جدول (۲): ویژگی‌های فیزیکی AlN و چند نیمه‌های پهن-باند.

| پارامترها                                                | GaN     | الماس         | BN                           | AlN     |
|----------------------------------------------------------|---------|---------------|------------------------------|---------|
| گاف انرژی (eV)<br>(۳۰۰K)                                 | ۳/۳۹    | ۵/۴۷          | ۵/۹۵                         | ۶/۲     |
| پایداری فیزیکی<br>(۳۰۰K)                                 | خوب     | خیلی خوب      | عالی                         | عالی    |
| ضریب انبساط گرمایی<br>خطی ( $10^{-6} K^{-1}$ )<br>(۳۰۰K) | ۵/۵۹    | ۰/۳ تا<br>۰/۷ | ۴-۳                          | ۴/۲     |
| تحرك پذیری الكترونی<br>( $cm^2/V.s$ )<br>(۳۰۰K)          | ۹۰۰     | -۱۹۰۰<br>۲۲۰۰ | ۲۰۰ (نوع n)<br>۵۰۰ و (نوع p) | ۱۱۰۰    |
| میدان شکست<br>الکتريکی ( $V.cm^{-1}$ )<br>( $10^6$ )     | ۳/۳     | ۵/۶           | ۰/۳۳                         | ۱۱/۷    |
| مرجع                                                     | [۲۳]    | [۳۲]          | [۳۱]                         | [۱۴]    |
|                                                          | [۷، ۱۴] | [۸، ۲۹]       |                              | [۸، ۱۲] |

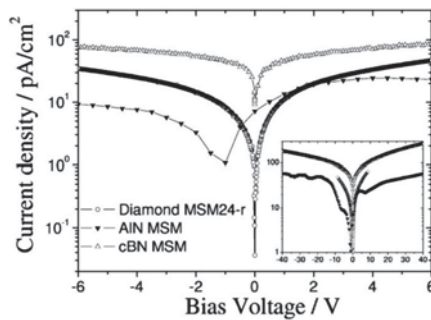
هرچه پهنای گاف انرژی ماده نیمه‌هادی بیش‌تر باشد، مقدار انرژی تابش ورودی مورد نیاز برای شروع تولید زوج حامل‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین، آسیب یونیزان برای نیمه‌هادی‌های پهن باند مثل الماس و AlN نسبت به مواد نیمه‌رسانا با پهنای گاف انرژی کم‌تر، کم‌تر خواهد بود. از این رو، این مواد برای تجهیزات فضایی که به‌طور مستقیم تحت تأثیر دز زیاد تابش‌های یونیزان است و کالیبره کردن مداوم آن‌ها چالش محسوب می‌شود، مناسب‌تر است. اولین بار در سال ۲۰۰۹ آژانس فضایی اروپا در پروژه مأموریت (ESA-PROBA2) (Autonomy2) از آشکارسازهای الماس (گاف انرژی ۵/۴۷ eV) برای آشکارسازی طیف DUV استفاده کرد. در بین مواد پهن باند مثل SiC [۲۷]، BCN [۲۸] و الماس [۲۹] اخیراً از گروه‌های III-نیتريدی مثل GaN و  $Al_xGa_{x-1}N$  در کاربردهای فضایی استفاده می‌شود [۳۰]. [۲۵]

#### ۴- مقایسه AlN و سایر نیمه‌هادی‌های

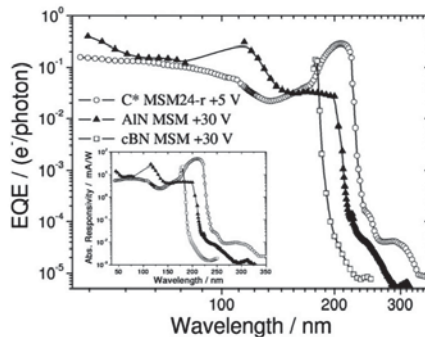
##### پهن-باند

تاکنون مواد مختلفی برای ساخت آشکارساز طیف VUV مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه طول موج مورد نظر، نوع کاربرد و شرایط محیط استفاده، از مواد نیمه‌هادی‌های با گاف انرژی متفاوت استفاده می‌شود. در جدول ۲ برخی ویژگی‌های اساسی AlN و چند نیمه‌هادی پهن-باند با هم مقایسه شده است. میدان شکست الکتريکی بالا ( $117 MV.cm^{-2}$ ) همراه با پایداری شیمیایی و حرارتی عالی AlN مورد توجه است.

جریان تاریک و بازدهی کوانتومی سه آشکارساز MSM بر پایه الماس، cBN، و AlN در مرجع [۱۳] گزارش شده است. مطابق با شکل ۱۰ چگالی جریان تاریک در دمای اتاق، در حضور گاز  $N_2$  اندازه گرفته شده است. آشکارساز الماس جریان تاریک بسیار کم  $1/1 Pa$  را در ولتاژ +۵ با اتصال اهمی الکتروود شاتکی الکتروود Mo/Au جریان تاریک  $1/4-1/2 pA$  در ولتاژ  $30 \pm 7 V$  (متناظر با  $160-190 pA/cm^2$ ) و برای آشکارساز AlN مقدار بسیار ناچیز  $13 fA$  (معادل  $56 pA/cm^2$ ) در ولتاژ  $30 \pm 7 V$  اندازه‌گیری شده است. همچنین، شکل ۱۱ بازدهی کوانتومی خارجی و منحنی پاسخ‌دهی آشکارساز الماس در ولتاژ +۵ و آشکارساز AlN و c-BN را در ولتاژ +۳۰ نشان می‌دهد. در واقع بازدهی کوانتومی خارجی به معنی نسبت تعداد حامل‌های تولید شده توسط سلول آشکارساز به نسبت تعداد فوتون‌های نور ورودی است [۳۴].



شکل (۱۰): جریان تاریک مربوط به سه آشکارساز MSM نیمه‌هادی c-BN، AlN، و الماس در ولتاژ -۶ تا +۶ (شکل داخل جریان تاریک را در ولتاژ -۴۰ تا +۴۰ نشان می‌دهد) [۱۳].



شکل (۱۱): بازدهی کوانتومی خارجی سه آشکارساز الماس در ولتاژ +۵ و آشکارساز AlN و c-BN را در ولتاژ +۳۰ (تصویر داخل منحنی پاسخ‌دهی سه آشکارساز را نشان می‌دهد) [۱۳].

## ۶- مراجع

- [1] Zheng, W., Lin, R., Ran, J., Zhang, Z., Ji, X., and Huang, F., "Vacuum-Ultraviolet Photovoltaic Detector", *ACS Nano*, Vol. 12, No. 1, pp. 425-431 2018.
- [2] Ulmer, M.P. "Future UV Detectors for Space Applications", Proceedings of The International Society for Optical Engineering (SPIE), Strasbourg, France, 2006.
- [3] Kozlovsky, A., Safargaleev, V., Ostgaard, N., Turunen, T., Koustov, A., Jussila, J., and Roldugin, A., "On the Motion of Dayside Auroras Caused by a Solar Wind Pressure Pulse", *Ann. Geophys.* Vol. 23, pp. 509-521, 2005.
- [4] Available: <https://spaceplace.nasa.gov/aurora/>.
- [5] Najmzadeh, S., "Detection by CCD and Its Applications", M.Sc. Thesis, Department of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, 2010 (In Persian).
- [6] Penquer, A., Gilard, O., Bardoux, A., Ecoffet, R., and Auvergne, M., "Radiation Effects on Image Sensors", *International Conference on Space Optics 2012*, Ajaccio, Corsica, France, 2012.
- [7] Rivera, C., Pereiro, J., Navarro, A., Muñoz, E., Brandt, O., and Grahn, H.T., "Advances in Group-III-Nitride Photodetectors", *The Open Electrical & Electronic Engineering Journal*, Vol. 4, pp. 1-9, 2010.
- [8] Razeghi, M. and Rogalski, A., "Semiconductor Ultraviolet Detectors", *J. Appl. Phys.*, Vol. 79, No. 10, pp. 7433-7473, 1996.
- [9] Walker, D. and Razeghi, M., "The Development on Nitride-based UV Photodetectors", *Opto-Electronics Review*, Vol. 8, No. 1, pp. 25-42, 2000.
- [10] Klein, C.A., "Bandgap Dependence and Related Features of Radiation Ionization Energies in Semiconductors", *J. Appl. Phys.*, Vol. 39, No. 4, pp. 2029-2038, 1968.
- [11] Kheirkhah, M., "Design, Simulation and Manufacturing of MSM Ultraviolet Detector Using Zinc Oxide Nanoparticles", M.Sc. Thesis, Department of Electrical and Electronics Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran, 2016 (In Persian).
- [12] Zubialevich, V.Z., Dinh, D.V., Alam, S.N. Schulz, S., O'Reilly, E.P., and Parbrook, P.J., "Strongly Nonparabolic Variation of the Band Gap in InxAl1-xN with Low Indium Content", *Semicond. Sci. Technol.* Vol. 31, No. 2, pp. 25-36, 2016.
- [13] BenMoussa, A., Soltani, A., Schühle, U., Haenen, K., Chong, Y.M., Zhang, W.J., Dahal, R., Lin, J.Y., Jiang, H.X., Barkad, H.A., BenMoussa, B., Bolsee, D., Hermans, C., Kroth, U., Laubis, C., Mortet, V., De Jaeger, J.C., Giordanengo, B., Richter, M., Scholze, F., and Hochedez, J.F., "Recent Developments of Wide-bandgap Semiconductor Based UV Sensors", *Diam. Relat. Mater.* Vol. 18, No's. 5-8, 2009.
- [14] Kamata, H., Ishii, Y., Mabuchi, T., Naoe, K., Ajimura, S., and Sanada, K. "Single Crystal Growth of Aluminum Nitride", *Fujikura Technical Review*, Vol. 16, No. 2, pp. 41-45, 2009.
- [15] Zhong, F., Huang, C., Danylyuk, Y.V., and Auner, G.W., "Development of an AlN Deep UV Detector for Space Application", *Mat. Res. Soc.*, Vol. 639, pp. 2-6, 2001.

آشکارساز AlN ماکزیمم پاسخدهی ۴/۵ mA/W (معادل طول موج ۱۹۰nm) را در ولتاژ +۳۰ را نشان می‌دهد. در واقع ویژگی‌های فیزیکی مطلوب و جریان تاریک بسیار کم همراه با بازده کوانتومی به نسبت خوب در طول موج‌های کم‌تر از ۲۰۰nm آشکارساز AlN را به گزینه مناسبی جهت استفاده در کاربردهای آشکارسازی VUV تبدیل کرده است. اگرچه ویژگی‌های ذاتی نیمه‌هادی AlN شایستگی آن را برای استفاده به عنوان آشکارساز ثابت کرده، با این حال با تکیه بر فناوری‌های جدید ساخت و توسعه، پیشرفت‌های بیش‌تری برای ارتقاء عملکرد آشکارسازهای بر پایه AlN مورد نیاز است. بهبود روش‌های ساخت، طراحی الکتروندهای انگشتی با کاهش فاصله انگشت‌ها از هم طراحی متفاوت الکتروندها، دستیابی به بهترین غلظت آلاینش لایه و بسیاری از راه حل‌های دیگر می‌تواند عملکرد این آشکارساز را بهبود بخشد.

## ۵- نتیجه‌گیری

امروزه آشکارسازی طول موج VUV به دلیل تولید داده‌های کاربردی در علمی نظیر نجوم و هواشناسی مورد توجه واقع شده است. تاکنون تکنیک‌های مختلفی برای آشکارسازی این طیف مورد استفاده قرار گرفته است. دستیابی به تکنولوژی ساخت نیمه‌هادی‌های پهن-باند مطلوب پنجره تازه‌ای به روی تحقیقات مبتنی بر طول موج VUV گشوده است. جذب مستقیم VUV، بدون نیاز به انواع فیلترهای طول موج‌های پایین‌تر، از جمله ویژگی‌های شاخص این مواد است. در کنار نیمه‌هادی‌های پهن-باند نظیر الماس، نیمه‌هادی‌های گروه III نیتريد به دلیل خواص نوری و الکتریکی ویژه امروزه مورد توجه هستند. AlN با گاف انرژی ۶/۳eV حساس به طول موج ۱۹۰ nm است. پایداری شیمیایی و حرارتی، مقاومت بالا در برابر تشعشعات و نیز ولتاژ شکست بالا از جمله ویژگی‌های این نیمه‌هادی است. ساخت آشکارساز بر پایه این ماده با بهبود روش‌های لایه‌نشانی و استفاده از الکتروندهای مناسب می‌تواند دارای جریان تاریک بسیار ناچیز، بازده کوانتومی بالا و پایداری عالی باشد. مقاومت تشعشعی بالا به دلیل گاف انرژی بلند و ضریب انبساط گرمایی مناسب، آشکارسازهای AlN را برای استفاده در محیط‌های تشعشعی متمایز کرده است. امید است تا با پیشرفت فناوری و ارتقاء تکنیک‌های ساخت بتوان به نسل جدید دوربین‌های تصویربرداری نجومی با CCD بر پایه AlN و عملکرد بهینه دست‌یافت.



- Proton Irradiation Damage Tests of AlN Detectors for VUV Solar Observations”, *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. B*, vol. 312, pp. 48–53, 2013.
- [26] Xin, G.L., Li, W.M., and Tian, Z.P.Y., “Effects of High-energy Proton Irradiation on Separate Absorption and Multiplication GaN Avalanche Photodiode”, *Nucl. Sci. Tech.* Vol. 3, pp. 1–8, 2018.
- [27] Chen, X., Zhu, H., Cai, J., and Wu, Z., “High-performance 4H-SiC-based Ultraviolet *p-i-n* Photodetector”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 102, No. 2, pp. 1-4, 2007.
- [28] Undaram, K.A.B.S., “Boron Carbon Nitride Based Metal-insulator-metal UV Detectors for Harsh Environment Applications”, *Optics Letters*, Vol. 41, No. 18, pp. 4249-4252, 2016.
- [29] Hochedez, J., Bergonzo, P., Castex, M., Dhez, P., and Hainaut, O., “Diamond UV Detectors for Future Solar Physics Missions”, *Diamond and Related Materials*, Vol. 10, No's. 3–7, pp. 673–680, 2001.
- [30] Malinowski, P.E., Duboz, J.Y., De Moor, P., Minoglou, K., John, J., Martin Horcajo, S., Semon, F., Frayssinet, E., Verhoeve, P., Esposito, M., Giordanengo, B., BenMoussa, A., Mertens, R., and Van Hoof, C., “Extreme Ultraviolet Detection Using AlGaN-on-Si Inverted Schottky Photodiodes”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 98, No. 14, pp. 1-4 2011.
- [31] Soltani, A., Barkad, H.A., Mattalah, M., Benbakhti, B., De Jaeger, J.C., Chong, Y.M., Zou, Y.S., Zhang, W.J., Lee, S.T., BenMoussa, A., Giordanengo, B., and Hochedez, J.F., “193 nm Deep-ultraviolet Solar-blind Cubic Boron Nitride Based Photodetectors”, *Applied Physics Letters*, Vol. 92, No. 5, pp. 1–4, 2008.
- [32] Moellea, C., Klosea, S., Szücs, F., Fecht, H.J., Johnston, C., Chalker, P.R., and Werner, M., “Measurement and Calculation of the Thermal Expansion Coefficient of Diamond”, *Diam. Relat. Mater.*, Vol. 6, No's. 5–7, pp. 839-842, 1997.
- [33] Zheng, W., Lin, R., Zhang, Z., and Huang, F., “Vacuum-Ultraviolet Photodetection in Few-Layered h-BN”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 10, No. 32, pp. 27116–27123, 2018.
- [34] [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_efficiency](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_efficiency).
- [16] Yanagida, T., Fujimoto, Y., Kawaguchi, N., and Yanagida, S., “Dosimeter properties of AlN”, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol. 121, No. 1421, pp. 988-991, 2013.
- [17] Giurgiutiu, V., Postolache, C., and Tudose, M., “Radiation, Temperature, and Vacuum Effects on Piezoelectric Wafer Active Sensors”, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 25, No. 3, pp. 1-25, 2016.
- [18] Bogusławski, P., “Doping Properties of C, Si, and Ge Impurities in GaN and AlN”, *The American Physical Society*, Vol. 56, No. 15, pp. 9496–9505, 1997.
- [19] Wang, J., Xu, F., He, C., Zhang, L., Lu, L., Wang, X., Qin, Z., and Shen, B., “High Quality AlN Epilayers Grown on Nitrided Sapphire by Metal Organic Chemical Vapor Deposition”, *Sci. Rep.*, Vol. 7, pp. 1-7, 2017.
- [20] Rashidi, A.M., Moradian, R., and Rahimimoghadam, P., “A Rreview of the Types of Aluminum Oxide Nanostructures and the Different Methods of Synthesizing These Nanostructures”, *Journal of Iranian Ceramic Society*, Vol. 51, No. 3, pp.45-62, 2017 (In Persian).
- [21] Li, J. and Fan, Z.Y., “200 nm Deep Ultraviolet Photodetectors Based on AlN”, *Applied Physics Letters*, Vol. 89, pp. 1-3, 2006.
- [22] Pantha, B.N., Dahal, R., Nakarmi, M.L., Li, J., Lin, J.Y., and Jiang, H.X., “Correlation Between Optoelectronic and Structural Properties and Epilayer Thickness of AlN”, *Applied Physics Letters*, vol. 241101, no. 2007, pp. 2005–2008, 2010.
- [23] Lohmeyer, W.Q., and Cahoy, K., “Space Radiation Environment Impacts on High Power Amplifiers and Solar Cells On-board Geostationary Communications Satellites”, *Space Weather*, Vol. 11, No. 8, pp. 476-488, 2015.
- [24] Zamani Moghaddam, S., Amjadifard, R., and Khoshsima, M., “Simulation of Total Ionizing Dose Radiation Effect on Telecommunication Satellite by GEANT4”, *Iranian Journal of Radiation Safety and Measurement*, Vol. 4, No. 3, pp. 29-36, 2016 (In Persian).
- [25] BenMoussa, A., Soltani, A., Gerbedoen, J.C., Saito, T., Averin, S., Gissot, S., Giordanengo, B., Berger, G., Kroth, U., De Jaeger, J.C., and Gottwald, A. “Developments, Characterization and