

مقایسه تأثیر ضخامت مبدل طلای بالک و نانو بر میزان انرژی جذب شده در داخل نانوسیم‌های سوسوزن ZnO در قالب AAO با استفاده از کد MCNP

نوریان ثمرین، صبا* (۱) - سرآمد، شهبیار (۱) و (۲)

(۱) دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه مهندسی هسته‌ای-پرتوپزشکی

(۲) مرکز فیزیک نظری و ریاضی، پژوهشکده ذرات و شتابگرها

چکیده:

در تصویربرداری پرتو ایکس، قدرت تفکیک مکانی پارامتر خیلی مهمی می باشد. نانوسوسوزن ZnO به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا، زمان واپاشی کمتر از 1ns و سادگی ساخت با روش الکتروشیمیایی (در قالب AAO) در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. برای آشکارسازی پرتوهای ایکس با انرژی بالا با توجه به محدودیت های موجود در افزایش ضخامت نانو سوسوزن ها، وجود یک مبدل برای تبدیل پرتوهای ایکس به الکترون برای افزایش میزان انرژی جذب شده مناسب به نظر می رسد. در این مقاله میزان انرژی جذب شده در نانوسیم‌های ZnO بر حسب تغییر ضخامت لایه مبدل و برای انرژی‌های چشمه مختلف در محدوده 35-8keV و ^{99m}Tc 14.0keV با کد MCNP محاسبه شده است. نتایج برای ^{99m}Tc تطابق خوبی با مراجع دارد.

کلمات کلیدی: تصویربرداری، کد MCNP، پرتو X، نانوسیم‌ها، مبدل

مقدمه :

سیستم‌های دیجیتالی تصویربرداری نوین به دو نوع تبدیل مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. در نوع تبدیل مستقیم یک نیمه هادی حساس به نور مثل یک آرایه ای از فیلم‌های ترانزیستوری آمورف سیلیکون، اشعه ایکس را مستقیماً به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. ولی در نوع تبدیل غیرمستقیم، اشعه ایکس ابتدا بوسیله‌ی آشکارسازهای سوسوزن به نور مرئی یا اشعه ماورای بنفش تبدیل شده و سپس فوتون‌های تولید شده با استفاده از نوربرهای اپتیکی بر روی آشکارسازهای نوری نظیر CCD یا CMOS تابانده شده و در نهایت تبدیل به سیگنال الکتریکی می‌شوند [۱].

ZnO یک نیمه رسانای نوع n با ساختار نواری مستقیم با گاف انرژی حدود ۳/۳eV و انرژی فعال‌سازی بزرگ (در حدود ۶۰meV در دمای اتاق) است که به عنوان یک سوسوزن غیرالی سریع شناخته می‌شود. این نیمه رسانا انرژی ذرات باردار (مانند پروتون، الکترون، آلفا) ویا ذرات بدون بار (مانند اشعه ایکس و گاما) را جذب کرده به فوتون های مرئی و عمدتاً ماوراءبنفش تبدیل می‌کند که با کمک یک تکثیر کننده‌ی فوتونی،

اشکارساز نیمه رسانا قابل آشکارسازی است [۲]. از جمله مهم‌ترین مزایای این نیمه‌رسانا، انرژی پیوندی بزرگ و قابلیت رشد تک بلوری آن است [۳]. تک کریستال اکسید روی دارای ویژگی‌های جالبی از جمله شفافیت در برابر نور مرئی [۴]، زمان واپاشی سریع کمتر از 1 ns [۵، ۶] سهولت در ساخت، قیمت پایین، پایداری مکانیکی، مقاومت در برابر شار با تابش بالا، غیرسمی بودن، انرژی متوسط 9 eV و ضریب فانو کوچک [۵-۷] است.

یکی از مهمترین مسائلی در که تصویرسازهای دیجیتالی اشعه ایکس مبتنی بر مواد سوسوزن مطرح است، کاهش قدرت تفکیک مکانی در اثر پخش‌شدگی و در نتیجه پراکندگی فوتون‌های نوری است که این مسئله کیفیت تصویر ایجاد شده را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. در آشکارسازهای نانوساختار، به دلیل وجود ضرایب شکست متفاوت بین نانوسیم‌های اکسید روی و دیواره غشاء، هر نانوسیم به عنوان یک هدایت کننده‌ی نوری مجزا عمل کرده و مانع از پخش‌شدگی نور می‌شود.

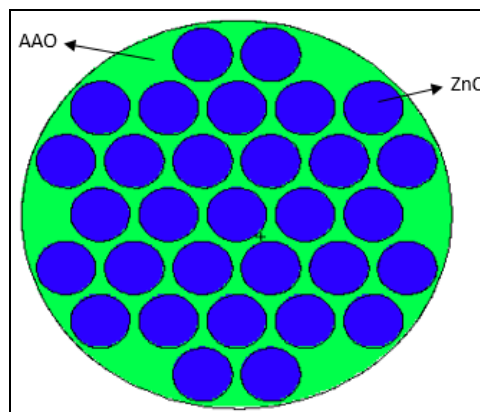
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که نانوسیم‌های اکسید روی رزولوشن مکانی را نسبت به آشکارسازهای بالک بهبود می‌بخشند [۸]. بازدهی آشکارسازی پرتو ایکس و رزولوشن مکانی نوعی از نانوسیم‌های اکسید روی برای پرتو ایکس 10 keV به ترتیب 11% و کمتر از $1.7\text{ }\mu\text{m}$ است [۹] که با افزایش میزان تخلخل قالب اکسید روی می‌توان این بازدهی را افزایش داد.

آندایز کردن آلومینیوم در ولتاژ آندایزینگ و اسید مناسب می‌تواند آرایه‌های هگزاگونالی با سایز حفرات و فواصل بین حفرات متفاوتی را شکل دهد. حفراتی با فواصل 50 nm - 420 nm ، می‌تواند با استفاده از حلال‌های اسید فسفریک، سولفوریک، اگزالیک به دست آید [۱۰]. رزولوشن فضایی 7 nm نانوسیم ZnO در قالب AAO با قطر 200 nm و فواصل بین حفرات 460 nm با کد GEANT4 شبیه‌سازی شده است و درصد جذب پرتوهای ایکس، تعداد کلی فوتون‌های نوری تولید شده به ازای هر پرتو ایکس و نسبت نور خروجی از انتهای آشکارساز به نور خروجی از دیواره‌ها شبیه‌سازی شده است [۸].

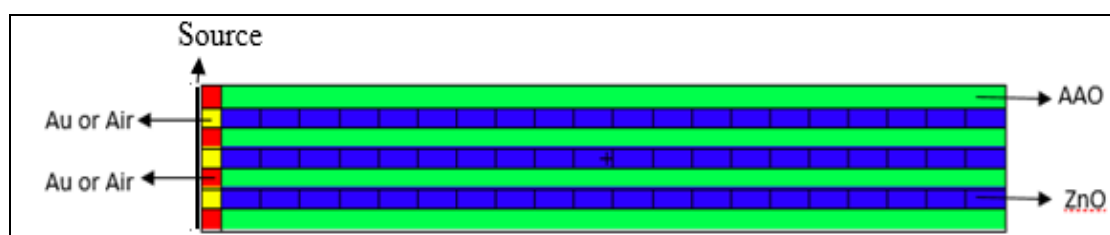
وابستگی نور خروجی و رزولوشن مکانی آشکارساز به قطر نانوسیم‌ها و تغییرات شدت نور بر حسب تغییر مکان پرتو فرودی با کد GEANT4 شبیه‌سازی شده است و رزولوشن کمتر از $1\text{ }\mu\text{m}$ را برای پرتو ایکس 10 keV نشان می‌دهد [۱۰]. همچنین وابستگی رزولوشن مکانی آشکارساز به قطر نانوسیم‌ها و تغییرات شدت نور بر حسب تغییر مکان پرتو فرودی با استفاده از کد MCNP، OPTICS و MATLAB شبیه‌سازی شده است که رزولوشن کمتر از $1\text{ }\mu\text{m}$ را برای پرتو ایکس 10 keV نشان می‌دهد [۱۱]. در این مقاله نیز میزان انرژی جذب شده در نانوسیم‌های ZnO بر حسب تغییر ضخامت لایه مبدل و برای انرژی‌های چشمه مختلف در محدوده 8 keV - 35 keV و 140 keV ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) محاسبه شده است.

روش کار :

AAO متخلخل که از طریق آندایزینگ دو مرحله‌ای آلومینیوم تولید می‌شود به صورت آرایه‌ای از حفره‌ها که به صورت هگزاگونالی مرتب شده‌اند در شکل (۱) نشان داده شده است. این ساختارها به وسیله‌ی مشخصاتی مانند قطر حفره‌ها، فواصل بین حفره‌ها و ضخامت دیواره‌ها مشخص می‌شوند. چون قالب AAO با فواصل بین حفره‌ای 660 nm و قطر حفره‌های 200 nm - 450 nm در دسترس است [۱۰]. بنابراین این هندسه شبیه سازی گردیده است. هندسه استفاده شده در کد MCNP برای محاسبه میزان انرژی جذب شده، یک استوانه AAO با ضخامت $20\text{ }\mu\text{m}$ و شعاع سطح مقطع 1450 nm است که در برابر چشمه ایکس صفحه‌ای با شعاع 1450 nm قرار داده شده است که شامل ۳۱ نانوسیم ZnO با آرایش هگزاگونالی است. در بین چشمه و قالب AAO، یک لایه مبدل قرار داده شده است که این لایه در حالتی که به صورت کامل (بالک) از جنس طلا باشد یا لایه‌ای از طلا که دارای حفره‌های هوا در راستای نانوسیم‌های ZnO باشد و یا در شرایطی که نانوسیم‌های طلا در راستای نانوسیم‌های ZnO باشند، در نظر گرفته شده است (شکل ۲). با استفاده از این هندسه میزان انرژی جذب شده در نانوسیم‌های ZnO بر حسب تغییر ضخامت لایه مبدل و برای انرژی‌های چشمه مختلف در محدوده 35 keV - 8 keV و 140 keV ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) محاسبه شده است.



شکل شماره (۱) نمای XY هندسه MCNP برای محاسبه انرژی جذب شده حاصل از چشمه ایکس صفحه‌ای با شعاع 1450 nm (قطر نانوسیم‌ها برابر 400 nm).



شکل شماره (2) نمای YZ هندسه MCNP برای محاسبه انرژی جذب شده حاصل از چشمه ایکس صفحه‌ای با شعاع 1450nm (قطر نانوسیم‌ها برابر 400nm).

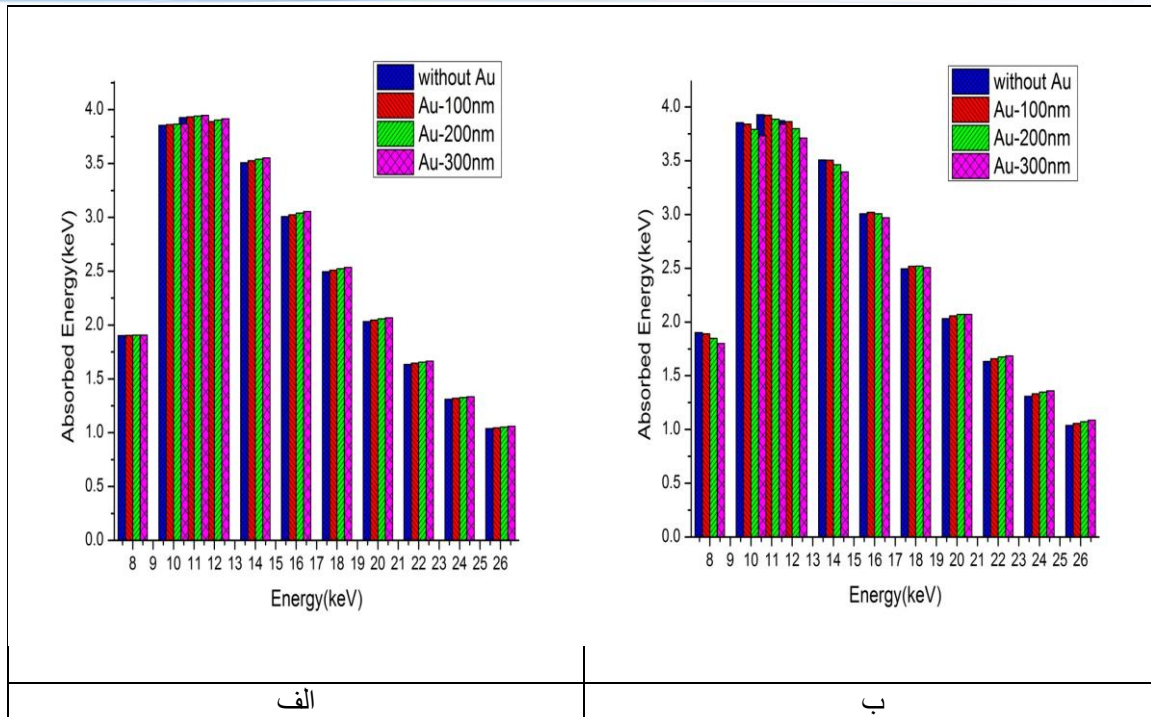
نتایج :

تغییر میزان انرژی جذب شده در 31 نانوسیم اکسیدروی با ضخامت $20\mu\text{m}$ و قطر حفره 400nm که تحت تابش چشمه سطحی با شعاع 1450nm قرار دارد، برای انرژی‌ها و ضخامت‌های متفاوت، در شرایطی که لایه طلا دارای حفره‌هایی در راستای نانو سیم‌های ZnO است، در شکل 3 (الف) نشان داده شده است (در این حالت قطر حفره‌های هوا برابر با قطر نانوسیم‌های اکسیدروی (400nm) است).

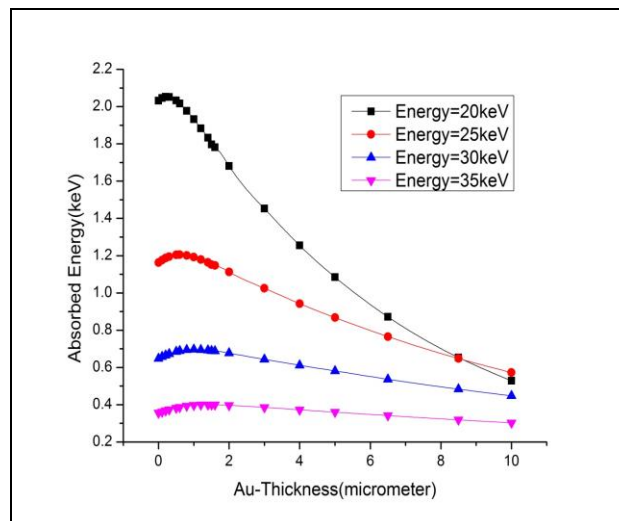
تغییر میزان انرژی جذب شده در نانوسیم‌های اکسیدروی برای لایه‌ای از طلا به صورت بالک، با ضخامت‌های متفاوت، (بدون حفره‌های هوا) در شکل 3 (ب) نشان داده شده است (شیبه سازی‌ها برای ضخامت‌های 100nm ، 200nm ، 300nm و بدون طلا انجام شده است).

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در انرژی‌های زیر 16keV و 18keV نانو بودن مبدل نسبت به بالک بودن آن، مزیت داشته و انرژی جذب شده در ضخامت‌های کمتر طلا بیشتر است اما در انرژی‌های بالای 16keV و 18keV نانو بودن مبدل مزیتی ندارد و مبدل بالک طلا بهتر است و با افزایش ضخامت طلا انرژی جذب شده بیشتر می‌شود.

انرژی جذب شده در 31 نانوسیم اکسیدروی با ضخامت $20\mu\text{m}$ و قطر حفره 400nm که تحت تابش چشمه سطحی با شعاع 1450nm با انرژی 20keV ، 25keV ، 30keV و 35keV (در محدوده انرژی‌های ماموگرافی) بر حسب تغییر ضخامت طلا در حالتی که نانوسیم‌های طلا بالای ZnO قرار دارند در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل شماره (3) انرژی جذب شده در ۳۱ نانوسیم اکسیدروی با ضخامت با ضخامت $20\mu\text{m}$ و قطر حفره 400nm که تحت تابش چشمه سطحی با شعاع 1450nm قرار دارد (الف. لایه‌ای از طلا با ضخامت‌های متفاوت، دارای حفره‌های هوا (قطر حفره 400nm) که در راستای حفره‌های ZnO هستند ب. لایه‌ای از طلا با ضخامت‌های متفاوت به صورت بالک).

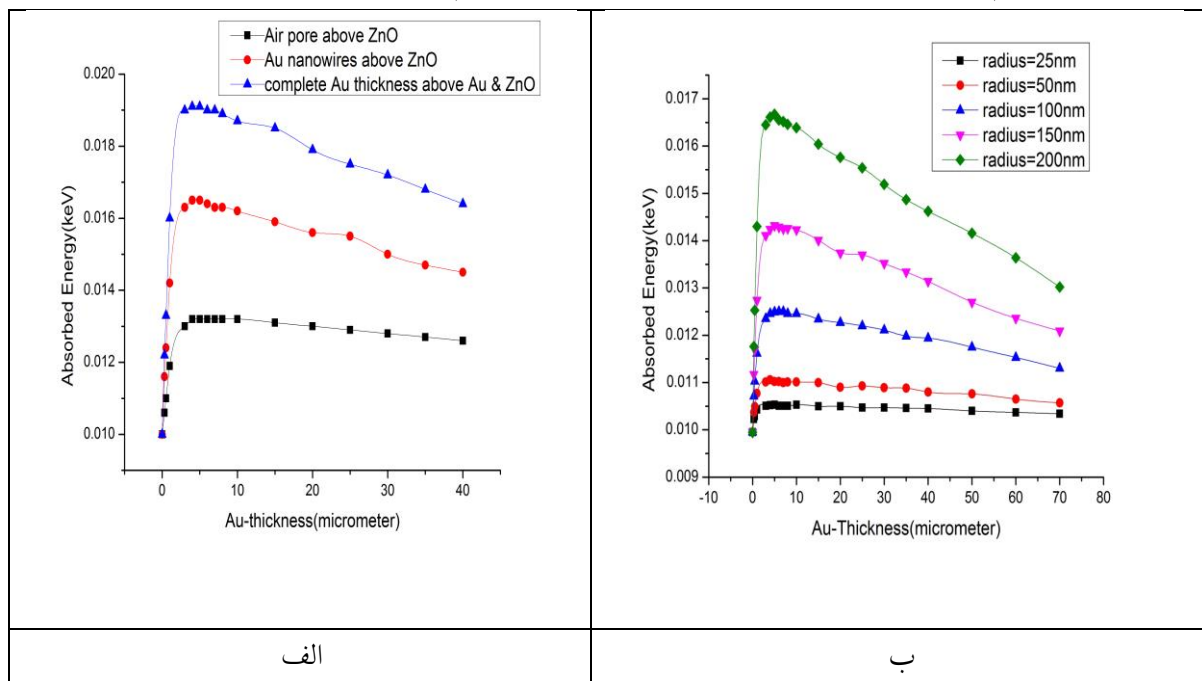


شکل شماره (4) انرژی جذب شده در ^{31}P نانوسیم اکسیدروی با ضخامت $20\ \mu\text{m}$ و قطر حفره $400\ \text{nm}$ تحت تابش چشمه سطحی با شعاع $1450\ \text{nm}$ برای انرژی $20\ \text{keV}$ ، $25\ \text{keV}$ ، $30\ \text{keV}$ و $35\ \text{keV}$ بر حسب تغییر ضخامت طلا در حالتی که نانوسیم‌های طلا بالای ZnO قرار دارند.

در اینجا نیز میزان انرژی جذب شده با افزایش انرژی پرتو ایکس کاهش می‌یابد و برای انرژی‌های بالاتر ضخامت بهینه برای ماکزیمم انرژی جذب شده، افزایش می‌یابد.

میزان انرژی جذب شده در ^{31}P نانوسیم اکسیدروی با ضخامت $20\ \mu\text{m}$ و قطر حفره $400\ \text{nm}$ که تحت تابش چشمه سطحی با شعاع $1450\ \text{nm}$ حاصل از $^{99\text{m}}\text{Tc}$ با انرژی $140\ \text{keV}$ قرار دارد، بر حسب تغییر ضخامت طلا در شکل 5 (الف) نشان داده شده است. (لایه‌ای از طلا با ضخامت‌های متفاوت به صورت بالک و حاوی حفره‌های هوا (در قالب طلا) و در حالتی که نانوسیم‌های طلا در راستای نانوسیم‌های ZnO قرار دارند، در نظر گرفته شده است).

میزان انرژی جذب شده در داخل نانوسیم‌های ZnO به ضخامت $20\ \mu\text{m}$ و با قطر $400\ \text{nm}$ حاصل از $^{99\text{m}}\text{Tc}$ با انرژی $140\ \text{keV}$ در شکل 5 (ب) نشان داده شده است. در این حالت شعاع نانوسیم‌های طلا که هم محور با نانوسیم‌های ZnO هستند برابر با $25\ \text{nm}$ ، $50\ \text{nm}$ ، $100\ \text{nm}$ ، $150\ \text{nm}$ ، $200\ \text{nm}$ است که برای ضخامت‌های مختلف از نانوسیم‌های طلا، میزان انرژی جذب شده در داخل نانوسیم‌های ZnO محاسبه شده است.



شکل شماره (5) انرژی جذب شده در ^{31}P نانوسیم اکسیدروی با ضخامت $20\ \mu\text{m}$ و قطر حفره $400\ \text{nm}$ که تحت تابش چشمه سطحی با شعاع $1450\ \text{nm}$ حاصل از $^{99\text{m}}\text{Tc}$ با انرژی $140\ \text{keV}$ قرار دارد (الف).

لایه‌ای از طلا با ضخامت‌های متفاوت برای بالک و حاوی حفره‌های هوا و در حالتی که نانوسیم‌های طلا بالای ZnO قرار دارند ب. لایه‌ای از طلا با شعاع‌ها و ضخامت‌های متفاوت در حالتی که نانوسیم‌های طلا بالای ZnO قرار دارند).

همان‌طور که در شکل (5) الف. نشان داده شده است، برای چشمه ^{99m}Tc با انرژی 140keV ، میزان انرژی جذب شده در داخل نانوسیم‌های ZnO برای حالتی که لایه‌ای از طلا با ضخامت‌های متفاوت به صورت بالک در نظر گرفته شده است، بیشتر از حالتی است که نانوسیم‌های طلا در راستای نانوسیم‌های ZnO قرار گرفته‌اند و در این حالت نیز میزان انرژی جذب شده بیشتر از وقتی است که حفره‌های هوا (در قالب طلا) در راستای نانوسیم‌های ZnO قرار دارند. همچنین ضخامت بهینه در هر سه حالت برابر $3\mu\text{m}$ است که مطابق با مرجع [۱۲] است. با توجه به شکل (5) ب. نیز برای شعاع بزرگتر نانوسیم‌های طلا، میزان انرژی جذب شده بیشتر از شعاع‌های کوچکتر است و در همی شعاع‌ها ضخامت بهینه طلا برابر با $3\mu\text{m}$ است [۱۲].

بحث و نتیجه گیری :

هندسه استفاده شده در کد MCNP برای محاسبه میزان انرژی جذب شده، یک استوانه AAO با ضخامت $20\mu\text{m}$ و شعاع سطح مقطع 1450nm است که در برابر چشمه ایکس صفحه‌ای با شعاع 1450nm قرار داده شده است که شامل 31 نانوسیم ZnO با آرایش هگزاگونالی است. بین چشمه و قالب AAO، یک لایه مبدل قرار داده شده است که اثر این لایه در حالتی که به صورت کامل (بالک) از جنس طلا باشد یا لایه‌ای از طلا که دارای حفره‌های هوا در راستای نانوسیم‌های ZnO باشد و یا در شرایطی که نانوسیم‌های طلا در راستای نانوسیم‌های ZnO باشند، بررسی شده است. براساس نتایج به دست آمده، در انرژی‌های زیر 16keV و 18keV نانو مبدل نسبت به بالک مزیت دارد و انرژی جذب شده در ضخامت‌های کمتر طلا بیشتر است اما در انرژی‌های بالای 16keV و 18keV نانو بودن مبدل مزیتی ندارد و مبدل بالک طلا بهتر است و با افزایش ضخامت طلا انرژی جذب شده بیشتر می‌شود. بعلاوه برای انرژی‌های در محدوده ماموگرافی، میزان انرژی جذب شده با افزایش انرژی پرتو ایکس کاهش می‌یابد و با افزایش انرژی ضخامت بهینه برای ماکزیمم انرژی جذب شده، افزایش می‌یابد.

بیشترین انرژی جذب شده برای چشمه ^{99m}Tc با ضخامت‌های متفاوت از طلا با انرژی 140keV ، در داخل نانوسیم‌های ZnO زمانی اتفاق می‌افتد که لایه‌ای از طلا به صورت بالک در نظر گرفته شود. پس از آن بیشترین انرژی جذب شده مربوط به حالتیست که نانوسیم‌های طلا در راستای نانوسیم‌های ZnO قرار گرفته‌اند و در نهایت کمترین انرژی جذب شده مربوط به زمانی است که حفره‌های هوا (در قالب طلا) در راستای نانوسیم‌های ZnO قرار دارند. بعلاوه ضخامت بهینه در هر سه حالت برابر با $3\mu\text{m}$ است. برای شعاع

بزرگتر نانوسیم‌های طلا، میزان انرژی جذب شده بیشتر از شعاع‌های کوچکتر است و در همه‌ی شعاع‌ها ضخامت بهینه طلا برابر با $3\mu\text{m}$ که با نتایج منابع دیگر مطابقت دارد.

مراجع :

- [1] J. Yorkston, Recent developments in digital radiography detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 580, 2, 974-985, 2007.
- [2] V. Rengarajan, W. M. Nemeth, and J. E. Nause, Bulk Single Crystal Doped Zinc Oxide (ZnO) Scintillator, International Application Under the Patent Cooperation Treaty, Publication no. 2007/094785, 2007.
- [3] J. H. He, J. H. Hsu, C. W. Wang, H. N. Lin, L. J. Chen, and Z. L. Wang, Pattern and Feature Designed Growth of ZnO Nanowire Arrays for Vertical Devices, *The Journal of Physical Chemistry B*, 110, 1, 50-53, 2006.
- [4] E. M. C. Fortunato, P. M. C. Barquinha, A. C. M. B. G. Pimentel, A. M. F. Gonçalves, A. J. S. Marques, L. M. N. Pereira, *et al.*, Fully Transparent ZnO Thin-Film Transistor Produced at Room Temperature, *Advanced Materials*, 17, 5, 590-594, 2005.
- [5] Ü. Özgür, Y. I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. A. Reshchikov, S. Doğan, *et al.*, A comprehensive review of ZnO materials and devices, *Journal of Applied Physics*, 98,4, 041301, 2005.
- [6] T. Nakazato, Y. Furukawa, M. Tanaka, T. Tatsumi, M. Nishikino, H. Yamatani, *et al.*, Hydrothermal-method-grown ZnO single crystal as fast EUV scintillator for future lithography, *Journal of Crystal Growth*, 311, 3, 875-877, 2009.
- [7] J. Wilkinson, K. B. Ucer, and R. T. Williams, Picosecond excitonic luminescence in ZnO and other wide-gap semiconductors, *Radiation Measurements*, 38, 4-6, 501-505, 2004.
- [8] A. Taheri, S. Saramad, and S. Setayeshi, Geant4 simulation of zinc oxide nanowires in anodized aluminum oxide template as a low energy X-ray scintillator detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 701, 30-36, 2013.
- [9] A. Taheri, S. Saramad, S. Ghalenoei, and S. Setayeshi, Taheri-Saramad x-ray detector (TSXD): A novel high spatial resolution x-ray imager based on ZnO nano scintillator wires in polycarbonate membrane, *Review of Scientific Instruments*, 85, 1, 013112, 2014.
- [10] F. Esfandi and S. Saramad, Simulation, optimization and testing of a novel high spatial resolution X-ray imager based on Zinc Oxide nanowires in Anodic Aluminium Oxide membrane using Geant4, *Journal of Instrumentation*, 10, 7, P07019, 2015.
- [11] صبا نوریان ثمرین، مطالعه و شبیه‌سازی نانوسنتیلاتورهای مناسب برای کاربردهای تصویربرداری پرتو X، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای - پرتوپزشکی، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بهمن ۱۳۹۴.
- [12] T. Koike, S. Uno, T. Uchida, M. Sekimoto, T. Murakami, M. Shoji, F. Nagashima, K. Yamamoto, E. Nakano, A new gamma camera with gas electron multiplier, *Journal of Instrumentation*, 7, C01078, 2012.