

شبیه سازی مبدل نانوسیم طلا برای آشکارسازهای یونیزان

INC29-1058

حمید صائبی*، شهیار سرآمد

گروه مهندسی پرتو پزشکی، دانشکده انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران-ایران.

چکیده:

آشکارسازهای گازی دارای کاربردهای برجسته‌ای برای تشخیص پزشکی هستند. تمرکز این مقاله، بهینه‌سازی پارامترهای مبدل نانوسیم است. بالاترین بازده کوانتومی توسط کد شبیه سازی GEANT4 تعیین گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که در مبدل‌های با ابعاد کوچک، ضخامت باید تا حد امکان بزرگ باشد تا بازده کوانتومی افزایش یابد اما در مبدل‌های با ابعاد بزرگ، بیشترین بازده، زمانی حاصل می‌شود که از نانوسیم‌ها نیز بر روی مبدل استفاده شود. در نهایت با تشکیل منحنی‌های بازده کوانتومی، مشخص شد که طول و قطر بهینه برای دستیابی به بالاترین بازده کوانتومی به ترتیب ۹ میکرومتر و ۳۰۰ نانومتر است.

کلیدواژه‌ها: مبدل نانوسیم، بازده کوانتومی، طول و قطر بهینه، مبدل بالک

Simulation of Au nanowire converter for ionization Radiation Detectors

H. Saebi*, S. Saramad

Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology, P.O.BOX:15875-4413, Tehran, Iran.

Abstract:

Radiation gas detectors can have applications for medical diagnostics. The focus of this study is optimising the parameters of a nano wire converter by Geant4 simulation code, to achieve the highest quantum efficiency (QE). The simulation results showed that in converters with small dimensions, the thickness should be as large as possible to increase the QE. However, in converters with large dimensions, the highest efficiency is achieved when nanowires are also used on the converter. Finally, by forming QE curves of these nanowires in different lengths and diameters, it was determined that the optimum length and diameter to achieve the highest QE are 9 μm and 300 nm, respectively.

Keywords: Nano converter, Quantum efficiency (QE), Optimum length and diameter, Bulk converter

۱. مقدمه:

آشکارسازهای گازی کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف از جمله تحقیقات و درمان دارند. می‌توان ادعان داشت که آغاز این حوزه، معرفی یک محفظه تناسبی چند سیمه توسط چاپاراک و ساولی بود [۱]. معرفی چنین آشکارسازی امکان مکان‌یابی فعل و انفعالات پرتوهای یونیزان را با دقت نسبتاً خوبی فراهم کرد. از زمان معرفی چنین آشکارسازهایی تا به امروز، انواع مختلفی از این آشکارسازها با پیشرفت‌هایی در طراحی خود وارد این عرصه شده‌اند. پس از معرفی ضریب تکثیر الکترون گازی^۱ (GEM) توسط ساولی [۲] حوزه جدیدی برای کاربردهای آشکارساز گازی پدید آمد. اصول و کاربردهای GEM را می‌توان در مقالات یافت (به عنوان مثال [۳]). برای تشخیص پزشکی، از آشکارسازهای گازی برای رادیوگرافی دیجیتال اشعه ایکس و آنژیوگرافی استفاده می‌شود. همچنین آشکارسازهای گازی، سریع و حساس به موقعیت مدرن برای تصویربرداری اشعه ایکس استفاده شدند. یکی از مشکلات عمده آشکارسازهای گازی، بازده پایین آن برای تبدیل گاما و اشعه ایکس به الکترون است. اگرچه برای تشخیص اشعه ایکس نرم از آشکارسازهای گازی استفاده می‌شود، اما به دلیل چگالی کم گاز و جرم اتمی، عملکرد آن چندان کارآمد نیست [۴ و ۵]. این مشکل را می‌توان با افزایش ابعاد محفظه گاز و استفاده از گازهایی با جرم اتمی بالاتر مانند زنون بهبود بخشید. با این حال، افزایش ابعاد محفظه گاز قدرت تفکیک فضایی آشکارساز را کاهش می‌دهد. به منظور افزایش کارایی آشکارسازهای گازی برای اشعه ایکس با انرژی بالاتر، یکی از راهبردها، استفاده از مبدل بالک است. این مبدل شامل ورقه نازکی از مواد با عدد اتمی بالا بوده و ضخامت آن به نحوی طراحی شده است که احتمال برهمکنش پرتو با ماده را افزایش داده به شرطی که تعداد الکترون خروجی نیز افزایش یابد. در مرجع [۴] مبدل بالک به آشکارساز گازی جفت است. در چنین آشکارسازی، تابش فرودی، با مبدل بالک برهمکنش کرده و الکترون‌های تولید شده که ممکن است وارد ناحیه گازی شوند، تکثیر می‌شوند. در این نوع آشکارسازها، بازده آشکارسازی در مبدل بالک برابر با تعداد کل الکترون‌های اولیه تولید شده در مبدل که به فضای گاز می‌رسند تقسیم بر تعداد کل فوتون‌های فرودی است. بر اساس این تعریف، اگر برهمکنش گاما با مبدل به طور متوسط الکترون‌های ثانویه بیشتری تولید کند، بازده تشخیص افزایش می‌یابد و سیگنال بزرگ‌تری انتظار می‌رود. همچنین برای کاربردهای تصویربرداری پزشکی، مهم است که درصد بالاتری از گامای فرودی که با مبدل برهم کنش دارند، حداقل یک الکترون ثانویه قابل تشخیص تولید کنند. این پارامتر، که بازده کوانتومی^۲ (QE) نامیده می‌شود، با افزایش ضخامت مبدل افزایش می‌یابد که به تعامل بیشتر گاما با مبدل مربوط می‌شود. اما با افزایش ضخامت مبدل، احتمال فرار الکترون‌ها از مبدل کاهش می‌یابد. بنابراین، انتظار می‌رود که برای ضخامت بهینه، حداکثر (QE) را بتوان به دست آورد. به منظور بهبود (QE) مبدل بالک، مبدل‌های نانوساختاری مانند نانوسیم‌ها و مبدل‌های نانو متخلخل معرفی شدند [۶ و ۷]. از آنجایی که نانوساختارها نسبت سطح به حجم بالاتری دارند، انتظار می‌رود که با بهینه‌سازی ساختار آن، مبدل‌های نانوساختار در مقایسه با مبدل‌های بالک شانس بیشتری برای فرار الکترون داشته باشند. بنابراین مبدل‌های نانوساختار می‌توانند کاندیدای خوبی برای تبدیل کارآمد فوتون‌های پر انرژی به الکترون باشند. تا آنجا که نویسندگان می‌دانند، هیچ مطالعه‌ای وجود ندارد که بهینه‌سازی مبدل‌ها را در آشکارسازهای گازی به طور جامع بررسی کرده باشد. در این راستا، هدف از شبیه‌سازی‌های انجام شده در کار جاری، محاسبه و به دست آوردن موارد زیر است:

(۱) محاسبه تعداد الکترون‌های خروجی مبدل بالک در ضخامت‌های مختلف هنگام قرار گرفتن در معرض تابش گاما و بدست آوردن ضخامت بهینه آن. (۲) محاسبه تعداد الکترون‌های خروجی نانوسیم‌های طلا در ضخامت‌ها و قطرهای مختلف هنگام قرار گرفتن در معرض تابش گاما و بدست آوردن ضخامت بهینه آن. (۳) محاسبه بازده کوانتومی نانوسیم‌های طلا

¹ Gas Electron Multiplier

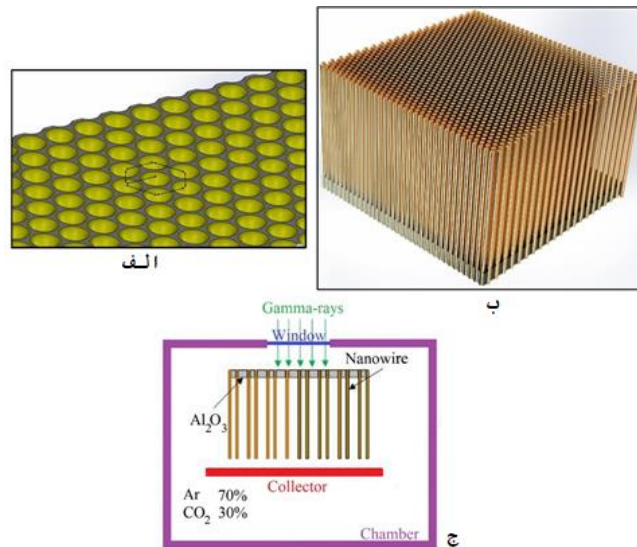
² Quantum Efficiency

با قطرها و ضخامت‌های مختلف و راندمان کوانتومی مبدل بالک. (۴) تاثیر عرض پرتو در نانوسیم و مبدل بالک بر الکترون-های خروجی (۵) مطالعه طیف الکترون خروجی مبدل نانوسیم و مبدل بالک.

۲. روش کار:

۱.۲. روش شناسی شبیه سازی:

تمامی شبیه سازی‌ها با استفاده از جعبه ابزار هندسه و ردیابی (GEANT4) نسخه ۴ انجام شده است. به منظور شبیه سازی مبدل گاما به الکترون همان طور که در (شکل ۱-الف) دیده می‌شود، یک صفحه Al_2O_3 با ابعاد 150×150 میکرومتر مربع و یک آرایه شش ضلعی تناوبی از منافذ با فاصله بین منافذ ۴۶۰ نانومتر تعریف شده است و سپس منافذ با طلا به عنوان نانوسیم پر شده است. در نهایت، تنها ضخامت صفحه Al_2O_3 (نه نانوسیم‌های طلا) کاهش یافت تا شکل واقعی مبدل ایجاد شود (شکل ۱-ب). سپس کل ساختار در یک محفظه حاوی ۷۰٪ Ar و ۳۰٪ CO_2 قرار داده شده است (شکل ۱-ج). برای شبیه سازی برهمکنش پرتوهای گامای فرودی با مبدل نانوسیم در کد GEANT4، از فیزیک لیست مدل لیورمور، بسته الکترومغناطیسی کم انرژی GEANT4 که برای نانوساختارها مناسب است، استفاده شده است. برای پرتوهای گامای تابشی ۱۴۱ کیلو الکترون ولت ^{99}Tc برد قطع ۱۰ نانومتر انتخاب شده است. الکترون‌های ثانویه تشکیل شده در مبدل، تا زمانی که توسط آند جمع آوری شوند ردیابی می‌گردند. باید در نظر گرفت که پرتو گامای فرودی که به الکترون تبدیل می‌شود، می‌تواند با برهمکنش مولکول‌های $Ar-CO_2$ در داخل چندین منفذ، الکترون‌های ثانویه زیادی تولید کند. بنابراین برای تخمین QE به درستی، رویدادهای تکراری (همه یونیزاسیون‌های ثانویه مربوط به یک ذره برخوردی) باید فقط یک بار در نظر گرفته شوند. در شبیه سازی دما و فشار سیستم به صورت استاندارد در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. (الف) نمایی از آرایه شش ضلعی متناوب از حفرات و فاصله بین منافذ ۴۶۰ نانومتر، (ب) صفحه Al_2O_3 همراه با نانوسیم‌های طلا، و (ج) کل ساختار آشکارساز گازی.

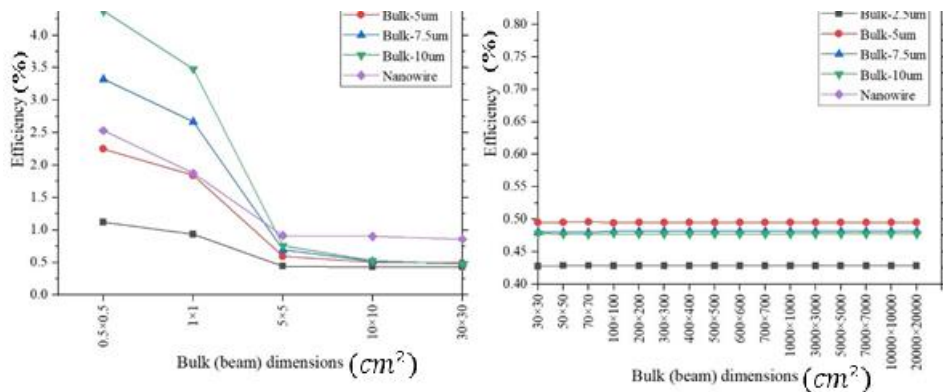
۳. نتایج:

۱.۳. مقایسه بازده مبدل نانوسیم با راندمان مبدل بالک در ضخامت‌های مختلف:

قبل از بهینه سازی مبدل نانوسیم برای حداکثر بازده خروجی، آموزنده است که بین بازده مبدل نانوسیم و بازده مبدل بالک مقایسه‌ای داشته باشیم. این کار به وضوح تفاوت راندمان و برتری استفاده از مبدل نانوسیم را نشان می‌دهد. شکل

۲ مقایسه بین بازده (الکترون خروجی در فوتون تابشی) مبدل بالک در ابعاد مختلف با بازده مبدل نانوسیم را نشان می‌دهد. ابعاد نانوسیم‌ها دارای ابعاد استاندارد تجاری با طول ۱۰ میکرومتر و قطر ۴۰۰ نانومتر است.

ابعاد باریکه تابشی با ابعاد مبدل بالک برابر است و ضخامت تمامی مبدل‌ها ۵ میکرومتر در نظر گرفته می‌شود. از شکل مشاهده می‌شود که در ابعاد کوچک مبدل، راندمان خروجی با وجود نانوسیم‌ها مزیتی را نشان نمی‌دهد و در چنین ابعادی، هر چه مبدل ضخیمتر باشد، بازده بالاتری دارد. در ابعاد بزرگتر (تقریباً بزرگتر از ۵×۵)، به راحتی می‌توان مزایای استفاده از نانوسیم‌ها را با توجه به کارایی مشاهده کرد. در ابعاد بزرگتر از ۳۰×۳۰، راندمان مبدل در حضور نانوسیم‌ها حدود ۲/۵ برابر بیشتر از راندمان مبدل با ضخامت ۵ میکرومتر است (که در چنین ابعادی نسبت به ۳ ضخامت دیگر ۲/۵، ۷/۵ و ۱۰ راندمان بالاتری دارد).

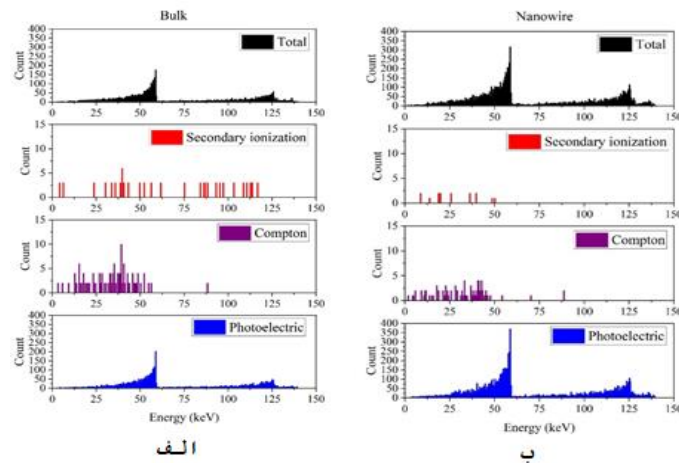


شکل ۲. مقایسه بازده (بر حسب درصد) مبدل حجمی در ابعاد مختلف با بازده مبدل حاوی نانوسیم.

۲.۳. مقایسه بین طیف انرژی مبدل بالک و نانوسیم از نظر برهمکنش:

از آنجایی که بهترین طیف زمانی به دست می‌آید که بیشتر الکترون‌های خروجی ناشی از برهمکنش‌های فوتوالکتریک باشد، مقایسه الکترون‌های خروجی از نظر برهمکنش مفید خواهد بود. ما این مقایسه را برای مبدل‌های بالک و نانوسیم انجام دادیم. مبدل بالک (و همچنین پرتو گامای فرودی) از یک صفحه طلا به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میکرومتر و ضخامت ۱۰ میکرومتر و نانوسیم از ابعاد استاندارد ۴۰۰ نانومتر در قطر ۱۰ میکرومتر طول تشکیل شده است. انرژی پرتوهای گامای فرودی مطابق با انرژی ^{۹۹}Tc است که ۱۴۱ کیلو الکترون ولت است. نتایج طیف الکترون خروجی بر حسب الکترون‌های فوتوالکتریک، کامپتون، ثانویه و کل برای مبدل‌های بالک و نانوسیم به ترتیب در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب نشان داده شده است.

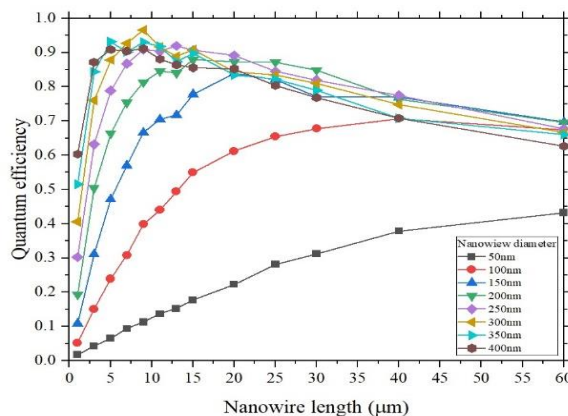
همانطور که مشاهده می‌شود، بیشتر الکترون‌های خروجی ناشی از برهمکنش فوتوالکتریک است، اما این مقدار با استفاده از نانوسیم‌ها بهبود یافته است، به طوری که تعداد الکترون‌های ساطع شده با وقوع برهمکنش‌های فوتوالکتریک (به دلیل احتمال بیشتر جذب الکترون‌های لبه K) برای مبدل نانوسیم ۱/۷۸ برابر مبدل بالک است.



شکل ۳. (الف) طیف انرژی الکترون‌های ساطع شده از مبدل بالک. (ب) طیف انرژی الکترون‌های ساطع شده از مبدل نانوسیم. (شکل‌ها به ترتیب بر حسب برهمکنش‌های فوتوالکتریک، کامپتون و الکترون‌های ثانویه همراه با طیف الکترون‌های گسیل شده از نظر برهمکنش‌های کل می‌باشند)

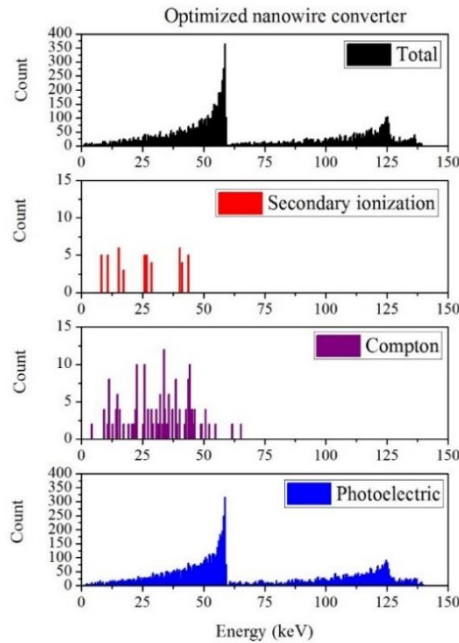
۳.۳. بهینه‌سازی مبدل نانوسیم طلا:

به منظور تعیین بهترین QE در مبدل نانوسیم طلا، QE برای قطر منافذ مختلف (۵۰ نانومتر تا ۴۰۰ نانومتر) و ضخامت نانوسیم (۱ میکرومتر تا ۶۰ میکرومتر) شبیه‌سازی شد. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۳-ب، حداکثر QE مبدل نانوسیم طلا برای ضخامت ۹ میکرومتر و قطر ۳۰۰ نانومتر برابر با ۰/۹۲۵۸٪ است. برای طول سیم‌های کمتر از ۵ میکرومتر، QE با افزایش قطر مبدل افزایش می‌یابد. برای این طول‌ها، چون فوتوالکترون‌ها انرژی کافی برای فرار از سیم‌ها دارند، بنابراین افزایش قطر سیم، احتمال برهمکنش گاما با نانوساختار را افزایش می‌دهد. در طول‌های ۹-۱۰ میکرومتر، QE با افزایش قطر از ۵۰ به ۳۰۰ نانومتر تمایل به افزایش دارد، اما در قطرهای بیشتر از ۳۰۰ این روند کمتر مشخص است و QE در این محدوده ابعادی تقریباً به همان ترتیب در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، کوچکترین ابعاد ممکن برای دستیابی به بالاترین QE را می‌توان به عنوان بهینه‌ترین ابعاد در نظر گرفت که در اینجا برابر با ۹ میکرومتر طول و ۳۰۰ نانومتر قطر بود. نکته دیگری که می‌توان از نتایج استنباط کرد این است که بالاترین QE ممکن را می‌توان برای نانوسیم‌های بلند (بیشتر از ۴۰ میکرومتر) حتی با قطرهای کوچک به ۱۰۰ نانومتر به دست آورد. به این ترتیب برای دستیابی به حداکثر QE می‌توان به طور خلاصه بیان کرد: در نانوسیم‌های با طول‌های کوچک، قطر نانوسیم باید تا حد امکان بزرگ باشد و در نانوسیم‌های بلند اندازه قطر نباید زیاد بزرگ باشد.



شکل ۴. درصد QE مبدل نانوسیم طلا به عنوان تابعی از طول نانوسیم در قطرهای مختلف.

شکل ۵ طیف انرژی الکترون‌های خروجی مبدل نانوسیم بهینه شده را از نظر برهمکنش نشان می‌دهد. تغییرات در قله‌های طیف کل انرژی به وضوح قابل مشاهده است (در مقایسه با طیف انرژی نشان داده شده در شکل ۳-الف و شکل ۳-ب به ترتیب برای مبدل استاندارد بالک و نانوسیم). با این حال، از این شکل می‌توان دریافت که تعداد شمارش‌های ناشی از برهمکنش‌های کامپتون و یونیزاسیون ثانویه در نانوسیم بهینه سازی شده بیشتر از نانوسیم استاندارد است. مقادیر کمی برای سه نوع مبدل بالک، نانوسیم استاندارد و حالت بهینه شده در جدول ۱ آمده است. با توجه به این جدول، افزایش تعداد شمارش‌ها به دلیل برهمکنش فوتوالکتریک را می‌توان با استفاده از نانوسیم‌های بهینه شده به خوبی مشاهده کرد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مبدل‌های نانوسیم به جای مبدل‌های بالک به طور قابل توجهی QE را



بهبود می‌بخشد، در حالی که نانوسیم‌های بهینه شده نیز QE را به میزان کمتری بهبود می‌بخشند.

شکل ۵. طیف انرژی الکترون‌های ساطع شده از مبدل نانوسیم بهینه شده (با طول ۹ میکرومتر و قطر ۳۰۰ نانومتر) از نظر برهمکنش‌های فوتوالکتریک، کامپتون و الکترون‌های ثانویه به همراه طیف الکترون‌های گسیل شده از کل تعاملات

جدول ۱. مقایسه دو مبدل استاندارد (بالک و نانوسیم) با مبدل نانوسیم بهینه شده

	برهمکنس (شمارش به ازای 10^6 فوتون گامای برخوردی)				QE (%)
	فوتوالکتریک	کامپتون	تولید زوج	یونیزاسیون ثانویه	
بالک استاندارد	4546	152	.	90	0.48
نانوسیم استاندارد	8916	86	.	15	0.90
نانوسیم بهینه شده	9354	189	.	49	0.96

۴. نتیجه گیری:

در این مقاله بهبود و بهینه سازی مبدل‌های الکترونی در آشکارسازهای گازی بر اساس شبیه سازی با استفاده از کد Giant 4 مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان داد که در ابعاد کوچک، مبدل بالک با ضخامت ۱۰ میکرومتر QE بالاتری نسبت به سایر ضخامت‌ها و همچنین مبدلی با نانوسیم‌های استاندارد دارد، اما در ابعاد بزرگ، مبدل نانوسیم دارای QE بسیار بالاتری نسبت به مبدل بالک با هر ضخامتی است (تقریباً بیش از ۶۰٪ بیشتر از یک مبدل با ضخامت ۱۰ میکرومتر). مشخص شد مبدل نانوسیم به طور چشمگیری QE را بهبود می‌بخشد و وقوع برهمکنش‌های فوتوالکتریک را تقریباً ۱/۸ برابر افزایش می‌دهد. به دست آوردن QE مبدل برای نانوسیم‌ها با طول‌ها و قطرهای

مختلف با شبیه‌سازی به این نتیجه رسید که اگر نانوسیم کوتاه باشد، قطر آن باید تا حد امکان بزرگ باشد تا حداکثر QE حاصل شود و اگر طول نانوسیم بلند باشد، تمام قطرهای بیشتر از ۱۰۰ نانومتر نتایج QE برای آنها تقریباً یکسان خواهد بود.

۵. منابع:

1. Charpak, G. and F. Sauli, *Multiwire proportional chambers and drift chambers*. Nuclear Instruments and Methods, 1979. 162(1): p. 405-428.
2. Sauli, F., *Applications of gaseous detectors in astrophysics, medicine and biology*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1992. 323(1): p. 1-11.
3. Charpak, G., *Applications of proportional chambers to some problems in medicine and biology*. Nuclear Instruments and Methods, 1978. 156(1): p. 1-17.
4. Koike, T., et al. *Development of new type gaseous gamma camera with GEM*. in *2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC)*. 2009.
5. Sauli, F., *GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1997. 386(2): p. 531-534.
6. Fujiwara, T., Y. Mitsuya, and H. Takahashi, *Radiation imaging with glass gas electron multipliers (G-GEMs)*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018. 878: p. 40-49.
7. Sauli, F., *The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016. 805: p. 2-24.