

طراحی و شبیه سازی یک آشکارساز نوری مبتنی بر نقاط کوانتومی با اتصالات انتخابگر برای تشخیص همزمان چند طول موج نوری

حمید حیدرزاده^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷</p>	<p>در این کار، یک آشکارساز نوری جدید مبتنی بر نقاط کوانتومی با اتصالات دارای قابلیت انتخاب حامل های تولید شده، برای تشخیص همزمان چند طول موج نوری معرفی و شبیه سازی شده است. در طراحی لایه فعال از نقاط کوانتومی با اندازه های مختلف استفاده گردیده است. هر یک از اندازه ها، برای تشخیص یک طول موج خاص تخصیص داده شده است. در این آشکارساز برای تفکیک حامل های تولیدی توسط هر طول موج، اتصالات انتخابگر انرژی با استفاده از دیواره های کوانتومی طراحی گردیده است. به کمک نرم افزار کامسول یک ساختار سه بعدی شامل یک آرایه 4×4 از نقاط کوانتومی بزرگ و یک آرایه 3×3 از نقاط کوانتومی کوچک به صورت تودرتو شبیه سازی شده و ترازهای انرژی و توابع موج برای آن ها استخراج شده است. سپس به کمک نرم افزار متلب از روی ترازهای انرژی و توابع موج ویژگی های اپتیکی مانند ضریب جذب محاسبه شده است. تکنیک معرفی شده آشکارسازهای نوری جدیدی را معرفی می کند که می توانند تشخیص همزمان چندین طول موج را با یک افزاره انجام دهند. برای تشخیص طول موج های بزرگ تر، گذارهای درون نواری و برای تشخیص طول موج های کوچک تر، گذارهای بین نواری کوانتومی مورد استفاده قرار گرفته است. در این کار اتصالات مناسب با استفاده از دیواره های کوانتومی طراحی و به ناحیه فعال با نقاط کوانتومی مناسب متصل شده اند. ضریب جذب نوری برای آرایه ای از نقاط کوانتومی با دو اندازه مختلف شبیه سازی شده است. لازم به ذکر است که مسیرهای جریان مستقل برای هر طول موج طراحی شده است.</p>
<p>واژگان کلیدی: آشکارساز نوری، نقاط کوانتومی، تشخیص همزمان، اتصالات هوشمند، طول موج، اپتوالکترونیک.</p>	

۱- مقدمه

امروزه حسگرها، آشکارسازها، و سایر ادوات نوری به عنوان بخش مهمی از سیستم های نوری مورد توجه قرار گرفته اند [۱-۴]. فناوری آشکارسازهای نوری چند طول موجی در چندین کاربرد بسیار مهم مانند کاربردهای نظامی، تصویربرداری پزشکی، و کاربردهای فضایی استفاده می شوند [۵ و ۶]. یکی از روش هایی که برای تشخیص همزمان چند طول موج نوری صورت گرفته، استفاده از چندین آشکارساز به صورت همزمان بوده است [۷]. روش دیگر، استفاده از یک آشکارساز پهن باند به همراه فیلتر

نوری بوده که طول موج های ناخواسته فیلتر می شوند [۸ و ۹]. بنابراین، این نوع سیستم ها به مجموعه های آشکارساز پیچیده، سیستم های خنک کننده مجزا، قطعات الکترونیکی اضافی و عناصر نوری اضافی (عدسی ها، منشورها، گریتنینگ ها و تقسیم کننده های پرتو و غیره) نیاز دارند [۷]. علاوه بر این، این سیستم های آشکارساز، شامل تنظیمات نوری ظریفی هستند که منجر به سخت افزار کنترلی پیشرفته می شوند [۷]. در نهایت، این عوارض باعث افزایش وزن و هزینه سیستم آشکارساز می شوند. بنابراین استفاده از یک آشکارساز نوری با توانایی تشخیص همزمان چندین

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: heidarzadeh@uma.ac.ir
۱. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی

کوانتومی بررسی شده است. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی آشکارسازهای نوری مبتنی بر ساختارهای کوانتومی صورت گرفته که قابلیت تشخیص طول موج‌های مختلف مانند رنج طیفی مادون قرمز و فرابنفش را دارند. به عنوان مثال، یک آشکارساز مادون قرمز آشکار کوانتومی در [۳۲] انجام یافته است. تغییر خصوصیات الکترونیکی افزاره‌های مبتنی بر ساختارهای کوانتومی با مدیریت مواد، اندازه و اشکال آن‌ها، مزیت اصلی افزاره‌های مبتنی بر ساختارهای کوانتومی است [۳۳-۳۵]. به عنوان یک نمونه، فاصله اختلاف انرژی بین دو نوار در یک ساختار کوانتومی، محدوده فرکانس نور ساطع شده یا جذب شده را تعیین می‌کند. علی‌رغم همه تحولات به دست آمده در تشخیص همزمان چند طول موجی، مشکل به صورت کامل حل نشده است. در این کار، یک آشکارساز نوری برای آشکار کردن همزمان چندین طول موج معرفی شده است که قادر به شناسایی همزمان طول موج‌های مختلف از طریق چندین مسیر جریان خروجی مستقل است. از اینرو طراحی آشکارساز و شبیه‌سازی آن یک پله بسیار مهم برای تحقق بخشیدن به آنهاست چرا که در هنگام ساخت تمام مشخصات ابعادی آن‌ها بایستی مشخص باشد.

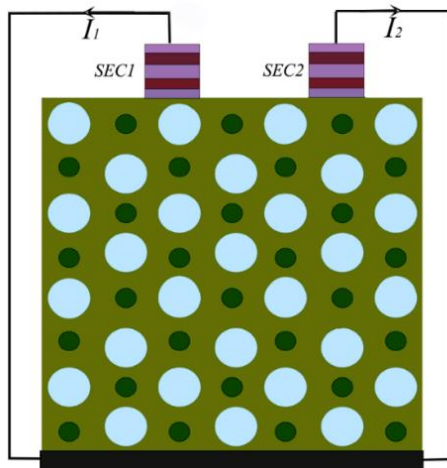
۲- ساختار پیشنهادی و روش شبیه‌سازی

در ساختارهای کوانتومی تشکیل نوارهای انرژی و مشخصات اپتیکی به شدت وابسته به ارتفاع سد، اندازه نقاط کوانتومی، و فاصله بین آن‌ها است. در این مقاله، برای طراحی یک آشکارساز نوری با قابلیت تشخیص همزمان چندین طول موج، از نقاط کوانتومی با اندازه‌های مختلف استفاده شده است. شماتیک اولیه طرح در شکل (۱) نمایش داده شده است. برای استخراج حامل‌های تولیدی توسط هر طول موج از یک اتصال انتخابگر انرژی استفاده شده است. مطابق شکل (۱)، اتصال انتخابگر اول (SEC1) و اتصال انتخابگر دوم (SEC2) به ترتیب برای استخراج حامل‌های تولید شده از نوار انرژی مربوط به نقاط کوانتومی بزرگتر و کوچکتر اختصاص داده شده است که به ترتیب مسیرهای جریان مستقل (I_1) و (I_2) را تشکیل خواهند داد. لازم به ذکر است که اتصالات انتخابگر توسط سدهای دوگانه کوانتومی طراحی شده‌اند. برای اینکه عملکرد ساختار واضح‌تر بیان شود مکانیزم عملکرد مجموعه‌ی آشکارساز طراحی شده در شکل (۲) نشان داده شده است. در این ساختار ترازهای انرژی که در داخل سدهای دوگانه تشکیل

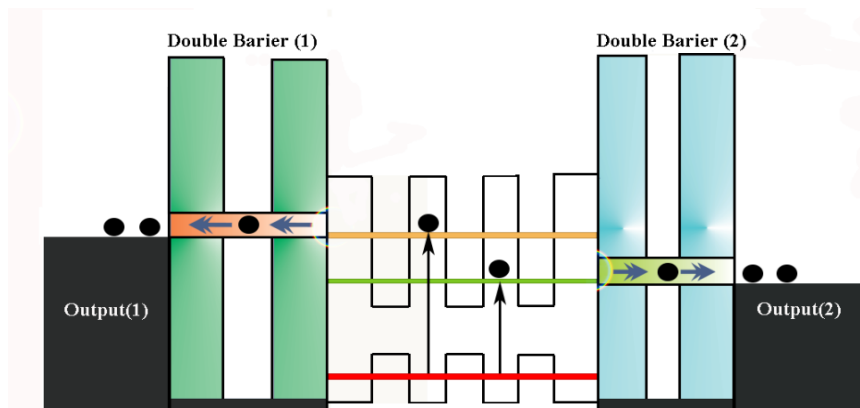
طول موج نوری می‌تواند راه حل خوبی در توسعه آشکارسازها باشد. با توجه به بازه‌ی طول موجی وسیع آشکارسازهای نوری از فرابنفش تا مادون قرمز، یکی از چالش‌های اساسی پیدا کردن ماده مناسب متناسب با طول‌موج نوری است [۱۰]. به عبارت دیگر برای آشکارسازی امواجی با طول موج خاص نیازمند نیمه‌هادی‌هایی با شکاف‌های انرژی متنوع هستیم [۱۱]. برای رفع این چالش، آشکارسازهای مبتنی بر نقاط کوانتومی به عنوان یک فناوری جالب در حوزه نانو تکنولوژی مورد توجه محققان قرار گرفته [۱۲] و نسل جدیدی از آشکارسازها با عنوان آشکارسازهای نوری کوانتومی به وجود آمده‌اند [۱۳-۱۴]. ایجاد ترازهای انرژی مناسب یک پارامتر بسیار مهم در سیستم‌های آشکارسازی بوده و به کمک ساختارهای کوانتومی می‌توان انرژی شکاف مؤثر مواد را تغییر داد [۱۵ و ۱۶]. امروزه به کمک تکنیک‌های مختلف می‌توان ساختارهای ناهمگن کوانتومی با قابلیت اثرات محصور شدگی را رشد داد [۱۷-۱۹]. امروزه نقاط کوانتومی در افزاره‌های مختلف مانند آشکارسازها، سلول‌های خورشیدی، لیزرهای نوری و سایر ادوات اپتوالکترونیکی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کنند [۲۰-۲۴].

گذارهای الکترونی به دو دسته درون‌نواری و بین‌نواری تقسیم بندی می‌شوند. در حالت گذار درون‌نواری، گذار الکترون از تراز انرژی در یک نوار به تراز در همان نوار صورت می‌گیرد، در حالی که در حالت بین‌نواری، گذار الکترون از تراز انرژی در یک نوار به تراز در یک نوار دیگر صورت می‌گیرد. برای آشکارسازهای مادون قرمز از گذارهای درون‌نواری و برای آشکارسازهای فرابنفش از گذارهای بین‌نواری می‌توان استفاده کرد [۲۵-۲۸]. انرژی گذار با ترازهای انرژی در هر چاه کوانتومی تعیین می‌شود و با تغییر ساختار قابل تنظیم هستند. در ساختارهای کوانتومی حامل‌ها در هر سه بعد محدود شده‌اند [۲۹]. با استفاده از ساختارهای کوانتومی، آشکارساز نوری مادون قرمز و فرابنفش کوانتومی در چندین کار انجام شده است [۳۰-۳۲]. ساختارهای مبتنی بر نقاط کوانتومی مزایای بسیاری در مقایسه با آشکارسازهای نوری مادون قرمز معمولی چاه کوانتومی دارند. پاسخ‌دهی بالاتر، عملکرد دمای بالاتر، باریکه با قابلیت نوار باریک از جمله آن‌هاست. به همین دلیل در این کار آشکارسازهای بر اساس نقاط

متوسط، فرکانس زاویه‌ای فوتون تابشی، عنصر ماتریس دوقطبی، انرژی حالت‌های اولیه، انرژی حالت‌های نهایی، نصف پهنای خط هستند. در واقع ساختار از دو قسمت اصلی، شامل نقاط کوانتومی به عنوان جاذب و سدهای دوگانه کوانتومی به عنوان انتخابگر حامل‌ها، تشکیل شده است. لازم به ذکر است که جنس نقاط کوانتومی از ماده سلنید سرب (PbSe) با انرژی شکاف ۰٫۲۷ الکترون ولت در داخل اکسید روی (ZnO) انتخاب شده است. همچنین اتصالات انتخابگر تشکیل شده از چاهی از جنس PbSe و دیواره‌هایی از جنس سولفید روی (ZnS) هستند. به عبارت دیگر حامل‌های تولیدی از طریق پدیده تونل‌زنی در داخل نقاط کوانتومی حرکت کرده و در نهایت از طریق تونل‌زنی از سد دوگانه اول به اتصال اول و از طریق تونل‌زنی از سد دوگانه دوم به اتصال دوم انتقال پیدا می‌کنند و جریان‌های مربوطه را ایجاد می‌کنند.



شکل ۱- ساختار پیشنهادی برای آشکارسازی همزمان چندین طول موج بوسیله‌ی ساختارهای کوانتومی با مسیر جریان مستقل



شکل ۲- مکانیزم عملکرد آشکارسازی همزمان چندین طول موج به صورت همزمان با استفاده از ساختارهای کوانتومی و اتصالات انتخابگر

شده است به حامل‌های مربوطه با انرژی یکسان اجازه عبور از آن را خواهند داد، و به حامل‌های دیگر اجازه عبور داده نخواهد شد. به عبارت دیگر، فوتون‌های تابشی با طول موج بزرگ‌تر (انرژی کم‌تر) الکترون‌ها را به نوار انرژی اول و فوتون‌های تابشی با طول موج کوچک‌تر (انرژی بزرگ‌تر) آن‌ها را به تراز بالاتر برده و هر کدام از حامل‌های تولیدی توسط اتصالات مربوطه استخراج خواهند شد و مسیر جریان مستقلی را ایجاد خواهند کرد.

در این کار، با استفاده از نرم‌افزار کامسول یک آرایه‌ای از نقاط کوانتومی شامل یک آرایه‌ی ۴×۴ از نقاط کوانتومی بزرگ و یک آرایه‌ی ۳×۳ از نقاط کوانتومی کوچک شبیه سازی شده و ترازهای انرژی و توابع موج برای آن‌ها استخراج گردیده است. معادله‌ی حاکم معادله شرودینگر سه بعدی و به صورت معادله (۱) می‌باشد.

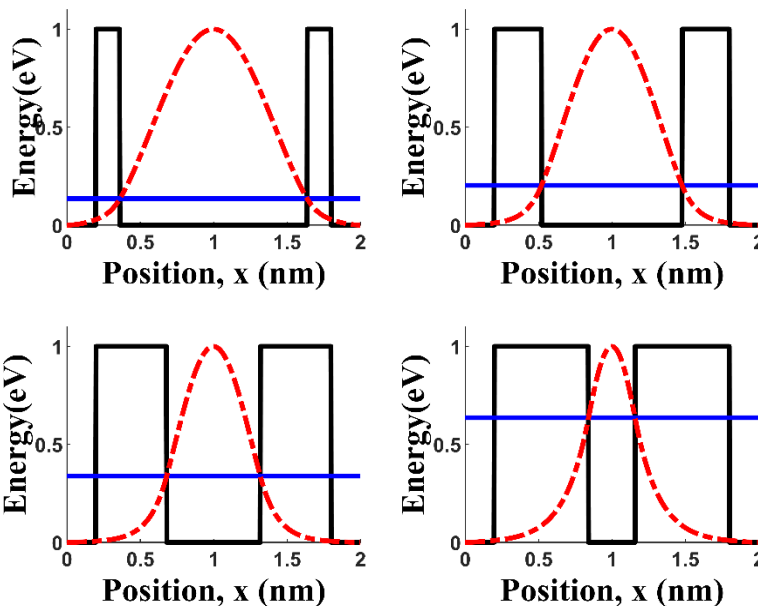
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m^*(x,y,z)} \nabla_{x,y,z}^2 + V(x,y,z) \right] \psi(x,y,z) = E \psi(x,y,z) \quad (1)$$

در این معادله، x, y, z مختصات مکانی و \hbar, m^*, V, E, ψ به ترتیب ثابت پلانک کاهش یافته، جرم موثر، پتانسیل، انرژی، و تابع موج مربوطه می‌باشند. بعد از حل این معادله با استفاده از ترازهای انرژی و توابع موج مربوطه به کمک نرم‌افزار متلب ضرایب جذب برای هر یک از انتقالات با استفاده از معادله (۲) محاسبه شده است.

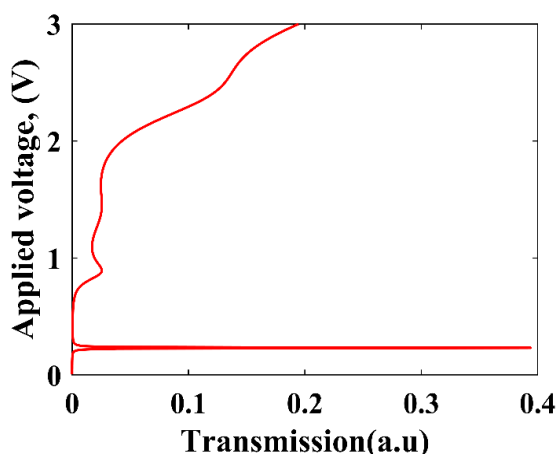
$$\alpha(\omega) = \frac{4\pi\omega^2}{V_0 \hbar c \epsilon_0 \sqrt{\epsilon_r}} \sum_{i,j} d_{ij} |f(E_i) - f(E_j)| \left(\frac{\gamma_{ij}}{\gamma_{ij} + (\omega - \omega_{ij})^2} \right) \quad (2)$$

در این جا، $i, j, \epsilon, \hbar, c, \epsilon_0, \epsilon_r, V_0, \omega, d_{ij}, E_i, E_j, \gamma$ به ترتیب عبارتند شماره‌ی حالت‌های اولیه، حالت‌های نهایی، بار الکترون، ثابت پلانک، سرعت نور، ثابت گذرده‌ی، حجم

می‌شود با تغییر ابعاد دیواره‌ی کوانتومی موقعیت تراز انرژی در داخل آن تغییر کرده است و با کم شدن پهنای چاه، تراز انرژی شکل گرفته در انرژی بالاتر تشکیل می‌شود. در واقع هدف اصلی ما از طراحی چنین ساختاری ایجاد ترازهای انرژی در سطوح مناسب برای دستیابی به یک اتصال هوشمند است. نتایج شکل (۳) نشان می‌دهد که چنین اتصالاتی را می‌توان با تنظیم ضخامت بدون تغییر ترکیب لایه‌ها طراحی کرد.



شکل ۳- ترازهای انرژی و توابع موج در داخل سد دوگانه کوانتومی با ابعادهای مختلف



شکل ۴- احتمال عبور بر حسب ولتاژ اعمالی برای یک اتصال انتخابگر مبتنی بر سد دوگانه کوانتومی

۳-۲- ناحیه اکتیو با نقاط کوانتومی برای آشکارسازی
طبق اثر محصور شدگی کوانتومی، برهم‌کنش بین سطوح انرژی امکان‌پذیر بوده و انتقال درون نواری با پهنای نوار باریک همراه با قدرت انتقال بالا وجود دارد. طول موج

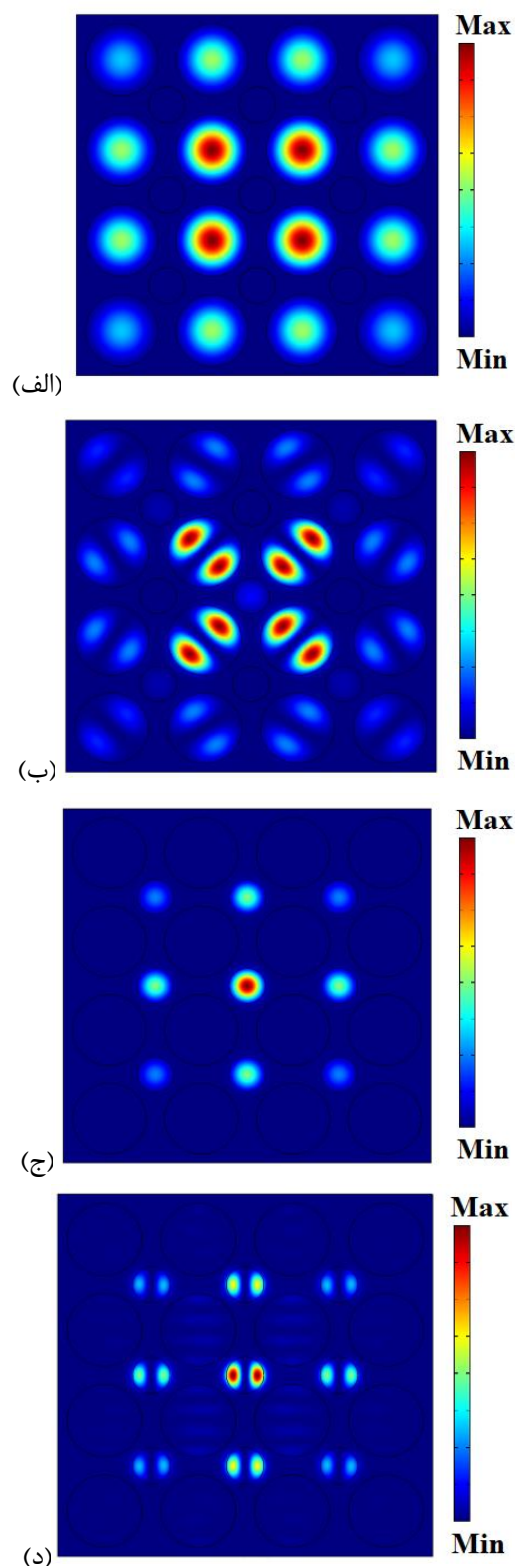
۳- نتایج شبیه‌سازی و بحث

۳-۱- اتصال انتخابگر انرژی به کمک سدهای

پتانسیل

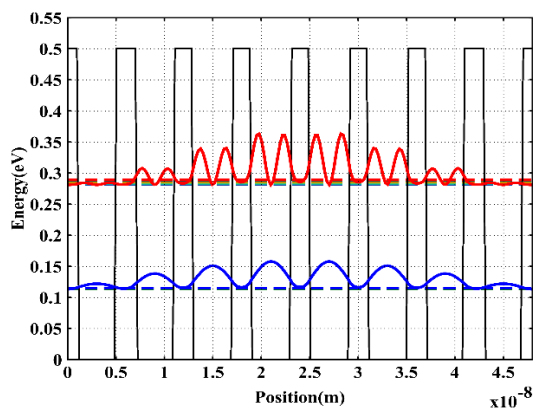
در این کار یک ساختار متقارن سد پتانسیل دوگانه به عنوان اتصال انتخابگر انرژی برای استخراج حامل‌های تولیدی توسط تابش نور در نظر گرفته شده است. در شکل (۳) ترازهای انرژی و توابع موج در داخل سد پتانسیل دوگانه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده

طراحی یک آشکارساز نوری برای تشخیص چندین طول موج نیازمند این است که حامل بار تولیدی در اثر تابش در انرژی مورد نظر به اتصال مربوطه استخراج شود. در این کار ساختار آشکارساز به شکلی طراحی شده است که الکترون تولید شده در هر یک از سطوح انرژی توسط اتصالات مربوطه استخراج می‌شود. به عبارت دیگر، چنین ساختاری مانند یک فیلتر برای سطوح انرژی عمل خواهد کرد. به عنوان یک نمونه طیف انتقال ساختار طراحی شده در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طوری که این شکل نشان می‌دهد در داخل محدوده سد طیف عبوری، یک پیک در یک انرژی خاص نمایان شده است. این پیک به اتصال انتخابگر اجازه خواهد داد تا حامل مورد نظر را به خروجی مورد نظر استخراج کند. به عبارت دیگر، این شکل احتمال تونل‌زنی از سد دوگانه را نشان می‌دهد. حامل‌های تولید شده در هر یک از نقاط کوانتومی از طریق پدیده تونل‌زنی به اتصال مربوطه می‌شوند.



شکل ۵- نمایش توابع موج محاسبه شده در آرایه‌ای از نقاط کوانتومی (الف) حالت اول در داخل نقطه کوانتومی بزرگ، (ب) حالت دوم در داخل نقطه کوانتومی بزرگ، (ج) حالت اول در داخل نقطه کوانتومی کوچک، و (د) حالت دوم در داخل نقطه کوانتومی کوچک.

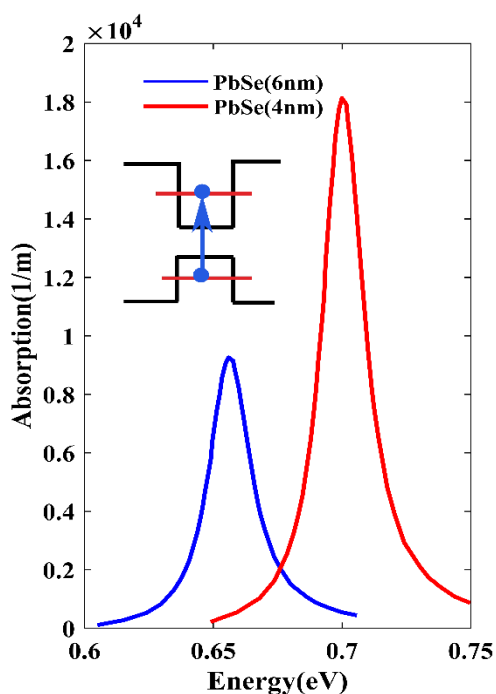
تشدید، به پارامترهای فیزیکی مانند جرم موثر، پارامترهای ساختاری مانند اندازه و ترکیب موادی ساختار کوانتومی بستگی دارد. با مدیریت پارامترهای اشاره شده، طول موج تشدید مناسب قابل طراحی می‌باشد. در این بخش نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی ساختار معرفی شده آرایه گردیده است. سطوح انرژی گسسته و توابع موج برای آن‌ها محاسبه شده است. در ادامه با استفاده از ترازهای انرژی و توابع موج مربوطه، خواص نوری و الکتریکی مانند ضریب جذب برای آن محاسبه شده است. نوارهای میانی تشکیل شده در ساختار مبتنی بر نقاط کوانتومی به شدت تحت تاثیر اندازه و فاصله‌ی بین آن‌هاست. در شکل (۵) توابع موج در داخل ساختار نشان داده شده است که لایه جاذب آشکارساز چند طول موجی را تشکیل می‌دهد. در این ساختار یک آرایه از نقاط کوانتومی بزرگ و یک آرایه از نقاط کوانتومی کوچک از جنس PbSe به صورت تودرتو استفاده شده است. در شکل (۵-الف) و (۵-ب) توابع موج به ترتیب برای انرژی اول و دوم در داخل نقاط کوانتومی بزرگتر نشان داده شده است. همچنین همین حالت‌ها برای نقاط کوانتومی کوچکتر در شکل (۵-ج) و (۵-د) نشان داده شده است. طبیعت کوبلینگ مابین نقاط کوانتومی بر روی گسستگی ترازهای انرژی تاثیرگذار است. فاصله‌ی نقاط کوانتومی در هر یک از ترازهای انرژی بر مشخصات اپتیکی تأثیرگذار می‌باشد. در واقع با توجه به اندازه‌های نقاط کوانتومی و برهم‌کنش‌های بین آن‌ها، ترازهای انرژی‌های مختلف شکل می‌گیرند. بین دو تراز (نوارهای) انرژی مختلف، انتقالات الکترونی با تابش نور صورت می‌گیرد که اختلاف انرژی آن‌ها قابلیت تنظیم-پذیری را دارند. زمانی که نورهای مادون قرمز با طول موج-های مختلف به ساختار می‌تابد، طول موج بزرگتر (انرژی کمتر) الکترون‌ها را از حالت انرژی اول به حالت انرژی دوم در نقاط کوانتومی بزرگتر منتقل می‌کنند. به طور مشابه طول موج‌های کوچک‌تر (انرژی بزرگ‌تر) انتقال الکترون‌ها را بین دو تراز نقطه‌ی کوانتومی کوچک‌تر انجام خواهند داد. در ساختارهای کوانتومی گذارهای درون‌نواری، بین حالت‌های کوانتومی محصور شده در درون نوار هدایت یا نوار ظرفیت می‌توانند رخ دهند. انتقال حامل‌ها در ساختار پیشنهادی نیازمند سطوح انرژی مختلف است. در شکل (۶) ساختار نوار انرژی و ترازهای انرژی شکل گرفته در داخل نقاط کوانتومی نشان داده شده است.



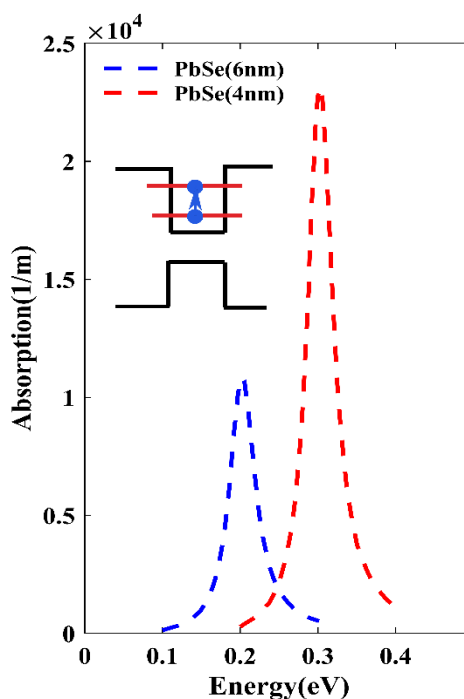
شکل ۶- ترازهای انرژی تشکیل شده در آرایه‌ای از نقاط کوانتومی

همان‌طور که اشاره شد، برای ساختار کوانتومی معرفی شده مقادیر ویژه انرژی و توابع موج محاسبه شده است. برای نقاط کوانتومی با فاصله نزدیک اثرات کوپلینگ قابل توجه و گسستگی بین ترازهای انرژی زیاد است. در حالی که با زیاد شدن فاصله‌ی نقاط کوانتومی از همدیگر، اثرات کوپلینگ کاهش پیدا کرده است. در این حالت در ترازهای انرژی گسستگی نخواهیم داشت. یکی از مشخصات بسیار مهم نقاط کوانتومی، ضریب جذب بین دو نوار انرژی در آن‌هاست.

جذب فوتون‌ها با انرژی $h\nu=E_1$ الکترون‌ها را از سطوح انرژی اول به سطوح انرژی دوم در داخل نقاط کوانتومی بزرگ‌تر و فوتون‌های با انرژی $h\nu=E_2$ آن‌ها را از سطح انرژی اول به سطح انرژی دوم در داخل نقاط کوانتومی کوچک‌تر تحریک می‌کنند. الکترون‌های برانگیخته شده در داخل نقاط کوانتومی بزرگ‌تر توسط یکی از الکترونها و الکترون‌های برانگیخته شده در داخل نقاط کوانتومی کوچک‌تر توسط الکتروند دیگری استخراج خواهند شد. به عبارت دیگر هر یک از سطوح انرژی یکی از طول موج‌ها را به خود اختصاص خواهد داد. در نقاط کوانتومی موقعیت ترازهای انرژی به پارامترهای مختلفی همانند شکل نقاط کوانتومی، جرم موثر مواد تشکیل دهنده، فاصله‌ی بین آن‌ها و ... بستگی دارد. به عنوان مثال، شعاع نقاط کوانتومی موقعیت ترازهای انرژی را تغییر می‌دهد. هنگامی که نقاط کوانتومی در فاصله نزدیکی از هم قرار بگیرند تداخل توابع موج در آن‌ها زیادتر خواهد شد. همان‌طور که در شکل (۶) تابع موج نقاط کوانتومی مرکزی نشان داده شده است، تابع موج در نقاط کوانتومی دورتر ضعیف شده است. به عبارت دیگر با افزایش فاصله‌ی بین نقاط کوانتومی، اندرکنش بین آن‌ها کم‌تر خواهد شد.



(ب)



(الف)

شکل ۷- (الف) ضریب جذب برای گذار درون نوری برای آرایه‌ی نقاط کوانتومی با اندازه‌ی ۴ و ۶ نانومتری و (ب) ضریب جذب برای گذار بین نوری برای آرایه‌ی نقاط کوانتومی با اندازه‌ی ۴ و ۶ نانومتری.

افزایش تعداد ترازهای تشکیل دهنده‌ی نوار و افزایش تعداد گذارهای الکترونی می‌شود. به عبارت دیگر، از نظر ریاضی، تعداد توابع لورنتزی افزایش یافته است.

۴- نتیجه گیری

در این کار، یک آشکارساز نوری چند طول موجی مبتنی بر نقاط کوانتومی طراحی شده است. این آشکارساز از اتصالات انتخابگر انرژی برای استخراج حامل‌های مربوطه استفاده می‌کند. ساختار پیشنهادی ما می‌تواند چند طول موج مختلف را از طریق مسیرهای جریان خروجی مستقل به طور همزمان تشخیص دهد. از اثر محصور شدن کوانتومی و یک روش المان محدود سه بعدی برای شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی استفاده شده است. تشکیل نوارهای میانی در داخل نقاط کوانتومی ما را به داشتن سطوح انرژی گسسته‌ای هدایت می‌کند، که تشخیص چند طول موج توسط یک افزاره را امکان‌پذیر می‌سازد. استفاده از اتصالات انتخابگر انرژی و پدیده‌ی تونل‌زنی به حامل‌های تولید شده اجازه می‌دهد تا به سمت الکترودهای مربوطه حرکت کنند. در نهایت، به عنوان کاربرد این ساختار، نقاط کوانتومی با دو شعاع مختلف با قابلیت تشخیص همزمان دو طول موج، به طور همزمان ارائه شده است. این آشکارساز را می‌توان با اعمال چندین نقاط کوانتومی با اندازه، شکل و مواد مختلف و استفاده از اتصالات انتخابگر مناسب برای تشخیص طول موج‌های مختلف طراحی کرد.

در شکل (۷-الف) ضریب جذب از یک نوار انرژی در نوار هدایت به یک نوار انرژی دیگر در همان نوار برای نقاط کوانتومی ۴ نانومتری و ۶ نانومتری محاسبه شده است. با توجه به معادله‌ی (۲)، ضریب جذب به حالت اولیه و حالت نهایی بستگی دارد. در این شکل ضریب جذب برای برای یک گذار درون نواری محاسبه شده است. همچنین مطابق این شکل، برای نقاط کوانتومی کوچک‌تر، پیک جذب در انرژی بالاتر (طول موج پایین‌تر) رخ می‌دهد. همچنین شدت جذب برای نقاط کوانتومی کوچک‌تر بیش‌تر از نقاط کوانتومی بزرگ‌تر می‌باشد. اشاره به این نکته می‌تواند مهم باشد که در حالت گذار درون نواری در نوار هدایت فقط الکترون‌ها با نور تابشی اندرکنش می‌دهند و از نوار اول به نوار دوم منتقل می‌شوند. در شکل (۷-ب) ضریب جذب برای یک گذار بین نواری محاسبه شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، هر چقدر نقاط کوانتومی کوچک‌تر باشد، پیک جذب در انرژی‌های بالاتر (طول موج‌های پایین‌تر) رخ خواهد داد. به عبارت دیگر اندازه‌ی نانو ذرات، تأثیر قابل توجهی را بر پیک جذب دارند. با انتخاب درست اندازه‌ی نقاط کوانتومی می‌توان طول موج‌های مورد نظر را آشکار کرد. البته از لحاظ اندازه پیک جذب می‌توان گفت که چگالی نقاط کوانتومی می‌تواند به طور قابل توجهی ضریب جذب سیستم را افزایش دهد. این رفتار به دلیل افزایش تعداد نقاط کوانتومی در واحد حجم است که منجر به

مراجع

- [۱] حمید بهادر، «سنسور ضریب شکست بسیار حساس جدید با استفاده از کوپلینگ عمودی قوی در نانوساختار پلاسمونیک دیسک بیضی شکل روی حلقه بیضی شکل»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۹، شماره ۶۴، بهار ۱۴۰۰، صفحه ۶۴-۷۵.
- [۲] سعید علیانی و احمد محب‌زاده، «نویزها طراحی و مدل‌سازی حسگر زیستی مبتنی بر نانو تشدیدگر کریستال فوتونی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۳۵۱-۳۵۸.
- [۳] سعید رحیمی، سهیل رضازاده مفردنیا، بهنام راسخ و سید عباس شجاع‌الساداتی، «شبیه‌سازی و بررسی عملکرد پارامترهای مختلف حسگر مبتنی بر غشای سیلیکونی جهت تشخیص متان محلول در فرایند تخمیر»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۸، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۳۲۹-۳۳۶.
- [۴] سید سعید حاجی نصیری، «تحلیل پاسخ زمانی و نایکوئیست لیزر خودسامانده نقطه کوانتومی InGaAs-GaAs با استفاده از مدل تابع انتقال»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۸، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۲۹۵-۳۰۳.
- [5] P. Wang, S. Liu, W. Luo, and H. Fang, "Arrayed Van Der Waals Broadband Detectors for Dual-Band Detection", *Advanced Materials*, Vol. 29, No.16, 2017, pp.16044391-16044398.
- [6] Z. Xie, Z. Deng, X. Zou, and B. Chen, "InP-based near infrared/extended-short wave infrared dual-band photodetector" *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 32, No.16, 2020, pp.1003-1006.

- [7] J.A. Jayasinghe, "Multiband detectors and application of nanostructured anti-reflection coatings for improved efficiency.", Georgia State university, Vol.12, No. 1, 2012, pp.1-10.
- [8] T. Chen, X. Yi, L. Li, and R. Minasian, "Single passband microwave photonic filter with wideband tunability and adjustable bandwidth", Optics letters, Vol. 37. No. 22, pp.4699-4701.
- [9] T. Bauer, H. Thome, and T. Eisenhammer, "Bandpass filter arrays patterned by photolithography for multispectral remote sensing, In Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites", International Society for Optics and Photonics, Vol. 9241, No. 10, 2014, pp. 924111-924115.
- [10] S. Cai, X. Xu, W. Yang, J. Chen, and X. Fang, "Materials and designs for wearable photodetectors", Advanced Materials, Vol. 31, No. 18, 2019, pp. 18081381-1808138115.
- [11] M. Long, P. Wang, H. Fang, and W. Hu, "Progress, challenges, and opportunities for 2D material-based photodetectors", Advanced Functional Materials, Vol. 29, No. 19, 2019, pp. 18038071-18038075.
- [12] S. Coe-Sullivan, "Quantum dot developments," Nature Photonics, Vol. 3, No. 6, 2009, pp. 315-316.
- [13] M. M. Ackerman, X. Tang, and P. Guyot-Sionnest, "Fast and sensitive colloidal quantum dot mid-wave infrared photodetectors", ACS Nano, Vol. 12, No. 7, 2018, pp. 7264-7271.
- [14] A. De Iacovo, C. Venettacci, L. Colace, L. Scopa, and S. Foglia, "PbS Colloidal Quantum Dot Photodetectors operating in the near infrared", Scientific reports, Vol. 6, No. 1, 2016, pp. 1-9.
- [15] S. Baskoutas and A. F. Terzis, "Size-dependent band gap of colloidal quantum dots", Journal of applied physics, Vol. 99, No. 1, 2006, pp. 0137081-01370815.
- [16] S. Maimon, E. Finkman, G. Bahir, S. Schacham, J. Garcia, and P. M. Petroff, "Intersublevel transitions in InAs/GaAs quantum dots infrared photodetectors", Applied Physics Letters, Vol. 73, No. 14, 1998, pp. 2003-2005.
- [17] X. Yan, X. Zhang, J. Li, Y. Wu, J. Cui, and X. Ren, "Fabrication and optical properties of GaAs/InGaAs/GaAs nanowire core-multishell quantum well heterostructures," Nanoscale, Vol. 7, No. 3, 2015, pp. 1110-1115.
- [18] M. Hamer, "Gate-defined quantum confinement in InSe-based van der Waals heterostructures", Nano Letters, Vol. 18, No. 6, 2018, pp. 3950-3955.
- [19] S. Liu, "Self-assembled Al nanostructure/ZnO quantum dot heterostructures for high responsivity and fast UV photodetector", Nano-micro letters, Vol. 12, 2020, pp. 1-13.
- [20] Q. Xu, J. Hu, and X. Wang, " On-chip Ge, InGaAs, and colloidal quantum dot photodetectors: comparisons for application in silicon photonics", Journal of the Optical Society of America A, Vol. 38, No. 1, 2021, pp.194-200.
- [21] S. Vichi, S. Bietti, and A. Khalili, "Droplet epitaxy quantum dot based infrared photodetectors," Nanotechnology, Vol. 31, No. 24, 2020, pp. 245203-245205.
- [22] Y. Shoji, K. Watanabe, and Y. Okada, "Photoabsorption improvement in multi-stacked InGaAs/GaAs quantum dot solar cell with a light scattering rear texture", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 204, 2020, pp. 1102161-1102165.
- [23] M. Liao, S. Chen, and Z. Liu, "Low-noise 1.3 μm InAs/GaAs quantum dot laser monolithically grown on silicon", Photonics Research, Vol. 6, No. 11, 2018, pp. 1062-1066.
- [24] X. Tang, M. M. Ackerman, M. Chen, and P. G. Sionnest, "Dual-band infrared imaging using stacked colloidal quantum dot photodiodes", Nature Photonics, Vol. 13, No. 4, 2019, pp. 277-282.
- [25] S. R. Shriram, "Study on inter band and inter sub-band optical transitions with varying InAs/InGaAs sub-monolayer quantum dot heterostructure stacks grown by molecular beam epitaxy", IEEE Transactions on Nanotechnology, Vol. 19, 2020, pp. 601-608.
- [26] L. M. Krüger, "High-speed interband cascade infrared photodetectors: photo-response saturation by a femtosecond oscillator", Optics Express, Vol. 29, No. 9, 2021, pp. 14087-14100.
- [27] V. Ryzhii, "Comparison of intersubband quantum-well and interband graphene-layer infrared photodetectors," IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 54, No. 2, 2018, pp. 1-8.
- [28] V. Y. Aleshkin, "Interband infrared photodetectors based on HgTe–CdHgTe quantum-well heterostructures", Optical Materials Express, Vol. 8, No. 5, 2018, pp. 1349-1358.
- [29] A. Mellor, A. Luque, I. Tobías, and A. Martí, "The influence of quantum dot size on the sub-bandgap intraband photocurrent in intermediate band solar cells," Applied Physics Letters, Vol. 101, No. 13, 2012, pp. 133909.

- [30] Z. Ma et al., "Enhanced detectivity of PbS quantum dots infrared photodetector by introducing the tunneling effect of PMMA," *Nanotechnology*, Vol. 3, No. 2, 2021, pp. 1955021-1955025.
- [31] H. D. Jahromi and A. Zarifkar, "A physical model for quantum wire infrared photodetectors under illumination condition," *Optics Communications*, Vol. 493, 2021, pp. 1270431-1270435.
- [32] A. Rostami, R. O. Rezayee, H. R. Saghai, R. Yadipour, and H. Baghban, "A dual-color IR quantum cascade photodetector with two output electrical signals", *IEEE transactions on electron devices*, Vol. 58, No. 1, 2010, pp. 165-172.
- [33] Y. H. Kang, J. Park, U. H. Lee, and S. Hong, "Effect of the dot size distribution on quantum dot infrared photoresponse and temperature-dependent dark current", *Applied physics letters*, Vol. 82, No. 7, 2003, pp. 1099-1101.
- [34] X. Jiang, S. S. Li, and M. Tidrow, "Study of intersubband transition in quantum dots and quantum dot infrared photodetectors", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 5, No. 1, 1999, pp. 27-35.
- [35] Y. Liu, "Highly Sensitive CuInS₂/ZnS Core-Shell Quantum Dot Photodetectors", *ACS Applied Electronic Materials*, Vol. 3, No. 3, 2021, pp. 1236-1243.