



دانشگاه تبریز

دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی فناوریهای نوین

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نانوفناوری
گرایش نانو الکترونیک

عنوان:

بهینه سازی ساختارهای دیودهای نور گسیل رنگ سفید مبتنی بر نقاط کوانتومی

استاد راهنما:

دکتر سعید گل محمدی هریس

استاد مشاور:

دکتر غلامرضا کیانی

پژوهشگر:

سید جعفر ربانی شبستری

بهمن ۱۳۹۲

صلى الله عليه وسلم

تقدیم به:

همسر عزیزم:

که سایه مهربانیش، سایه سار زندگیم می باشد.

و

فرزند دلبندم:

امید بخش جانم، که آسایش او آرامش من است.

و

به یاد مادر مهربانم

که هرچه دارم از اوست ...

و

به یاد پدر بزرگوارم

که در فکرم همه اوست...

به خاطر حمایت‌ها، تشویق‌ها و همه خوبی‌های بی دریغشان

تقدیر و تشکر

خدای بزرگ را شکرگزارم که به من توفیق کسب دانش در محضر اساتید بزرگوار در جوار دوستان صمیمی و در بستر خانواده‌ای مهربان در کشور عزیزمان عنایت فرمود.

بر خود لازم می‌دانم از زحمات استاد بزرگوارم دکتر سعید گل محمدی صمیمانه تشکر نمایم که جدا از کوله بار سنگین علم و دانش خود، هیچ‌گاه صفا و محبت خود را از من دریغ نکردند و همواره برای من همچون برادری مهربان بودند. برای ایشان آینده‌ای درخشان مملو از موفقیت‌های بی پایان را از خداوند منان خواستارم.

نام خانوادگی دانشجو: ربانی شبستری	نام: سید جعفر
عنوان پایان نامه: بهینه سازی ساختارهای دیودهای نور گسیل رنگ سفید مبتنی بر نقاط کوانتومی	
استاد راهنما: دکتر سعید گل محمدی هریس	
استاد مشاور: دکتر غلامرضا کیانی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی نانو فناوری گرایش: نانوالکترونیک دانشگاه: تبریز	
دانشکده: مهندسی فناوری های نوین تاریخ فارغ التحصیلی: بهمن ۱۳۹۲ تعداد صفحات: ۱۱۶	
کلید واژه ها: دیود نور گسیل سفید، نقطه کوانتومی، پهن شدگی غیر همگن، بهره	
<p>چکیده:</p> <p>در این پروژه ساختار دیود نور گسیل رنگ سفید مبتنی بر چاههای کوانتومی و نقاط کوانتومی را مورد مطالعه قرار دادیم. در مرحله اول ساختار دیود نور گسیل رنگ سفید با استفاده از چندین چاه کوانتومی با ناحیه فعال متشکل از لایه های $In_xGa_{1-x}N$ با x و عرض های مختلف، که به عنوان چاه های کوانتومی گسیل کننده طول موج های قرمز، سبز و آبی و GaN به عنوان سد می باشد، با استفاده از روش $6-6k.p$ و با در نظر گرفتن میدان پلاریزاسیون ناشی از قطبش خودبه خودی و پیزوالکتریک، حل خود سازگار معادله شرودینگر-پواسن شبیه سازی شده و از نتایج حاصل از این شبیه سازی، مقادیر ویژه انرژی همچنین توابع موج برای الکترون و حفره به دست آمد. سپس با بررسی عناصر ماتریس انتقال بین باندی، شدت خروجی با توجه به انتقالات بین باندی با بالاترین احتمال گسیل بین دو سطح انرژی محاسبه شده است و در نهایت با افزایش دما از ۲۵۰ تا ۳۵۰ درجه کلین منجر به پهن شدگی همگن و کاهش شدت نور خروجی شده است. نور خروجی تقریباً در محدوده نور سفید باقی می ماند.</p> <p>در مرحله دوم ساختار دیود نور گسیل رنگ سفید مبتنی بر چندین نقاط کوانتومی با ناحیه فعال متشکل از سه لایه نقاط کوانتومی برای تولید طول موج های قرمز، سبز و آبی و به شکل هرم سربریده و ماده $In_xGa_{1-x}N$ به عنوان نقطه کوانتومی و GaN به عنوان سد مورد مطالعه و شبیه سازی قرار دادیم. با استفاده از روش تقریب جرم موثر و در نظر گرفتن میدان پلاریزاسیون ناشی از قطبش خودبه خودی و پیزوالکتریک، سپس حل معادله شرودینگر و پواسن به صورت خودسازگار، مقادیر ویژه انرژی همچنین توابع موج برای الکترون و حفره به دست آمد. با بررسی عناصر ماتریس انتقال بین باندی، شدت خروجی با توجه به انتقالات بین باندی با بالاترین احتمال گسیل بین دو سطح انرژی محاسبه شد. با افزایش دما از ۱۰۰ درجه کلین تا ۴۰۰ درجه کلین، باعث پهن شدگی همگن طیف خروجی و کاهش شدت نور خروجی می شود. نور خروجی تقریباً در محدوده نور سفید باقی می ماند. در نهایت با تغییر اندازه نقاط کوانتومی از ۶/۵ تا ۱۳/۵ نانومتر با مرکزیت ۱۰ نانومتر برای لایه های گسیل کننده طول موج های قرمز، سبز و آبی پهن شدگی غیر همگن مورد بررسی قرار گرفت.</p>	

فهرست عناوین

۲	۱ بررسی منابع و پیشینه پژوهش
۲	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- نور سفید
۶	۳-۱- تبدیل کننده‌های طول‌موج برای تولید نور سفید
۷	۱-۳-۱- دیود سفید بر اساس تبدیل کننده‌های رنگینه
۷	۲-۳-۱- دیود سفید بر اساس تبدیل کننده‌های فسفری
۹	۳-۳-۱- دیود سفید بر اساس تبدیل کننده‌های نیمه‌هادی
۱۱	۴-۱- دیود سفید با استفاده از نقاط کوانتومی
۱۳	۱-۴-۱- مزیت‌ها و محدودیت‌های دیودهای نقاط کوانتومی
۱۴	۵-۱- مهمترین فرآیندها در رشد نقاط کوانتومی نیتریدی
۱۶	۱-۵-۱- روش‌های پرتو مولکولی (MBE)
۱۸	۲-۵-۱- روش‌های بخار شیمیایی فلز-آلی (MOCVD)
۲۰	۶-۱- مرور بر مقالات
۲۰	۱-۶-۱- دیودهای نور گسیل نزدیک به رنگ سفید آبخاری نیتریدی
۲۲	۲-۶-۱- ال‌ئی‌دی‌های قرمز-سبز-آبی مبتنی بر نقاط کوانتومی InGaN
	۳-۶-۱- ساطع کننده دو رنگ (قرمز-سبز) از نانوکریستال‌های غیرهم‌جنس نقطه کوانتومی-چاه کوانتومی CdSe- ZnS بر روی دیود (آبی) InGaN/GaN
۲۳	۴-۶-۱- انتشار نور از یک لایه نقاط کوانتومی کلونیدی ترکیبی از رنگهای قرمز-سبز-آبی
۲۶	۵-۶-۱- طراحی دیود نور سفید GaN از طریق آنالیز تابع پوش
۲۸	۶-۶-۱- طراحی و تجزیه تحلیل خواص ال‌ئی‌دی تک-تراشه نور سفید InGaN/GaN
۳۱	۲ مواد و روش
۳۱	۱-۲- مقدمه
۳۱	۲-۲- ساختارهای بلوری نیمه‌رساناهای III-V
۳۳	۳-۲- دلیل استفاده از مواد نیتریدی در ساختار دیود نوری

- ۳۵-۴-۲- میدان‌های پلاریزاسیون در نیمه‌رساناهای *III-V*.....
- ۳۶-۱-۴-۲- پلاریزاسیون خودبه‌خودی.....
- ۳۷-۲-۴-۲- پلاریزاسیون پیزو الکتریک.....
- ۴۰-۳-۴-۲- اثر محدود شدگی کوانتومی اشتراک (*QCSE*).....
- ۴۲-۵-۲- حل معادله شرودینگر.....
- ۴۳-۱-۵-۲- معادله شرودینگر یک بعدی.....
- ۴۳-۱-۱-۵-۲- چاه پتانسیل بی‌نهایت.....
- ۴۶-۲-۱-۵-۲- چاه پتانسیل متناهی و متقارن.....
- ۴۸-۱-۲-۱-۵-۲- روش محاسبات برای حل معادله شرودینگر.....
- ۴۸-۲-۲-۱-۵-۲- روش عددی تفاضلات محدود.....
- ۴۹-۳-۲-۱-۵-۲- حل عددی معادله شرودینگر یک بعدی به روش تفاضلات محدود.....
- ۵۲-۴-۲-۱-۵-۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی چاه کوانتومی نمونه با نرم افزار *nextnano*.....
- ۵۳-۲-۵-۲- حل معادله شرودینگر سه بعدی.....
- ۵۵-۶-۲- محاسبه بهره (شدت) نوری.....
- ۵۶-۱-۶-۲- محاسبه بهره نوری برای چاه کوانتومی.....
- ۶۰-۲-۶-۲- محاسبه بهره نوری برای نقطه کوانتومی.....
- ۶۳-۷-۲- نمودار رنگی.....
- ۳ نتایج و بحث..... ۶۸**
- ۶۸-۱-۳- ساختار دیود سفید با استفاده از چندین چاه کوانتومی.....
- ۶۹-۱-۱-۳- طراحی چاه‌های کوانتومی برای انتشار نور سفید در جهت قطبی (۰۰۱).....
- ۶۹-۱-۱-۱-۳- چاه کوانتومی گسیل‌کننده نور قرمز.....
- ۷۰-۲-۱-۱-۳- چاه کوانتومی گسیل‌کننده نور سبز.....
- ۷۱-۳-۱-۱-۳- چاه کوانتومی گسیل‌کننده نور آبی.....
- ۷۳-۲-۳- شدت نور خروجی در چاه‌های کوانتومی.....
- ۷۵-۱-۲-۳- تاثیر دما بر شدت نور خروجی چاه‌های کوانتومی.....

- ۳-۳- طراحی دیود نور سفید با ناحیه فعال نقاط کوانتومی..... ۷۷
- ۳-۳-۱- طراحی ناحیه فعال با نقاط کوانتومی ۷۷
- ۳-۳-۱-۱- نقطه کوانتومی گسیل کننده نور قرمز..... ۷۷
- ۳-۳-۱-۲- نقطه کوانتومی گسیل کننده نور سبز ۸۲
- ۳-۳-۱-۳- نقطه کوانتومی گسیل کننده نور آبی ۸۷
- ۳-۳-۲- شدت نور خروجی برای نقطه کوانتومی..... ۹۲
- ۳-۳-۱-۲- اثر تغییر دما در شدت نور خروجی ۹۳
- ۳-۳-۲-۲- اثر تغییر سایز نقاط کوانتومی در شدت نور خروجی ۹۶
- ۳-۳-۱-۲- لایه نقاط کوانتومی گسیل کننده نور آبی ۹۷
- ۳-۳-۲-۲- لایه نقاط کوانتومی گسیل کننده نور سبز ۹۸
- ۳-۳-۲-۳- لایه نقاط کوانتومی گسیل کننده نور قرمز ۹۸
- ۳-۳-۲-۴- شدت نور خروجی برای لایه‌های کوانتومی ۹۹
- ۴ پیوست ۱۰۳
- ۴-۱- معرفی نرم افزار *nextnano*..... ۱۰۳
- ۴-۱-۱- ساختار برنامه ۱۰۴
- ۴-۱-۱-۱- معرفی مقادیر ثابت ۱۰۶
- ۴-۱-۱-۲- تنظیمات مربوط به گام ودامنه شبیه‌سازی ۱۰۶
- ۴-۱-۱-۳- تنظیمات مربوط به ساختار قطعه ۱۰۷
- ۴-۱-۱-۴- گام‌بندی شبیه سازی ۱۱۰
- ۴-۱-۱-۵- تعریف معادلات مورد نیاز ۱۱۱
- ۴-۱-۱-۶- تعریف انواع خروجی ۱۱۲
- ۴-۱-۱-۷- اجرای برنامه ۱۱۳
- ۴-۱-۲- فرآیند اجرای برنامه ۱۱۴
- ۴-۱-۳- روش برنامه ۱۱۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: مواد نیمه‌هادی و مشخصه نور تولیدی ۴
- شکل ۲-۱: روند رشد بازدهی، فن‌آوری ال‌ئی‌دی که کمتر از ۰/۱ لومن بر وات در سال ۱۹۶۲ میلادی، به بیش از ۱۰۰ لومن بر وات تا سال ۲۰۱۰ میلادی افزایش یافته است. ۴
- شکل ۳-۱: طول موج‌های مکمل برای تولید نور سفید ۵
- شکل ۴-۱: تولید نور سفید از ترکیب سه رنگ قرمز، سبز و آبی ۶
- شکل ۵-۱: طیف نشری و جذبی یک رنگینه تجاری. شکل جانبی ساختار شیمیایی مولکول رنگینه را نشان می‌دهد. ۷
- شکل ۶-۱ (الف): ساختار دیود سفید شامل یک دیود نورانی آبی و یک کپسول اپوکسی شامل فسفر (برای تبدیل طول موج ج) طیف نشری یک دیود سفید تجاری بر مبنای تبدیل کننده فسفری ۸
- شکل ۷-۱: گاف انرژی در دمای اتاق بر حسب ثابت شبکه عناصر متداول و نیمه‌هادی‌های دوتایی ۱۰
- شکل ۸-۱ (الف): طرحی از یک دیود نیمه‌هادی باز سازی فوتون. (ب) طیف خروجی در دمای اتاق ۱۰
- شکل ۹-۱: انواع فرآیندهای رشد نقاط کوانتومی ۱۵
- شکل ۱۰-۱: تصویر *AFM* از نقاط کوانتومی *GaN* که روی *AlN* در سه دمای مختلف (الف) ۷۲۵ (ب) ۷۰۵ (ج) ۶۸۵ درجه سانتی‌گراد رشد یافته‌اند. ۱۸
- شکل ۱۱-۱: طرحی از دیود آبی با ساختار چندین نقاط کوانتومی ۱۸
- شکل ۱۲-۱: توپوگرافی‌های سطح در دمای اتاق از نمونه‌های نقاط کوانتومی *InGaN* با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (*AFM*) ۲۰
- شکل ۱۳-۱: طرحی از ساختار دیود نور گسیل نزدیک به رنگ سفید آبخاری نیتریدی ۲۱
- شکل ۱۴-۱ (الف): طیف *PL* ال‌ئی‌دی آبخاری سفید در دمای اتاق (ب) طیف *EL* ال‌ئی‌دی آبخاری سفید در دمای اتاق برای جریان‌های مختلف تزریقی ۲۱
- شکل ۱۵-۱: طیف *EL* برای ال‌ئی‌دی‌های قرمز، سبز و آبی زیر جریان پالسی ۲۰ میلی‌آمپر با عرض پالس ۵۰٪ در دمای اتاق ۲۳
- شکل ۱۶-۱: طیف لومینانس نانوکریستال‌های غیرهم‌جنس در دمای اتاق برای جریان‌های مختلف به همراه طرحی از ساختار گسیل کننده نور قرمز و سبز (هسته/پوسته) و عکس نور تولید شده سفید از دیودهای نور سفید-نانوکریستال. ۲۴
- شکل ۱۷-۱ (الف): تصویری از نقاط کوانتومی آبی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (*AFM*) (ب) نمایی از بخش جانبی دیود نوری با استفاده از نقاط کوانتومی (ج) تصویری از دیود نور سفید با استفاده از نقاط کوانتومی در عمل ۲۵
- شکل ۱۸-۱: طیف نرمالیزه شده دیود نور سفید با استفاده از نقاط کوانتومی کلئیدی ۲۶
- شکل ۱۹-۱: ساختار دیود نور سفید چندین چاه کوانتومی که در اینجا فقط دو پریود از آن نشان داده شده است. همچنین $L_C > L_B$ ضخامت لایه‌های سد، برای کاهش هم‌پوشانی تابع پوش در نظر گرفته شده است. ۲۶
- شکل ۲۰-۱: تابع پوش برای اولین تراز انرژی حفره-سنگین برای تمام چاه‌های کوانتومی در $k_p = 0$ ۲۷
- شکل ۲۱-۱: طیف *PL* برای هر دو پلاریزاسیون *TE* و *TM* برای دیود نور سفید ۲۷

- شکل ۲۲-۱: طرحی از ساختار دیود تک-تراشه سفید $InGaN/GaN$ ۲۸
- شکل ۲۳-۱: نمودار توزیع طیفی ال‌ئی‌دی تک-تراشه نور سفید برای جریان‌های تزریقی ۱، ۵، ۲۰ و ۶۰ میلی‌آمپر ۲۹
- شکل ۱-۲: الف) ساختار ZB مکعبی GaN ب) ساختار WZ شش‌گوشه‌ای GaN ۳۲
- شکل ۲-۲: گاف انرژی نیمه‌هادی‌های مختلف..... ۳۴
- شکل ۳-۲: مدل بار نقطه‌ای..... ۳۶
- شکل ۴-۲: طرحی که استرین فشاری و کششی را نشان می‌دهد..... ۳۷
- شکل ۵-۲: الف) چاه کوانتومی در جهت غیر قطبی و طرح ب) چاه کوانتومی در جهت قطبی که منجر به القا چگالی بار صفحه‌ای می‌شود..... ۴۰
- شکل ۶-۲: ساختار $GaN/InGaN/GaN$ در جهت قطبی (۰۰۰۱) که در این مورد پلاریزاسیون پیزو الکترونیک GaN قابل صرف‌نظر کردن است..... ۴۲
- شکل ۷-۲: چاه پتانسیل بی‌نهایت..... ۴۳
- شکل ۸-۲: چاه پتانسیل متناهی متقارن..... ۴۷
- شکل ۹-۲: مشتق مرتبه اول..... ۵۰
- شکل ۱۰-۲: گره بندی ساختار..... ۵۱
- شکل ۱۱-۲: باند هدایت و ظرفیت به همرا مقادیر ویژه انرژی..... ۵۲
- شکل ۱۲-۲: توابع موج اول، دوم و سوم برای الکترون..... ۵۲
- شکل ۱۳-۲: نقطه کوانتومی هرم سربریده..... ۵۳
- شکل ۱۴-۲: طرحی از ساختار باندی برای LED الف) با طول موج مرئی (بلند) و وجود میدان پلاریزاسیون که عمده گسیل برای قطبش TE می‌باشد. ب) میدان پلاریزاسیون صفرگسیل که برای هر دو قطبش TE و TM یکسان است. ج) با طول موج کوتاه و وجود میدان پلاریزاسیون که عمده گسیل برای قطبش TM می‌باشد..... ۵۶
- شکل ۱۵-۲: الف) ترازهای انرژی اول و دوم برای باند هدایت و باند ظرفیت (حفره-سنگین و حفره سبک) و انرژی گسیل فوتون..... ۵۷
- شکل ۱۶-۲: طیف خروجی برای HB و IHB در دماهای پایین..... ۶۲
- شکل ۱۷-۲: برش عرضی از چشم انسان و نمایی از شبکه شامل گیرنده‌های استوانه‌ای و مخروطی..... ۶۳
- شکل ۱۸-۲: طیف حساسیت سلول‌های استوانه‌ای و مخروطی چشم انسان..... ۶۴
- شکل ۱۹-۲: توابع تطبیق رنگ..... ۶۴
- شکل ۲۰-۲: مختصات رنگ..... ۶۶
- شکل ۱-۳: طرح چند چاه کوانتومی برای دیود نور گسیل سفید..... ۶۸
- شکل ۲-۳: منحنی پتانسیل و توابع موج اول الکترون و حفره برای چاه کوانتومی گسیل کننده نور قرمز..... ۷۰
- شکل ۳-۳: چاه کوانتومی گسیل کننده نور سبز..... ۷۱
- شکل ۴-۳: چاه کوانتومی گسیل کننده نور آبی الف) منحنی پتانسیل و توابع موج الکترون و حفره. ب) منحنی

- ۷۲..... پلاریزاسیون
- شکل ۳-۵: ساختار باند ظرفیت الف) چاه کوانتومی قرمز با عرض ۳ نانومتر و $In_{0.32}Ga_{0.68}N$ (ب) چاه کوانتومی سبز با عرض ۲/۵ نانومتر و $In_{0.28}Ga_{0.72}N$ (ج) چاه کوانتومی آبی با عرض ۲ نانومتر و $In_{0.25}Ga_{0.75}N$ ۷۳
- شکل ۳-۶: شدت نور خروجی چاه‌های کوانتومی برای پلاریزاسیون TE بر حسب طول موج ۷۴
- شکل ۳-۷: منحنی CIE برای چاه‌های کوانتومی ۷۴
- شکل ۳-۸: تاثیر افزایش دما بر چاه‌های کوانتومی الف) چاه کوانتومی آبی (ب) چاه کوانتومی سبز (ج) چاه کوانتومی قرمز ۷۵
- شکل ۳-۹: دیود نور گسیل سفید با ناحیه فعال نقاط کوانتومی ۷۷
- شکل ۳-۱۰: لبه‌های نواری نور قرمز در جهت $x-y$ الف) باند هدایت (گاما) (ب) باند ظرفیت (حفره-سنگین). شکل موج‌های سمت راست برای $z=0.5nm$ رسم شده است. ۷۸
- شکل ۳-۱۱: لبه‌های نواری نور قرمز در جهت $x-z$ و $z=0.5nm$ الف) باند هدایت (گاما) (ب) باند ظرفیت (حفره-سنگین). شکل موج‌های سمت چپ برای $y=5nm$ رسم شده است. ۷۹
- شکل ۳-۱۲: توابع موج مربوط به اولین تراز انرژی برای الکترون برای نور قرمز الف) در جهت $x-y$ و $z=0.5nm$ (ب) در جهت $x-z$ و $y=5nm$ ۸۰
- شکل ۳-۱۳: توابع موج مربوط به اولین تراز انرژی برای حفره-سنگین برای نور قرمز الف) در جهت $x-y$ و $z=0.5nm$ (ب) در جهت $x-z$ و $y=5nm$ ۸۱
- شکل ۳-۱۴: لبه‌های نواری نور سبز در جهت $x-y$ الف) باند هدایت (گاما) (ب) باند ظرفیت (حفره-سنگین). شکل موج‌های سمت راست برای $z=0.5nm$ رسم شده است. ۸۳
- شکل ۳-۱۵: لبه‌های نواری نور سبز در جهت $x-z$ و $z=0.5nm$ الف) باند هدایت (گاما) (ب) باند ظرفیت (حفره-سنگین). شکل موج‌های سمت چپ برای $y=5nm$ رسم شده است. ۸۴
- شکل ۳-۱۶: توابع موج مربوط به اولین تراز انرژی برای الکترون برای نور سبز الف) در جهت $x-y$ و $z=0.5nm$ (ب) در جهت $x-z$ و $y=5nm$ ۸۵
- شکل ۳-۱۷: توابع موج مربوط به اولین تراز انرژی برای حفره-سنگین برای نور سبز الف) در جهت $x-y$ و $z=0.5nm$ (ب) در جهت $x-z$ و $y=5nm$ ۸۶
- شکل ۳-۱۸: لبه‌های نواری نور آبی در جهت $x-y$ الف) باند هدایت (گاما) (ب) باند ظرفیت (حفره-سنگین). شکل موج‌های سمت راست برای $z=0.5nm$ رسم شده است. ۸۸
- شکل ۳-۱۹: لبه‌های نواری نور آبی در جهت $x-z$ و $z=0.5nm$ الف) باند هدایت (گاما) (ب) باند ظرفیت (حفره-سنگین). شکل موج‌های سمت چپ برای $y=5nm$ رسم شده است. ۸۹
- شکل ۳-۲۰: توابع موج مربوط به اولین تراز انرژی برای الکترون برای نور آبی الف) در جهت $x-y$ و $z=0.5nm$ (ب) در جهت $x-z$ و $y=5nm$ ۹۰
- شکل ۳-۲۱: توابع موج مربوط به اولین تراز انرژی برای حفره-سنگین برای نور آبی الف) در جهت $x-y$ و $z=0.5nm$ (ب) در جهت $x-z$ و $y=5nm$ ۹۰

- ۹۱..... $y=5nm$ و جهت $x-z$ در جهت $x-y$ و جهت $x-y$ و شکل ۳-۲۲: توابع موج مربوط به دومین تراز انرژی الکترون و حفره-سنگین برای نور آبی الف) و ج) در جهت $x-y$ و
- ۹۲..... $z=0.5nm$
- ۹۳..... شکل ۳-۲۳: شدت نور خروجی برای نقطه کوانتومی قرمز، سبز و آبی
- ۹۳..... شکل ۳-۲۴: منحنی CIE برای نقاط کوانتومی
- ۹۵..... شکل ۳-۲۵: اثر افزایش دما بر نور آبی
- ۹۵..... شکل ۳-۲۶: اثر افزایش دما بر نور سبز
- ۹۵..... شکل ۳-۲۷: اثر افزایش دما بر نور قرمز
- ۹۶..... شکل ۳-۲۸: توزیع گروه‌های نقاط کوانتومی به صورت تابع گوسین
- ۹۹..... شکل ۳-۲۹: شدت نور خروجی برای لایه‌های کوانتومی قرمز، سبز و آبی در دمای 300° درجه کلونین
- ۱۰۵..... شکل ۴-۱: بلوک دیاگرام کلی برنامه ورودی
- ۱۱۴..... شکل ۴-۲: منوی مربوط به اجرای برنامه $nextnano.mat$

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: ثابت‌های شبکه a و c در واحد \AA و پارامتر u (مقدار ایده‌آل ۰/۳۷۵) نیتتریدهای گروه III ۳۳
- جدول ۲-۲: ثابت‌های پیزوالکتریک C/m^2 و ثابت‌های الاستیک در GPa و پلاریزاسیون خودبه‌خودی C/m^2 ۳۹
- جدول ۳-۲: مشخصه‌های ماده برای AlN ، GaN و InN . مقادیر از مراجع [۳۹] و [۴۰] استخراج شده‌اند. ۶۰
- جدول ۱-۳: مقادیر ویژه انرژی مربوط به باند هدایت و ظرفیت برای چاه کوانتومی قرمز ۶۹
- جدول ۲-۳: مقادیر ویژه انرژی مربوط به باند هدایت و ظرفیت برای چاه کوانتومی سبز ۷۰
- جدول ۳-۳: مقادیر ویژه انرژی مربوط به باند هدایت و ظرفیت برای چاه کوانتومی آبی ۷۱
- جدول ۴-۳: مقادیر انرژی در باند هدایت و ظرفیت برای ترازهای اول و گاف انرژی موثر در نقطه کوانتومی قرمز ۸۲
- جدول ۵-۳: مقادیر انرژی در باند هدایت و ظرفیت برای ترازهای اول و گاف انرژی موثر در نقطه کوانتومی سبز ۸۲
- جدول ۶-۳: مقادیر انرژی در باند هدایت و ظرفیت برای ترازهای اول و گاف انرژی موثر در نقطه کوانتومی آبی ۸۷
- جدول ۷-۳: طول موج مرکزی و پهنای پالس نقطه کوانتومی ۹۲
- جدول ۸-۳: مقادیر انرژی در باند هدایت و ظرفیت برای ترازهای اول انرژی و گاف انرژی موثر دردهماهای مختلف برای نور آبی ۹۴
- جدول ۹-۳: مقادیر انرژی در باند هدایت و ظرفیت برای ترازهای اول انرژی و گاف انرژی موثر دردهماهای مختلف برای نور سبز ۹۴
- جدول ۱۰-۳: مقادیر انرژی در باند هدایت و ظرفیت برای ترازهای اول انرژی و گاف انرژی موثر دردهماهای مختلف برای نور قرمز ۹۴
- جدول ۱۱-۳: تاثیر افزایش دما بر تغییرات x, y ۹۶
- جدول ۱۲-۳: محاسبه تعداد نقاط کوانتومی برای هر گروه ۹۷
- جدول ۱۳-۳: مقادیر انرژی برای ترازهای اول انرژی و گاف انرژی برای لایه نقاط کوانتومی آبی ۹۷
- جدول ۱۴-۳: مقادیر انرژی برای ترازهای اول انرژی و گاف انرژی برای لایه نقاط کوانتومی سبز ۹۸
- جدول ۱۵-۳: مقادیر انرژی برای ترازهای اول انرژی و گاف انرژی برای لایه نقاط کوانتومی قرمز ۹۹

فصل اول

بررسی منابع و پیشینه پژوهش

۱ بررسی منابع و پیشینه پژوهش

۱-۱- مقدمه

دیود نورافشان^۱ (*LED*) یا ال‌ئی‌دی که در ترجمه بعضی جزوه‌ها، کتاب‌ها و رساله‌های الکترونیک دیود نورانی نیز نامیده شده است، یک قطعه الکترونیک از خانواده دیودها است. در زبان محاوره الکترونیک گاهی آنرا لِد (*led*) نیز می‌گویند. ال‌ئی‌دی‌های تک رنگ همانند بقیه دیودها دارای دو پایه آند^۲ و کاتد^۳ هستند. ال‌ئی‌دی‌های دو رنگ (یا بیشتر) دارای یک پایه مشترک (معمولاً کاتد، معروف به کاتد-مشترک^۴) و به ازای هر رنگ یک پایه دیگر (معمولاً آند) هستند.

تا قبل از دهه اخیر، دیودهای نوری فقط می‌توانستند نورهای سبز و قرمز و زرد تولید کنند که باعث می‌شد کاربرد آنها محدود شود. پس از آن دیودهای نوری با نور آبی هم ساخته شد. یک دیود نوری دو برابر روشنایی یک لامپ ۶۰ وات روشنایی تولید می‌کند و حدود ۱۰۰ هزار ساعت عمر مفید دارد. طبق محاسبات وزارت انرژی ایالات متحده، دیودهای نوری می‌توانند تا سال ۲۰۵۰ میلادی مصرف انرژی آمریکا را ۲۹ درصد کاهش دهند. به دلیل این که دیودهای نوری گرمای زیادی تولید نمی‌کنند، بازده انرژی آن‌ها هم بالاتر است و دیرتر هم می‌شکنند. پژوهشگران بر این باور هستند که دیودهای نوری حتی جایگزین لامپ‌های گازی و مهتابی‌ها هم خواهند شد. اگر این اختراع تازه، چهره صنعتی و تجاری پیدا کند می‌تواند گستره نورهای یک رنگین کمان از جمله نور لامپ‌های معمولی و سفید را تولید کند. با این اوصاف، اختراع ادیسون یعنی لامپ خانگی کنونی باید به زودی از صحنه زندگی بشر خداحافظی کند.

برخی از دیودهای نوری سرعت پاسخ و حساسیت بسیار بالایی دارند. از آنجایی که الکترونیک نوین علاوه بر سیگنال‌های الکتریکی اغلب دارای سیگنال‌های نوری نیز است، دیودهای نوری نقش مهمی را به عنوان قطعات الکترونیک ایفا می‌کنند. غالباً از قطعات پیوندی^۵ برای بهبودی سرعت پاسخ و حساسیت آشکارسازهای نوری یا تابش‌های پر انرژی استفاده می‌شود. دیودهای نورافشان برتری‌های بسیاری بر منابع نور سنتی دارند که مصرف کمتر، عمر بیشتر، استحکام بیشتر، اندازه کوچکتر و سرعت بیشتر در

¹ Light-Emitting Diode

² Anode

³ Cathode

⁴ Common-Cathode

⁵ Junction

خاموش و روشن شدن از جمله امتیازات این منابع نوری بشمار می‌رود. دیودهای نورافشان مصارف متفاوتی در نورپردازی شهری، علائم عبور و مرور و چراغ‌های امروزی خودرو دارند. همچنین اندازه بسیار کوچک آنها باعث شده است تا در نمایشگرهای گرافیکی نسل جدید به کار روند. سرعت بسیار بالای آنها در خاموش و روشن شدن کاربردهای ویژه‌ای در فن آوری مخابرات برای آنها به ارمغان آورده است.

در سال ۱۹۰۷ میلادی روند^۱ به انتشار نور از کریستال نیمه‌هادی^۲ هنگام عبور جریان پی برد. بعد از سال ۱۹۲۰ میلادی و اوایل ۱۹۳۰ میلادی لسوو^۳ آزمایش روند را دوباره تکرار کرد و موفق شد اثر فتوالکتریکی^۴ را کشف نماید. بعد از سال ۱۹۵۰ تولید نور در محدوده نور مرئی بر اساس گالیم-فسفاید (GaP) معنی‌دار شد. اولین ال‌ئی‌دی‌های تولید صنعتی در سال ۱۹۶۲ میلادی توسط هولونیاک^۵ از جنرال الکتریک^۶ و تنها با رنگ قرمز و ترکیب گالیم-آرسناید-فسفاید (GaAsP) با بازدهی کمتر از ۰/۱ لومن^۷ بر وات وارد بازار شدند. ساخت هر ال‌ئی‌دی در آن زمان ۲۶۰ دلار هزینه داشت.

ال‌ئی‌دی‌های سبز، زرد و نارنجی در دهه ۷۰ میلادی تولید شدند. ال‌ئی‌دی‌های اولیه به علت بهره پایین‌شان تنها در مدارات الکترونیکی استفاده می‌شدند. بهره نوری ال‌ئی‌دی‌ها رفته‌رفته افزایش یافت تا اینکه در دهه ۸۰ و اوایل دهه ۹۰ میلادی ال‌ئی‌دی‌ها با مواد جدید و روشنایی بالا وارد بازار شدند.

این مواد آلومینیوم-ایندیم-گالیم-فسفاید (AlInGaP) برای رنگ‌های نارنجی-قرمز، نارنجی، زرد و قرمز و ایندیم-گالیم-نیتراید (InGaN) برای رنگ آبی و سبز مبنایی برای روشنایی بالا در صنعت دیود قرار گرفتند. شکل ۱-۱ بر اساس انتخاب مواد نیمه‌هادی و ناخالصی‌های آن مشخصه‌های نور تولیدی را نشان می‌دهد.

¹ Round

² Semiconductor

³ Lossev

⁴ Electroluminescence

⁵ Holonyak

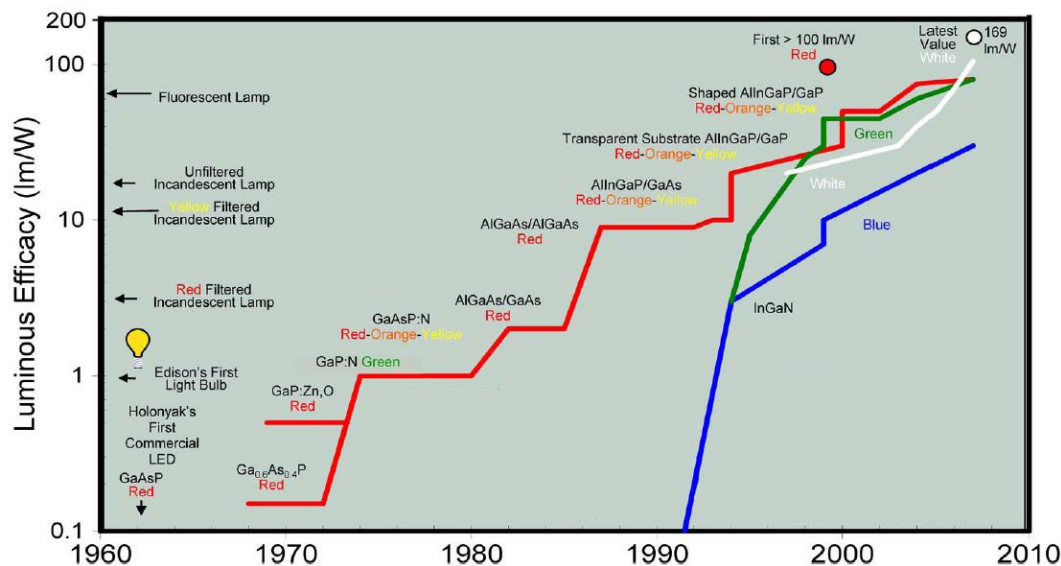
⁶ General Electric

⁷ Lumen

Materials	Wavelength (nm)	Color
GaInN	370	purple
GaInN	450	blue
GaInN	525	green
InGaAlP/GaAs	562	green
InGaAlP/GaAs	574	yellow green
InGaAlP/GaP	590	yellow
InGaAlP	644	red
GaAlAs/GaAs	660	red
GaP/GaP	700	red
GaAlAs	880	UV
GaAs	940	UV

شکل ۱-۱: مواد نیمه‌هادی و مشخصه نور تولیدی

درکنار همه این‌ها دیودهای سفید به دلیل کاربردهای فراوان آن‌ها از سال ۱۹۹۵ میلادی مسیر رشد را طی کردند. شکل ۲-۱ مسیر رشد ال‌ئی‌دی را از زمان هولونیاک تا به امروز را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۲-۱: روند رشد بازدهی، فن‌آوری ال‌ئی‌دی که کمتر از ۰/۱ لومن بر وات در سال ۱۹۶۲ میلادی، به بیش از ۱۰۰ لومن بر وات تا سال ۲۰۱۰ میلادی افزایش یافته است.

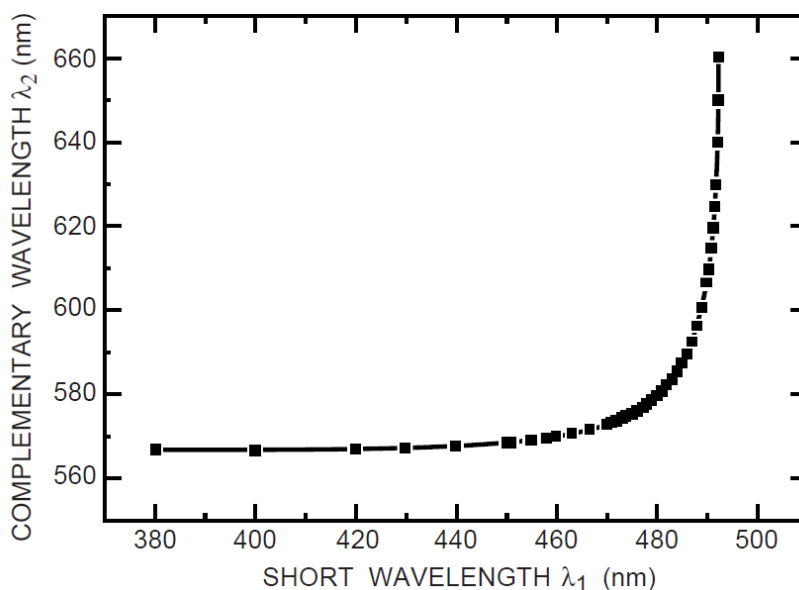
۲-۱- نور سفید

از آنجاکه نور سفید کاربردهای مهمی در روشنایی، عمل جراحی، نمایش‌گرها، چراغ اتومبیل و ... دارد، تلاش بسیار زیادی به منظور تولید نور سفید با بیشترین بازده شده است. در اینجا به طور مختصر روش‌های تجاری و نوین ترکیب رنگ‌ها را برای به‌دست آوردن نور سفید اشاره می‌کنیم [۲].

نور سفید به چندین روش تولید می‌شود:

- ❖ دورنگ^۱
- ❖ سه رنگ^۲
- ❖ تبدیل کننده طول موج^۳

یک روش تولید نور سفید استفاده از دو تک رنگ می‌باشد که رنگ‌های مکمل نامیده می‌شوند. ترکیب دو تک رنگ مکمل با نسبت توان معین، سبب ایجاد نور سفید می‌شود. شکل ۱-۳ طول موج‌های رنگ‌های مکمل را نشان می‌دهد [۳].



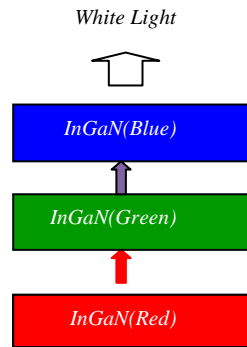
شکل ۱-۳: طول موج‌های مکمل برای تولید نور سفید

روش دیگر برای تولید نور سفید، نشر سه رنگ اصلی (قرمز، سبز، آبی) می‌باشد. مطابق شکل ۱-۴ اگر سه رنگ اصلی در طول موج‌های خاص خود با نسبت توان مناسب تولید شوند ترکیب آن‌ها نور سفید را فراهم می‌آورد.

¹ Dichromatic

² Trichromatic

³ Wavelength Converter



شکل ۱-۴: تولید نور سفید از ترکیب سه رنگ قرمز، سبز و آبی

روش دیگر برای تولید نور سفید به وسیله گسیل کننده با پهنای طیفی وسیع است که طیف کامل نور مرئی را تولید می‌کند. بیشتر گسیل کننده‌های نور سفید از یک دیود در طول موج کوتاه و یک تبدیل کننده طول موج استفاده می‌کنند. مقدار یا همه نور گسیل شده از دیود در ماده تبدیل کننده جذب شده و نوری ساطع می‌شود که طول موج آن بلندتر بوده و در نهایت با ترکیب این نورها، نور سفید در خروجی ظاهر می‌شود.

۳-۱- تبدیل کننده‌های طول موج برای تولید نور سفید

چندین نوع ماده تبدیل کننده شامل رنگینه‌ها^۱، فسفرها و نیمه‌هادی‌ها وجود دارد. پارامترهای این مواد، طول موج جذب، طول موج نشر و بازده کوانتومی هستند. یک تبدیل کننده خوب نزدیک به ۱۰۰٪ بازده کوانتومی دارد. بازده انرژی کلی تبدیل کننده طول موج با رابطه (۱-۱) بیان می‌شود:

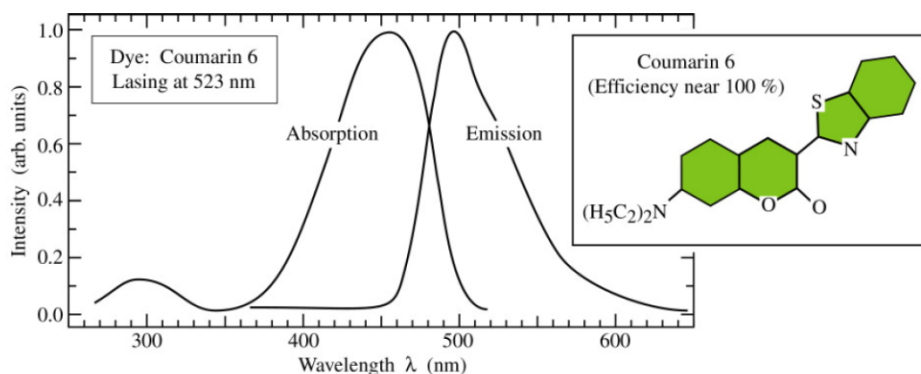
$$\eta = \eta_{ext} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \quad (1-1)$$

که λ_1 طول موج اولیه، λ_2 طول موج تبدیل شده و η_{ext} بازده کوانتومی خارجی می‌باشد. بازده کوانتومی خارجی برابر است با تعداد فوتون گسیل شده به فضای آزاد در واحد ثانیه تقسیم بر تعداد الکترون تزریق شده به داخل ال‌ئی‌دی در واحد ثانیه است. اگر بازده کوانتومی خارجی برابر واحد باشد، باز هم تلفات مربوط به فرآیند تبدیل طول موج وجود دارد.

¹ Dyes

۱-۳-۱- دیود سفید بر اساس تبدیل کننده‌های رنگینه

دیودهای سفید با استفاده از مولکول‌های رنگینه آلی به‌عنوان مواد تبدیل کننده طول‌موج ساخته شده‌اند. یک نمونه از طیف نشر و جذب رنگینه در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. رنگینه‌ها می‌توانند داخل کپسول اپوکسی^۱ قرار گیرند یا می‌توانند به پلیمرهای شفاف نوری بپیوندند. رنگینه‌ها می‌توانند بازده کوانتومی ۱۰۰٪ داشته باشند، با این وجود رنگینه‌ها جزء مولکول‌های آلی می‌باشند مشکلاتی از قبیل طول عمر محدود و عدم پایداری دراز مدت دارند. برخی مولکول‌های رنگینه از لحاظ نوری بعد از مدتی جذب فوتون غیر فعال می‌شوند. طول عمر رنگینه‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای کوتاه‌تر از طول عمر مبدل‌های طول‌موج فسفر و نیمه‌هادی است [۲].



شکل ۱-۵: طیف نشری و جذبی یک رنگینه تجاری. شکل جانبی ساختار شیمیایی مولکول رنگینه را نشان می‌دهد.

رنگینه‌ها اختلاف کوچکی بین طیف نشر و جذب دارند (جابه‌جایی استوکس^۲). برای مثال جابه‌جایی استوکس برای رنگینه حدود ۵۰ نانومتر است که در (شکل ۱-۵) نشان داده شده است. این جابه‌جایی کوچک‌تر از جابه‌جایی استوکس مورد نیاز برای دیود سفید دو رنگی است که شیفت طول‌موجی برای نمونه ۱۰۰ نانومتر یا بیشتر نیاز دارد.

۱-۳-۲- دیود سفید بر اساس تبدیل کننده‌های فسفری

بیشتر مواد تبدیل کننده طول‌موج، شامل فسفر می‌باشند. یک گروه متداول YAG^۳ با فرمول شیمیایی $Y_3Al_5O_{12}$ است. فسفر موجود در دیود سفید معمولاً با دیود آبی یا UV تحریک می‌شوند [۲].

^۱ Epoxy

^۲ Stokes Shift

^۳ Yttrium Aluminum Garnet