

Design of a Hybrid Enhanced Photocathode Based on Plasmonic Nano-Grating

A. Arabkhorasani¹, J. Khalilzade^{*2}, H. Zaki Dizaji³, Y. Shohmat⁴

^{*} Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 24/10/2020; Accepted: 15/06/2021)

Abstract

The most important and effective part of any light detector is the photocathode. In this research, in order to improve the efficiency of the photocathode optical response, the plasmonic phenomenon is used and a new photocathode is designed and simulated based on the finite difference time domain (FDTD) method. By designing a periodic nano-grating on the surface, a structure is presented that makes it possible to couple the incoming light to an electron density wave on the surface. Plasmonic resonance is created in the desired wavelength range and the field strength is greatly increased. In this way, the metal-semiconductor becomes an excellent absorber. For this purpose, photocathodes with planar and non-planar (nano-grating) structures consisting of GaAs and Au are simulated separately. Then, the plasmonic nano-grating structure consisting of Au-GaAs composite materials is simulated and compared with the plasmonic nano-grating structure of gold, so that the absorption rate of the structure is increased by 16.1%. The plasmonic nano-grating structure consisting of Au-GaAs in the visible spectrum shows better performance in increasing the photocathode efficiency due to higher absorption. The structure provided for the photocathode has the advantage of filtering the incoming light with excellent accuracy and quality. Another important feature is the creation of multiple resonant frequencies simultaneously with the formation of repetitive geometry.

Keywords: Photomultiplier, Photocathode, Nano-Grating, Plasmonic, Gallium Arsenide, Gold

^{*} Corresponding author E-mail: jkhalil@ihu.ac.ir

علمی-پژوهشی

طراحی یک فوتوکاتد ارتقاء یافته ترکیبی بر پایه نانوتوری های پلاسماونیک

علی عرب خراسانی^۱، جواد خلیل زاده^{۲*}، حسین ذکی دیزجی^۳، بداله شهامت^۴

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، ۳- استادیار، ۴- پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

چکیده

مهم ترین و تأثیر گذارترین بخش هر آشکارساز نوری، قطعه حسگر آن است. در روند توسعه فوتوکاتدها از مواد و ساختار متنوعی استفاده شده و در سال های اخیر ساختارهای ترکیبی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش به منظور ارتقای بازدهی پاسخ اپتیکی فوتوکاتد از پدیده پلاسماونیک استفاده شده و بر اساس روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) فوتوکاتد جدیدی طراحی و شبیه سازی شده است. با تعبیه طرحی از نانوتوری تناوبی بر روی سطح، ساختاری ارائه شده است که با ایجاد امکان تزویج نور فرودی به یک موج چگالی الکترونی در سطح، تشدید پلاسماونی در محدوده طول موج مورد نظر به وجود آمده و شدت میدان افزایش بسیار زیادی پیدا می کند. به این طریق فلز-نیم هادی تبدیل به یک جاذب عالی می شود. برای این منظور ابتدا فوتوکاتدهای با ساختار مسطح و غیر مسطح (نانوتوری) متشکل از Au و GaAs به طور مجزا شبیه سازی شدند. سپس ساختار نانوتوری پلاسماونیک متشکل از مواد ترکیبی Au-GaAs شبیه سازی و با ساختار نانوتوری پلاسماونیک طلا مقایسه شد، به طوری که میزان جذب ساختار ۱۶/۱ درصد افزایش یافت. ساختار نانوتوری پلاسماونیک متشکل از مواد Au-GaAs در بازه طیف مرئی به دلیل جذب بیشتر، عملکرد بهتری در افزایش بازده فوتوکاتد خواهد داشت. ساختار ارائه شده برای فوتوکاتد، دارای مزیت فیلتراسیون نور فرودی با دقت و کیفیت بسیار خوبی است. قابلیت مهم دیگر ایجاد چندین فرکانس تشدید هم زمان با ایجاد هندسه تکراری است.

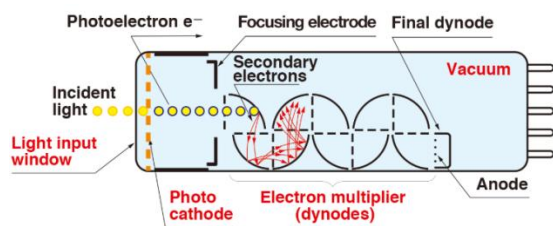
کلیدواژه ها: فوتومولتی پلایر، فوتوکاتد، نانوتوری، پلاسماونیک، گالیوم آرسناید، طلا

۱. مقدمه

اصلی، حسگر نور (فوتوکاتد)، تکثیر کننده های الکترون (داینودها) و جمع کننده الکترون ها (آند) تشکیل می شود. با ورود نور به فوتوکاتد در شرایط خاص، فوتوالکترون ها از فوتوکاتد گسیل خواهند شد. این فوتوالکترون ها توسط متمرکز کننده به سوی داینودها حرکت کرده و بر اساس گسیل الکترون ثانویه تکثیر خواهند شد. الکترون های تکثیر شده توسط آند جمع آوری شده و در نهایت به یک سیگنال خروجی تبدیل می شوند. طرحواره اجزای یک آشکارساز تکثیر کننده نوری در شکل (۱) نشان داده شده است [۲].

آشکارسازهای متعددی برای دریافت و اندازه گیری نور وجود دارد. یکی از مهم ترین و حساس ترین آنها لوله تکثیر کننده نوری^۱ (PMT) است. تکثیر کننده نوری یک دستگاه اپتوالکترونیکی است که نور را به جریان قابل اندازه گیری تبدیل می کند. این دستگاه حساسیت بسیار بالا و پاسخ سریع دارد و در زمینه های مختلف آشکارسازی نور و بویژه برای شدت های خیلی پایین به کار می رود.

تکثیر کننده های نوری، حساس ترین نوع در میان آشکارسازهای تابش های مرئی، فرابنفش و محدوده فروسرخ نزدیک هستند. حساسیت بالا، نویز پایین و پاسخ فرکانسی بالا در چنین ساختارهایی موجب شده است که تکثیر کننده های نوری جایگاه مهمی در حوزه های مختلف پیدا کنند. این ابزارها در تجهیزات تشخیصی حوزه هایی مانند زیست شناسی، سلامت و پزشکی، هسته ای، انرژی بالا، اپتیک، لیزر و مخابرات و الکترونیک استفاده می شود [۱]. این آشکارساز در حالت کلی از سه قسمت



شکل (۱): طرحواره بخش های مختلف یک آشکارساز تکثیر کننده نوری [۲].

* نویسنده پاسخگو: jkhalil@ihu.ac.ir

^۱ Photomultiplier tube

در صورتی که بین الکترون‌های آزاد فلز و موج فرودی تشدید رخ دهد، موج پلاسمونی در مرز مشترک فلز (به‌عنوان ماده‌ای با ثابت دی‌الکتریک حقیقی منفی) و دی‌الکتریک (به‌عنوان ماده‌ای با ثابت دی‌الکتریک مثبت) منتشر خواهد شد. اگر سطح فلز مورد نظر صاف باشد پلاسمون پلاریتون‌های سطحی غیر تابشی بوده و کم‌کم به دلیل قسمت موهومی غیر صفر مربوط به ثابت دی‌الکتریک فلز، انرژی‌شان کاهش پیدا می‌کند؛ اما اگر سطح دارای ناصافی باشد، پلاسمون پلاریتون‌های سطحی علاوه بر جذب توسط فلز، به خاطر پراکندگی ناشی از ناصافی‌ها به فضای آزاد هم منعکس می‌شوند که این نیز منجر به کاهش طول انتشار آنها خواهد شد [۹]. امروزه با پیشرفت‌های فناوری نانو، فوتوکاتدهای مبتنی بر پلاسمون‌های سطحی مورد توجه خاص محققان و مهندسان قرار گرفته‌اند. در بین نانو ساختارهای پلاسمونی مختلف، ساختارهای پلاسمونی مبتنی بر فلزات نقره و طلا به دلیل خواص منحصر به فرد اپتیکی و الکترونیکی که مربوط به تشدید پلاسمون‌های سطحی است، بسیار مورد توجه بوده‌اند [۱۰]. به‌عنوان مثال رابرت و همکارانش در سال ۲۰۱۰، با تحریک پلاسمون‌ها از طریق طلا در یک ساختار فوتوکاتد، توانستند شدت نور را در ناحیه فعال به میزان ۱۸ برابر افزایش دهند [۱۱]. لی و همکارانش در سال ۲۰۱۳، با به‌کارگیری نانوحفره‌هایی در مس، توانستند میزان جذب نور را در طول موج ۸۰۰ nm افزایش دهند [۱۲]. در سال ۲۰۱۷ گروهی دیگر ساختاری متشکل از نانو کواک‌هایی به صورت حلقه‌های تناوبی هم مرکز در سطح فلز پیشنهاد دادند. مزیت این ساختار ماهیت تقارن آن است که وابستگی به نوع قطبش نور فرودی در آن وجود ندارد و هر دو نوع قطبش S و P دارای پاسخ یکسان خواهند بود، حتی نور با قطبش دایروی نیز امکان جفت‌شدگی به پلاسمون‌های سطحی را خواهد داشت [۱۳].

با توجه به اثرات افزایشی پلاسمونیک در افزایش بازدهی ساختارهای فوتوکاتدی و بهبود عملکرد آنها، در این مقاله با ترکیب فلز طلا و نیمه‌هادی گالیوم آرسناید، یک فوتوکاتد ارتقاء یافته بر پایه نانوتوری‌های پلاسمونی جدید با بازدهی بالا ارائه شده است. در ساختار مورد نظر سعی شده با بهره‌گیری از مزیت‌های فلز و نیمه‌هادی عملکرد فوتوکاتد تا حد امکان بهبود داده شود. لایه‌نشانی مواد فلزی برای ایجاد یک سری نانوتوری‌های متناوب در سطح فلز انجام می‌گیرد، که در آن مدهای پلاریتون‌های پلاسمون سطحی برانگیخته می‌شوند. با استفاده از مهندسی سطح و طراحی نانو ساختار مورد نظر نشان داده شده است که امکان مدیریت نور و جفت‌شدگی دقیق با این روش وجود دارد و می‌توان ساختاری طراحی کرد که در طول موج (و یا طول موج‌های) خاصی برای کار دستگاه، تشدید

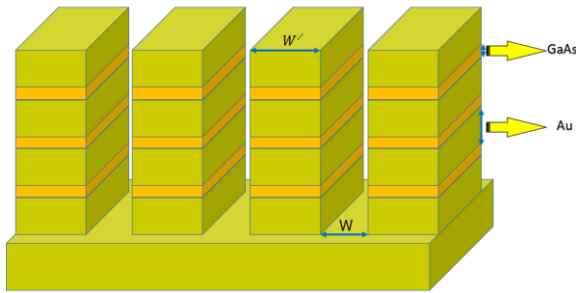
مهم‌ترین قسمت PMT، فوتوکاتد است که عملکرد دستگاه را از نظر حساسیت به فوتون تعیین می‌کند [۴]. بازده کوانتومی، حساسیت، پاسخ طیفی، پاسخ زمانی و یکنواختی از مهم‌ترین کمیت‌های فوتوکاتدها هستند و برحسب کاربرد مورد توجه قرار می‌گیرند. تاکنون ساختارهای متنوعی توسط محققان ارائه شده است که هر کدام به نوعی سعی در افزایش بازدهی تکثیرکننده نوری داشته‌اند [۵-۷].

در فوتوکاتدی که تحت تابش نور قرار گرفته است به شرطی که فوتون‌های تابشی انرژی کافی برای عبور از تابع کار کاتد را داشته باشند، الکترون‌ها از سطح جدا می‌شوند [۱]. این اصل ساده پایه‌ی ایجاد پرتو الکترونی یا همان پدیده گسیل الکترون است. می‌توان پدیده گسیل الکترون را به سه مرحله (۱) جذب فوتون، (۲) انتقال الکترون به سطح، (۳) عبور از سد فلز-خلأ تقسیم‌بندی کرد. تلفات انرژی در هر یک از این سه مرحله رخ می‌دهد و باعث کاهش بازدهی کوانتومی فلز می‌شود. در مرحله اول، تنها بخش جذب‌شده نور فرودی مهم است، از این رو عبور و بازتاب فوتون، بازدهی کوانتومی را کاهش می‌دهند. در مرحله دوم ممکن است فوتو الکترون‌ها به واسطه برخورد با دیگر الکترون‌ها (پراکندگی الکترونی) یا با شبکه (پراکندگی فونون) انرژی از دست بدهند. در نهایت سد پتانسیل در سطح از فرار برخی الکترون‌ها جلوگیری می‌کند. تلفات انرژی توصیف‌شده برای مواد گوناگون متفاوت است.

مواد مورد استفاده در فوتوکاتدها از نوع نیمه‌هادی یا فلز است. در میان انواع فوتوکاتدهای نیمه‌هادی، فوتوکاتدهای مبتنی بر GaAs به دلیل مزایایی چون بازده کوانتومی بالا، پاسخ جذبی در طول موج‌های بلند و جریان تاریکی پایین، گزینه مناسبی برای استفاده در آشکارسازهای فرابنفش، منابع تولید الکترون، لامپ‌های تقویت‌کننده تصویر، میکروسکوپ‌های الکترونی و سلول‌های خورشیدی است. از آنجا که گاف انرژی GaAs برابر ۱/۴ الکترون‌ولت است، این ماده در بازه طول موج مرئی دارای جذب نسبتاً خوبی هست [۳].

در چند سال اخیر پلاسمون پلاریتون‌های سطحی^۱ (SPP) از جمله گزینه‌های بسیار مناسب برای تله نانومتری نور مورد توجه بوده‌اند. با تنظیم خواص پلاسمون‌های سطحی، از طریق کنترل هندسه نانو ساختارها، می‌توان جذب نور را در طول موج‌های انتخاب شده تا حد زیادی افزایش داد [۸]. در یک تعریف کلی می‌توان گفت که پلاسمون پلاریتون‌های سطحی، نوسانات دسته جمعی الکترون‌های آزاد سطح فلز هستند که تحت تأثیر یک موج الکترومغناطیسی با زاویه فرود و فرکانس خاصی قرار گرفته‌اند.

¹ Surface Plasmon Polariton



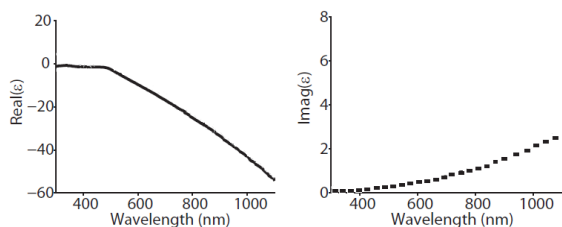
شکل (۳): شمای سه بعدی از نانو توری طراحی شده مرکب گالیوم آرسناید و طلا.

به منظور تحلیل رفتار نوری ساختار و محاسبه پروفایل میدان‌های الکترومغناطیسی از روش عددی تفاضل محدود در حوزه زمان با گام‌های مکانی Δz (۱ nm) و گام‌های زمانی $\Delta t = \Delta z/2c$ استفاده شده که در آن c سرعت انتشار نور در فضای آزاد است [۱۴]. همچنین به دلیل تناوبی بودن ساختار پیشنهادی، در راستای افقی از شرایط مرزی تناوبی و در راستای عمودی از شرایط مرزی لایه کاملاً همسان^۲ استفاده شده است. برای تحریک ساختار از منبع نوری موج تخت در بازه طول موج ۴۰۰ الی ۹۰۰ نانومتر استفاده شده است.

در ساختار پیشنهادی، ثابت دی‌الکتریک طلا بر اساس مدل درود طبق رابطه

$$\epsilon_{Au} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \quad (1)$$

در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. در این رابطه ω فرکانس زاویه‌ای، ω_p فرکانس پلاسما و γ زمان واهلش الکترون‌ها در فلز است. شکل (۴) قسمت‌های حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک طلا را نشان می‌دهد. علاوه بر این مشخصات ثابت دی‌الکتریک گالیوم آرسناید و نمودار مربوط به آن را می‌توان در مرجع [۱۶] مشاهده کرد.



شکل (۴): بخش‌های حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک طلا بر حسب مدل درود [۱۷].

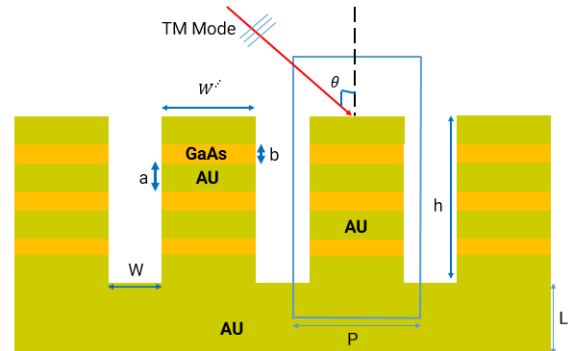
۳. مبانی نظری

هنگامی که یک موج نوری بر روی ساختار نوری پراش فرود

پلاسمونی ایجاد شده و باعث ارتقای عملکرد فوتوکاتد شود.

۲. معرفی ساختار

به طور کلی برای ایجاد پلاسمون سطحی بر روی سطح فلز به طراحی شبکه‌ای از شیارهای منظم با عمق، عرض و تناوب مشخص بر روی سطح فلز نیاز است. بسته به مقدار پارامترهای طراحی و نوع فلز، شرط تشدید و تولید پلاسمون‌های سطحی در طول موج‌های خاصی اتفاق می‌افتد. ساختار جدید طراحی شده در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. این فوتوکاتد از نانوتوری‌های متشکل از گالیوم آرسناید و طلا ساخته شده است. در ساختار پیشنهادی، عمق شیارها، h عرض شیارها، W عرض شیارها، W' عرض دندانها، L ضخامت زیر لایه و p تناوب است. هر دندان از چهار لایه طلا با ضخامت‌های 50 nm و سه لایه گالیوم آرسناید با ضخامت‌های 10 nm تشکیل شده است. در این ساختار، نور فرودی تحت زاویه θ به سیستم تابیده و باعث تشدید پلاسمون پلاریتون‌های سطحی در مرزهای فلز با گالیوم آرسناید و همچنین فلز با هوا می‌شود. نور جفت شده از سطح صاف فلز وارد شیارها شده و در لبه‌های تیز شیار به پلاسمون تبدیل می‌شوند که حاوی تمامی فرکانس‌های فوریه مورد نیاز برای تطبیق تکانه هستند. پلاسمون‌هایی که بر روی دیواره‌های شیار منتشر می‌شوند را می‌توان در چارچوب پلاسمون پلاریتون‌های سطحی که در داخل موج‌بر فلز-عایق - فلز^۱ (MIM) منتشر می‌شود، توصیف کرد. بستن یک انتهای موج‌بر MIM در فاصله h مانند شکل (۲) منجر به تشدید گزینشی پلاسمون‌ها در شیارها می‌شود. در این حالت می‌توان عمق شیار را طوری تنظیم کرد که پلاسمون‌های منتشر شده در سطح بالا با پلاسمون‌های منعکس شده از کف شیار به طور مخرب تداخل داشته و در نتیجه منجر به جذب کامل شود. در طراحی ساختار مورد نظر، جهت دستیابی به شرط تشدید پلاسمونیک، باید شرط $W < P < \lambda$ برقرار باشد.



شکل (۲): شمای عرضی از نانو توری طراحی شده مرکب گالیوم آرسناید و طلا.

^۲ Perfectly Matched Layer (PML)

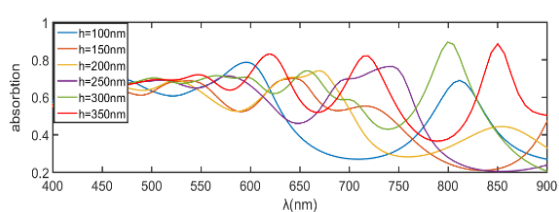
^۱ Metal - Insulation - Metal

است. در نتیجه رابطه (۳) را برای موج تخت می توان به صورت رابطه (۴) نوشت:

$$A = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha_{abs}(\lambda) d\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (4)$$

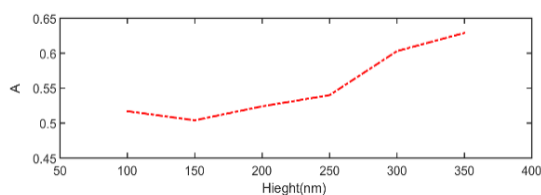
حل معادله (۴) نشان می دهد که میزان جذب برای حالت غیر مسطح و مسطح به ترتیب برابر با ۰/۵۲۴ و ۰/۴۰۸ است، و جذب حالت غیر مسطح نسبت به مسطح به میزان ۲۹ درصد افزایش پیدا کرده است.

محاسبات فوق برای عرض ۴۰ nm و تناوب ۴۰۰ nm و ارتفاع های مختلف نانو ساختارهای گالیوم آرسناید تکرار شد و میزان جذب ساختارهای فوق بر حسب ارتفاع های مختلف نانو ساختارهای گالیوم آرسناید در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): نمودار طیف جذب ساختار برای ارتفاع های مختلف گالیوم آرسناید غیر مسطح (نانوتوری).

با توجه به رابطه (۴)، میزان جذب کل (A) برای ارتفاع های مختلف ساختار نانوتوری گالیوم آرسناید در شکل (۷) نمایش داده شده است. لذا از این طریق می توان میزان جذب کل (A) هر ساختار را محاسبه و با یکدیگر مقایسه کرد.



شکل (۷): نمودار میزان جذب کل (A) برای ارتفاع های مختلف غیر مسطح (نانوتوری).

همان طور که در شکل (۷) مشاهده می شود، میزان جذب کل ساختار نانوتوری گالیوم آرسناید از ارتفاع ۱۵۰ nm به بعد با افزایش ارتفاع، افزایش یافته است. دلیل این امر را می توان ناشی از افزایش سطح در نانو ساختارها، نسبت سطح به حجم و همچنین برقراری بهتر شرط تشدید در شیارهای نانوتوری دانست. این امر از نمودارهای شکل (۶) قابل مشاهده است، به طوری که با افزایش ارتفاع، قله های بلندتری تشکیل شده است.

می آید، پلاسمون پلاریتون های سطحی در سطح مشترک فلز - دی الکتریک تحریک می شوند. با حل معادلات ماکسول، روابط پاشندگی در سطح مشترک فلز - دی الکتریک و همچنین در لایه فلز - دی الکتریک - فلز محاسبه و با استفاده از آن روابط می توان شرایط تحریک پلاسمون پلاریتون ها را برای ساختار مورد نظر به دست آورد [۱۹-۱۸].

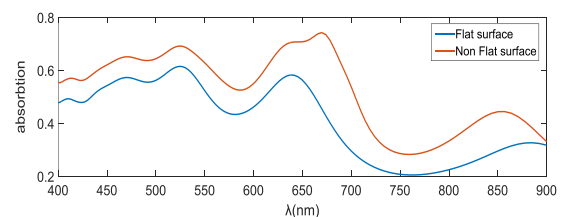
بازدهی یک فوتوکاتد نیز از رابطه زیر به دست می آید.

$$Y(h\nu) = \frac{f(1-R_{hv})}{1+1/\alpha_{hv}L_D} \quad (2)$$

که در آن f احتمال فرار الکترون، R_{hv} بازتاب ماده فوتوکاتد برای فوتون فرودی، L_D طول پخش الکترون و α_{hv} ضریب جذب فوتوکاتد است [۲۰].

۱-۳. بررسی ساختار مسطح و غیرمسطح (نانوتوری) GaAs

فوتوکاتد نیمه هادی گالیوم آرسناید در دو ساختار مسطح و غیرمسطح انتخاب شده و عملکرد آنها بررسی شده است (در این حالت فلز طلا وجود ندارد). طیف جذبی این دو ساختار در شکل (۵) نشان داده شده است. حالت مسطح دارای سطح تخت با ضخامت ۲۰۰ nm و حالت غیرمسطح متشکل از شیارهایی با مشخصات $h=200\text{ nm}$ و $W=40\text{ nm}$ ، $P=400\text{ nm}$ است. همان طور که مشاهده می شود جذب ساختار غیرمسطح (نانوتوری) از ساختار مسطح بیشتر است. این امر را می توان ناشی از شیارهای ایجاد شده بر روی سطح دانست، به طوری که شیارها نقش مشدد را برای نور فرودی دارند.



شکل (۵): نمودار طیف جذب ساختار مسطح (منحنی آبی) و غیر مسطح (منحنی قرمز) با $h=200\text{ nm}$.

سطح زیر منحنی جذب (A) به عنوان معیاری برای میزان جذب کل است و به صورت

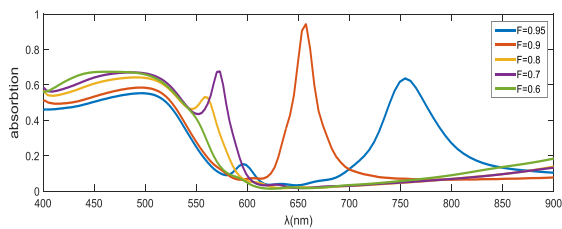
$$A = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha_{abs}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

نوشته شده و بهنجار به یک است. در رابطه (۳)، $\alpha_{abs}(\lambda)$ ضریب جذب تابع طول موج بدون بعد ساختار است، $S(\lambda)$ تابع توزیع طیف تابشی است که مقدار آن برای تابش موج تخت برابر با ۱

همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار Au در ارتفاع ۲۰۰ nm قله جذب تیزی در طول موج ۵۷۵ nm دارد که بیانگر ایجاد شرط پلاسمونیک در این ساختار است. در شکل (۹) هم افزایش میدان الکتریکی در شیار نسبت به دیگر نقاط کاملاً مشهود است.

۳-۳. ساختار مرکب طلا و گالیوم آرسناید

بر اساس شرایط ذکر شده بخش‌های قبل برای ایجاد پلاسمونیک، ساختاری که فقط از فلز تشکیل شده باشد، دارای جذب فوتون مناسبی است. اما به دلیل اینکه فلزات ذاتاً الکترون آزاد دارند، فوتوالکترون‌های تولیدی دارای عمق نفوذ کم‌تری هستند و این عامل می‌تواند عملکرد فوتوکاتد را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین در ادامه، در راستای ارتقا عملکرد الکترونی و اپتیکی از ساختارهای مرکب فلز و نیم‌رسانا استفاده شده است. در راستای طراحی ساختار بهینه، لازم است که پارامتر ضریب پوشش‌دهی F مورد بررسی و توجه قرار بگیرد. بنابراین، شبیه‌سازی ساختاری با ضرایب پوشش‌دهی مختلف انجام شد. در شکل (۱۱) طیف جذبی ساختار Au-GaAs برای ضرایب پوشش‌دهی مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل، ساختار بهینه از نظر قله جذب، با $F=0.9$ و $P=400$ nm و $W=360$ nm مطابقت دارد.

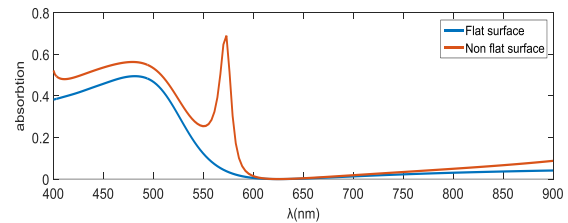


شکل (۱۱): طیف جذب ساختار Au-GaAs برای Fهای مختلف.

در شکل (۱۲) میزان جذب ساختار Au و Au-GaAs نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر دو ساختار دارای قله‌ی جذب تیزی هستند که بیانگر ایجاد شرط تشدید پلاسمونی قوی در طول موج‌های تقریبی ۷۲۰ nm برای Au و ۶۶۰ nm برای Au-GaAs است. علاوه بر این در ساختار Au-GaAs، قله‌ی جذب بلندتر است. این جذب قوی ایجاد شرط پلاسمونیک اضافی در دندان‌های نانوتوری را نشان می‌دهد طوری که موج بر MIM (Au-GaAs-Au) تشکیل شده و باعث افزایش جذب می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی FDTD، می‌توان میزان ارتقا میدان در ساختار نانوتوری را مشخص کرد. با استفاده از پروفایل میدان، شدت ارتقا میدان در مکان‌های مختلف نانوتوری قابل مشاهده است. پروفایل میدان برای ساختارهای Au و Au-GaAs به ترتیب در طول موج‌های ۷۲۰ nm و ۶۶۰ nm در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است.

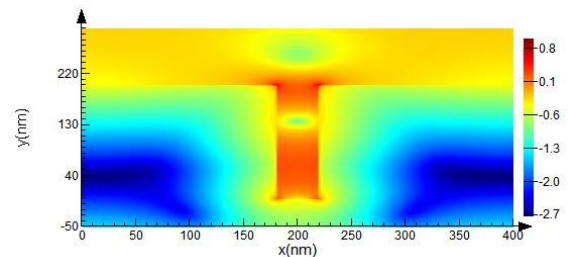
۲-۳. بررسی ساختار مسطح و غیرمسطح (نانوتوری) طلا

در این بخش ساختاری بررسی می‌شود که زیرلایه و شیارهای آن از جنس طلا هستند. شکل (۸) طیف جذبی ساختار را برای دو حالت مسطح و غیرمسطح نشان می‌دهد. مشخصات حالت غیرمسطح عبارتند از: $h=200$ nm، $W=40$ nm، $P=400$ nm. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت به کارگیری نانوتوری طلا در ساختار، قله جذب با نیم پهنای ۲۰ nm در طول موج ۵۷۵ nm به وجود می‌آید که به دلیل تشدید پلاسمون‌ها است. اما در حالت مسطح به دلیل عدم تشکیل شرط تطبیق تکانه موج فرودی با تکانه موج پلاسمون، تحریک پلاسمونی رخ نمی‌دهد و در نتیجه قله جذبی تشکیل نمی‌شود.



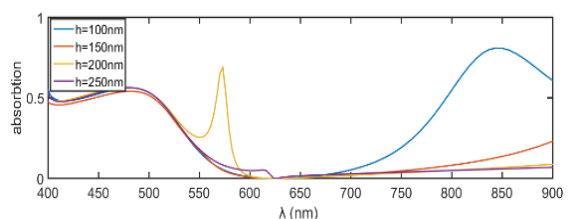
شکل (۸): نمودار طیف جذب ساختار طلا، مسطح (آبی) و غیرمسطح (قرمز) برای $h=200$ nm.

شکل (۹) پروفایل میدان را در طول موج پلاسمونی ۵۷۵ nm نشان می‌دهد.



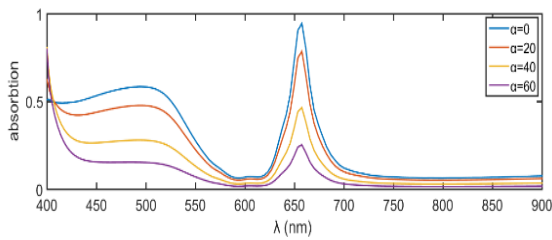
شکل (۹): پروفایل میدان الکتریکی ساختار غیرمسطح طلا در طول موج ۵۷۵ nm.

شکل (۱۰) میزان جذب ساختار را برای ارتفاع‌های مختلف طلا برای عرض ۴۰ nm و تناوب ۴۰۰ nm نشان می‌دهد.

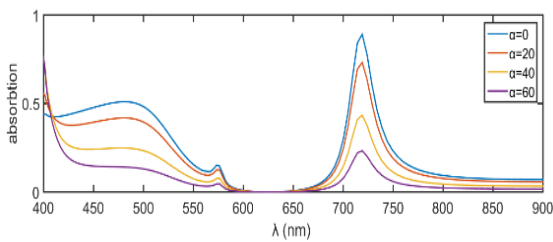


شکل (۱۰): نمودار طیف جذب ساختار برای ارتفاع‌های مختلف طلا.

ساختارهای پیشنهادی از جنس Au-GaAs و Au تحت زوایای تابش مختلف با قطبش TM قرار گرفته و پروفایل جذب محاسبه گردید. نتایج در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، جذب ساختار Au-GaAs با افزایش زاویه تابش، کاهش یافته و در زاویه ۶۰ درجه کم‌ترین مقدار خودش را دارد. همچنین برای ساختار Au مطابق با شکل (۱۶) جذب تابش فرودی با افزایش زاویه تابش، همانند ساختار Au-GaAs کاهش یافته است.



شکل (۱۵): نمودار طیف جذب ساختار Au-GaAs در زوایای تابش مختلف.



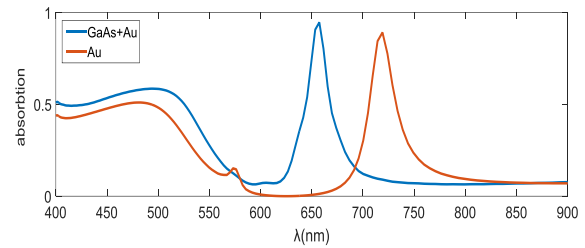
شکل (۱۶): نمودار طیف جذب ساختار Au در زوایای تابش مختلف.

با توجه به دو شکل (۱۵) و (۱۶)، دلیل وابستگی شدت جذب به زاویه، عدم تقارن زاویه‌ای ساختار است. با تغییر زاویه نور فرودی، میزان تطبیق تکانه نور فرودی با بردار موج پلاسمون سطحی تغییر کرده و بر روی شدت جذب نور تأثیر می‌گذارد.

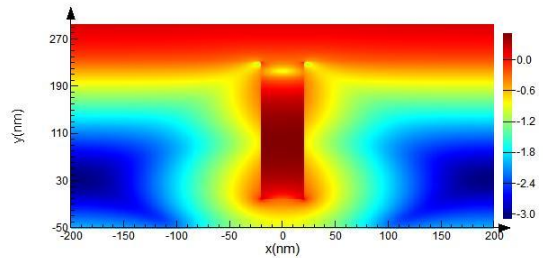
به‌طور کلی مشخص است که پاسخ پلاسمون به شدت وابسته به اندازه، هندسه ساختار و ماده است. در واقع تغییر شکل و یا گام نانوتوری، اثر قابل‌توجهی بر روی طول‌موج و شکل موج پلاسمون تشدیدی دارد.

۴. نتیجه‌گیری

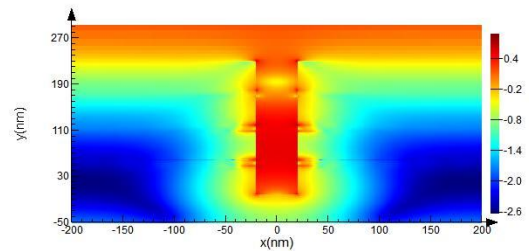
نوع ساختار و جنس ماده از عوامل مهم و تأثیرگذار در عملکرد فوتوکاتد و به‌ویژه بازدهی آن است. مواد فلزی همچون طلا به دلیل خواص پلاسمونیک و سرعت الکترونی بالا گزینه مناسبی برای استفاده به‌عنوان ماده فوتوکاتد هستند، اما پراکندگی الکترونی در این مواد یک ضعف به‌شمار می‌آید. از طرفی نیمه‌هادی گالیوم آرسناید دارای خواص اپتیکی مناسب است، اما



شکل (۱۲): نمودار طیف جذب ساختار Au (قرمز) و Au-GaAs (آبی).



شکل (۱۳): پروفایل میدان الکتریکی ساختار Au در طول موج ۷۲۰ nm.



شکل (۱۴): پروفایل میدان الکتریکی ساختار مرکب Au-GaAs در طول موج ۶۶۰ nm.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شدت میدان در شیاری نانوتوری دو ساختار چندین برابر افزایش یافته، علاوه بر این در شکل (۱۴) شدت میدان در موج‌بر MIM (Au-GaAs-Au) افزایش یافته است.

با استفاده از رابطه (۴)، مشاهده می‌شود که میزان جذب کل (A) برای ساختار مرکب GaAs-Au و ساختار Au به ترتیب برابر با ۰/۲۶۴ و ۰/۲۲۷ است، یعنی میزان جذب کل (A) برای ساختار مرکب GaAs-Au نسبت به ساختار Au به میزان ۱۶/۱ درصد افزایش پیدا کرده است.

با توجه به نتایج و شبیه‌سازی‌ها، مشخص است که ساختار مرکب Au-GaAs به دلیل خواص اپتیکی بهتر همچون جذب بیشتر گزینه مناسبی برای فوتوکاتد است. این ساختار مرکب نسبت به ساختارهای مجزای گالیوم آرسناید و طلا بازده و پاسخ زمانی بهتری دارد.

۳-۵. بررسی اثر زاویه تابش

جهت بررسی اثر زاویه تابش و مشخص کردن مقدار بهینه آن،

- [8] J. A. Schuller, E. S. Barnard, W. Cai, Y. C. Jun, J. S. White, and M. L. Brongersma, "Plasmonics for extreme light concentration and manipulation," *Nature materials*, vol. 9, pp. 193-204, 2010.
- [9] J. Zhang, L. Zhang, and W. Xu, "Surface plasmon polaritons: physics and applications," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 45, p. 113001, 2012.
- [10] A. Polyakov, K. Thompson, C. Senft, S. Dhuey, B. Harteneck, X. Liang, and H. A. Padmore, "Photocathode performance improvement by plasmonic light trapping in nanostructured metal surfaces," In *Nanophotonic Materials*, vol. 8094, p. 809407, 2011.
- [11] R. C. Word, T. Dornan, and Könenkamp, "Photoemission from localized surface plasmons in fractal metal nanostructures," *Applied Physics Letters*, vol. 96, p. 251110, 2010.
- [12] R. K. Li, H. To, G. Andonian, J. Feng, A. Polyakov, C. M. Scoby, and P. Musumeci, "Surface-plasmon resonance-enhanced multiphoton emission of high-brightness electron beams from a nanostructured copper cathode," *Physical review letters*, vol. 110, p. 074801, 2013.
- [13] S. Foroutan, H. Z. Dizaji, and A. Riahi, "Plasmon resonance-enhanced photocathode by light trapping in periodic concentric circular nanocavities on gold surface," *Optik*, vol. 138, pp. 223-228, 2017.
- [14] Y. Shahamat, A. Ghaffarinejad, and M. Vahedi, "Plasmon induced transparency and refractive index sensing in two nanocavities and double nanodisk resonators," *Optik*, vol. 202, p. 163618, 2020.
- [15] Prangma, "Local and dynamic properties of light interacting with subwavelength holes," PhD, Twente, Enschede, 2009.
- [16] S. Vassant, et al., "Optical control of THz reflectivity with surface waves," *Terahertz Emitters, Receivers, and Applications II*, International Society for Optics and Photonics, vol. 8119, 2011.
- [17] A. Derkachova, K. Kolwas, and I. Demchenko, "Dielectric function for gold in plasmonics applications: size dependence of plasmon resonance frequencies and damping rates for nanospheres," *Plasmonics*, vol. 11, pp. 941-951, 2016.
- [18] T. Iqbal, S. Khalil, M. Ijaz, K. N. Riaz, M. I. Khan, M. Shakil, and S. Afsheen, "Optimization of 1D plasmonic grating of nanostructured devices for the investigation of plasmonic bandgap," *Plasmonics*, vol. 14, pp. 775-783, 2019.
- [19] K. Eyvazi and M. A. Karami, "Optimizing Plasmonic Color Filter for Imaging Sensor," *Journal of Applied Electromagnetism*, vol. 7, pp. 105-112, 2019. (In Persian)
- [20] J. Qiao, X. Li, J. Niu, and Y. Gao, "Quantum Yield of Reflection Mode Varied Doping GaN Photocathode," In *Matec Web of Conferences*, EDP Sciences, vol. 67, p. 02019, 2016.

امکان برانگیختگی پلاریتون پلاسمون‌ها در آن وجود ندارد و همچنین دارای سرعت الکترونی پایین است. لذا ترکیب این دو ماده منجر به ظهور خواص اپتیکی و الکترونی مناسب در ساختار می‌شود. در نتیجه ساختار نانوتوری پلاسمونیک متشکل از مواد مرکب گالیوم آرسناید و طلا پیشنهاد و خواص اپتیکی آن مورد مطالعه قرار گرفت به طوری که این ساختار دارای ۱۶/۱ درصد جذب بیشتر نسبت به نانوتوری طلا بوده و در نهایت عملکرد بهتری در آشکارساز خواهد داشت.

در این پژوهش، فوتوکاتد مورد استفاده در یک آشکارساز تکثیرکننده نوری مورد مطالعه قرار گرفت. این قابلیت مختص با آشکارساز نوری نبوده و قابل توسعه به فوکاتدهای مورد استفاده در سایر سامانه‌ای اپتوالکتریکی است و می‌تواند عملکرد آنها را نیز بهبود دهد.

۵. مراجع

- [1] S. O. Flyckt, "Photomultiplier tubes: principles and applications," *Photonis*, 2002.
- [2] K. K. Hamamatsu, "Photomultiplier tube handbook," *Electron Tube Division*, 2006.
- [3] C. Feng, Y. Zhang, J. Liu, Y. Qian, X. Liu, F. Shi, and H. Cheng, "Effect of graded bandgap structure on photoelectric performance of transmission-mode Al_xGa_{1-x}As/GaAs photocathode modules," *Applied Optics*, vol. 56, pp. 9044-9049, 2017.
- [4] K. Matsuoka, "Expression for the angular dependence of the quantum efficiency of a thin multi-alkali photocathode and its optical properties," *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, vol. 12, p. 123H0, 2018.
- [5] S. Xia, L. Liu, and Y. Kong, "Research on quantum efficiency and photoemission characteristics of negative-electron-affinity GaN nanowire arrays photocathode," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 48, p. 306, 2016.
- [6] X. Zhangyang, L. Liu, Z. Lv, F. Lu, and J. Tian, "Efficient light trapping in GaN inclined nanorod and nanohole arrays for photocathode applications," *Optical Materials*, vol. 101, p. 109747, 2020.
- [7] L. Liu, F. Lu, J. Tian, X. Zhangyang, and Z. Lv, "The effective light harvesting performance of graded compositional Al_xGa_{1-x}N nanocone arrays photocathode for ultraviolet detector—A numerical investigation and simulation," *International Journal of Energy Research*, vol. 44, pp. 5779-5790, 2020.