

دیودهای نورگسیل (LEDs) با بازده کوانتمی بالا بر مبنای نانوساختارهای نیتروژن دار

نگارش: سید سعید حیدری استاد راهنما : دکتر حمید هراتی زاده

استاد مشاور:

دکتر مرتضی ایزدی فر

بهمن ماه ۱۳۸۶

فهرست مطالب

عنوان سپاسگزاری چکیدہ فہرست مطالب فہرست شکلھا فہرست جداول

فصل اول- تاریخچه و معرفی دیودهای نور گسیل رنگی و سفید ۱-۱ معرفی دیودهای نورگسیل (LEDs) ۱-۲ فرآیندهای بازترکیب در نیمرساناها ۱-۲-۱ بازترکیب نوری ۱-۲-۲ روشهای تولید نور سفید با استفاده از LED ۱-۴ تاریخچه LEDها ۱-۵ دیودهای نور گسیل بر پایه نیمرساناهای نیتروژندار

فصل دوم- کاربردها و مزایای دیودهای نور گسیل و دستهبندی آنها ۲-۱ کاربردهای مدرن LDها و LEDها ۲-۲ اهمیت LEDها از نظر اقتصادی ۲-۳ دستهبندی دیودهای نور گسیل

۱-۳-۲ دیودهای نورگسیل آلی یا پلیمری ۲-۳-۲ دیودهای نورگسیل غیر آلی ۲-۳-۲ سیلیکون متخلخل ZnO ۲-۲-۳-۲ AlGaInP ۳-۲-۳-۲ GaN ۴-۲-۳-۲ Al_xGa_{1-x}N ۵-۲-۳-۲ InGaN ۶-۲-۳-۲

فصل سوم- مراحل ساخت LEDها و مقایسه انواع بستر برای LEDهای نیتروژندار

LED مراحل ساخت

۲-۳ مطالعه و مقایسه انواع بستر برای LEDهای برمبنای نانوساختارهای چاه کوانتمی نیتروژندار

- LED ۱-۲-۳ها روی بستر SiC
- LED ۲-۲-۳های روی بستر Si
- GaN های روی بستر LED ۳-۳-۳

۳-۳-۳ مقایسه دو LED رشد داده شده روی بسترهای GaN و

۴-۳ مقایسه بازدهی LEDهای با رشد جانبی و عمودی

۵-۳ رشد LEDها بر روی دیگر بسترهای جدید

فصل چهارم- معرفی متریک CRI و بازده LEDها و انتخاب دو LED مناسب برای تولید نور سفید پربازده ۲-۴ مختصات رنگی CIE ۴–۲ تولید پربازده ترین نور سفید حاصل از دو منبع با طول موج و شدت متفاوت
۴–۴ بازده کوانتمی LEDها
۴–۴ بازدهی کل و مکانیزمهای کاهش دهنده آن
۴–۴ بازدهی کل و مکانیزمهای کاهش دهنده آن
۵–۱ عوامل موثر در محاسبه مقدار گاف انرژی موثر در رنیمرساناهای نیتروژندار
۵–۱ عوامل موثر در محاسبه مقدار گاف انرژی موثر در رنیمرساناهای نیتروژندار
۵–۱ عوامل موثر در محاسبه مقدار گاف انرژی موثر در رنیمرساناهای نیتروژندار
۵–۱ عوامل موثر در محاسبه مقدار گاف انرژی
۵–۱ عوامل موثر در محاسبه مقدار گاف انرژی موثر در رنیمرساناهای نیتروژندار
۵–۱–۲ تقریب وگارد برای محاسبه گاف انرژی
۵–۱–۲ انژی حالت پایه اکسیتون در چاه کوانتمی
۵–۱–۳ انرژی حالت پایه اکسیتون در چاههای کوانتمی نیتروژندار و مقایسه آن در چاههای کوانتمی کوانتمی A-۱–۴ اثر قطبش و ایجاد چاه مثلثی در چاههای کوانتمی نیتروژندار و مقایسه آن در چاههای کوانتمی A-۱–۴ اثر قطبش و ایجاد چاه مثلثی در چاههای کوانتمی نیتروژندار و مقایسه آن در چاههای

۲-۵ گیراندازی و محدودیت حاملها

۵-۳ روشهای مطالعه نمونههای این پایاننامه

۵-۴ ساختار نمونههای مورد مطالعه در این پایاننامه

۵-۵ اثر تغییر دما در فرآیندهای بازترکیب

۵–۵–۱ بررسی جابجایی انرژی پیک قلههای PL در اثر تغییر دمای نمونه برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر

۵–۵–۲ بررسی تغییرات شدت پیک قلههای PL در اثر تغییر دمای نمونه برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر

۵–۵–۳ بررسی تغییرات مساحت زیر نمودار PL در اثر تغییر دمای نمونه برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر ۵–۵–۴ بررسی تغییرات FWHM قلههای PL در اثر تغییر دمای نمونه برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگ

۵-۶ اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی در فرآیندهای بازترکیب ۵-۶-۱ بررسی تغییرات شدت قلههای PL در اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر

۵-۶-۲ بررسی تغییرات جابجایی انرژی پیک قلههای PL در اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر

۵-۶-۳ بررسی تغییرات مساحت زیر نمودار PL در اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر

۵-۷ بررسی تغییرات شدت دو قله انرژی نمونه با غلظت ایندیم ۱۳/۹ درصد در اثر تغییر دما

مراجع

ضميمه

مقاله اول

مقاله دوم

مقاله سوم

فهرست شكلها

محاسبه ترازهای انرژی در نوار رسانش و نوار ظرفیت چاههای کوانتومی

GaN/AlGaN

بهمدی، حجت٬ حیدری طبائی زواره، سید سعید٬ هراتیزاده، حمید٬ طبسی، فروغالسادات٬

ادانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکاده فیزیک، صنادوق پستی ۳۲۱۹۹۹۹۱۳۱

۲ دانشگاه آزاد مشهد، دانشکده فیزیک

چکیدہ

در این مقاله روش های مختلف در زمینه تعیین ترازهای انرژی نوار ظرفیت در چاههای کوانتومی مورد یررسی قرار گرفته است. به دلیل وجود حفرههای سبک و سنگین در نوار ظرفیت محاسبه ترازهای انرژی در این نوار پیچیده تر از نوار رسانش است. از طرفی چاههای کوانتومی مورد مطالعه یعنی GaN/AlGaN به دلیل حضور میدانهای پیزوالکتریک و خودبخودی از حالت مربعی به حالت مثلثی تغییر شکل می دهند که ما ضمن محاسبه ترازهای انرژی برای الکترونها و حفره ها، انرژی گسیلی چاه GaN را با مقادیر تجربی حاصل از اندازه گیری های فوتولومینسانس مقایسه می کنیم. به دلیل اهمیت بکارگیری نانوساختارهای نیمرسانا در صنایع الکترونیکی، اپتوالکترونیکی و مخابراتی بویژه در ساختار دیودهای نوری و دیودهای لیزری، آشکارسازها، قطعات فرکانس بالا و ... لازم است همراه با پیشرفت سریع فعالیتهای تجربی انجام گرفته در زمینه رشد و تهیه ساختارها و طراحی و ساخت قطعات مربوطه، در زمینه تئوری آنها نیز مطالعات جامع انجام پذیرد. بعنوان مثال حل معادله شرودینگر در ساختار واقعی که با ساختارهای ایدهآل تفاوتهایی دارند اجتناب ناپذیر مینماید و لازم است که ترازهای انرژی برای نوارهای ظرفیت و رسانش محاسبه گردند و در این راستا نمی توان از پتانسیلهایی که بعنوان اغتشاش، چاه کوانتومی را تحت تأثیر قرار میدهند چشم پوشی نمود.

حل معادله شرودینگر برای چاه پتانسیل مربعی متناهی آنگونه که در کتابهای کوانتومی نیز نشان داده شدهاست، به یک معادله جبری بشکل معادله(۱) منجر می شود:

$$\tan\left(\left(\frac{m_w E L_z^2}{2\hbar^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right) = \left(\frac{m_b}{m_w} \frac{V_0 - E}{E}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(1)

که در آن m_b) m_w) جرم مؤثر ذره در چاه(سد) میباشد. در نوار ظرفیت به دلیل وجود دو نوع حفره سبک و سنگین وضعیت پیچیده تر از نوار رسانش میباشد (شکل ۱). در مدل پیشنهادی *لوتینگر* [۱] ابتدا وقتی انرژی محصورسازی بعنوان یک اختلال روی حالت مختل نشده k=0 اعمال می شود، تبهگنی حفره های سبک و سنگین شکافته می شود و جرم مؤثر حفره های وارد شده در معادله شرودینگر گونه را می توان بشکل زیر نوشت:

$$\frac{1}{m_{hh}^{z}} = \gamma_{1} - 2\gamma_{2} , \qquad \frac{1}{m_{lh}^{z}} = \gamma_{1} + 2\gamma_{2}$$
 (Y)

سپس برهم کنش *لوتینگر* را بعنوان یک اختلال جدید روی ترازهای چاه کوانتومی اضافه میکنیم. جرمهای عرضی در صفحه فصل مشترک بشکل معادله (۲) نوشته میشوند:

$$\frac{1}{m_{hh}^{xy}} = \gamma_1 + \gamma_2 \qquad , \qquad \frac{1}{m_{lh}^{xy}} = \gamma_1 - \gamma_2 \tag{(7)}$$

اکنون جرم حفره سنگین(یعنی حالت $\frac{3}{2} = \pm \frac{3}{2}$) کمتر از جرم حفره سبک($J_z = \pm \frac{1}{2}$) است(شکل ۱۵). در اینحالت مشاهده می شود(شکل ۱۵) که با درنظر گرفتن مراتب بالاتر اختلال k.p ترازهای انرژی حفرههای سبک و سنگین دیگر همدیگر را قطع نمی کنند(شکل ۱۵).



شکل ۱: ترازهای انرژی در نوار ظرفیت(تراز انری مربوط به حفرههای سبک پایینتر از تراز انرژی حفرههای سنگین قرار

س*ینگ* برای حل یک چاه پتانسیل مربعی متناهی تناوبی معادله شرودینگر را با استفاده از ضرایب فوریه محاسبه کرد[۲]. او با در نظر گرفتن پتانسیل تناوبی و تابع موج به صورت زیر

(که در آن G پتانسیل تناوبی شبکه وارون است، $G = rac{2n\pi}{a}$) ترازهای انرژی در داخل چاه را بدست آورد و اولین تراز انرژی برای یک چاه مربعی تناوبی کم عمق (شکل ۲) را بدون اعمال میدان الکتریکی به صورت زیر محاسبه نمود:

$$E_1 = \frac{3\Delta E}{4} - \frac{\pi^2 \hbar^2}{4m^* {L_w}^2} \left[\left(1 + \frac{80\Delta E^2 {L_w}^4 {m^*}^2}{\pi^6 \hbar^4}\right)^{1/2} - 1 \right]$$
(\$)

و سپس با در نظر گرفتن اغتشاش ناشی از میدان الکتریکی اولین تراز انرژی چاه مربعی متناهی تحت تأثیر میدان را به صورت زیر بدست آورد.

$$E_{1} = \frac{3\Delta E}{4} - \frac{\pi^{2}\hbar^{2}}{4m^{*}L_{w}^{2}} [\{1 + 32[\frac{5\Delta E^{2}}{2\pi^{2}} + (\frac{eE_{w}L_{w}}{\pi})^{2}]\frac{L_{w}^{4}m^{*2}}{\pi^{4}\hbar^{4}}\}^{1/2} - 1]$$

$$(7)$$

شکل ۲ : چاه پتانسیل مربعی محدود الف) بدون اعمال میدان, ب) با اعمال میدان

نمونههای مورد مطالعه در این مقاله، چاههای کوانتومی چندگانه GaN/AlGaN بدون آلایش است که تمام خصوصیات ساختاری و شرایط رشد آنها مشابه بوده و تنها تفاوت آنها در پهنای چاه میباشد. این نمونهها در راستای [۲۰۰۱] روی زیر لایه اکسید آلومینیوم (Al₂O₃) به روش رسوب بخار شیمیایی (MOCVD) رشد داده شدهاند.نتایج حاصل از مطالعه اپتیکی این ساختارها قبلاً درمقالهای درهمین کنفرانس گزارش شده است[۳]. در طیف فتولومینسانس (PL) نمونه mole (مطالعه اپتیکی این نادی اکتارها قبلاً درمقالهای در همین کنفرانس گزارش شده است[۳]. در طیف فتولومینسانس (PL) نمونه mole (مطالعه اپتیکی این نادی این اکتارها قبلاً درمقالهای درهمین کنفرانس گزارش شده است[۳]. در طیف فتولومینسانس (PL) نمونه mole (و mole دو قله ماختارها قبلاً درمقالهای درهمین کنفرانس گزارش شده است[۳]. در طیف فتولومینسانس (PL) نمونه mole (و قله موجود نادیک به هم مشاهده شدند که مربوط به اکسیتونهای جایگزیده در دو چاه با پهنای متفاوت ناشی از ناهمواری های موجود در فصل مشترک چاه و سد میباشد. با میکروفوتولومینسانس *μ* PL متوجه شدیم گستردگی عرضی این ناهمواری های کوانتومی چندگانه حدود یک آنگستروم میباشد. با میکروفوتولومینسانس *μ* PL مشاهده شده شده ند. تفاوت پهنای چاههای کوانتومی چندگانه حدود یک آنگستروم میباشد. با میکروفوتولومینسانس *μ* PL مشاهده شده شده ند. تفاوت پهنای چاه های کوانتومی چندگانه حدود یک آنگستروم میباشد. اما اختلاف این دو قله مربوط به دو چاه با اختلاف پهنای آ/۵۰ میباشد که به اندازه یک بردار C شبکه ورتساید(WOCW) میباشد که به اندازه یک بردار C شبکه ورتساید(WOCW) مربوط به پهنای الما/۵۰ دو چاه با انرژی GaN/۸ مربوط به پهنای کردار گرمرا کا میبان میباند که به اندازه یک بردار C شبکه ورتساید(WOCW) و ازرژی GaN/۵۰ مربوط به پهنای ۲۰۰۸ دو چاه با انرژی GaN(۸ میبان میبانی را میبانی را میبانی را میبانی و میبانی و برای چاه میبان دو چاه با انرژی GaN/۵۰ مربوط به پهنای کردار C شبکه ورتساید(WOCW) و ازرژی Gany (Counce) دو چاه با انرژی کرور و به بهمای T/۵۰ میبانی را میبان میبانی و را میبانی را میبانی کردرو و به پهنای T/۵۰ میبانی و برای چاه مشاهده شده در طیف فتولومینسانس را میبانی دو میبانی کردار C شیبای و ایرژی (Counce) دو قله میبای کردر (Counce) دو میف میبای T/۵۰ میبای دو میبای کردر و میبای T/۵۰ میبای

در ساختار Wz بعلت عدم تقارن، میدانهای قطبشی خودبخودی(SP)، و بدلیل وجود کرنش در فصل مشترک ناشی از تفاوت در ثابتهای شبکه و ضریب انبساط گرمایی لایههای چاه و سد، میدانهای قطبشی پیزوالکتریک(Pz) برای بلورهای شش گوشی با گروه تقارنی بلوری C_{6V} توسط رابطه زیر داده میشود[0و ٤]:

i=1,2,3,... I=1,...,6
$$P_i^{P_z} = \sum_i d_{il} \sigma_l$$
 (V)

که Pi^{Pz} مؤلفه های قطبش پیزو الکتریک هستند. در نمونههای ما σ1=σ2 و σ3=0 است و استرسهای پیچشی خیلی ناچیز در نظرگرفته شدهاند. لذا σ4=σ5=0 و عملاً فقط مؤلفه در جهت z قطبش پیزوالکتریک P3^{Pz}، باقی میماند:

$$P_{3}^{z} = 2d_{31}\sigma_{1} = 2d_{31}\varepsilon = C_{11} + C_{12} + \frac{2C_{13}^{2}}{C_{33}}$$
(A)

در نهایت تنها مؤلفه قطبش پیزوالکتریک بر حسب کرنش و ضرایب e_{kl} در نمونههای ما بشکل زیر است:

$$P_3^{P_z} = 2 \frac{(a - a_0)}{a_0} [e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}}]$$
(9)

که جهت آن در جهت رشد بلور است. در ساختار Wz قطبش خودبخودی(Sp) در جهت رشد بلور [۰۰۰۱] بوده و از تقریبی شبیه قانون و گارد برای آلیاژهای Al_xIn_yGa_(1-x-y)N داریم:[۵و ٤]

$$P_{\text{AlxInyGa}(1x-y)N}^{(\text{Sp})} = x P_{AlN}^{(\text{Sp})} + y P_{InN}^{(\text{Sp})} + (1 - x - y) P_{GaN}^{(\text{Sp})}$$
(1.)

در نمونههای ما که با روش MOCVD رشد داده شده ساختار بلوری Ga-face است. ثابت شبکه AlGaN کمتر از GaN می باشد و از آنجایی که لایه ضخیمتر (در اینجا AlGaN) بعنوان بستر در نظر گرفته می شود لذا کرنش از نوع تراکمی و جهت قطبش پیزو مخالف جهت قطبش خودبخودی است. جرم مؤثر الکترونها و حفره ها در GaN به ترتیب عبارتند از $m_e = 0.22m_0$ و $m_e = 0.22m_0$) ($m_{hh} = 1.76m_0$) معنوان بستر), عمق چاه الکترون و حفره در نوار رسانش وظرفیت در نمونه ($m_{hh} = 1.76m_0$) با ستفاده از قانون وگارد و پارامتر انحناء 20.25 [3] برابر با مقادیر زیر محاسبه می شود:

,
$$\Delta E_c \approx 115 \ meV \quad \Delta E_v \approx 62 \ meV$$
 (11)

انرژی جایگزیدگی اکسیتونها از اختلاف بین مقدار منحنی ورشنی(E(T) = E(O) - A × T² / (B + T)) با مقادیر تجربی، ELocal =۱٤meV بدست می آید.

از آنجا که در نمونههای ما بدلیل حضور میدانهای قطبشی خودبخودی و پیزوالکتریک چاه به شکل مثلثی است، از روش *سینگ* (معادله ۲) برای مقایسه با مقادیر تجربی استفاده کردیم که در توافق خوبی با مقادیر تجربی ما می باشد (شکل ۳). ما با داشتن مقادیر تجربی انرژی گاف GaN (E_B=۳/۵۰۵eV)[۵] و انرژی جایگزیدگی(E_{local}) و انرژی بستگی(E_{bocal}) و انرژی در نوارهای اکسیتونها و تعیین انرژی گسیلی(E_b) به کمک طیف فوتولومینسانس و معادله (۱) و با محاسبه ترازهای انرژی در نوارهای رسانش و ظرفیت به کمک معادله (۸) مقایسه ای مقادیر تجربی معادله (۲۸meV)[۵] و انرژی جایگزیدگی(E_{local}) و انرژی بستگی(BaNeV)[۵] اکسیتونها و تعیین انرژی گاف GaN (E_{PL}) به کمک طیف فوتولومینسانس و معادله (۱) و با محاسبه ترازهای انرژی در نوارهای رسانش و ظرفیت به کمک معادله (۸) مقایسه ای بین مقادیر محاسبه شده برای انرژی گسیلی چاههای GaN/AIGaN بر حسب رسانش و ظرفیت به کمک معادله (۸) مقایسه ای بین مقادیر محاسبه شده برای انرژی گسیلی چاههای GaN/AIGaN بر حسب رسانش و مقادیر تجربی یدستآمده در شکل (۳) انجام داده ایم که این نمودار تأیید خوبی بر اعتبار روش بکار رفته در محاسبه ترازهای انرژی نوار رسانش و معادیر ترزی گسیلی معاده (۸) مقایسه ای بین مقادیر محاسبه ترای انرژی گسیلی (۱) انرژی گسیلی زیاده در شکار (۳) انجام داده ایم که این نمودار تأیید خوبی بر اعتبار روش بکار رفته در محاسبه ترازهای انرژی نوار رسانش و ظرفیت می بهنای و مقادیر تجربی تطبیق قابل قبولی نشان می دهد.

$$E_{PL} = E_g + E_{1e} + E_{1hh} - E_b - E_{local}$$
(17)



سپاسگزاری

مؤلفین از همکاری صمیمانه پروفسور مونمار و گروه ایشان جهت استفاده از امکانات آزمایشگاه فوتولومینسانس در دانشگاه لینشوپینگ سوئد سپاسگذاری مینماید.

مراجع:

J. M. Luttinger, Phys. Rev. 102, 1030 (1956)
 J. Singh, Appl. Phys. Lett. 64, 2694 (1994)
 ۳. " مطالعه افت و خیز آماری پهنای نانو ساختار گالیم نیتراید به روش اپتیکی" فروغ السادات طبسی; حمید هراتی راده; بو مونمار; هیروشی آمانو، یازدهمین کنفرانس ماده چگال، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان، ۱۳۸۴
 4. F. Bernardini; V. Fiorentini; J. Phys. Rev. B 64 (2001)

5. H. Morkoc, Nitride Semiconductors and Devises, ed. By R. Hull, R.M. Osgood, Jr., H. Sakaki, and A. Zunger, Springer-Verlage, (1999)

6. P. BigenWald, P.Lefebvre, T. Bretagnon, and B. Gil, Phys. Stat. Sol. (b), 216, 371 (1999)

مقاله دوم

ارائه به کنفرانس اپتیک وفتونیک در رفسنجان

مطالعه اپتیکی نانوساختار نیمرساناهای نیتروژندار غنی از ایندیم

سعید حیدری'، حجت بهمدی'، زهرا آزادواری'، حمید هراتیزاده'

ٔ دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک

چکیده – در این مقاله رفتار ویژه اتمهای ایندیم در ساختار نیمرساناهای نیتروژندار بویژه InGaN مورد بررسی قرار میگیرد. رفتار اتمهای ایندیم بویژه تمایل آنها به تجمع و ایجاد خوشههای ایندیم در آلیاژهایی از قبیل InGaN منجر به افت و خیزهای شدید پتانسیل در ساختار کریستالی InGaN می گردد که منشأ اصلی ایجاد جایگزیدگی در این ساختارها میباشد. تکنیک مناسب برای مطالعه این رفتار، طیف سنجی فتولومینسانس بر حسب تغییرات دمایی میباشد. تأثیر ایندیم در چاههای کوانتومی InGaN/GaN بمراتب بیشتر از تأثیر آلومینیم در چاههای کوانتومی GaN/AlGaN است، زیرا در چاههای کوانتومی InGaN/GaN ناحیه فعال(چاه) آلیاژ GaN/AlGaN میباشد، در حالیکه در چاههای کوانتومی GaN/AlGaN آلیاژ AlGaN تشکیل دهنده ناحیه سد می باشد.

> کلید واژه- خوشه های ایندیمی، جایگزیدگی، چاههای کوانتومی InGaN/GaN، فتولومینسانس، خواص اپتیکی، اکسیتون کد PACS – ۴۶۷۰ – ۲۵۴۰، ۲۵۰۰–۱۶۰۰، ۶۰۰۰، ۱۶۰۰–۵۵۹۰، ۲۵۰۰–۲۵۰۰، ۲۵۰۰–۲۶۰۰، ۲۶۰۰–۲۶۰۰، ۳۰۰۰

۱- مقدمه

نیمرساناهای نیتروژندار بدلیل خصوصیات ویژه خود از قبیل گستردگی گاف انرژی از ناحیه مادون قرمز تا ناحیه فراءبنفش، پایداری حرارتی بالا، پایداری ساختاری در شرایط سخت محیطی و غیره کاربردهای گستردهای در زمینه الکترونیکی و اپتو-الکترونیکی دارند.

در میان نیمرساناهای نیتروژندار ترکیباتی که حاوی ایندیم میباشند. علی رغم کاربردهای گسترده در قطعات اپتوالکترونیکی از قبیل دیودهای نورگسیل با روشنایی بالا و دیودهای لیزری ناحیه آبی دارای ابهامات زیادی در رفتار و خصوصیات فیزیکی از جمله گاف انرژِی (که از ۲٫۷ تا ۲٫۲ الکترون ولت گزارش شده است) می باشند. پیش بینی می شود که ریشه رفتارهای غیر عادی یا بعبارت دیگر کمتر شناخته شده در رفتار اتمهای ایندیم باشد. مقاله حاضر به مطالعه اپتیکی ساختار چاه کوانتومی InGaN/GaN با هدف شناخت فیزیک این نیمرسانا به منظور کنترل مکانیزمهای بازترکیب نوری در این ترکیبات برای افزایش راندمان اپتیکی آنها می پردازد.

بدلیل تمایل ایندیم برای تشکیل خوشههای غنی از ایندیم در ترکیبات نیتروژندار مطالعه مکانیزم بازترکیب این ترکیبات پیچیدهتر از ترکیبات دیگر نیمرساناهای نیتروژندار است. رفتار خوشهای ایندیم در ترکیبات InGaN باعث بوجود آمدن افت و خیزهای پتانسیل در چاههای کوانتومی و در نتیجه افزایش بیش از پیش حالتهای جایگزیده می شود و حضور حالتهای جایگزیده تاثیر قابل ملاحظه ای در افزایش توان تابشی ساختارهای کوانتومی دارد.

همانطور که میدانیم در چاههای کوانتومی GaN/AlGaN، نیمرسانای دوتایی GaN ناحیه فعال (لایه چاه) را تشکیل میدهد و تغییر درصد Al ارتفاع سد پتانسیل را در ترکیبات GaN/AlGaN تغییر میدهد. در حالیکه در چاههای کوانتمی InGaN/GaN ناحیه فعال (لایه چاه) آلیاژ سهتایی InGaN است و با توجه به اینکه فرایندهای بازترکیب در چاه اتفاق میافتد، تغییر درصد ایندیم InGaN در مکانیزم و احتمال فرایندهای بازترکیب نسبت به ترکیبات حاوی آلومنیوم در چاههای کوانتومی GaN/AlGaN

در سالهای اخیر از طرفی بدلیل اهمیت صنعتی و از طرف دیگر بدلیل وجود ابهامات و پیچیدگیهای زیاد ساختارهای حاوی ایندیم، تمرکز مطالعات و تحقیقات به روی نیمرساناهای نیتروژندار حاوی ایندیم مانند InGaN و InG بنحو روزافزونی گسترش یافته است.

۲- معرفی نمونه ها

نمونه های مورد مطالعه در این مقاله چاههای کوانتومی چندگانه InGaN رشد داده شده بروی زیر لایه Sapphire می باشند که حاوی ۸٫۱٪ و ۱۸٫۷٪ ایندیم اند. سنجش های اپتیکی بروش فتولومینسانس و با تحریک لیزر ^آرگون از دمای پایین تا دمای اتاق به انجام رسیده است.

۳- بحث و بررسی

عدم تطابق ثابت شبکه (بمیزان ۱۵٪) و اختلاف ضریب انبساط گرمایی بین زیر لایه Sapphire و لایههای بالایی آن باعث بوجود آمدن نواقصی شبکه ای ودررفتگیهای ریسمانگونه (Threading Dislocations) با چگالی از مرتبه ۲۰۰^۲ cm⁻² تا ۱۰^{۱۲} در حین رشد میشود[۱]. علی رغم حضور نواقص شبکه ای فراوان بازده نوری ساختارهای چاه کوانتومی آنها تا حدودی (در مقایسه با نیمرساناهای نیروژندار حاوی آلومنیوم) مناسب میباشد. نتیجه مطالعات ساختاری TEM و NFSOM(Near Field) (عالی میه مناط کوانتومی (عام) (۲-۴] نشاندهنده تشکیل ساختارهای سهبعدی شبه نقاط کوانتومی (3D Q.D-Like) ناشی از توزیع غیر یکنواخت ایندیم در چاه کوانتومی InGaN است که به حضور یک کمینه پتانسیل برای بازترکیب حاملهای جایگزیده منجر میشود.از طرفی خصوصیات این قطعات شدیداً تحت تأثیر اثر محدودیت کوانتومی (QCSE) ناشی از حضور یک میدان پیزوالکتریک بزرگ در چاه کوانتومی است [۵].

بطور کلی کاهش گاف انرژی بدلیل تغییرات دمایی در InGaN, AlGaN, GaN می توان بوسیله معادله تجربی ورشنی (می توان بوسیله معادله تجربی ورشنی ورشنی (علی کاهش گاف انرژی بد دمای T است. $\boldsymbol{\alpha} \in \boldsymbol{\beta}$ هم ثابتهای $[\boldsymbol{\beta}]$ [۶] $E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}$ [۶] کرمایی ورشنی هستند که از مطالعات فتورفلکتانس مقادیر آنها $\boldsymbol{\alpha} = 1$ meV/K و سالعات فتورفلکتانس مقادیر آنها In_{0.14}Ga_{0.86}N ایرای (۲) ایران (۲) بدست آمدهاست (۲).

برای سادهسازی از مقادیر بدست آمده برای ثابتهای گرمایی ورشنی مربوط به In.14Ga.86N در تخمین گاف انرژی لایههای InGaN با درصد ایندیم ۸٫۱٪ و ۱۸٫۷٪ استفاده می کنیم[7]. جابجایی قله فتولومینسانس وابسته به تغییرات دمایی برای InGaN بادرصد ایندیم ۸٫۱٪ با مقدار تخمین زدهشده برای InGaN، با تغییرات دما از ۱.6Kتا دمای ۶۱ ۶ و همچنین برای InGaN با درصد ایندیم ۱۸٫۷٪ با تغییرات دما از ۵۲ تا دمای ۸۰ ۸ همخوانی ندارد.

شکل (۱- الف و ب) تغییرات طیف فتولومینسانس چاههای کوانتومی InxGa1-xN را بترتیب برای دو نمونه با درصدهای ایندیم ۸٫۱٪ و ۱۸٫۷٪ با افزایش دما نشان میدهد.

مطابق شکل (۱-الف) برای نمونه با درصد ایندیم ۸٫۱٪ زمانی که دما از ۸.6 تا ۶۱K افزایش می یابد، در قله طیف PL یک جابجایی ۲۵me۷ بسمت انرژیهای پایین دیده میشود که این مقدار حدود ۷ برابر مقدار پیشبینیشده توسط رابطه ورشنی در این بازه دمایی فوق است. از طرفی در شکل(۱-ب) مشاهده میشود که با تغییر دما از ۵K تا ۸۰K مقدار این جابجایی برای نمونه با درصد ایندیم ۱۸٫۷٪، ۲۸me۷ است که حدود ۵ برابر مقدار پیشبینیشده توسط رابطه ورشنی در این بازه دمایی است.

با افزایش دما از ۲۱ K برای نمونه Ino.osGao.92N و ۸۰K برای نمونه Ino.osGao.82N انتقال به انرژی های بالا (Blue Shift) در قله طیف فتولومینسانس داریم که اگر کاهش گاف انرژی ناشی از افزایش دما طبق رابطه ورشنی در این بازه را لحاظ کنیم، مقدار واقعی این جابجایی از مقداری که در شکل دیده میشود بیشتر است.



شكل ۱- الف) تغييرات طيف فوتولومينسانس Ino.08Gao.92N ب) تغييرات طيف فوتولومينس Ino.18Gao.82N با دما

برای دمای بالاتر از ۶۱K برای نمونه Ino.08Gao.92N و ۸۰K برای نمونه Ino.14Gao.86N از آنجا که فرایندهای غیرتابشی غالب میشوند، با افزایش دما طول عمر حاملها شدیداً کاهش مییابد و مستقل از انرژیهای گسیلی میشود. لذا بعلت کاهش طول عمر، این حاملها قبل از رسیدن به حالات با انرژیهای پایینتر بازترکیب میکنند که این امر باعث پهنشدگی در انرژیهای گسیلی و در نهایت انتقال به انرژی های بالا (Blue Shift) در قله انرژی میشود.

(ب)

(الف)

بنابراین جنبههای گسیل خودبخودی مربوط به InGaN شدیداً تحت تأثیر دینامیک بازترکیب حاملهایی است که حالات انرژیهای پایین قله طیفی فتولومینسانس (band-tail)را اشغال می کنند. ناهمگنیهایی از قبیل نوسانات آلیاژی ایندیم، تغییرات ضخامت لایه در چاههای کوانتومی چندگانه یا نواقص بلوری که با دما تغییر میکنند منشاء ایجاد حالات فوق می باشند که موجب جایگزیدگی بیشتر اکسیتونها میگردد.



شکل ۲- مقایسه پهنای در نیمه طیف FWHM فتولومینسانس In0.18Ga0.82N و In0.18Ga0.82N در دمای ۶۰K .

از طرفی با بررسی و مقایسه منحنیهای فتولومینسانس در دمای ۶۱K همانطور که در شکل (۲) دیده می شود، با افزایش درصد ایندیم از ۸ درصد به ۱۸ درصد، پهنای طیف در نصف ماکزیمم(FWHM) بمیزان ۱۵me۷ افزایش می یابد. دلیل این پدیده افزایش درجه افت و خیزها و یا افزایش ناکاملیهای فصل مشترک با افزایش درصد ایندیم می باشد [۸].

۴- نتیجهگیری

افزایش چگالی خوشههای غنی از ایندیم در نمونههای InGaN باعث می شود تا حالات جایگزیده تا دمای بالاتری حضور داشتهباشند. بنابراین امکان حضور اکیستونهای جایگزیده حتی در دماهای بالا نیز بیشتر است، که این امر در افزایش راندمان اپتیکی قطعات ساخته شده از این نوع مواد و عملکرد آنها در دماهای بالاتر مؤثر است.

۵- سپاسگزاری

مولفان از پروفسور آمانو و گروه ایشان بخاطر کمک در تهیه نمونه های مورد مطالعه و از پروفسور هولتز بخاطر در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی سپاسگزاری می نمایند.

۶- مراجع

] S. D. Lester, F. A. ponce, M. G. Crawford and D. A. Steigerwald: Appl. Phys. Lett. 66 (1995) 1249.1 [

] M. G. Cheong, C. Lio, H. W. Choi, B. K. Lee, E. K. Suh, H. J. Lee, J. Appl. Phys. 93 (2003) 4691.⁴

] H. K. Cho, J. Y. Lee, C. S. Kim, G. M. Yang, N. Sharma, C. Humphreys, J. Crystal Growth 231 (2001) 466.3[

] M. S. Jeong, J. Y. Kim, Y. W. Kim, J. O. White, C. H. Suh, C. H. Hong, H. J. Lee, Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 976.4[

] S. F. Chichibu, A. C. Abare, M. S. Minsky, S. Keller, S. B. Fleischer, J. E. Bower, E. Hu, U. K. Mishra, L. A. Coldren, S. P. DenBaars, **5**[T. Sota, *Appl. Phys. Lett.* **73** (1998) 2006.

] Y. P. Varshni, *Physica* 34, 149 (1967).6[

] W. Shan, T. J. Schmidt, X. H. Yang, S. J. Hwang, J. J. Song, and B. Goldenberg, Appl. Phys. Lett. 66, 985 (1995); W. Shan, B. D. 7[Little, J. J. Song, Z. C. Feng, M. Schurman, and R. A. Stall, *ibid*. 69, 3315 (1996).

] R. W. Martin, P. G. Middleton, K. P. O'Donnell, and W. Van der Stricht, Appl. Phys. Lett. 74, 263 (1999).8[

Optical investigation of high Indium concentration Nitride Semiconductor Nanostructures

Saeed Heidari¹, Hojjat Behmadi¹, Hamid Haratizadeh¹, Azadvari¹

Physics department, Shahroud university of technology, Shahroud, Iran

Abstract- In this paper we investigate special behavior of In in nitride semiconductors specially InGaN. Indium atoms behavior specially their tendency to accommodation (segregation) and producing the Indium clusters in alloys such as InGaN leads to strongly potential fluctuations in InGaN crystal structure which is the origin of localization in this cases. The suitable technique to study this behavior is photoluminescence spectrometry versus temperature. The effect of Indium in InGaN/GaN MQWs is stronger than that of Alumina in GaN/AlGaN MQWs, since InGaN is the active region (quantum well) in InGaN/GaN quantum well structures while AlGaN is the potential barrier in AlGaN/GaN quantum well structures.

Keywords: In clusters, Localization, InGaN/GaN Quantum wells, Photoluminescence, Optical properties, Excitons

PACSNo: 160-4670, 160-2540, 160-6000, 230-5590, 250-5590, 260-3800, 300-6280

{بازدهی کوانتمی خارجی نسبت تعداد فوتونهای تولید شده به جریان الکتریکی عبوری از پیوند p-n با واحد الکترون/ فوتون می باشد.

Luminousefficiency حد پاسخ چشم انسان در واحد توان ورودی به LED است. پاسخ چشم انسان در ناحیه طیفی سبز بیشترین مقدار است و با کاهش یا افزایش طول موج به سمت IR، UV کاهش می یابد.} اگر نیمههادیها با پالس کوتاه تحریک شوند شدت نور گسیلی عموماً با تابع زیر بصورت تابعی از زمان بعد از تحریک بیان می شود : (۲۴–۵) که ($T_L(T)$ زمان واپانشی لومینسانس در دمای داده شده T می باشد معکوس تحریک بیان می شود : (۲۴–۵) که ($T_L(T)$ و (T_{rans} (T)) مجموع سه نوع مختلف از احتمال گذار است (۴۸–۵) که ($T_L(T)$ و (T) مجموع سه نوع مختلف از احتمال گذار است (۴۸–۵) که ($T_L(T)$ و (T) مجموع سه نوع مختلف از احتمال گذار است (۴۸–۵) که ($T_L(T)$ و (T) مجموع سه نوع مختلف از احتمال گذار است (۴۸–۵) که ($T_L(T)$ و (T) مجموع سه نوع مختلف از احتمال گذار است (۴۵–۵) که ($T_L(T)$ و غیر تابشی در عمق ترازهای انرژی است. اگر باز ترکیب تابشی در عمق ترازهای انرژی رخ دهد جملهٔ مربوط به زمان انتقال حذف می شود بازده کوانتمی داخلی ($(T_{max}(T))$) گسیل بصورت زیر داده می شود : ((T - 0)) اگر چه اندازه گیری مقدار (T) ایر T_{max} و موماً مشکل است ولی با داشتن آن می توان وابستگی دمایی T_T را تخمین زد (T) می معدار (T_T) می موماً مشکل است ولی با داشتن آن می توان وابستگی دمایی T_T را تخمین زد (T) می مقدار (T) می مود بازده کوانتمی داخلی (T_T , می شود N, T_T , T_T , T_T می شود ($T_T - 0$) اگر چه اندازه گیری مقدار (T) می بارت زیر بیان می شود ($T_T - 0$) که T_T . رزیر داده می شود می شود ($T_T - 0$) که باشند. اگر آن می توان وابستگی دمایی ،سطح مقطع مرکز باز ترکیب غیر تابشی (T_T) وچگالی NRC می باشند. اگر کیفیت بلور نسبتا خوب باشد (T_T می مردنازه گیری در دمای به اندازه کافی پایین صورت گرفته باشد کیفیت بلور نسبتا خوب باشد (T_T) می مونظر کرد.در مواقع بعضی مواقع وابستگی دمایی شدت کی فیندانس (T_T) مشاهده می شود موریکه تا زمانی که T_T است (T) ثابت است وپس (T_T) بر ای گرفته باشد الومینسانس (T_T) می شود می زر کیب غیر تابشی صردخان کرد.در مواقع بعضی مواقع وابستگی دمایی شدت الومینسانس (T_T) می شود می شود بطوریکه تا زمانی که T_T است (T) ثابت است وپس (T_T) باز است (T_T) می تا کارش می بازد.

در چنین موردی می توان فرض کرد که بازده کوانتمی داخلیهمانطور که در شکل (۴۰–۵) نشان داده شده نزدیک unity در دمای زیر T_c می باشد ،بنابراین زمان واپاشی لومینسانس در این محدوده دمایی وابسته به طول عمر تابشی است وبازده کوانتمی داخلی را می توان بشکل $\eta_{int}(T) = I(T)/I_c$ داد. طول عمرهای تابشی وغیر تابشی در دمای بالاتر از T_c بصورت زیر نمایش می دهیم []. (۴۹–۵) و(۵–۵-۵)

- طول عمر تابش واندازه اکسیتونها : لایههای فعال بسیاری از قطعات اپتیکی از چاههای کوانتمی که ساختار دو بعدی (2D) دارند تشکیل شده است .با توجه به تئوری (Hanamura) (۱۹۸۸) طول عمر بازترکیب تابشی اکسیتونهای دو بعدی با مرکز جرم صفر با رابطه زیر داده می شود (۵۱–۵) که w_{ex} فرکانس اکسیتون و ($\Phi(0)$ تابع موج حرکت داخلی اکسیتون ، a_B شعاع بوهر اکسیتون و ----- Contribution per unit eell to the band –to- band radiative decay rate می باشد .این رابطه پیشگویی می کند که طول عمر تابشی یک اکسیتون دو بعدی در حدود چند ps است اگر چه در بیشتر موارد انواع چاههای کوانتمی طول عمر تابشی از مرتبه چند صد پیکو ثانیه دردمای پایین دارند. این مربوط میشود به اثر جایگزیدگی اکسیتونی در مراکز ناخالصی یا نواقص شبکه یا مینیمم پتانسیل در چاه کوانتمی این حالتهای جایگزیده میتوانند بعنوان یک نقطه کوانتمی صفر بعدی در نظر گرفته شوند. با توجه به اصل عدم قطعیتهایزنبرگ چنین جایگزیدگی تابع موج اکسیتونها منجر به پهن شدگی تکانه مرکز جرم در فضای k میشود در نتیجه احتمال باز ترکیب اکسیتونها در مقایسه با حالتی که جایگزینی وجود ندارد کاهش مییابد زیرا تعداد اکسیتونهایی که قانون پایستگی تکانه بافوتون را ارضا کنند بسیار کم خواهد شد (2016)Sugawara طول عمر تابشی اکسیتونهای جایگزیده در دمای پایین را بصورت زیر بدست آورد

Photopic vision is the <u>vision</u> of the <u>eye</u> under well-lit conditions. In humans and many animals, photopic vision allows <u>color perception</u>, mediated by <u>cone cells</u>.

Photopic vision is the scientific term for human color vision under normal lighting conditions during the day.

the human eye uses three types of cones to sense light in three respective bands of color. The pigments of the cones have maximum absorption values at wavelengths of about 445 nm (blue), 535 nm (green), resp. 575 nm (red). Their sensitivity ranges overlap to provide continuous (but not linear) vision throughout the visual spectrum. The maximum efficacy is 683 lumens/W at a wavelength of 555 nm (yellow).

the human eye usess scotopic vision. In the intermediate range, mesopic vision combines both types.

-۳ جابجایی پیک قله انرژی PL در اثر تغییر درصد ایندیم:



. دادههای L - I می توانند به MQWs می می توانند به می در حالت پایدار توصیف می کند فیت MQWs می اندازی حاملها و فرآیند عکس آنرا در MQWs در حالت پایدار توصیف می کند فیت شوند[۱۳۰]:

$$\frac{dN}{dt} = \left(N_0 - N\right) j_c \sigma_{cap} - N \left(\frac{1}{\tau_{decap}} + \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{nonrad}}\right) \quad (1.7)$$

که N_0 تعداد کل حالتهای جایگزیده و N تعداد کل حاملهای گیرافتاده ، j_c شار جریان تزریقی ، σ_{cap} سطح مؤثر برای گیراندازی حاملها ، $\tau_{rad}, \tau_{rad}, \tau_{rad}, \tau_{decap}$ مقطع مؤثر برای گیراندازی حاملها ، $\tau_{nonrad}, \tau_{rad}, \tau_{decap}$ طول عمرهای بازترکیبهای تابشی و غیرتابشی و آزادشدن حاملهای گیرافتاده میباشد. با فرض بزرگ بودن $\tau_{rad}, \tau_{nonrad}$ در دماهای پائین (کمتر از ۱۵۰K) ، شدت EL متناسب با N/τ_{rad} خواهد بود و داریم :

$$L = \frac{N_0}{\left(1/j_c \sigma_{cap}\right) + \tau_{rad}} \tag{(1.Y)}$$



شکل ۵-۵- تغییر طیف a EL) یک UV LED عمیق(۲۸۰nm) و b) یک LED آبی (۴۶۵nm) را با افزایش دما

از رابطه (/ – ۱) L با $N_0 j_c \sigma_{cap} J_c$ در حد $\delta_c \to 0$ داده می شود . به عبارت دیگر L در جریان های بالا $(\infty \leftarrow j_c)$ به مقدار اشباع N_0 / τ_{rad} می رسد. انتظار می رود توان خروجی LED سبز در جریان های بالا (بیشتر از ۱۰۰۸) حدود ۲۰۰ برابر LED باشد. اثرات جایگزیدگی تأثیر زیادی روی کارآیی LED ها در دماهای بالا دارد ، شکل ۵–۵ تغییر طیف LE یک LED عمیق(۲۸۰۳) و یک LED آبی (۴۶۵nm) را با افزایش دما نشان می دهد. با افزایش دما از LED معیق(۲۸۰۳) و یک LED آبی (۴۶۵nm) را با افزایش دما نشان می دهد. با افزایش دما از LED می در مقایسه با کاهش ۶ درصدی برای LED ابی نشان می دهد. در حالیکه قسمت انرژی بالای طیف LED آبی کاهش کندی در شدت گسیل نشان می دهد، شدت و انرژی نوار انرژی پائین بخصوص در (tail) دنباله حدوداً مستقل از دما هستند . گسیل انرژی های پائین با گسیل حالتهای جایگزیده مطلوب می شود و حساسیت کمتری با تغییر دما دارد . حالتهای جایگزیده حتماً در دمای 0^{0} ۲۱۷۳ ریز حضور زیادی دارند زیرا شیفت آبی پیک LE با افزایش جریان انرژی جایگزیده حتماً در دمای 0^{0} ۲۱۷۳ را پیشنهاد می کند . مشاهده LED نشان داده که انرژی جایگزیدگی در در مقایسه قسمتهای انرژی پائین و انرژی بالای طیف گسیلی UV وابستگی دمایی مشابهی از شدت نور گسیلی نشان میدهد . شیفت قرمز پیک UV از رابطه وابستگی دمایی AlGaN طبق رابطه ورشنی با گسیلی نشان میدهد . شیفت قرمز پیک UV از رابطه وابستگی دمایی دمایی AlGaN طبق رابطه ورشنی با $^{-1}$ میدهد . شیفت قرمز پیک UV از رابطه وابستگی دمایی رفتارها اثرات جایگزیدگی کم را در آلیاژهای AlGaN و غلبه انتقالهای نوار به نوار را نشان میدهد. کاهش تیزتر در شدت UV LED EL در مقایسه AlGaN و غلبه انتقالهای نوار به نوار را نشان میدهد. کاهش تیزتر در شدت UV LED EL در مقایسه با LED آبی قویاً ناشی از UV کم عمق تر و چگالی بالای در رفتگیها در ناحیه فعال میباشد. بند افست بین لایه های چاه و سد در DV LED در مقایسه AlGaN ایی لایه های چاه و سد در DV LED در مقای بالای در رفتگیها در ناحیه فعال میباشد. بند افست بین لایه های چاه و سد در UV LED می محدود کام۲۰ است که بسیار کمتر از UV در کارایی دمایی بین لایه های یا UV LED می در دارات جایگزیدگی در AlGaN مال دیگری در کارایی دمایی بین لایه های عام لیگری در کارایی دمای میباند. بین لایه های حام و سد در DV LED می معرف ترات جایگزیدگی در AlGaN مال دیگری در کارایی دمای بین لایه های یا سال LED در می معرف تر و چگالی بالای در رفتگی ها در ناحیه فعال میباشد. بند افست بین لایه های یا می از UV LED در DV در

ساختار MQW بشدت نرخ بازتر کیبهای تابشی و محدودیت حاملها را تحت تأثیر قرار میدهد. بازتر کیبهای غیرتابشی کاملاً قابل حذف نیستند. حاملهای تزریقی ممکن است در حالتهای غیرتابشی نواقص در QWs باز ترکیب کنند یا از QWs تحت اثر تونل زنی یا جنبش گرمایی فرار کرده و در حالتهای نقص سد و لایه در پوش بازتر کیب کنند. یا از BWs تحت اثر تونل زنی یا جنبش گرمایی فرار کرده و در حالتهای نقص سد و لایه در پوش بازتر کیب کنند. خصوصیات منحصربه فرد شامل جایگزیدگیهای قوی و انرژی بستگی اکسیتونی قوی تر کیبات نیتروژندار فرآیندهای تابشی و غیرتابشی را از دیگر مواد گروه III – V متمایز میکند. در LED های آبی و UV با کیفیت بالا بیشتر حاملها در حالتهای جایگزیده در Ws گیر میافتند که این امر به فرایند تابشی با بازدهی ۷۰ تا ۷۰ درصد منجر میشود. با کاهش II در ناحیه فعال چگالی حالتهای جایگزیده فرایند تابشی با بازدهی ۷۰ تا ۸۰ درصد منجر میشود. با کاهش II در ناحیه فعال چگالی حالتهای جایگزیده کوانتمی فرایند تابشی با بازدهی ۷۰ تا ۸۰ درصد منجر میشود. با کاهش II در ناحیه فعال چگالی حالتهای جایگزیده کوانتمی فرایند تابشی با بازدهی ۷۰ تا ۸۰ درصد منجر میشود. با کاهش II در ناحیه فعال چگالی حالتهای جایگزیده کوانتمی فرایند تابشی با بازدهی ۷۰ تا ۸۰ درصد منجر میشود. با کاهش II در ناحیه فعال چگالی حالتهای جایگزیده در DI های نیتروژن دار هنگامی که طول موج گسیل کمتر از ۳۸۰m است کاهش مییاد داشت. بازده کوانتمی در DI های نوش می یابد و حاملها شانس بیشتری برای گیر افتادن در حالتهای نقص خواهند داشت. بازده کوانتمی کاهش مییابد و حاملها شانس بیشتری برای گیر افتادن در حالتهای نقص خواهند داشت. بازده کالی حیوس کاهش مییابد آمای که طول موج گسیل کمتر از ۳۰۰m است کاهش مییابد آمای از میدان در DI های کان می بازدهی خارجی آمای که طول موج گسیل کمتر از ۲۰۰ مین کاهش می نود تایش می بازدهی خارجی می می می باز میدان ای در DI های نیزوژن دار هنگامی که طول موج گسیل کمتر از ۳۰۰m است کاهش مییابر آمای DI های در DI های کا عمیق بر مبنای AIGaN زمانهای بازتر کیب تابشی و غیرتابشی بیشد تابعی از میدان در TI های کا عمیق بر مبنای AIGaN زمانهای بازتر کیب تابشی و غیرتابشی بازدهی خارجی از ۲۰۰ در TA۰m است کاهش می می در تابهای کا می کرای می در اندازه میکرومتر است. بیشترین بازدهی خارجی TI های کا می تان در تابهای تا در تاری

فصل اول

تاریخچه و معرفی دیودهای نور گسیل رنگی و سفید

- ۱-۱ معرفی دیودهای نور گسیل (LEDs)
- ۱–۲ فرآیندهای بازترکیب در نیمرساناها
- ۱-۳ روشهای تولید نور سفید با استفاده از LEDها
 - ۴-۱ تاریخچه LEDها
- ۱-۵ دیودهای نور گسیل بر پایه نیمرساناهای نیتروژندار

۱−۱ معرفی دیودهای نورگسیل (LEDs)

LED در ساده ترین حالت تشکیل شده از پیوند دو نیمرسانای نوع n و p که با تزریق حاملها توسط منبع ولتاژ و در نهایت بازترکیب مستقیم الکترونها و حفرههای تزریق شده نور گسیل می کند (شکل ۱–۱).



شکل ۱-۱- نمای کلی از یک دیود(LED) با پیوند p-n در بایاس مستقیم

امروزه از ساختارهای ناهمگون چاههای کوانتومی چندگانه (MQWs)^۱ ، برای ساخت قطعات نورگسیل استفاده می شود. مزایای این ساختارها عبارتند از:

۱- بدلیل وجود اثر محدودیت کوانتومی ترازهای انرژی طبق جوابهای معادله شرودینگر چاه کوانتومی شکافته می شود. همچنین مقدار انرژی تراز پایه در نتیجه گاف انرژی، وابسته به پهنای چاه خواهد بود، بصورتی که با افزایش پهنای چاه مقدار گاف انرژی کاهش می یابد و بالعکس. بدین ترتیب می توان طیف نور گسیلی را با تغییر پهنای چاه تا حدودی کنترل کرد.

۲- حاملهای تزریق شده به داخل چاه در داخل چاه گیر افتاده و در نتیحه احتمال بازترکیب الکترونها و
 حفرهها افزایش مییابد. این امر باعث افزایش بازده کوانتومی تابشی داخلی قطعه می شود.

۳- با کنار هم قرار دادن چند چاه کوانتمی، بطور همزمان از تمام چاهها نور گسیل می شود بنابراین شدت نور گسیلی و بازدهی کوانتمی افزایش خواهد یافت(شکل۱-۲).



این ساختارهای چاههای کوانتومی ناهمگون سه نوع هستند(مطابق شکل ۱-۳)



اتصال نوع (۱) بدلیل گیراندازی همزمان الکترونها و حفرهها در ناحیه فعال کاربرد فراوانی در ساخت قطعات اپتوالکترونیکی دارد. شکل ۱-۴ الف و ب نمایی از یک LED با چاههای کوانتمی چندگانه InGaN/GaN را نشان میدهند.



شکل ۱- ۴- الف) نمای داخلی از یک LED با چاههای کوانتمی چندگانه InGaN/GaN وب) نمای کلی LED بستهبندی شده.

شدت نور گسیلی از LEDها شدیداً تابعی از جریان ورودیشان میباشد. منحنی شدت نور گسیلی برحسب جریان برای LED نوعی مطابق شکل۱-۵ میباشد.



شکل I-0- نمودار I-V برای یک LED نوعی

با افزایش جریان، بازترکیب نورگسیل افزایش مییابد، تا زمانیکه افزایش بیشتر جریان دیگر باعث افزایش شدت نور گسیلی نخواهد شد، زیرا ترازهای چاه از حاملها پر شده و حاملهای تزریقی اضافی از چاه به خارج شدت نور گسیلی نخواهد شد، زیرا ترازهای چاه از حاملها پر شده و حاملهای تزریقی اضافی از چاه به خارج نشت(Leakage) میکنند. افزایش جریان باعث افزایش دمای قطعه نیز میشود. این موضوع باعث میشود حاملها ترازهای انرژی بالاتر را پر کنند، در نتیجه جریان نشت افزایش مییابد. نذا انتخاب جریان ورودی میه می ترازهای انرژی بالاتر را پر کنند، در نتیجه جریان نشت افزایش مییابد. لذا انتخاب جریان ورودی بهینه حائز اهمیت میباشد. همچنین افزایش اندازه ناحیه فعال در LED باعث افزایش تعداد بازترکیبهای نوری و در نتیجه افزایش بازدهی میشود. اما با بزرگتر شدن قطعه احتمال وجود نواقص شبکه و در نتیجه وجود مراکز بازترکیب غیرتابشی افزایش مییابد. همچنین ساخت قطعات نیمرسانای با ابعاد بزرگ و بدون

عیب مشکل است. لذا محدودیتهایی در انتخاب اندازه قطعه وجود دارد. با افزایش ضخامت ناحیه فعال (چاه) میتوان تعداد حاملهای گیر افتاده را افزایش داد اما این امر منجر به کاهش سرعت پاسخگویی سیستم به ولتاژ خارجی میشود.

۱–۲– فرآیندهای بازترکیب در نیمرساناها

بازترکیب الکترونها و حفرهها در یک نیمرسانا نقش مهمی در رفتار الکتریکی و اپتیکی آنها بازی می کند. الکترون در یک یا چند مرحله به حالت خالی که مربوط به حفره است میافتد، و هر دو حامل در یک فرآیند نابود میشوند. اختلاف انرژی بین حالتهای اولیه و نهایی الکترون آزاد میشود (ناپدیدمیشود). این منجر به یک دسته بندی ممکن از فرآیندهای بازترکیب میشود: بازترکیب نوری و غیر نوری. برای بررسی فرآیندهای بازترکیب، یک نمونه تحت مطالعه ابتدا بایستی به یک حالت غیرتعادلی تحریک شود؛ برای مثال، با جذب نوری با انرژی فوتونی متجاوز از گاف نواری.

۱-۲-۱ بازترکیب نوری

اگر الکترون موجود در نوار ظرفیت در یک نیمرسانا با کسب انرژی به نوار رسانش انتقال یابد و در جای خود یک حفره باقی گذارد، نیمرسانا به حالت برانگیخته رفته و با گذشت زمان کمی، الکترون موجود در نوار رسانش با حفره بجا مانده در نوار ظرفیت بازترکیب مینماید؛ که حاصل آن آزاد شدن انرژی کسب شده میباشد. اگر این انرژی به صورت فوتون ساطع گردد، بازترکیب نوری فوق را لومینسانس گویند. اگر تحریک اولیه توسط منبع نوری مانند لیزر انجام گیرد، فرآیند مورد نظر فتولومینسانس خوانده میشود و چنانچه حاملها توسط بمباران الکترونهای با انرژی بالا تحریک شوند، مکانیزم، کاتدولومینسانس نامیده میشود؛ و اگر تحریک توسط اعمال جریان انجام شود، مکانیزم الکترولومینسانس نامیده میشود. و را ترکیب نوری خود



شکل ۱-۶- دیاگرام انتقالهای نوری در نیمرساناها. انتقالهای نوار به نوار، و اکسیتون آزاد FE انتقالهای تابشی ذاتی و انتقالهای اکسیتون مقید BE ، حامل آزاد با مقید FB و جفت دهنده-پذیرنده DAP انتقالهای نوری غیر ذاتی میباشند.

یک دیاگرام شماتیک از تحریکهای الکترونی بسیار مهم با انتقالهای نوری مربوطه در شکل ۱–۶ نشان داده شدهاست. فرآیندهای نوری میتوانند هم منشاء ذاتی^۱ و هم منشاء غیر ذاتی^۲ داشته باشند. بازترکیب نوار به نوار^۳ و بازترکیب اکسیتون آزاد^۴ (FE) به عنوان انتقالهای تابشی ذاتی، و بازترکیب اکسیتون مقید^۵ (BE)، بازترکیب حامل آزاد با مقید^۶ و بازترکیب جفت دهنده-پذیرنده^۷ (DAP) به عنوان انتقالهای تابشی غیر ذاتی شناخته میشوند. بازترکیب نوار به نوار بین یک الکترون از نوار رسانش(CB) و یک حفره در نوار ظرفیت (VB) اتفاق میافتد. این بازترکیب به چگالی الکترونهای در دسترس (n) و چگالی حفرههای در دسترس (q) وابسته است. چون به وجود هر دو حامل در فرآیند بازترکیب نیاز است، نسبت بازترکیب متناسب با حاصلضرب n و P خواهد بود.

در یک ساختار چاه کوانتومی (QW)، انتقالهای نوار به نوار می توانند منجر به بازتر کیب intra-band یا -inter ا band شوند. انتقالهای intra-band بین حالتهای متعلق به همان باند (CB یا VB) اتفاق می افتد، در صور تیکه انتقالهای inter-band بین حالتهای CB و VB رخ می دهد. شکل ۱-۷ بازتر کیبهای بین دو نوار و داخل یک نوار را نشان می دهد.

- ¹ Intrinsic
- ² extrinsic
- ³ Band-to-band
- ⁴ Free Exiton
- ⁵ Bound Exiton
- ⁶ Free-to-Bound Recombination
- ⁷ Donor- Acceptor Pair Transition



شکل ۱-۲- الف) گذارهایی که بین دو نوار ظرفیت و هدایت و ب) گذارهایی که بین زیرترازهای یک نوار(هدایت یا ظرفیت) در یک QW اتفاق می افتد.

بازترکیب inter-band بین حالتهای با عددکوانتومی n در QW از قوانین انتخاب زیر پیروی میکند [۳]:

$$\Delta n = 0 \qquad \Delta m_j = 0 \ , \pm 1 \tag{1-2}$$

که m_j عدد کوانتومی مغناطیسی مربوط به حالتهای CB و VB است.

الکترونها و حفرههای تحریک شده ممکن است به صورت ضعیف به فرم اکسیتون آزاد با برهمکنشی کولنی جاذب متقابل، مقید شوند که میتواند به صورت یک ماهیت (موجود) واحد در کریستال حرکت کند. انرژی بازترکیب اکسیتون به اندازه انرژی قیدی اکسیتون^۸ کاهش مییابد. بسته به گیراندازی^۴ ماده، اکسیتون میتواند دو نوع متفاوت باشد. زمانی که اکسیتون قویاً مقید شده باشد به عنوان اکسیتون فرنکل شناخته میشود [۴] که معمولاً درمورد کریستالهای یونی این نوع اکسیتون دیده میشود. نوع دوم، اکسیتونهای وانیر-مات هستند که به صورت ضعیف مقید شدهاند و دارای یک تابع موج با گستردگی چندین اتم میباشند. اکسیتون وانیر- مات تحرک بالایی دارد و در نیمرساناها بیشتر این نوع اکسیتون مشاهده میشود انرژی قیدی فرنکل و وانیر- مات را در مقایسه با فواصل اتمی نشان میدهد.

⁸ Exiton binding energy

⁹ Involve



شکل ۱-۸- شکل شماتیک یک اکسیتون فرنکل و یک اکسیتون وانیر- مات

اکسیتونهای آزاد ممکن است توسط ناهمواریهای پتانسیلی یا افت و خیزهای^{۱۰} بین دو لایهٔ رشد داده شده جایگزیده گردند، که باعث کاهش انرژی گسیلی این نوع اکسیتونها به اندازهٔ انرژی جایگزیدگی می شود. شکل ۱-۹ یک اکسیتون جایگزیده بواسطهٔ افت و خیزهای سطح مشترک دو ماده را نشان می دهد.



Monolayer width fluctuations

بين دو لايه

در حضور ناخالصیها یا نقایص، اکسیتونهای مقید BE ممکن است مشاهده شوند. شکل گیری BE می تواند از راههای مختلفی مثل گیراندازی پی در پی الکترونها و حفرهها در یک مرکز ناخالصی یا نقص منفرد، گیراندازی مستقیم FE ، یا تحریک مستقیم در حالتهای BE ، انجام شود. در تمام حالتها جفت الکترون-حفره به صورت ضعیف به ناخالصی مقید خواهند بود. انرژی مقید بودن اکسیتون به نقص، انرژی بازترکیب

¹⁰ Flactuation

شکل ۱-۹- طرحی از یک اکسیتون جایگزیده در لایهٔ InGaN بخاطر افت و خیزهای سطحی

BE نسبت به FE را کاهش میدهد. مشاهدهٔ انتقال BE میتواند دال بر حضور ناخالصیها یا نقایص در ماده باشد؛ و همچنین میتواند اطلاعاتی درباره ساختار الکترونی آنها ارائه دهد[۲]. گسیل BE توسط یک پهنای طیفی باریک مشخص میشود، که اساساً از مورد مربوط به FE کوچکتر است. اغلب، هر دو اکسیتون آزاد و مقید همزمان در یک ماده وجود دارند. گسیل JL حامل آزاد به مقید (Free-to-Bound) بخاطر بازترکیب یک الکترون (حفره) از BD (VB) به یک حالت پذیرنده (دهنده) است. هنگامی که هردو ناخالصی دهنده و پذیرنده و پذیرنده در یک نیمرسانا حضور دارند انتقالهای تابشی بین حالتهای مربوطه میتواند رخ دهد. برهمکنش پذیرنده در یک نیمرسانا حضور دارند انتقالهای تابشی بین حالتهای مربوطه میتواند رخ دهد. برهمکنش پذیرنده در یک نیمرسانا حضور دارند انتقالهای تابشی بین حالتهای مربوطه میتواند رخ دهد. برهمکنش میشود :

$$h\nu(R) = E_g - E_A - E_D + \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r R} + J(R)$$
(2-2)

که E_{D} و E_{D} به ترتیب انرژی قیدی پذیرنده و دهنده، R فاصله بین دهنده و پذیرنده، ε_{0} گذردهی خلاء ، و E_{A} و E_{D} و E_{D} به ترتیب انرژی قیدی پذیرنده و دهنده و پذیرنده یونیزه شده اشاره ε_{r} ثابت دیالکتریک نسبی ماده است. ترم چهارم به برهمکنش کولنی بین دهنده و پذیرنده یونیزه شده اشاره دارد و آخرین جمله، یک ترم تصحیحی است، که شامل برهمکنش دوقطبی- دوقطبی دوقطبی بین اتمهاست (برهمکنش واندروالس). برای جفتهای دور از هم ترمهای برهمکنش کولنی و واندروالسی خیلی کوچکند و پایین ترین انرژی فوتون ممکن v

۱-۲-۲ بازترکیب غیرتابشی^{۱۲}

یک جفت الکترون- حفره میتوانند بهصورت غیرتابشی بازترکیب کنند. انرژی اضافی میتواند به یک فونون یا تعداد بیشتر فونون منتقل میشود؛ یا توسط بازترکیب غیر تابشی اوژه^۳، انرژی اضافی به صورت انرژی جنبشی به حامل دیگری داده شود البته در نمونههای ما بدلیل بزرگ بودن گاف نواری احتمال حضور بازترکیبهای غیر تابشی اوژه بسیار پایین است زیرا این احتمال با توان چهارم اندازه گاف نواری رابطه معکوس دارد. تمام فرآیندهای بازترکیب غیرتابشی باعث تولید گرما در داخل ماده میشوند. بدیهی است که تلاش ما بر افزایش

¹¹ Binding energies

¹² Nonradiative recombination

¹³ Auger Recombination

نسبت بازترکیب نوری به بازترکیب غیر نوری و در نتیجه افزایش راندمان اپتیکی نانوساختار مورد مطالعه خواهد بود

از نقاط کوانتومی QD یا جعبههای کوانتومی^{۱۴} در تمام زیرساختارهای نیمرسایی یاد میکنیم که حرکت زوج الکترون حفره ایجاد شده در تمام جهات فضا، در سه بعد محدود شده باشد (نیمرساناهای شبه صفر بعدی یا هیچ بعدی). شعاع یک نقطه کوانتومی معمولاً در حد چند ده آنگسترم است که با شعاع بوهر اکسیتون قابل قیاس است [۵] و ترازهای انرژی به صورت زیر بدست میآیند:

$$E^{e} = E_{g} + \frac{\hbar^{2}}{2m_{e}} \left[\frac{\alpha_{ne} l_{e}^{4}}{R} \right]^{2}$$
(3-2)

$$E^{h} = \frac{-\hbar^{2}}{2m_{h}} \left[\frac{\alpha_{nh}l_{h}}{R}\right]^{2}$$
(4-2)

1-۳ روشهای تولید نور سفید با استفاده از LEDها

استفاده از LEDهای سفید بعنوان منابع نوری جدید صرفهجویی قابل توجهی در مصرف انرژی در پی دارد از اینرو تلاش برای تولید LEDهای سفید به روشهای مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. برای تولید نور سفید با استفاده از LEDها سه روش وجود دارد:

۱- ترکیب نور دو یا چند LED با رنگهای اصلی قرمز، سبز و آبی نور سفید را میدهد (شکل ۱-۱۰ و ۱۲_الف).



شکل ۱-۱۰- طیف مرکب از سه LED با نورهای آبی، سبز و قرمز

¹⁴Quantum Boxes

۲- با برخورد نور آبی و ماوراء بنفش به ترکیبات فسفر این ترکیبات نور زرد رنگ گسیل میکنند. ترکیب نور زرد و آبی، طیف سفید متمایل به آبی را میدهد. با نشاندن لایهای از این ترکیب بر سر راه خروج نور آبی یا ماوراء بنفش LED، میتوان نور سفید را تولید کرد. یک نوع فسفر با پیک نور زرد در ۸۰۰m با FWHM ماوراء بنفش معایل بای تولید نور سفید را تولید کرد. یک نوع فسفر با پیک نور زرد در ۲۰۰۳ با میتوان نور سفید از نور UV استفاده میشود. از معایب این روش تغییر رنگ از آبی تا زرد با تغییر اندک جریان ورودی است. کیفیت پایین رنگ، شاخص رنگ پایین ورش تغییر رنگ از آبی و ماوراء بنفش با یند معایب این روش تغییر منگ از آبی ما زرد می میتوان نور سفید از نور UV استفاده میشود. از معایب این روش تغییر رنگ از آبی تا زرد با تغییر اندک جریان ورودی است. کیفیت پایین رنگ، شاخص رنگ پایین ورش معایب این روش اند. این روش بدلیل در دسترس بودن LEDهای با بازدهی بالا در طیف آبی و ماوراء بنفش بسیار مورد استفاده قرار می گیرد(شکل۱–۱۲و۲۱–۰).



۳- ساخت LEDها بطوریکه تمام طیف مرئی را گسیل کنند و در نتیجه ترکیب این طیف، نور سفید را میدد.
میدهد. بعنوان مثال از چاههای شیبدار برای ساخت این نوع LEDها استفاده شده است (شکل ۱–۱۲–ج).



پیشرفت میکرو الکترونیک توسط قطعات بر پایه سیلیکون میسر شد اگر چه کاربردهای آن در اپتوالکترونیک و ارتباطات نوری بدلیل گاف نواری غیر مستقیمش محدود است در عوض مواد با گاف نواری مستقیم از قبیل InGaAs برای چنین کاربردهایی معرفی شدند. امروزه شبکههای ارتباطات نوری قسمت مهمی از شبکههای
ارتباطات از قبیل شبکه تلفن و اینترنت هستند. علارقم نقش مهمی که قطعات InGaAs دارند طول موج عملکردشان محدود به ناحیه مادون قرمز میباشد بنابراین برای منابع نوری یا آشکارسازهای ناحیه مرئی و ماورای بنفش نمی توانند استفاده شوند. احتیاج به قطعات نیمرسانای با گاف نواری پهن با قابلیت عملکرد در ناحیه مرئی و UV اجتناب ناپذیر است. تلاش و توجه زیادی برای تولید دیودهای نورگسیل (LEDs) با بازده بالا برای جایگزینی با لامپهای حرارتی و فلوئورسنت سنتی روشنایی صورت می گیرد. همچنین برای بسیاری کاربردها یک دیود لیزری (LD) سبک وزن و قابل حمل به لیزرهای گازی و حالت جامد سنتی ترجیح داده می شود بعلاوه DL ها و DL ها می توانند برای سیستمهای نمایش با منابع نوری با بازده بالا ، سبک وزن و قابل اعتماد مورد استفاده قرار گیرند، همچنین برای ارتباطات نوری، سیستمهای ذخیره اطلاعات زیمرساناهای بر پایه III-نیترایدها با گاف نواری پهن درناحیه نور مرئی و VU میباشند. در حال حاضر نیمرساناهای بر پایه III-نیترایدها با گاف نواری پهن درناحیه نور مرئی و VU میباشند. در حال حاضر مهمترین مواد مورد استفاده در ساخت انواع نور گسیلنده ها عبارتند از : InGaN,AlGaN,GaN,ZnO و ترکیبات آلی (OLED) و پلیمر ها (PLED)

۴-۱- تاریخچه LEDها

اولین LED کاربردی در سال ۱۹۶۲ از آلیاژ ترکیبی نیمه هادی GaAsP که نور قرمز گسیل می کرد ساخته شد (شکل۱-۱۳). از همان سال گسترش تجاری LEDها شروع شد و تا کنون هر دوسال شدت نور گسیلی LEDها دو برابر شده است. در سال ۱۹۶۸ اولین LED تجاری با روشنایی /۰۰۰۱Lm/LED، از نیمرسانای GaAsP ساخته شد که به عنوان indicator استفاده می شدند. پیشرفت ALBهای AlGaAs روی بسته GaAs و بکارگیری ساختارهای ناهمگون (hetrostructure) و همخوانی ثابتهای شبکه باعث شد LEDهای قرمز به بازده روشنایی لامپهای حرارتی که با فیلتر، نور قرمز گسیل می کردند برسد. بازدهی با استفاده از بسترهای شفاف برای نیمرساناها (بستر AlGaAs) بیشتر از دو برابر شد. استفاده از روش رشد MOVPE باعث رشد نوع جدید نیم رساناها (بستر AlGaAs) بیشتر از دو برابر شد. استفاده از روش رشد MOVPE باعث را می داد. در اواخر دهه ۱۹۰۰ مراکی موالی ایستر از دو برابر شد. استفاده از روش رشد AlGaAs باعث مرا می داد. در اواخر دهه ۱۹۹۰ AlgaIn روی GaAs) بیشتر از دو برابر شد. استفاده از روش رشد MOVPE باعث را می داد. در اواخر دهه ۱۹۹۰ AlgaIn روی GaAs که رنگ زرد تا قرمز در طیف مرئی با روشنایی بالا مرا می داد. در اواخر دهه ۱۹۹۰ AlgaIn روی AlgaIn پیشرفت دادند. یک دهه برای اتصالات n-۹ وآلیاژ کردن صرف شد، در نتیجه LED مای Alga با بازدهی کوانتمی داخلی ۱۰۰ درصد ساخته شد. بدین معنی که هر شد، در نتیجه LED مای مای مای می دار با بازدهی کوانتمی داخلی ۱۰۰ درصد ساخته شد. بدین معنی که هر الکترون و حفره تزریقی بازتر کیب نوری داشتند. مشکل بعدی خارج کردن نور گسیلی از داخل نیمرسانا بود. اولین تلاش برای جلوگیری از جذب در بستر GaAs با گاف نواری Ra70 nm الاع الاع در -I42 eV این روش حذف بستر GaAs با روش etching و جایگزینی با GaP شفاف بوسیله Wafer bonding در -GaP در Packard در سال ۱۹۹۴ بود که LED و جایگزینی با Ca الما کار آنها بود که برای اولین بار در چراغهای راهنمایی و رانندگی و علائم تابلوها و چراغهای ترمز اتومبیلها استفاده شد. در ادامه AIInGaP تجاری توسط دو گروه ناکامورا ، پروفسور آکاز کی و آمانو در دانشگاههای ناگویا و میجو تکمیل تر شد. همچنین AIInGaN بود طیف پهن تری از نور گسیلی را پوشش می دهد و دسترسی به نور سبز و آبی و ماورای بنفش را میسر می سازد ولی همانند AIInGaP ناهمگنی ایندیم و عدم تطابق ثابت شبکه با ثایت شبکه بستر از جمله چالشها بودهاند. می افزوه بازده کوانتمی داخلی DIInGaN در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد برای نورآبی و ماورای بنفش می باشد ولی مزیت شفاف بودن بستر یاقوت و حساسیت بیشتر چشم انسان به نور سبز نورآبی و ماورای بنفش قرمز شرکتهای بزرگ مثل Nichia , Lumileds را بر آن داشته است تا تلاش بیشتری در جهت افزایش



شکل۱-۱۳- تحول تاریخی نیمرساناهای نور گسیل و مقایسه بازدهی آنها

۱–۵ دیودهای نور گسیل بر پایه نیمرساناهای نیتروژندار

اولین گزارشهای LED آبی پیوند n-n ساخته شده از III-نیترایدها در سال ۱۹۹۱[۶] با یک LED هم-پیوند (homojanction) GaN که با گسیل نور آبی با توان خروجی μμ ۴۲ در ۲۰ mA ساخته شد. این نور آبی از انتقال ناخالصی وابسته به Mg آلاییده شده در لایه GaN نوع q بود. کارآیی آن چند برابر بیشتر از بهترین محصول تجاری آن زمان یعنی LEDهای آبی SiC بود. اولین LED های بر مبنای ساختارهای ناهمگون دوگانه GaN/InGaN/GaN در سال ۱۹۹۳ [۷] گزارش شدند که توان خروجی بهبود یافته μμ ناهمگون دوگانه GaN/InGaN/GaN در سال ۱۹۹۳ [۷] گزارش شدند که توان خروجی بهبود یافته μμ کردند. گزارشهای بعدی در امعرفی کردند.

اولینLED های آبی تجاری با روشنایی بالا در حد شمع(candela) در ۱۹۹۳ توسط ناکامورا در شرکت nichia chemical تولید شدند [۱۲۲] این قطعات تجاری ترکیب ناخالصی Zn-Si را درناحیه فعال InGaN برای تولید نور آبی LED با قله پیک طیف گسیل در ۴۵۰nm به کار میگرفتند که توان خروجی LED با بازدهی کوانتمی خارجی ۲/۷٪ و بازده روشنایی ۲/۱ Im/۷ را داشتند.

بعد از آن در سال ۱۹۹۵ نسل دوم ELDهای III-نیتراید بر مبنای ساختار چاه کوانتمی یگانه با توان خروجی۴/۸ mW برایELDهای آبی ۴۵۰ nm و ۳ mW برای ELDهای سبز ۵۲۵ به ترتیب با (luminousefficiency)بازده روشنایی ۱m/w و ۲۲ lm/۷ به بازار آمدند. پهنای این ELDهای تجاری باریکتر شده بودند اما رنگ آنها در برابر تغییرات جریان ورودی پایداری کافی نداشت. در حال حاضر شرکتهای Lumileds و Nichia مدعی ساخت LEDهای با بازده حدود ۱۳/۷ میباشند.

فصل دوم

کاربردها و مزایای دیودهای نور گسیل و دستهبندی آنها

۲-۱ کاربردهای مدرن LDها و LEDها

۲-۲ اهمیت LEDها از نظر اقتصادی

۲-۳ دستەبندى ديودھاى نورگسيل

۲-۱ کاربردهای مدرن LDها و LEDها

مهمترین کاربردهای LED ها عبارتند از:

- استفاده از LED سفید در صنایع روشنایی و زیباسازی اماکن عمومی با LEDهای رنگی. بدلیل بازدهی و طول عمر بالای LEDها نسبت به دیگر منابع نورگسیل صرفهجویی گستردهای در صنایع روشنایی بوسیله جایگزینی با لامپهای قدیمی صورت خواهد گرفت.
- امکان ساخت صفحات نمایش بزرگ برای استفاده در استادیومها و اماکن عمومی با استفاده از LEDها میسر شد. همچنین با کاهش هزینه ساخت LEDها امکان تولید صفحات نمایش لپتاپها و تلویزیونها و میسر شد. همچنین با کاهش هزینه ساخت LEDها امکان تولید صفحات نمایش در این ای و تلویزیونها و میایلها بصورت تجاری بوجود خواهد آمد. کیفیت بالا و بازدهی بالا از مهمترین مزایای LEDها در ساخت این صفحات است.
- استفاده گسترده از LDها در دیسکهای نوری ذخیره اطلاعات (CD, DVD, HDVD) بطور روزافزون در حال افزایش است.
- امروزه کاربردهای پزشکی LEDها در حال گسترش است. بعنوان مثال برای درمان برخی ضایعات پوستی، پوست تحت تابش مستقیم نور LED با طول موج خاص قرار می گیرد. همچنین استفاده از LED سفید جهت روشنایی در آندوسکوپی نتایج بهتری در بر دارد.
- دانشمندان در تلاشند از LEDها و LDها برای انتقال اطلاعات در مدارهای الکترونیکی و کامپیوترها جهت کاهش مصرف انرژی و افزایش سرعت استفاده کنند. امروزه از LDها در مخابرات فیبر نوری استفاده گستردهای صورت می گیرد.

بطور شماتیک گسترش استفاده از LED ها برای روشنایی در شکل ۲-۱ آورده شده است. روشنایی عمومی و صفحات نمایش بزرگ و نور پسزمینه مانیتورها و تلویزیونهای LCD, TFT عمدهترین استفاده را دارند.



شکل ۲-۱- گسترش استفاده از LED ها برای روشنایی

۲-۲- اهمیت LEDها از نظر اقتصادی

از نظر اقتصادی منافع زیادی در استفاده از LEDها وجود دارد. کاهش مصرف انرژی و حجم بالای درآمدهای تجاری افزایش روزافزون اهمیت استفاده از LEDها را میرساند. برای مثال پیش بینی میشود فروش LED های سفید تا سال ۲۰۱۰ میلادی بیش از ۳ میلیارد دلار باشد همچنین روند رشد سریع مبادلات تجاری دو شرکت بزرگ نیچیا و اورلایت نشان دهنده اهمیت بالای گسترش استفاده از LED ها میباشد(شکل۲-۲).







۲-۳ دستهبندی دیودهای نورگسیل

دیودهای نور گسیل از نظر مواد بکار رفته در ساختارشان به دو دسته آلی یا پلیمری(OLEDs) و غیر آلی (LEDs) تقسیم بندی میشوند.

۲-۳-۲ دیودهای نورگسیل آلی یا پلیمری

کشف خواص نیمرسانایی پلیمر پلی استیلن (polyacetylene) در سال ۱۹۷۷ [۹] و در ادمه کشف و توسعه پلیمرهای رسانا در سال ۲۰۰۰ توسط A. Heeger, مع المحموم المعالي المعام المعالي المعام المعالي المعام الم جایزه نوبل شیمی سال ۲۰۰۰ [۱۰و۱۱و۱۲و۱۳] ریشههای استفاده از پلیمرها در قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی بودند. در سال ۱۹۹۰ باروفس [Burroughes] و همکارانش در دانشگاه کمبریج گسیل الکترولومینسانس از پلیمرهای نیمرسانا را کشف کردند[۱۴]. قطعات OLED تشکیل شدهاند از چندین لایه ماده پلیمر که بین یک کاتد و یک آند آلی یا غیر آلی از قبیل ITO (Indium tin Oxide) یا یک پلیمر رسانا قرار می گیرند. شکل ۲-۳ نمایی مقطعی از یک LED پلیمری را نشان میدهد.



شکل۲-۳- نمای کلی ساختار یک LED پلیمری . ولتاژ مثبت آند نسبت به کاتد باعث عبور جریان از لایه پلیمر شده و گسیل نور از این ناحیه و خروج نور از سمت بستر شفاف را منجر می شود.

در یک OLED با دو لایه، یک لایه برای انتقال حفرهها و دیگری برای انتقال الکترونها انتخاب می شود و سطح تماس آندو محل بازترکیب الکترونها و حفرهها است. آند و کاتد به امر تزریق حاملها کمک می کنند. تزریق حفره از آند به لایه پلیمر انتقال دهندهی حفره و تزریق الکترون از کاتد به لایه پلیمر انتقال دهندهی الکترون صورت می گیرد (شکل ۲-۴). بین این دو لایه می توان لایه ی پلیمری دیگری قرار داد تا حاملها فرصت بیشتری برای بازترکیب در این ناحیه پیدا کنند.



شکل۲-۴- مواد معمول انتقال دهنده الکترون و حفره و یک OLED دو لایه

ساخت DLED ها روی بستر شفاف عایق صورت می گیرد. OLED ها را می توان به راحتی در ابعاد بزرگ (با مساحت چند سانتی متر مربع) در دمای پایین ساخت. OLED ها روی هر ماده مناسب می توانند قرار گیرند حتی روی بسترهای انعطاف پذیر. همچنین هزینه ساخت صفحات نمایش پایینتر از LCD ها و صفحات پلاسما و تولید طیف نور وسیعتری نسبت به LCD ها و صفحات پلاسما از مزایای OLED هاست. به دلیل گسیل مستقیم نور از DLED ها از هر پیکسل، زاویه دید وسیعتری دارند. در DLD ها و صفحات پلاسما نور پس زمینه پس از عبور از فیلتر دریافت می شود ولی در DLED ها این اتلاف انرژی در حین عبور وجود ندارد. LED های پلیمری از مادون قرمز تا ماورای بنفش و همچنین نور سفید و نور پلاریزه را با بازدهی مناسب گسیل می کنند[۵۹ و ۱۹ و ۱۹و۸ و ۱۹]. بزرگترین معضل DLED ها طول عمر کوتاه پلیمرهاست (در حدود ۵۰۰۰ ساعت) و همچنین آسیب پذیری در تماس با آب. پلیمرهای مورد استفاده در DLE ها شامل مشتقات می ده.



شکل ۲-۵- دو نمونه از پلیمرهای نورگسیل ۵) (Poly(dialkoxy p-phenylene-vinylene) و (a) Poly(dialkylfluorene)

کنترل حاملها در گسیل نور از پلیمرها در بازدهی و انتخاب ولتاژ اهمیت فراوان دارند، مثلاً مقید کردن حفرهها و تزریق الکترونها به ناحیه فعال (ETHB) یا بالعکس (HTEB) با انتخاب مناسب نوع پلیمرها ومهندسی لایهها امکان پذیر است (شکل ۲-۶).



شکل ۲-۶- دیاگرامهای نوار انرژی یک LED پلیمری چند لایه با لایه فعال با نوار انرژی افقی (چپ) و تحت بایاس مستقیم (راست). ETHB نشان دهنده لایه انتقال دهنده الکترون و مسدود کننده حفره وHTEB نشان دهنده لایه انتقال دهنده حفره و مسدود کننده الکترون میباشد. انتخاب مناسب ETHB و HTEB حاملها را در ناحیه فعال مقید میکند.

مهمترین ماده مورد استفاده برای انتقال الکترون *Alq*₃ میاشد (tris(8-hydroxyquiolinato)aluminum) *Alq*₃ میاشد همچنین مولکولهایی از قبیل (tris(8-hydroxyquiolinato)-1,2,4-oxadiazole(PBD)-2)-2 نیز محکولهایی از قبیل (خبیل (خبیل (خبیل ۲۰ میتوانند بکار روند[۲۰و۲۲])-2 نیز بعنوان لایههای انتقال دهنده الکترون برای بهبود تزریق الکترون از کاتد میتوانند بکار روند[۲۰و۲۲]). مواد متداول برای تسهیل انتقال حفره متنوعتر هستند (از قبیل *N* – *diphenyl – N*)، همچنین لایههای مواد متداول برای تسهیل انتقال حفره متنوعتر هستند (از قبیل *N* – *diphenyl – N*)، همچنین لایههای پلیمر رسانا بعنوان آند یا کمک کننده تزریق حفره بکار میروند[۲۳]. موبیلیتی اکثر مواد آلی در محدوده پلیم رسانا بعنوان آند یا کمک کننده تزریق حفره بکار میروند[۲۳]. موبیلیتی اکثر مواد آلی در محدوده orGaNic (OVPD) تا ^{NN – 2} میار ای و شد فاز بخار پلیمری (OVPD) (OVPD) مح² را تعاول (میار) میار میرای و میار و رشد فاز بخار پلیمری (OVPD) (OVPD) معاول و میار در ناحیه دول برای دستیابی به نور با رنگهای گسیلی دلخواه مورد استفاده قرار میگیرند[۲۴]. مزایای DIEO (OVPD) میار می و میار میروند[۲۴]. مزایای OrGaNic (OVPD) معاول در ناحیه به منابع نور گسیل متواد از بان پلیمری در ناحیه (مار) دستیابی به نور با رنگهای گسیلی دلخواه مورد استفاده قرار میگیرند[۲۴]. مزایای DIEO ما سبت معال برای دستیابی به نور با رنگهای گسیلی دلخواه مورد استفاده قرار میگیرند[۲۴]. مزایای DIEO ما نسبت به منابع نور گسیل متداول انعطاف پذیری، زاویه دید بالا، امکان ساخت سلولهای خورشیدی ارزان قیمت و میال برای دستیابی به نور با رنگهای گسیلی دلخواه مورد استفاده قرار می گیرند[۲۴]. مزایای DIEO ما ساخت میهای کوانتمی میاشند در حالیکه مهمترین عیب آنها افت بازدهی از کیب نقطههای میاشد. بیشترین با پلیمرهای نور گسیل می توان کامپوزیتهای با بازدهی بالاتر بوجود آورد. بعنوان مثال نقطههای میاشد. بیشترین با بیمرهای نور گسیل میتوان کامپوزیتهای با بازدهی بالاتر بوجود آورد. بعنوان مثال نقطههای کوانتمی میا با با درهی را دربر میگیرد) ترکیب شده با پلیمرها بعنوان کوانتمی میام در و بازدهی را دربر میگیرد) ترکیب شده با پلیمرها بعنوان حالتهای میارده دو بابل میار در او بال میام میتوان ما ما حلول ای میاوین را دربر میگیرد) ترکیب شده با پلیمرها بعنوا

LEDها نور کمتری در واحد سطح گسیل میکنند. OLEDها در مقایسه با صفحات LCD و پلاسما طول عمر کمتری دارند.

۲-۳-۲ دیودهای نورگسیل غیر آلی

شدت بالای گسیل نور از حجم کوچک، دستیابی به طول موجهای دلخواه، بازدهی بالا و غیره از مزایای ویژه نیمرساناهای غیر آلی هستند که باعث توجه روزافزون محققان به نیمرساناهای غیر آلی برای تولید نور لیزر و نور معمولی شده است. در شکل۲-۷ مهمترین نیمرساناها با توجه به گاف نواری انرژی و ثابت شبکه آورده شدهاند.



شکل۲-۷- گاف نوار انرژی بر حسب ثابت شبکه خانواده III-نیتراید ها و برخی دیگر از ترکیبات گروه II-VI و III-V

در زیر برخی از مهمترین ترکیبات نیمرساناهای آلی مورد بررسی قرار گرفته شدهاند.

۲–۳–۲–۱ سیلیکون متخلخل

سیلیکون گاف نواری غیر مستقیم دارد (شکل ۲–۸) اما با ایجاد تخلخل در آن میتوان امکان حضور بازترکیبهای تابشی را فراهم کرد. در سال ۱۹۹۰ گسیل مرئی از سیلیکون متخلخل برای اولین بار توسط کانهام L.T.Canham مشاهده شد[۲۵].



شکل ۲-۸- ساختار نواری سیلیکون[۲۶]

طیف نور گسیلی انواع مختلف ترکیبات Si در شکل ۲-۹ آورده شده است. همانطور که در شکل پیداست سیلیکون متخلخل بیشترین شدت گسیل نور را دارا میباشد. یکی از مهمترین مزایای سیلیکون متخلخل تولید ساده و ارزان آن است .



اندازه حفرههای سیلیکون متخلخل از میکرومتر تا نانومتر تغییر می کند. الکترون و حفره تولید شده در نوسانات پتانسیل در کمترین انرژیها گیر افتاده و سپس بازترکیب تابشی صورت میدهند. پارامترهای موثر در ترکیبات سیلیکون متخلخل ثابت دیالکتریک و مقدار تخلخل و اندازه آنها میباشد. شکل۲–۱۰ طیف PL یک لایه سیلیکون متخلخل با ضخامت یک میکرومتر با درصدهای مختلف تخلخل را نشان میدهد. مشاهده میشود که با افزایش تخلخل شدت افزایش مییابد زیرا در حالتهای با تخلخل پایین فرار حاملها از مکانهای بدون نقص شبکه و گیر افتادن در مراکز بازترکیب غیر تابشی محتملتر میباشد.



شکل ۲-۱۰- طیف فتولومینسانس لایههای سیلیکون متخلخل با آلایش پایین (Ω 0.2) نوع p با درصد تخلخلهای مختلف. ضخامت تمام لایهها حدود یک میکرومتر میباشد[۲۸].

ZnO T-T-T-T

ZnO (اکسید روی) یک نیمههادی گروه II-IV از نوع n با گاف نواری مستقیم ۳/۳ eV در دمای اتاق و ۳/۴۴eV در دمای ۴K میباشد. بخاطر ویژگیهای خاص و کاربردهای مختلف در الکترونیک شفاف، نور گسیلهای ماورای بنفش (UV)، قطعات پیزوالکتریک، قطعات فرکانس بالا، سنسورهای شیمیایی و اسپینترونیک شدیداً مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است[۲۹–۳۹]. جرم مؤثر حامل های ZnO اسکالر مجازی، برابر با $0.24m_{\circ}$ و $0.59m_{\circ}$ به ترتیب برای الکترونها و حفره ها میباشد. تحرک الکترونی ZnO با مجازی، برابر با $180m_{V}^{2}$ با $100m_{O}$ می باشد. تحرک الکترونی $100m_{V}^{2}$ شبکه ساده بین 100 و $100m_{V}^{2}$

یکی از مهمترین ویژگیهای ZnO داشتن انرژی بستگی اکسیتونی بزرگ برابر با ۶۰meV است که بیشتر از انرژی حرارتی در دمای اتاق (KT = 26meV) است و بوضوح بزرگتر از دیگر نیمههادیهای مورد استفاده در قطعات نورگسیل سبز و آبی از قبیل KT = 26meV) و (KT = 25)است [+7]در نتیجه در دمای اتاق گسیل اکسیتونی خواهد داشت که باعث بالا بودن بازدهی در این دما میشود و امکان استفاده عملی از لیزرها با آستانه پایین در دمای اتاق را فراهم میآورد. بهبودهای اخیر در رسانش OnD و تولید آلایش نوع q آن توجه زیادی را در کاربردهای گسیل در دمای اتاق را فراهم میآورد. بهبودهای اخیر در رسانش OnD و تولید آلایش نوع q آن توجه زیادی را در کاربردهای گسیل در می اتاق را فراهم میآورد. بهبودهای اخیر در رسانش OnD و تولید آلایش نوع q آن توجه زیادی را در کاربردهای گسیلنده می آورد. بهبودهای اخیر در رسانش OnD و مکان استفاده عملی از لیزرها با آستانه پایین در دمای اتاق را فراهم میآورد. بهبودهای اخیر در رسانش OnD و تولید آلایش نوع q آن توجه زیادی را در کاربردهای گسیلنده می توری Varistors, UV و سنسورهای گازی و شیمیائی ایجاد کرده است [+7]. برخی کاربردهای ایتوالکترونیک شفاف با توان بالا و سنسورهای گازی و شیمیائی ایجاد کرده است [+7]. برخی کاربردهای ایتوالکترونیک (TOP همانند OnD در این را ۲۰۰۲) میباشد که برای تولید قطعات نور گسیل سبز، آبی و سفید بطور گسترده استفاده میشود [+7]. در Xiro (تر ۲۰۰۲) میباشد که برای تولید قطعات نور گسیل سبز، آبی و سفید بطور گسترده استفاده میشود [۲۰]. و در تتیجه کم هزینه را در دسترس بودن ماده کهای با کیفیت بالا و تکنولوژی رشد بلوری بسیار ساده تر و در نتیجه کم هزینه تو دارد. Zno از دهه ۱۹۳۰ مورد توجه بود و بسیاری از خصوصیات آن تحقیق شده و در نتیجه کم هزینه تر نیز دارد. Zno از دهه ۱۹۳۰ مورد توجه بود و بسیاری از خصوصیات آن تحقیق شده و در نتیجه کم هزینه تو دانی دانیز دارد. Zno از دهه ۱۹۳۰ مورد توجه بود و بسیاری از خصوصیات آن تحقیق شده و در نتیجه کم هزینه تر نیز دارد. Zno از دهه ۱۹۳۰ مورد توجه بود و بسیاری از خصوصیات آن تحقیق شده و در نتیجه کم هزینه تر نیز دارد. Zno از دهه ۱۹۳۰ مورد توجه بود و بسیاری از خصوصیات آن تحقیق شده است.

 ZnO هستند [۴۳و۴۴] . ZnO بصورتهای ZnO , [۴۴و۴۳] . ZnO مستند [۳۸و۴۳] . nano comb ,nano sphere ,nano belt ,nanorod ,nanowire



شكل ٢-١١- برخى از انواع a ZnO) نانوسيمها b) نانو ميلهها c) نانو لولهها b) نانو نوارها

تهیه ZnO نوع p مشکل است ولی نوع n با آلایش عناصر گروه p یا v از قبیل I,Cl,In,Ga,AI امکان پذیر است. ZnO ساختار ورتسایت مشابه با GaN با عدم تطابق شبکه حدود r درصد دارد. استفاده از ZnO به عنوان لایه بافر برای رشد GaN روی Sapphire کیفیت رشد را افزایش می دهد، همچنین ساختار شبکه ساده ZnO بعنوان ویفر تا r اینچ در دسترس است[P۳و ۴۱]. ZnO خواص اپتیکی مشابه با GaN دارد که می تواند جایگزین GaN برای کاربردهای اپتیکی از قبیل LED ها ، ZnOها به همراه رشد نوع q و n آن با آلایش OD MgO گردد. برای عملی کردن ساخت ابزارهای اپتیکی و الکترونیکی برپایه ZnO تولید فیلمهای با کیفیت بالا و تغییر گاف نواری با آلایش و ساخت ساختارهای چاه کوانتمی و آلایش برای تولید نوع n نیاز است. برای ZnO راده سمی) استفاده ZnMgO نزدیک ثابت شبکه ZnO می باشد بنابراین فیلمهای آلائیده شده ZnMgo برای ساخت ساختارهای ناهمگون (بعنوان مثال ZnMgO/ZnO/ Zn MgO) استفاده می شود.

AlGaInP - T-T-T-T



شكل ۲-۱۲- مقايسه طيف گسيلي AlGaInP و GaPAs و GaP

GaN 4-1-4-1

GaN یک ترکیب پایدار است. Maruska و Tietjen گاف انرژی GaN را ۳/۳۹eV اندازه گرفتند. بعد از آنها Pankove و همکارانشⁱ طیف فتولومینسانس GaN را در دمای پایین (۱/۶K) گزارش کردند. قویترین گســیل از گاف انرژی در ۳/۴۷۷eV و ضـعیفترین قله در ۳/۳۷e۷ مشــاهده شــد. چندین گروه وابستگی دمایی گاف انرژی GaN را اندازه گیری کردند. Pankove و همکارانش ضریب دمایی گاف انرژی را Connell و Camphausen در دمای بالای $dE_g/(dT) = -9 \times 10^{-6} eV/K$ و Connell در دمای بالای $dE_g/(dT) = -9 \times 10^{-6} eV/K$ وابستگی دما و فشار را از لبه جذب GaN مطالعه کردند. آنها تحت یک فشار هیدرواستاتیک تا Kbar, ۱۰ انتقال گاف انرژی GaN را به اندازه GaN را به اندازه dEg/(dp)=۴/۲±۰/۴ meV/bar در دمای اتاق و وابستگی دمایی را حدود dE_g/(dT) = −۶/۷×۱۰^{-۴}eV/K انـدازه گیری کردنـد. در دمـای اتاق رسـانندگی گرمایی برای GaN حدود κ=۱/۳ W/cmK است که از مقدار پیش بینی شده, کوچکتر است (κ=۱/۷ W/cmK). همکارانش با استفاده از طیف رامان به چهار مد فونونی در GaN با آلایش بالای نوع n دست یافتند. A1 [نور انتقالی (TO)] و (E1(TO مدهایی بودند که در ۵۳۳cm⁻¹ و ۵۵۹cm⁻¹ مشاهده شدند. همچنین فرکانسهای A1(LO) و E1(LO) از داده های IR انعکاسی در ۷۷۰±۷۰cm و ۲۰۰±۷۰cm تخمین زده شدند. Cingolani و همکارانش مدهای (A1(LO و A1(LO) را از طیف رامان در ۷۱۰cm⁻¹ و ۷۱۰cm⁻¹ مشاهده کردند. چندین گروه دیگر قله های اثر فونونی را در مطالعه لومینسانسی مشاهده کردند. چندین اندازه گیری هم روی ثابت های نوری GaN انجام شـد. Ejder برای ضـریب شـکسـت GaN با استفاده از اندازه گیریهای 9 n(۳/۳۸eV) =۲/۶۷ و n(۱/۰eV)=۳/۳۳ و n(۱/۰eV) و n(۳/۳۸eV) =۲/۶۷ کردند و مقدار ۵/۹ ج₀=۵ را اندازه گرفتند. Barker و Ilegems با اندازه گیریهای IR انعکاسی _{٤٥}=۹/۵ را بدست آور دند [۵۳].

Al_xGa_{1-x}N Δ -Y-Y-Y

آلیاژهای Al_xGa_{1-x}N (۳/۴ < E_g < ۶/۲eV) Al_xGa_{1-x}N رای طول موجهای ۲۰۰nm تا ۳۰۰nm مواد ایدهالی برای ساخت سنسورها ومنابع گسیلنده ارزان نور UV هستند زیرا AlGaN از معدود سیستمهای نیمرساناست که گاف نواری آن به آسانی با طراحی ساختار ناهمگون و ترکیب آلیاژ قابل تغییر است. سنسورها و منابع نور گسیل UV کاربردهای فراوانی در مطالعه پروتئینها[۵۴] ، تصفیه آب، LDها و LEDهای سفید دارند. رشد AIN بدلیل نیاز به دمای رشد بالاتر و داشتن اختلاف ثابت شبکه بیشترسخت تر از GaN است. AIN عایق خوبی است در نتیحه آزمایش هال دقیق روی آن غیر ممکن است. دستیابی به AlGaN رسانا با Al بالا بدلیل افزایش انرژی یونش آلایندهها و افزایش دررفتگیهای ذاتی مشکل میباشد. Mg و Si بعنوان ناخالصیهای پذیرنده و دهنده در آن بکار میروند. گاف نواری ساختار زینک بلند AIN بیشتر از گاف نواری ساختار ورتسایت آن است[۵۵]. شکل ۲–۱۳ طیف PL دمای پایین (۱۰K) برای آلیازهای Al_xGa_{1-x}N (۲>x>۰) نشان می دهد که PL گسیلی با قطبش Cااع یا C لی حی قواری می فراری کننده در مقابل تکفام ساز جمعآوری می شود



شکل ۲-۱۳- طیف PL با مقادیر مختلف x در Al_xGa_{1-x}N شکل

۱– با افزایش x انرژی پیک PL افزایش مییابد. ۲– با افزایش x شدت PL برای مولفه E⊥C کاهش مییابد.

برای x>۰/۲۵ گسیل غالب E||C خواهد بود که در اینصورت خارج کردن نور از قطعه مشکل خواهد بود(شکل ۲۵-۱۴).



LD with AlGaN as active layer



InGaN 8-1-3-1

InGaN یک ماده نیمرسانا تشکیل شده از ترکیب GaN و InN با گاف نواری مستقیم و دو ساختار زینک بلند و ورتسایت میباشد. طول موج گسیلی InGaN تابعی از درصد In می باشد برای ایندیوم ۲ درصد نزدیک ماورابنفش و برای ایندیوم ۱۰ درصد طول موج ۳۰۰ نانومتر و برای ۳۰ درصد ۴۴۰ نانومترخواهیم داشت. در درصدهای بالای In ، ایندیوم به صورت یکنواخت در InGaN نخواهد بود و بصورت خوشههایی با درصد بالایی از ایندیم در InGaN توزیع می گردد. InGaN بیشتر روی SiC و یاقوت رشد داده می شود [۵۶]. گاف نواری InI از ۲/۰ تا ۲/۶ گزارش شده است و این خاصیت InI در InGaN اثرات تجمع ایندیم را بوجود میآورد که منجر به وجود ترازهای انرژی متنوع و طیف PL پهن می گردد. عدم تقارن در ساختار InGaN باعث حضور میدانهای قطبشی خوبخودی در آن می گردد.

شکل۲-۱۵ ساختار InGaN و جهتهای مختلف رشد آنرا نشان می دهد.



شکل۲-۱۵- ساختار InGaN و جهتهای مختلف رشد آنرا



مراحل ساخت LEDها و مقایسه انواع بستر برای LEDهای نیتروژندار

- ۲-۳ مراحل ساخت LED ۲-۳ مطالعه و مقایسه انواع بستر برای LEDهای برمبنای نانوساختارهای چاه کوانتمی نیتروژندار ۴-۳ مقایسه بازدهی LEDهای با رشد جانبی و عمودی
 - ۵-۳ رشد LEDها بر روی دیگر بسترهای جدید

LED مراحل ساخت

مراحل ساخت LED همانطور که در شکل۳–۱ نشان داده شده شامل مراحل رشد بستر، رشد لایههای بافر، سد، چاه و غیره روی بستر، برش و ایجاد اتصالات و پوشش اپوکسی میباشد.



شكل-۱-۳ مراحل ساخت LED بطور شماتيك.

ابتدا بستر بصورت ماده کپهای با حجم زیاد تولید میشود سپس به ضخامتهای دلخواه برش داده میشود و لایههای بافر و چاههای کوانتمی و لایههای درپوش با روشهایی از قبیل MOCVD, MOVPE, MBE, MBC روی بستر بصورت آرایهای از LED ها رشد داده شده و سپس از یکدیگر جدا شده و اتصالات فلزی برقرار میشوند و در نهایت داخل پوشش اپوکسی قرار می گیرند. لایه اپوکسی برای محافظت LED در برابر آسیبهای ناشی از تماس با محیط و کاهش اختلاف ضریب شکست بین نیمرسانا و هوا و همچنین سادگی شکل گیری هندسی مناسب در جهت افزایش بازدهی خروج نور بکار میرود. در ساخت LED مهمترین پارامترها بازدهی بالا و هزینه تولید پایین میباشند. انتخاب مناسب بستر و روش رشد لایههای باالایی در کاهش هزینه تولید و اقزایش بازدهی بسیار موثرند از اینرو مطالعه انواع مختلف بستر امری لازم و ضروری است. همچنین همواره تلاش برای انتخاب ارزانترین روش رشد و لایهنشانی برای تولید انبوه صورت می گیرد.

تکنیک های رشد مختلفی برای لایه نشانی نیمرساناهای III-نیتراید به کار رفتهاند. از میان این تکنیکها، لایه نشانی پرتومولکولی MBE(molecular-beamepitax) و MOCVD معمولترین روش در ساخت اکثر ترکیبات نیمرساناهای گروه V-III بودهاند. همچنین ممکن است MOCVD مناسب ترین روش برای تولید این مواد به دو دلیل هزینه کمتر و کیفیت بالای محصول باشد.

در یک فرایند MOCVD لایه تحت یک فرایند شیمیایی مابین پیش مواد MetalarGaNic و هیدریدها روی سطح یک زیر لایه داغ رسوب می کنند. در مورد رشد بلور (Al In)GaN) ، ترکیبات TMGA، TMGA، TMGA سطح یک زیر لایه داغ رسوب می کنند. در مورد رشد بلور (Al In)GaN) ، ترکیبات TMGa، TMAI، TMGA (تری متیل =TM) معمولا بعنوان مواد اولیه گروه III و $_{\rm c}NH$ بعنوان یک منبع نیتروژن استفاده می شود. بعنوان مثال GaN را با وارد کردن همزمان TMGa و $_{\rm sapphire}NH$ در محفظه واکنشی با زیر لایه ایی از قبیل sapphire که تا دماهای بالا (معمولا 0 ۸۰۰ تا 0 ۲۰۰۰) گرم شده است میتوان رشد داد. ترکیبات سه تایی از قبیل AlGaN و AlGaN و AlGaN و TMIn با TMGa در محفظه واکنشی با زیر لایه مواد اولیه تای از قبیل sapphire که تا دماهای بالا (معمولا 0 ۸۰۰ تا 0 ۲۰۰۰) گرم شده است میتوان رشد داد. ترکیبات سه تایی از قبیل AlGaN و AlGaN و AlGaN و TMGA با تا می توان با مخلوط کردن TMI با TMGa با تا مواد مواد با تا درکیب جامد با تنظیم ترکیب فاز گازی TMA و TMGA یا TMI با TMGa و TMGA که ترکیب جامد با تنظیم ترکیب فاز گازی TMA و TMGA می شود.

اگرچه اصول لایه نشانی به روش MOCVD ساده است اما محققان با چالش های زیادی در دهه هشتاد میلادی برای لایه های نازک نیتروژن دار با کیفیت بالا روبرو بودند. یکی از این مشکلات این بود که آمونیاک مولکول بسیار پایداری است و بازدهی شکست (craking efficiency) آن پایین است. برای نگه داشتن استوکیومتری در فیلم رشد داده شده فشار نسبی بالایی برای آمونیاک در شرایط رشد نیاز است. معمولا حجم زیادی از آمونیاک و دمای بالای رشد در فرآیند رشد استفاده می شود و وقتی محفظه، حاوی غلظت بالای آمونیاک (حدود ٪۵۰) میشود خصوصیات فیزیکی آمونیاک اثر غالب در دینامیک جریان شارشی در راکتور می گذارد. این مورد برای ترکیبات دیگر گروه V-III از قبیل GaAs یا PI وجود ندارد. زیرا غلظت «Ash می گذارد. این مورد برای ترکیبات دیگر گروه V-III از قبیل GaAs یا PI وجود ندارد. زیرا غلظت را بست می گذارد. این مورد برای ترکیبات دیگر گروه V-III از قبیل GaAs یا PI و رسانش گرمایی بسیار پایین تری نسبت به هیدروژن دارد تاثیر زیادی روی اغتشاش شارش می گذارد. در دماهای بالاتر رشد، همرفت گرمایی آشفتگی جریان(turbulent flow) بیشتری را تولید می کند. در اواخر دهه ۹۰ میلادی ناکامورا و همکارانش [۵۷] یک راکتور با دو شارش معرفی کردند که این مشکل را حل می کرد (شکل ۳–۲) .گازهای منبع (شارش اصلی) به موازات سطح بستر زیر لایه، مشابه راکتور افقی قدیمی وارد میشوند. یک جریان دوم (جریان فرعی) از مقادیر مساوی $H_2 - R_2$ از بالا عمود بر سطح زیر لایه برای حذف همرفت گرمایی که از سطح زیر لایه داغ ($1000^{\circ}C$) بالا میآید وارد میشود تا واکنش دهندهها را به زیر لایه نزدیک کند. بدون جریان شارش دوم رشد دو بعدی نبوده و جزایر GaN شکل می-گرفتند.



شکل ۳-۲ محفظهای که ناکامورا برای اولین با ر برای رشد لایههای نیتروژن دار استفاده کرد [۵۷].

مشکل دوم رشد، کمبود بستر مناسب با ثابت شبکه و ضریب انبساط گرمایی همسان با GaN میباشد. در اواسط دهه ۸۰ میلادی گروه آکازاکی (Akazaki) در دانشگاه میجو(Meijo) یک فرآیند دو مرحلهایی تحت صفحه C بستر sapphire ابداع کردند. آنها یک لایه AIN بافر (۲۰۰۹^o) را دردمای پایین و سپس یک لایه GaN ضخیم را در دمای بالاروی بستر رشد دادند که این امر باعث بهبود خواص الکتریکی اپتیکی لایههای رشد داده شده می شد. ناکامورا از Nichia با روشهای مشابهی از رشد GaN در دمای پایین بعنوان لایه بافر استفاده کردند که در نتیجه لایههای GaN با کیفیت بالا علی رغم چگالی بالای دررفتگی تا ^{2–} CM⁰ در لایه، بدست آمد. لایه های ساختار ناهمگون GaN روی بستر sapphire دارای چگالی بالای دررفتگیهای صفحهایی و به خصوص ریسمانی (که موازی محور C هستند، شکل۳-۴) بین ⁸01 تا ¹⁰⁰¹ بر سانتیمتر مربع حتی بعد از چندین میکرومتر رشد لایه، همچنین دررفتگی در لبه سطح مشترک لایه و بستر به دلیل اختلاف زیاد ثابت شبکه (حدود ٪۱۴) و ضریب انبساط گرمایی (حدود ٪۸۰) با بستر Sapphire [۵۸] میباشند. در قیاس با دیگر مواد مورد استفاده در قطعات اپتوالکترونیک از قبیل ترکیبات V-۱۱ آرسنیک دار و یا V-۱۱ فسفر دار که مواد مورد استفاده در قطعات اپتوالکترونیک از قبیل ترکیبات V-۱۱ آرسنیک دار و یا V-۱۱ فسفر دار که چگالی دررفتگی بالای ^{2–2} میرا آیی قطعه تاثیر منفی میگذارد، ترکیبات III-نتیراید برای مواد مورد استفاده در قراری ترکیبات III-نتیراید برای ماه درفتگی بالای ^{2–3} مربالا بسیار مناسب است زیرا با حضور دررفتگیهای ریسمانی بسیار در ترکیبات InGaN مواد مورک با برای آن گزارش شده است. مشخص است که این در رفتگیها به عنوان مراکز باز ترکیب غیر بازی عمل نمیکند.



شکل ۳-۴- تصویر از چاههای کوانتمی InGaN/GaN که دررفتگیهای ریسمانی را نشان میدهد

۲-۳ مطالعه و مقایسه انواع بستر برای LEDهای برمبنای نانوساختارهای چاه کوانتمی نیتروژندار

Silane و Silane (bis-cyclopentadienyl-magnesium) CP_2Mg (bis-cyclopentadienyl-magnesium) CP_2Mg (silane شوند. هیدروژن یا نیتروژن بعنوان گازهای حامل (Carrier) استفاده میشوند. دماهای رشد ایده آل برای InGaN مختلف ساختار LED متفاوتند : GaN در 0 ۲۰۰۰ تا 0 ۲۰۰۰، میشوند. دماهای رشد ایده آل برای Sapphire و AlGaN ،۱۱۰۰ 0 در اتا 0 ۲۰۰۰ تا Sapphire کمی بیشتر و Sapphire در دماهای بسیار پائین *T* 0 ۲۰۰۰ تا Sapphire در 0 ۲۰۰۰ تا Silane در میشوند. رشد عملی III-نیترایدها روی Mg در دماهای بسیار پائین *T* 0 ۲۰۰۰ تا Sapphire در میشوند. رشد عملی III-نیترایدها روی GaN در دماهای بسیار پائین *T* 0 ۲۰۰۰ تا Sapphire در Sapphire میشوند. رشد عملی III-نیترایدها روی GaN در دماهای بسیار پائین *T* 0 ۲۰۰۰ تا Sapphire در میشوند. رشد عملی III-نیترایدها روی GaN در دماهای بسیار پائین *T* 0 ۲۰۰۰ تا Sapphire در میشوند. رشد عملی III-نیترایدها روی Sapphire در دماهای بسیار پائین *T* 0 ۲۰۰۰ تا Sapphire در میشوند. رشد عملی III-نیترایدها روی Sapphire در دماهای بسیار پائین *T* 0 ۲۰۰۰ تا Sapphire در دماهای بسیار پائین *T* 0 ۲۰۰۰ تا Sapphire در میشوند. رشد عملی III-نیترایدها روی Mg در دماهای بسیار پائین *T* 0 ۲۰۰۰ تا Sapphire در در در ماهای در شد Sapphire در تر Sapphire در Sapphire در در ماهای بین بود [۶۲]. دومین مورد رشد III-نیترایدها با کیفیت بالا روی Sapphire با سیفاده از لایه بافر نازک رشد داده شده در دمای پایین بود [۶۲].

GaN كيفيت بلورهاى لايههاى مستقيماً رشد داده شده روى GaN بدليل ناهمخوانى بزرگ ثابت شبكه بين GaN و ياقوت معمولاً پائين است. يك لايه بافر با ضخامت كمتر از 0C كه بطور معمول در دماى حدود 0C و ياقوت معمولاً پائين است. يك لايه بافر با ضخامت كمتر از 0 معمول در دماى حدود 0C معمولاً پائين است. يك لايه بافر با ضخامت كمتر از 0 معمول در دماى حدود 0C معمولاً پائين است. يك لايه بافر با ضخامت كمتر از Comm بافر معمول در دماى حدود 0C معمولاً پائين است. يك لايه بافر با ضخامت كمتر از Comm بافر معمول در دماى حدود 0C معمولاً پائين است. يك لايه بافر با ضخامت كمتر از الايه دوبعدى متعاقب مؤثر است. لايه درپوش (Cladding) براى جلوگيرى از فرار الكترونها از ناحيه فعال لازم است. هچنين لايه نهايى با درصد Mg بالا آلائيده مىشود تا مقاومت اتصال p كاهش يابد. شكل 0 مربوط به LED مربوط به LED مربوط به ميكا با پيك

گسیلی از طول موج سبز تا UV عمیق را نشان میدهد. LED FWHMهای آبی و سبز حدود ۳۰nm بیشتر از LEDهای UV میباشد. این امر بخاطر ناهمگنیهای زیاد در نواحی فعالInGaN میباشد[۶۰].



شکل۳-۵- طیف LED ELهای بر مبنای چاههای کوانتمی رشد داده شده روی بستر Sapphire به روش MOCVD

در طول رشد LED، اساساً لایهها بجای تنش relax می شوند اگرچه ممکن است یک فشار تراکمی در طول فرآیند سرد سازی تا دمای اتاق با توجه به ضریب انبساط گرمایی بیشتر یاقوت تولید شود [۶۴]. اندازه و علامت واقعی فشار تابعی از شرایط رشد، ضخامت و آلایش لایه در پوش نوع n (لایه پائینی) می باشد .

داده ها حاکی از آنند که آلایش مناسب Si میتواند فشار را از تراکمی به کششی تغییر دهد [۶۵] که خمش ویفر و شکست لایه را محتمل میکند و اندازه ماکزیمم ویفر و ضخامت LED را محدود میکند. علی رغم استفاده از لایه بافر برای کم کردن عدم تطابق ثابت شبکه بین نیترایدها و یاقوت، در رفتگیهای ریسمانی با چگالی بالایی 2–10¹⁰ د⁰⁸ در ساختار LEDها وجود دارد [۶۶]. برخی از این نواقص شبکه ریسمانی، وابسته به شرایط لایه درپوش، تا لایههای بالایی هم امتداد پیدا میکنند.



شکل ۳-۶ تصاویر AFM سیلیکون نمونه مختلف با درصدهای متفاوت ایندیم و شرایط رشد مختلف

شكل ۳-۶- تصاوير AFM سه LED چاه كوانتمي InGaN/GaN بر روى ياقوت با ريخت شناسي سطحي متفاوت را نشان می دهد. میانگین مربعی ناهمواری سطحی در این نمونهها در محدوده ۸nm-۰/۸-۴/۰ در مساحت مشخص (Pit) میباشد . سطح A LED از لحاظ میکروسکوپی ناهموار است ولی بدون چاله (Pit) مشخص ۲×۲ μm^2 می باشد.. در حالیکه LED های B و C نواقص سطحی بسیاری دارند . در نمونه B حدود LED ×10⁸ cm⁻² چاله با ریخت شناسی مخروطی شش وجهی(hexahedral) با اندازه حدود 100nm وجود دارد. نمونه C دارای چالههای کوچک با ساختار پیچشی حدود 10⁹cm⁻² چاله که از تقاطع سطح بالایی با نواقص شبکه بوجود آمدهاند میباشد . TEM نشان میدهد که چگالی نواقص شبکه در نمونه های A و B و C به ترتيب $6 \times 10^8 cm^{-2}$ و $3 \times 10^9 cm^{-2}$ و $3 \times 10^9 cm^{-2}$ هستند . چالههای هشت وجهی در نمونه B نواقص شبکه V شکل نامیده می شوند که در لایه Capping و چاههای کوانتمی موجودند و به در رفتگیهای ریسمانی وصل می شوند. تنش بالا در سطح مشترک InGaN / GaN و نواحی غنی از ایندیم [۶۹و۶۹] و یا ترکیبات ناخالصی دلیل شکل گیری آنها شناخته شدهاند [۷۰] . چگالی نواقص شبکه در LEDهای III-نیتراید رشد داده شده روی یاقوت بسیار بیشتر از LEDهای بر پایه نیمرساناهای قدیمی هستند. LEDهای بر مبنای GaAs با چگالی نواقص شبکه بیشتر از ۱۰^۴ cm⁻² هیچ گسیل لبه نواری را نشان نمی دهند[۲۱]. این که LEDهای آبی و سبز InGaN با نواقص شبکه بالا قابل استفاده هستند بخاطر اینست که نواقص شبکه ريسماني بعنوان مراكز بازتركيب غيرتابشي مؤثر عمل نمي كنند[٧٣و٧٢] . نواحي شبه نقطه كوانتمي غني از ایندیم که خود به خود در آلیاژ InGaN به دلیل نوسانات توزیع ایندیم شکل گرفتهاند ، باعث گیراندازی حاملها و بهبود فرآیندهای تابشی می شوند [۶۰] .

LED 1-۲-۳ها روی بستر SiC

SiC نیز بعنوان بستر برای LEDهای با روشنایی بالا بر مبنای InGaN مورد استفاده قرار گرفته است [۹۶و۹۶]. یکی از مزایای مهم استفاده از SiC آسانی آلایش جهت تولید بستر رساناست که ما را قادر میسازد LEDهای با اتصالات عمودی همانند LEDهای قدیمی گروه V-III که روی بسترهای رسانای GaAs و GaP

رشد داده می شدند، بسازیم. در نتیجه یخش غیریکنواخت جریان که در LEDهای رشد داده شده روی بستر Sapphire با اتصال جانبی وجود دارد، حضور نخواهد داشت. ساخت چنین LEDهایی بسیار سادهتر است. یک تماس بر پایه Ni در پشت بستر بعنوان الکترود نوع n شکل می گیرد و تنها یک سیم برای این LEDها نیاز است. مزیت دیگر SiC رسانش گرمایی بالای آنست که حدود ده برابر بیشتر از Sapphire می باشد. این موضوع در حذف گرمای LED بسیار مؤثر است. اما استفاده از بسترهای SiC برای LEDهای نیمرسانای نیتروژندار بخاطر هزینه بالای آن کمتر مرسوم است. عدم تطابق کمتر شبکه SiC با GaN(حدود ./۳/۵) در مقایسه با ياقوت هنوز باعث حضور چگالی دررفتگی بالا(حدود ^{2-۱۰٬}۰۳) می شود [۹۹و۹۹]. در مقایسه با یاقوت سطح نهایی زبر و نواقص سطحی و حجمی بسیار زیادی دارد که باعث بوجود آمدن نواقص زیاد در لایهها میشود. عیب دیگر SiC آلایشیافته، مات بودن آن در برابر نور مرئی است و طول موجهای UV کمتر از گسیل لبه نواری خود را قویاً جذب می کند و برای تولید گسیلندههای UV عمیق پربازده مناسب نیستند. لایههای GaN معمولاً با روش MOCVD روی صفحه(۰۰۰۱) بسترهای 6H یا 4H-SiC با صفحه Si رشد داده می شوند. یک لایه بافر AlN یا AlGaN برای کاهش عدم تطابق شبکه جهت کاهش تنش لازم است. AlN هم در دمای یایین و هم در دمای بالا روی SiC رشد داده میشود [۷۱–۷۳]. در مقایسه با لایههای بافر با دمای یایین روی ا یاقوت، Al نشانده شده با دمای بالا(حدود °۱۱۰۰C) روی SiC کیفیت شبکه بهتر و سطح صافتری دارد[۹۸]. بنابراین برای رشد لایههای دوبعدی بعدی با کیفیت بهتر مناسبترند. از آنجا که SiC ضریب انبساط گرمایی کمتری دارد در طول سرد سازی، لایههای GaN تحت فشار کششی(tensile stress) که مساعد برای ایجاد شکستگیها (Cracks) هستند، قرار می گیرند که با استفاده از لایه نازک بافر AIN تحت تنش قابل حذف میباشند [۷۵]. شرکت Cree اولین نسل LEDهای InGaN را با لایه بافر عایق تولید کرد و سیس لایه بافر AlN با لایه AlGaN با درصد آلومینیوم یایین که با Si آلایش یافته بود و رسانندگی بهتری داشت، جایگزین شد [۶۸]. ضریب شکست SiC(حدود ۱/۷ در طول موج آبی) کمی بیش از GaN و بسیار بیشتر از اپوکسی می باشد. بازتاب داخلی کل سطح GaN/SiC ناچیز است. بنابراین در LEDهای با هندسه قائم الزاویه بیشتر نور تولیدشده توسط ناحیه فعال درون بستر SiC گیر افتاده و شانس بالایی برای جذب شدن توسط بستر دارد. بنابراین هندسه نیمرسانا برای خروج نور از این LEDها اهمیت دارد.

Si های روی بسترLED ۲-۲-۳

طمع دستیابی به منابع نوری ارزان قیمت تلاشهای بسیاری برای رشد LEDها روی بستر Si در بر داشتهاست Si .[۱۰۶–۱۰۶]. Si تحت شرایط دمایی رشد LEDهای نیتروژندار پایدار است. ویفرهای Si با کیفیت کریستالی بالا و سطح نهایی صاف در اندازههای بزرگ و قیمتهای ارزان در دسترساند. استفاده از بستر Si حذف بستر با wet-etch را ساده کرده و امکان مجتمع کردن LEDها با مدارهای الکترونیکی کنترلی Si را فراهم میکند. LEDهای آبی و UV را بر پایه نیمرساناهای نیتروژندار با روش MOCVD[۱۰۲-۱۰۴] و MBE ا۱۰۱و ۱۰۲ روی بستر Si رشد دادهاند. استفاده از لایههای بافر AlN و AlGaN باعث کاهش نواقص شبکه و امکان تولید GaN دوبعدی و ممانعت از شکل گیری سیلیکون آمورف SiN_x میشود[۱۰۸]. با استفاده از لایه بافر AlN با کیفیت بالا، امکان تولید LEDهای آبی روی ویفرهای Si با ابعاد شش اینچ فراهم شدهاست[۱۰۶]. رشد LEDها روی Si همانند رشد SiC با شکلگیری تماس نوع n در پشت بستر جهت بهبودی پخش یکنواخت جریان صورت می گیرد. بازده LEDهای روی بستر Si حدود ده برابر کمتر از LEDهای روی بستر یاقوت یا SiC هستند. بیشترین کارایی گزارش شده هنوز زیر میلیوات (در ۲۰mA) با بازده کوانتومی خارجی کمتر از ٪۱ میباشد[۱۰۳]. کارایی LEDهای روی بستر Si با دو عامل محدود میشود. یکی جذب بالای نور مرئی و UV توسط Si و دیگری چگالی بالای نواقص شبکه ناشی از عدم تطابق بالای ثابت شبکه و ضریب انبساط گرمایی Si و نیترایدها. برای حذف کردن جذب توسط Si از یک آینه براگ AlGaN/GaN بین بستر و ساختار LED استفاده می شود [۱۰۴]. این آینه ولتاژ عملکرد و در نتیجه احتمال شکستگی را بالا میبرد. راه دیگر حذف بستر Si و انتقال LED روی بستر شفاف یا بازتابنده یا روی بستر با رسانندگی خوب گرمایی است . Si با تکنیک Chemical wet etching قابل حذف است. Zhang و همکارانش LED [۱۰۵] LED را از Si را از Si جدا کرده و روی یک بستر مس انتقال دادند. ویفر LED را با یک بازتابنده فلزی Al/Au نشانده شده روی تماس p با استفاده از ایندیم روی یک حامل مسی با Au آبکاری-شده مقید کردند. بستر Si را تا ۶۰µm نازک کرده و در محلول(۱:۱:۱) etch HF:HNO3:CH3OOH قرار دادند. لايه بافر AIN/AIGaN را plasma etch كرده و الكترود نوع n كه متشكل از تماس نيمه شفاف ۵ nm/۵nm)Ti/Au) بود روی لایه GaN گذاشتند مشخصههای I-V و L-I این LED را قبل و بعد از این فرایند نشان میدهد. مقاومت از Ω ۴۲ به ۲۷ Ω کاهش یافته بود و توان ایتیکی ٪۴۹ افزایش داشت(شکل ۳– ۷).



از انتقال از بستر Si به بستر مس

GaN های روی بستر LED ۳-۳-۳

LEDها روی بسترهای غیر همنوع بدلیل عدم تطابق شبکه یا اختلاف ضریب انبساط گرمایی دارای دررفتگیهای ریسمانی بسیار و تنشهای دومحوری در لایهها هستند. اگر GaN با کیفیت رشد بالا در دسترس قرار گیرد، این مشکلات بطور قابل ملاحظهای برطرف خواهد شد. همچنین دیگر نیازی به لایه بافر نیست. همچنین رسانش گرمایی بالای GaN(۵ برابر یاقوت) و رسانندگی آن امکان عملکرد LEDها در چگالیهای جریان بالا و دمای بالا را میدهد.

انفعال (passivity) نیتروژن و دمای ذوب بالا و فشار تجزیه بالای GaN رشد GaN با کیفیت بالا و ابعاد بزرگ را با مشکل روبرو کردهاست. روشهای رشد از محلول که گالیم مایع یا آلیاژهای گالیم را بعنوان حلال و گاز نیتروژن پرفشار که از بالا روی سطح رشد دمیده میشود، تا GaN را در فاز ترمودینامیکی پایدار نگه دارد امروزه برای رشد GaN استفاده میشود [۱۰۹].

یکی از بهترین روشهای رشد از محلول در فشار بالا(High-Pressure Solution Growth) که توسط Porowski و همکارانش ارائه شد. در این روش بلورهای GaN از گالیم مذاب تحت فشار هیدرواستاتیکی ۱۵Kbar هیدروژن در دماهای ۱۵۰۰K تا ۱۸۰۰K به شکل plateles یا میله رشد داده میشوند که چگالی دررفتگی کمتر از ²⁻۱۰^۹ دارند. اعتقاد بر اینست که این نواقص مربوط به ناخالصیهای اکسیژن و تهیجاهای نیتروژن میباشند و باعث کدری بلور میشوند. اندازه ماکزیمم GaN با کیفیت حدود Mom است. یک روش کارآمدتر برای رشد GaN کپهای (HCPE). در این روش CaC با فاز بخار(که با واکنش HCl با با دیواره داغ در فشار اتمسفر صورت میگیرد[۱۰و۲۲]. در این روش GaCl با فاز بخار(که با واکنش HCl با گالیم مایع در ۸۰۰ تا "GaAs شکل می گیرد) بر روی بستر از قبیل یاقوت، SiC یا GaAs انتقال می یابد و با NH₃ تزریقی در "P۰۰C تا "Soro تا Compandent برای شکل گیری GaA واکنش انجام می دهد. در مقایسه با دیگر روش های رشد بر آراستی نرخ رشد سریعتر(از مرتبه Thumh⁻¹) به روش HVPE امکان پذیر است[III]. در نتیجه این روش، روشی ارزان قیمت برای رشد مقادیر زیاد GaA کپهای می باشد. سپس Lapping پولیش کردن، etch کردن برای بدست آوردن ویفرهای GaN استفاده می شود. چگالی دررفتگی در فیلمهای Mag رشد داده شده با HVPE همانند ساختارهای ناهمگون GaA بالا(در حدود ²⁻¹⁰ ۱۰۰) می باشد. با افزایش ضخامت لایه و بازیخت آن چگالی دررفتگیها تا ²⁻¹⁰ ستاده می باشد. البته تنش بالا و درنتیجه خمش و شکست بازیخت آن چگالی دررفتگیها تا ²⁻¹⁰ می کاهش می باشد. البته تنش بالا و درنتیجه خمش و شکست که در اثر استفاده از بستر ناهمگون بوجود آمده ضخامت ماکزیمم GaA را محدود می کند. البته رشد همگون(train می وی از مستر مستقیماً تا دمای رشد در محیط غنی از آمونیاک حرارت داده می شود. رشد لایههای دوبعدی روی GaA بدون لایه بافر امکان-پذیر است.

شکل ۳–۸ منحنیهای پراش اشعه ایکس با دقت بالا(XRD) از بازتاب یک بستر GaN رشد دادهشده با HVPE و لایههای GaN رشد دادهشده روی آن و روی بستر یاقوت را نشان میدهد.



شکل ۳–۸- منحنیهای پراش اشعه ایکس با دقت بالا(XRD) از بازتاب یک بستر GaN رشد دادهشده با HVPE و لایههای GaN رشد دادهشده روی آن و روی بستر یاقوت

FWHM برای GaN همگون V۹arcsec میباشد که قابل قیاس با بستر GaN (مarcsec) و بسیار کمتر از GaN روی Sapphire با ساختار ناهمگون (۲۳۰ arcsec) میباشد. از آنجا که FWHM پیک (۲۰۰۰) درجه اعوجاج شبکه ناشی از نواقص شبکه را میرساند از اینرو FWHM کوچکتر نشان دهنده پایین تر بودن چگالی نواقص ریسمانی در GaN همگون میباشد. ناخالصیهای O, H, C نیز در GaN همگون کمتر میباشد[۱۱۳]. رشد LEDهای III-نیتراید روی بسترهای GaN کپهای هنوز حاوی تنش ناشی از عدم تطابق ثابت شبکه میباشد.

T-۳-۳ مقایسه دو LED رشد داده شده روی بسترهای GaN و GaN

در زیر دو نمونه LED یکی رشد داده شده بر روی بستر sapphire و دیگری رشد داده شده بر روی بستر GaN با یکدیگر مقایسه میشوند. LEDها از ده دوره چاه کوانتمی InGaN/GaN با تغییر درصد In از ۱۰٪ تا ۲۱٪ تشکیل شدهاند. مقایسه تصویر AFM آندو (شکل ۳–۹) حاکی از حضور کمتر نواقص شبکه در LED روی بستر GaN با ناهمواری سطحی کمتر میباشد. در مقایسه با LED روی بستر یاقوت، LED های روی بستر GaN با اتصال نوع n از پشت بستر ساختار عمودی دارند.



شکل ۳-۹- تصویر LED (a AFM رشد داده شده بر روی بستر GaN و b) LED رشد داده شده بر روی بستر sapphire حاکی از حضور کمتر نواقص شبکه در LED روی بستر GaN با ناهمواری سطحی کمتر میباشد.

شکل ۳–۱۰ مشخصههای جریان مستقیم I-۷ دو LED را در دماهای مختلف نشان میدهد . LED روی بستر sapphire در بایاس مستقیم رفتار تونل زنی نشان میدهد. با افزایش دما پدیده تونل زنی در جهت مستقیم افزایش مییابد، اما در نمونه a در ولتاژهای پایین ، جریانهای فعال شده با گرما حضور دارند. با افزایش بیشتر ولتاژ، جریانهای پخش و بازترکیب شروع به غلبه بر مولفه تونل زنی میکنند.



شکل ۳-۱۰- مشخصههای جریان مستقیم LED (a I-V روی بستر Sappire و LED (b) روی بستر GaN و Gave

تونل زنی حاملها هنوز در LED روی بستر Sapphire با بایاس معکوس دیده می شود (شکل ۳–۱۱). اما در LEDهای روی بستر GaN کاهش قابل ملاحظهای در حدود شش برابر کمتر در بایاس معکوس را نشان میدهد. جریان نشت باقیمانده، تابعی از دما و بایاس بکار رفته است که حضور همزمان جریانهای تونل زنی و تولید شده با دما را نشان میدهد.



شکل۳–۱۱– تونل زنی حاملها هنوز در LED(a روی بستر Sapphire با بایاس معکوس دیده می شود

شکل ۳-۱۲ طیف EL برای LED های روی بستر GaN و Sapphire را در جریانهای تزریقی مختلف نشان میدهد .



شکل ۳-۱۲- طیف EL برای LED های روی بستر Sapphire (a و d) GaN (b در جریانهای تزریقی مختلف

حضور حلقه های تداخل فابری پرو از مشخصههای LEDهای روی Sapphire اند در حالیکه برای LEDهای روی بستر GaN حضور ندارند. طول موج پیک در LED روی ۴۰۵/۵ nm GaN است در حالیکه برای LED های روی GaN میتر GaN منازم در دمای رشد می باشد. های روی sapphire میفت آبی با افزایش جریان را ندارند. در جریانهای بالا (بیشتر از Ann ۲۰۰۳) طول موج پیک LED های روی میچ کدام شیفت آبی با افزایش جریان را ندارند. در جریانهای بالا (بیشتر از ۲۰۰ mA) در است (LED های روی معیچ کدام شیفت آبی با افزایش جریان را ندارند. در جریانهای بالا (بیشتر از Gan از ۲۰۰ mA) مول موج پیک LED موی یافوت یک شیفت آبی با افزایش جریان را ندارند. در جریانهای بالا (بیشتر از Gan موج) مول موج پیک LED موی یوی LED موج پیک LED موی یافوت یک شیفت آبی با افزایش جریان را ندارند. در جاههای کوانتومی می باشد. شکل (۱۶ ma) در Da موی روی است (Gan بستر Gan باز نوسانات کمتر ضخامت یا ترکیب در چاههای کوانتومی می باشد. شکل – ۱۰ خصوصیات LED در LED مول موج پیوسته را نشان می دهد. نور خروجی از LED LED دا LED موی با افزایش جریان افزایش می باید. در حالیکه در Da موی بستر افزایش جریان افزایش می باید. در حالیکه در Da موی بستر افزایش جریان افزایش می باید. در حالیکه در Da مول موج پیوسته را نشان می دهد. نور خروجی از افزایش فوق خطی دارد. ضریب جذب GaN در طول موج ۴۰۵ موی بستر افزایش کونوت در جریان های پائین افزایش فوق خطی دارد. ضریب جذب GaN در طول موج ۴۰۵ موی بستر افزایش کونو خاص داد. ضریب جذب GaN در طول موج ۴۰۵ می موی ۴۰۵ می دادازه گرفته شده در افزایش فوق خطی دارد. ضریب جذب GaN در طول موج ۴۰۵ مول موج ۴۰۵ مود ۲۰۰۰ مول مود ۴۰۵ مول مول ۴۰۵ مول مول مول ۴۰۵ مول مود ۴۰۵ مول مول ۴۰۵ مول مول ۴۰۵ مول مول ۴۰۵ مول ۴۰۰ مول ۴۰۵ مول حالیکه sapphire شفاف است. جذب در زیر گاف نواری GaN بدلیل حضور ناخالصی در حین رشد میباشد. بدلیل ضریب شکست بالای GaN (۲/۵ – ۵) مخروط نور خروجی از LED همانند LED های روی بستر SiC بسیار کوچک هستند در نتیجه درصد قابل ملاحظهای از نور توسط بستر گیر افتاده و جذب میشود. بازده خروج نور از رسانا به هوا به ترتیب برای LEDهای روی بستر GaN و روی بستر sapphire ٪۸/۲ و ٪۱۱/۵ میباشد.



شکل۳-۱۳- a)خصوصیات L−I و b)بازدهی کوانتمی داخلی LED های نزدیک UV در حالت تزریق با طول موج پیوسته

شکل-14-ب بازده کوانتمی داخلی LED ها را بصورت تابعی از جریان تزریقی نشان میدهد. در جریان های پائین η_i به سرعت با افزایش جریان بدلیل افزایش بازترکیب تابشی افزایش مییابد و به مقدار ماکزیم خود ٪ ۳۳/۷ برای LEDهای روی بستر GaN و ٪ ۱۶/۸ برای LED های روی بستر Sapphire در محدوده جریان تزریقی ۲۰ تا ۵۰ mA میرسد. با افزایش جریان، η_i بدلیل پرشدن ترازهای انرژی کم میشود که نرخ این کاهش برای LEDهای روی بستر GaN کمتر است.


شکل۳-۱۴-الف) خصوصیات L-I دو LED ب) بازده کوانتمی داخلی LED ها بصورت تابعی از جریان تزریقی

شکل۳–۱۴-الف خصوصیات I – L دو LED را نشان میدهد. در جریانهای بالاتر (بیشتر از A۰m۵) بدلیل رسانش گرمایی بیشتر GaN ، کارایی LEDهای روی بستر GaN بیشتر است. در جریانهای پائین نرخ افزایش بازدهی برای LEDهای روی بستر GaN کمتر است. زیرا حالتهای بازترکیب غیرتابشی در آن بدلیل ناهمگنی بیشتر حضور بیشتری دارند. LEDهای UV با پیک طول موج کوتاهتر از ۳۶۵nm علیرغم جذب بالای نور توسط بستر GaN، روی GaN کپهای بازدهی بالایی دارند. شکل ۳–۱۵ مقایسه TRPL برای چاههای کوانتمی AlGaN در پالس ورودی TV۵nm با دو نوع بستر متفاوت را نشان میدهد. چاههای کوانتمی روی GaN طول عمر بیشتری (حدود ۵۰۰ps) دارند. این امر کیفیت بهتر ساختار LED های روی بستر GaN را با کاهش دوبرابری چگالی نواقص شبکه می ساند.



شکل۳–۱۵– مقایسه TRPL برای چاههای کوانتمی AlGaN در پالس ورودی ۲۷۵nm با دو نوع بستر متفاوت

۴-۳ مقایسه بازدهی LEDهای با رشد جانبی و عمودی

برای رقابت با لامپهای فلوئورست و دیگر منابع نوری پربازده کاهش هزینه و افزایش بازدهی LED حائز اهمیت میباشد. یک راه استفاده از LED ها در جریانهای بالاتر است. LED های رشد داده شده روی بستر Sapphire در جریانهای بالا بازدهی مناسبی ندارند زیرا نواقص شبکه در آنها زیاد است. در جریانهای بالا مقاومت الکتریکی بالای Sapphire مشکل ساز میشود همچنین رسانندگی گرمایی Sapphire جریان و دمای عملکرد این LED ها را محدود می کند. برای امتحان تأثیر هندسه قطعه روی بازدهی در جریانهای بالا می در وی را در جریانهای الا مقاومت الکتریکی بالای Sapphire مشکل ساز میشود همچنین رسانندگی گرمایی TeD جریانهای بالا مقاومت الکتریکی بالای در جریانهای میناد میشود همچنین میناند می میاند. در جریانهای بالا مقاومت الکتریکی بالای Sapphire می کند. برای امتحان تأثیر هندسه قطعه روی بازدهی در جریانهای بالا در می دو روش رشد عمودی و جانبی با هم مقایسه میشوند. اندازه مساحت قطعات m سر Cet سا



شکل۳-۱۶- نمایی از LED با اتصال عمودی(راست) و اتصال جانبی(چپ)

LED عمودی بیست درصد مساحت گسیل نور بیشتری دارد. ازدحام جریان در محل اتصال سیم زیاد است که در دماهای بالا شدید می شود. LED عمودی یک ساختار متقارن مشابه LEDهای AlInGaP روی بستر رسانای GaAs دارند. شکل ۳–۱۷ خصوصیات V – این دو را نشان می دهد.



شكل ۳-۱۷- خصوصيات I – V دو LED روى GaN و Sapphire

مقاومت سری به ترتیب ۷ و ۱۲/۲ و ۱۴ اهم برای LED های عمودی روی GaN ، جانبی روی GaN و جانبی روی Sapphire میباشد. برای LED جانبی پخش جریان ضعیف تر از نمونه عمودی است. بنابراین LEDهای عمودی بازده تبدیل توان بیشتری دارد. توان خروجی LED ها بصورت تابعی از جریان تزریقی در شکل ۳-۱۸ آورده شده است.



شكل ۳-۱۸- توان خروجي LED ها بصورت تابعي از جريان تزريقي

مشاهده می شود که LED روی بستر Sapphire در جریانهای بالا افت شدید گسیل نور دارد ولی LEDهای روی بستر GaN با اتصالات عمودی، شدت نور گسیلی آن در حال افزایش است. پیک توان خروجی LED های روی بستر GaN با اتصالات عمودی، شدت نور گسیلی آن در حال افزایش است. پیک توان خروجی LED های روی بستر GaN و Sapphire و FormA قرار دارد. دلیل این امر اثرات افزایش دما و ازدحام جریان می باشد که در LED های روی بستر Sapphire به دلیل ضعف رسانش گرمایی Sapphire بیشتر است. در حالیکه توان خروجی LED های روی بستر GaN و GaN با اتصالات جانبی به ترتیب در جریانهای ۲۰۰mA و FormA قرار دارد. در سانش گرمایی Sapphire بیشتر است. در حالیکه توان خروجی LED های روی بستر GaN با اتصالات رسانش گرمایی Sapphire بیشتر است. در حالیکه توان خروجی GAD مای روی بستر GaN با اتصالات معودی با افزایش جریان ورودی افزایش می باید که در جریان AO مای حدود دو برابر GaD های روی بستر GaN با تصالات معودی با افزایش جریان ورودی افزایش می باید که در جریان AO مای حدود دو برابر GAD های روی بستر GaN با تصالات معودی با فزایش جریان ورودی افزایش می باید که در جریان AO می می حدود دو برابر GaD مای روی بستر GaN با تصالات معودی با افزایش جریان ورودی افزایش می باید که در جریان AO مای حدود دو برابر GaD مای روی بستر GaN می می باید که در جریان MO مای حدود دو برابر GaD مای روی بستر GaN می باید که در جریان AO می می می باید. این نتایج نیاز حیاتی به GaN و حدود ۸۵ برابر GaD های روی بستر GaD مای با توان بالا را می ساند.

طول عمر LEDها (reliabitity) در جریانهای بالا با قرار دادن LED ها در جریان ۴۰۰mA (که حدود بیست برابر مقدار استاندارد LED های آبی تجاری امروزی است) تحت آزمایش قرار گرفتهاند. در شکل ۳–۱۹ تغییر شدت نور خروجی بصورت تابعی از زمان نشان داده شده است. LEDهای روی بستر GaN با اتصال عمودی هیچ تغییری را در شدت نور خروجی نشان نمیدهد. در حالیکه شدت نور گسیلی از LEDهای روی بستر Sapphire بعد از حدود هفت ساعت بدلیل خرابی تماس نوع q در دمای بالا صفر می شود. در رفتگیهای ریسمانی در GaN و آلیاژهای آن موبیلیتی کمتری نسبت به دیگر نیمرساناهای گروه V-III دارند.



شکل۳-۱۹- تغییر شدت نور خروجی بصورت تابعی از زمان برای LEDهای جانبی و عمودی

۵-۳ رشد LEDها بر روی دیگر بسترهای جدید

می توان بسترهای مناسب دیگری برای لایه نشانی LED های III-نیتراید را به دو گروه تقسیم کرد : آنهایی که تطابق ثابت شبکه بهتری با III-نیترایدها دارند و آنهایی که ساختارهای LED غیرقطبی تولید می کنند. AIN همانند GaN کپهای یک بستر مناسب برای لایه نشانی III-نیترایدها است. AIN قدرت مکانیکی و پایداری دمایی خوبی دارد و تطابق بسیار خوبی با ثابت شبکه AIGaN با AI بالا دارد. این خصوصیات در کنار شفافیت در برابر نور VU و رسانش گرمایی بالا (⁻⁻*K*⁻¹*Wm*⁻¹*M*) آنرا برای رشد LED های VU عمیق مطلوب می سازد. (UD و رسانش گرمایی بالا (⁻⁻*K*⁻¹*Wm*⁻¹*M*) آنرا برای رشد LED ساخته می شوند) بلورهای آلومینیم ذاتی (UC و رسانش گرمایی بالا (⁻⁻*K*⁻¹*M*) آنرا برای رشد LED اینچ و چگالی نواقص کمتر از ²⁻*m*⁻¹*O* را در برداشتهاند [AI و و در این گرمایی بالاتر اسانایی ش، با اتصالات جانبی ماخته می شوند) بلورهای آلومینیم ذاتی (native) هنوز موجود نیستند. تلاشهای اخیر بلور AIN با قطر ۱ اینچ و چگالی نواقص کمتر از ²⁻*m*⁻¹*O* را در برداشتهاند [AI و ۲۱۶] . در مقایسه با LED ها روی Sapphire اینچ و چگالی نواقص کمتر از ²⁻*m*⁻¹*O* را در برداشتهاند [AI و ۲۱۶] . در مقایسه با LED ها روی Sapphire اینچ و چگالی نواقص کمتر از ²⁻*mm* (ا در برداشتهاند (۲۰۱۵ و ۲۰۱۶) . در مقایسه با LED ما روی Sapphire می بعنوان بستر برای LED مان را در برداشته گرمایی بالاتر AIN دارند. بلورهای دیگری که بعنوان بستر برای AI جریان اشباع بالاتری بخاطر رسانش گرمایی بالاتر AIN دارند. بلورهای دیگری که اینیترایدها دارند. یک عیب بزرگ این بسترها پایداری دماین می مایی شبکه آنها تقریباً تطابق خوبی با III-نیترایدها دارند. یک عیب بزرگ این بسترها پایداری دمایی ضعیف آنها تحت شرایط رشد III-نیترایدهاست تیترایدها دارند. یک عیب بزرگ این بسترها پایداری دمایی ضعیف آنها تحت شرایط رشد که جهت مناسبی ایترایدها دارند. استرها مواد III-نیتراید ورتسایت صفحه C (۲۰۰۰) تولید می کنند که جهت مناسبی برای رشد است. در ساختارهای LED با صفحه C یک قطبش دائمی و پیزوالکتریک قوی در راستای محور C وجود دارد که میدان الکتریکی ناشی از این قطبش ها باعث جدایی الکترون و حفره از یکدیگر و کاهش بازدهی بازترکیب تابشی و شیفت قرمز پیک می شود. بدین منظور برای حذف قطبش سعی بر آن است تا ساختار LED با جهت غیرقطبی از قبیل صفحه $a (n\overline{12}n)$ و صفحه $m (0\overline{10})$ و یا صفحات نیمه قطبشی ($n\overline{12}n$) و $(n\overline{10})$ و یا صفحات نیمه قطبشی ($n\overline{12}n$) و $(n\overline{10})$ و یا صفحات نیمه قطبشی ($n\overline{12}n$) و $(n\overline{10})$ و یا صفحات نیمه قطبشی ($n\overline{12}n$) و $(n\overline{10})$ و یا صفحات نیمه قطبشی ($n\overline{12}n$) و $(n\overline{10})$ ($n\overline{10}$) و $(n\overline{10})$ و یا صفحات نیمه قطبشی ($n\overline{12}n$) و $(n\overline{10})$ ($n\overline{10}$) و $(n\overline{10})$ و یا صفحات نیمه قطبشی ($n\overline{10}$) و $(n\overline{10})$ و $(n\overline{10})$ و یا صفحات نیمه قطبشی ($n\overline{10}$) و $(n\overline{10})$ ($n\overline{10}$) و $(n\overline{10})$ ($n\overline{10}$) و $(n\overline{10})$ ($n\overline{10}$) ($n\overline{10}$

فصل چهارم

معرفی متریک CRI و بازده LEDها و انتخاب دو LED مناسب برای تولید نور سفید پربازده

۲-۴ مختصات رنگی CIE

۲-۴ تولید پربازده ترین نور سفید حاصل از دو منبع با طول موج و شدت متفاوت

۴-۳ بازده کوانتمی LEDها

۴-۴ بازدهی کل و مکانیزمهای کاهش دهنده آن

همانطور که در فصل یک اشاره شد با ترکیب نور دو یا چند LED میتوان نور سفید تولید کرد. برای دستیابی به نور مرئی با رنگ دلخواه و بازدهی و کیفیت بالا نیاز به مطالعه پاسخ چشم انسان به طول موجهای مختلف میباشد. در این راستا مطالعه فتومتریک نور با متریکهای تجربی اجتناب ناپذیر میگردد. در این فصل به معرفی معروفترین و پرکاربردترین متریک یعنی متریک IED و انتخاب مناسب شدت و طول موج دو منبع نور (LED) در جهت افزایش بازدهی نور نهایی پرداخته میشود و در انتها عوامل موثر در بازدهی کل بررسی میشوند.

۴-۱ مختصات رنگی CIE



شکل۴-۱- توابع رنگ xyz چشم انسان بین ۳۸۰ و ۷۸۰ نانومتر طبق استاندارد CIE ۱۹۳۱

سه مقدار X,Y,Z (tri-stimulus values) X,Y,Z (دار کی است مقدار X,Y,Z (دار کی الاز کی الاند نور سفید خواهد الاز در الاز قبیل شار روشنایی CIE می سال ۱۹۳۱ با مختصات (x,y) نمایش داده می شود. مختصات رنگی ابود. هر رنگ نور روی شکل هندسی CIE سال ۱۹۳۱ با مختصات (x,y) نمایش داده می شود. مختصات رنگی

$$y=Y/(X+Y+Z) = X/(X+Y+Z)$$
 (2-5)

محاسبه میشوند شکل ۴–۲ شکل هندسی رسم دو بعدی از تمام مقادیر ممکن رنگ(hue) و اشباع (saturation) میباشد. نقاط روی محیط شکل CIE) (saturation) برای یک منبع نور مستقل از روشنایی (luminsance) میباشد. نقاط روی محیط شکل CIE مکان هندسی مختصات رنگی رنگهای طیف (یعنی نور تکفام) میباشد. منحنی سیاه درون شکل CIE مختصات رنگی نور گسیلی از یک جسم سیاه در دماهای از ۲۰۰۸ تا بینهایت را نشان میدهدکه مکان هندسی پلانک (one میبای از یک جسم سیاه در دماهای از یک منبع نور سفی یا ایی میبایت را نشان میدهدکه مکان مختصات رنگی نور گسیلی از یک جسم سیاه در دماهای از ۲۰۰۸ تا بینهایت را نشان میدهدکه مکان مختصات رنگی نور گسیلی از یک جسم سیاه در دماهای از ۲۰۰۸ تا بینهایت را نشان میدهدکه مکان مختصات رنگی نور گسیلی از یک جسم سیاه در دماهای از یک منبع نور سفید است. نقاط روی این مندسی پلانک (color temperature) نام دارد و نمایش متداولی از یک منبع نور سفید است. نقاط روی این منخنی را میتوان با دمای جسم سیاه توصیف کرد که دمای رنگ (color temperature) نامیده میشود. به این ترتیب تنها با یک عدد میتوان رنگ را تعیین کرد. یک منبع غیر جسم سیاه اغلب با CCT (one concelated) این ترتیب تنها با یک عدد میتوان رنگ را تعیین کرد. یک منبع غیر جسم سیاه اغلب با CCT (one concelated) این ترتیب تنها با یک عدد میتوان رنگ را تعیین کرد. یک منبع غیر جسم سیاه اغلب با CCT (one concelated) این ترتیب تنها با یک عدد میتوان رنگ را تعیین کرد. یک منبع غیر جسم سیاه اغلب با CCT (one concelated) این ترتیب تنها با یک عده میتوان رنگ را تعیین کرد. یک منبع غیر جسم سیاه اغلب با CCT (one concelated) این ترتیب تنها با یک عده میتوان رنگ را تعیین کرد. یک منبع خیر جسم سیاه اغلب با CCT (one concelated) این ترتیب تنها با یک عده میتوان رنگ (one concelated) در تعیین کرد. یک منبع خیر حسم سیاه اغلب با CCT (one concelated) در ترک (one

color temperature) دمای رنگ همبسته توصیف می شود که دمای تابش کننده جسم سیاهی است که نزدیکترین رنگ را با منبع روشنایی یکسان دارد. خطوط وابسته به یک CCT نقاط پلانک را همانطور که در شکل می بینید قطع می کند.



شکل۴–۲– شکل هندسی CIE سال ۱۹۳۱

کلمات "سفید گرم" و "سفید سرد " اغلب در مباحث روشنایی استفاده می شوند، "سفید گرم" مشابه نور گسیلی از یک لامپ حرارتی است و تا حدی قرمز یا زرد می باشد در حالیکه نور "سفید سرد" سفیدی بیشتری (حتی آبی) دارد. جالب اینکه "سفید گرم" دمای رنگ وابسته کمتری (در حدود ۲۷۰۰K) نسبت به "سفید سرد" (با CCT در حدود ۴۱۰۰K) دارد. نور تولید شده با ترکیب نور دو منبع با مختصات CID متفاوت روی خط واصل مابین این دو مختصات قرار خواهد گرفت که مکان آن میانگین روشنایی هر یک از دو منبع است. بطور مشابه مختصات CID نور مرکب از سه منبع نور با مختصات CID متفاوت، درون مثلث تشکیل شده از مختصات CIE این سه منبع می باشد. تنها با استفاده از این سه منبع نور نمی توان نوری با مختصات CID خارج از این مثلث تولید کرد. زیر مجموعه کاملی از تمام رنگهایی که توسط n منبع نوری تولید می شود می شود نامیده می شود. تعریف luminous efficiency بستگی به ۱) تشعشع (radiation) یا ۲) یا منبع گسیل تشعشع دارد. یکای هردو lm/W میباشد. در مورد اول وات به مقدار توان شعاعی تشعشع و در دومی به مقدار توان الکتریکی ورودی منبع تشعشع مربوط می شود. مورد دوم مستقیماً به قابلیت توان تبدیل الکتریکی ورودی به نور خروجی اشاره می کند.

در رابطه با اهداف روشنایی و بازدهی مورد دوم مد نظر است. LER اندازه توان شعاعی است که توسط چشم بر حسب لومینسانس مشاهده میشود. LER با حساسیت چشم به طول موجهای مختلف نور (تابع روشنایی فوتوپیک، (\Box)() و توزیع توان طیفی ((λ) یا CP() یا SPD) تشعشع تعیین میشود. برای نور تکفام با طول موج λ ، LER و توزیع توان طیفی ((λ) یا (λ) یا LER) تشعشع تعیین میشود. برای نور تکفام با طول موج (∇) به شار دوشنایی (III) در طول موج خاص (۵۵۵۸۱) با ۱=(λ) میباشد. این عامل تبدیل توان شعاعی (Ψ) به شار روشنایی (III) در طول موج خاص (۵۵۵۸۱) با ۱=(λ) میباشد. این عامل برابر با ۳/۲۰۰۳ است. بنابراین ماکزیمم LER ممکن برای نور تکفام در ۵۵۵۸۲ (سبز)، در پیک پاسخگویی چشم بنابراین ماکزیمم LER میباشد. برای تابش با توزیعی از طول موجها، Krad با انتگرالگیری حاصلضرب SPD تشعشع (همان (λ)) و تابع بازدهی روشنایی فوتوپیک (λ) روی تمام طول موجها با نرمالیزه کردن بوسیله کل توان شعاعی محاسبه میشود:

$$K_{rad} = K_m \frac{\int P(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int P(\lambda)d\lambda}$$
(3-5)

Luminous efficacy منبع، اندازه مقدار توان شعاعی گسیلی توسط یک منبع متوسط چشم مشاهده می شود بعنوان شار روشنایی تقسیم بر توان الکتریکی ورودی منبع () و نرمالیزه شده با ثابت Km (مشابه فوق) می-باشد. بنابراین Luminous efficacy منبع از طریق یک LED یا OLED توسط رابطه زیر داده می شود:

$$K = K_m \frac{\int P(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{W_{in}}$$
(4-5)

با توجه به رابطه فوق دیده میشود که Luminous efficacy یک منبع LER ،K ضرب در بازدهی wall-plug (WPE) میباشد.

$$WPE = \frac{\int P(\lambda) d\lambda}{W_{in}}$$
(5-5)

شاخص Color Rendering (CRI) متریکی برای کیفیت رنگ میباشد. رنگهای اجسام مرجع مشخص وقتی با یک منبع نور آزمایشی دیده می شوند، در مقایسه با رنگهای مشاهده شده تحت تابش یک منبع نور مرجع با دمای رنگ همبسته، اگر هیچ اختلافی بین رنگهای مشاهدهشده طیف با تابانیدن منبع نور مرجع و منبع نور آزمایشی وجود نداشت، منبع آزمایشی ۲۰۰ CRI خواهد داشت. نور یک لامپ نور گسیل حرارتی، استاندارد CRI نزدیک ۱۰۰ دارد. CRI از SPD منبع نورگسیل آزمایشی محاسبه می شود. برای تعیین CRI منابع نور گسیل واقعی، ابتدا باید SPD اندازه گیری شود. امروزه مدل های ریاضی مختلف برای تجزیه و تحلیل SPD LEDهای سفید موجود است[۱۱۸]. اخیراً بحثهایی راجع به کافی بودن مقیاس CRI کنونی وجود دارد. مقیاس CRI کنونی بر مبنای یک فضای رنگ مطلق (فضای رنگ W.U.V سال ۱۹۶۴) میباشد که دیگر برای استفاده توصیه نمی شود. همچنین بر پایه هشت نمونه مرجع با اشباع (saturation) پایین و متوسط بنا نهاده شده است. از یک طرف این امر باعث می شود LEDهای قرمز، سبز، آبی (RGB) به سمت دستیابی با کنتر است (contrast) بالا می روند که خصوصیت ارجحی بویژه برای روشنایی حالت جامد می باشد اما با سیستم CRI تحت تنبیه قرار گرفته است(ohono). برای حل این مشکلات متریکهای جدیدی پیشنهاد شدهاند(برای مثال Davis و Ohno ۲۰۰۵ Croa از آنجا که کیفیت رنگ برای روشنایی حالت جامد از اهمیت بالایی از نظر اقتصادی برخوردار است بنابراین برای حل مشکلات مطالعات و آزمایشات بیشتری نیاز است. اتحادیه CIE Color" "rendering of White LED Light Sources در حال برسی با مقیاس CRI و طرحی برای متریک جدید مىباشد.

۴-۲ تولید پربازده ترین نور سفید حاصل از دو منبع با طول موج و شدت متفاوت

با ترکیب دو رنگ با مختصات رنگی متفاوت رنگ جدیدی حاصل خواهد شد که مختصات رنگی آن روی خط واصل دو مختصات رنگی دو رنگ ابتدایی خواهد بود. همانطور که در شکل ۴–۳ نشان داده شده ترکیب دو نور با طول موجهای ۴۷۵nm و ۵۵۰ m نور جدیدی روی خط واصل آندو در مختصات رنگی است که مکان دقیق این رنگ با نسبت شدتهای دو نور ابتدایی تعیین میشود.



شکل ۴-۳- ترکیب دو نور مختلف با طول موجهای تکفام ۴۷۵ و ۵۵۰ نانومتر در مختصات رنگی

برای دستیابی به بالاترین بازدهی در ترکیب دو نور، انتخاب دو طول موج ابتدایی و نسبت شدتهای آندو بسیار حائز اهمیت میباشد. برای دستیابی به نور سفید استاندارد[۱۱۹] دو نور مکمل (شکل۴–۴) باید انتخاب شوند.



شکل ۴-۴- طول موجهای مکمل برای دستیابی به نور سفید [۱۲۰]

کارایی روشنایی توان روشنایی تقسیم بر توان الکتریکی ورودی به منبع نور میباشد

که I و V جریان ورودی و ولتاژ بکار رفته در منبع میباشد.

تابع روشنایی رنگ جدید با

$$Y_{c} = y_{1}^{*}P_{1} + y_{2}^{*}P_{2} = y_{1}^{*}P_{1} + y_{2}^{*}RP_{1} = (y_{1}^{*} + y_{2}^{*}R)P_{1}$$
(7-5)

InGaN/GaN برای دستیابی به نور سفید استاندارد [۱۲۰] با ترکیب دو LED ساخته شده با MQWs برای مثال برای دستیابی به نور سفید استاندارد $\lambda_7 > \lambda_1$ نسبت شدتهای دو LED در شکل ۴–۵ رسم شده است. برای نور سفید بصورت تابعی از λ_1 شکل ۴–۵ بدست خواهد آمد.



شکل ۴–۵- نسبت توان دو منبع نور تکفام ($\lambda_2 > \lambda_1$) برای تولید نور سفید

اگر Po توان الکتریکی ورودی باشد توان اپتیکی خروجی کل برابر است با :

$$P_{out} = P_2 + P_1 = (1+R)P_1 \tag{8-5}$$

بازدهی روشنایی کل برابر خواهد بود با

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_0} = \frac{P_1(1+R)}{P_1(1+R\frac{\lambda_2}{\lambda_1})} = \frac{(1+R)}{(1+R\frac{\lambda_2}{\lambda_1})}$$
(9-5)

Eficacyروشنایی(که بر حسب lum/W توان اپتیکی محاسبه می شود) با Y_c / P_{out} داده می شود و در نتیجه برای محاسبه کارایی روشنایی(که بر حسب lum/W توان الکتریکی محاسبه می شود) داریم:

$$\frac{Y_c}{P_0} = \frac{Y_c}{P_{out} / \eta} = \frac{Y_c}{P_{out}}$$
(10-5)

با استفاده ازفرمول فوق کارایی روشنایی بصورت تابعی از λ_1 برای منابع تکرنگ ایدهآل محاسبه شد.(شکل۴– ۶)



شکل۴-۶- کارایی روشنایی بر حسب λ_1 (منبع با طول موج کوتاهتر)[۱۲۱]

بیشترین مقدار بازدهی روشنایی یا کارایی روشنایی هنگامی که طول موج LED اول ۴۴۰nm و LEDدوّم ۵۶۸nm باشد رخ میدهد. کارایی روشنایی برای این زوج LED، ۳۳۶۱m/W بدست آمده .اگر پهنای ۵nm برای هر دو طیف در نظر بگیریم کارایی روشنایی ۳۲۶۱m/W بدست خواهد آمد.

۲-۴ بازده کوانتمی LEDها

جدا ازطیف نورگسیلی، بازدهی و قابلیت اطمینان دو جنبه مهم در طراحی هر قطعه نورگسیل می-باشد. قطعات تجاری در دسترس InGaN برای بیش از ۱۰۰۰۰ ساعت طول عمر خواهند داشت. قطعات بر مبنای ZnO نیز در همین مقدار طول عمر ساخته خواهند شد. بنابراین قابلیت اطمینان نگرانی اصلی نیست. اما برای گسیلندههای نوری حالت جامد بازده نوری بالاتری برای رقابت با لامپهای فلوئورسنت نیاز است. لذا اندازه گیری بازده نوری، بخش مهمی از مطالعه قطعات نیمههادی نور گسیل میباشد.

بازده کوانتومی: بازده نوری یک قطعه نورگسیل از قبیل LED ها با نسبت توان خروجی(output power) به توان ورودی(iput power) تعریف میشود. تعریف کاربردی تر بازده کوانتومی خارجی (η) بصورت نرخ گسیل فوتون به نرخ تولید زوج الکترون- حفره(در PL) یا نرخ تزریق حاملها (در EL) تعریف میشود. اهمیت شناخت مکانیزم گسیل نور را با دو موضوع میتوان دریافت:

۱- اولین موضوع رسیدن به LED های با بازده بالاست . LED های تجاری در دسترس بازده کوانتمی خارجی (η_{ext}) بالاتر از ۱۰٪ دارند. مقدار (η_{ext}) یک LED آبی بر مبنای $In_xGa_{1-x}N$ تحت جریان MA بیشتر از (η_{ext}) بالاتر از ۲۰٪ دارند. مقدار ($\eta_{ext})$ یک LED آبی بر مبنای ۲۰۰K می تعده منوز در دمای اتاق محدود به حدود به حدود کارایی قطعه هنوز در دمای اتاق محدود به فرایندهای باز ترکیب غیر تابشی را از میان برداریم میتوانیم مقدار (η_{ext}) را بیش را ز (η_{ext}) را بیشتر از ۲۰۰K با افزایش دما سریعاً کاهش می یابد در نتیحه کارایی قطعه هنوز در دمای اتاق محدود به فرایندهای باز ترکیب غیر تابشی را از میان برداریم میتوانیم مقدار (η_{ext}) را بیش از (η_{ext}) را بیش از (η_{ext}) را بیش از (η_{ext}) را بیش از (η_{ext}) را بیش از سیار می ای باز ترکیب خانیزمهای بازترکیب تابشی وغیر تابشی بسیار مهم است .

۲- در رابطه با LDها هنوز نیازمند افزایش طول عمر و کاهش پهنای طیف ساختارهای چاه کوانتمی برمبنای InGaN میباشیم که این امر InGaN میباشیم. در زمینه LDها نیازمند تولید LDهای آبی و سبز بر مبنای InGaN میباشیم که این امر با شناخت دقیق مکانیزم گسیل نور میسر خواهد بود.

فرایند های باز ترکیب حاملها (الکترونها وحفره ها)که با تحریک فوتونی یا بایاس مستقیم ساختاری n-p رخ میدهند به دو دسته فرایند های تابشی و غیرتابشی تقسیم می شوند.

اگر نیمههادیها با پالس کوتاه تحریک شوند شدت نور گسیلی عموما[ً] با تابع زیر بصورت تابعی از زمان بعد از تحریک بیان می شود :

$$I(t) = I_0 \exp(-\frac{t}{\tau_L(T)})$$
(11-5)

که $au_L(T)$ زمان واپاشی لومینسانس در دمای داده شده T میباشد , معکوس $au_L(T)$ مجموع سه نوع مختلف از احتمال گذار است:

$$\frac{1}{\tau_L(T)} = \frac{1}{\tau_{rad}(T)} + \frac{1}{\tau_{non-rad}(T)} + \frac{1}{\tau_{trans}(T)}$$
(12-5)

که $au_{rad}(T)$ و $au_{ran-rad}(T)$ طول عمرهای تابشی وغیر تابشی هستند، $au_{rans}(T)$ زمان انتقال به ترازهای انرژی پایین تر است. اگر باز ترکیب تابشی در عمق ترازهای انرژی رخ دهد جمله مربوط به زمان انتقال حذف می شود.

بازده کوانتمی داخلی گسیل (
$$\eta_{
m int}(T)$$
 بصورت زیر داده می شود :

$$\eta_{\text{int}}(T) = \frac{\tau_{non-rad}(T)}{\tau_{rad}(T) + \tau_{non-rad}(T)}$$
(13-5)

اگر چه اندازه گیری مقدار ($\eta_{
m int}(T)$ از آزمایش عموما ً مشکل است ولی با داشتن آن می توان وابستگی دمایی au_L را تخمین زد. ($au_{
m non-rad}(T)$ با عبارت زیر بیان می شود:

$$\frac{1}{\tau_{non-rad}} = \upsilon_{th} \times \sigma \times N_t \tag{14-5}$$

NRC به ترتیب سرعت گرمایی، سطح مقطع مرکز باز ترکیب غیر تابشی (NRC) و چگالی NRC میباشند. اگر کیفیت بلور نسبتا ً خوب باشد (N_t کوچک) واندازه گیری در دمای به اندازه کافی پایین مورت گرفته باشد میتوان از فرایندهای باز ترکیب غیر تابشی صرفنظر کرد. در بعضی مواقع وابستگی دمایی مورت گرفته باشد میتوان از فرایندهای باز ترکیب غیر تابشی صرفنظر کرد. در بعضی مواقع وابستگی دمایی شدت لومینسانس (I(T) مشاهده می شود بطوریکه تا زمانی که $T < T_c$ است (T) ثابت است و سپس شدت لومینسانس (I(T) مشاهده می شود بطوریکه تا زمانی که $T < T_c$ است (T) ثابت است و سپس شدت لومینسانس (T) مشاهده می شود بطوریکه تا زمانی که $T < T_c$ است (T) ثابت است و سپس شدت لومینسانس (T) مشاهده می شود بطوریکه تا زمانی که $T < T_c$ است (T) ثابت است و سپس تمدت لومینسانس در این محدوده دمایی وابسته به طول واحد در دمای زیر T_c می باشد ، بنابراین زمان واپاشی لومینسانس در این محدوده دمایی وابسته به طول عمر تابشی و غیر تابشی است و بازده کوانتمی داخلی را می توان بشکل $\eta_{int}(T) = I(T)/I_c$ داد. طول عمر تابشی و غیر تابشی بصورت زیر داده می شوند[۱۲]

$$\tau_{rad}\left(T\right) = \tau_{L}(T) \times \frac{I_{C}}{I(T)}$$
(15-5)

$$\tau_{non-rad}\left(T\right) = \tau_{L}(T) \times \frac{I_{C}}{I_{C} - I(T)}$$
(16-5)

لایههای فعال بسیاری از قطعات اپتیکی از چاههای کوانتمی که ساختار دو بعدی (2D) دارند تشکیل شده است . تئوری هانامورا (Hanamura) (۱۹۸۸)در رابطه با طول عمر باز ترکیب تابشی اکسیتونهای دو بعدی پیشگویی میکند که طول عمر تابشی یک اکسیتون دو بعدی در حدود چند ps است اگر چه در بیشتر موارد انواع چاههای کوانتمی طول عمر تابشی از مرتبه چند صد پیکو ثانیه در دمای پایین دارند. این مربوط می شود به اثر جایگزیدگی اکسیتونی در مراکز ناخالصی یا نواقص شبکه یا مینیمم پتانسیل در چاه کوانتمی. این حالتهای جایگزیده می توانند بعنوان یک نقطه کوانتمی صفر بعدی در نظر گرفته شوند. با توجه به اصل عدم قطعیت هایزنبرگ چنین جایگزیدگی تابع موج اکسیتونها منجر به پهن شدگی تکانه مرکز جرم در فضای k می شود در نتیجه احتمال باز ترکیب اکسیتونها در مقایسه با حالتی که جایگزیدگی وجود ندارد کاهش می یابد زیرا تعداد اکسیتونهایی که قانون پایستگی تکانه با فوتون را ارضا کنند بسیار کم خواهد شد.

۴-۴ بازدهی کل و مکانیزمهای کاهش دهنده آن

سه مکانیزم اساسی در مورد کاهش بازده کوانتمی خارجی هنگام خروج نور گسیلی از قطعه عبارتند از :

الف- بازجذب نور گسیلی توسط تولید زوج الکترون- حفره در ناحیه فعال یا بستر.

برای رفع این مشکل عرض چاه را باریکتر و گاف انرژی بستر را بزرگتر از گاف انرژی ناحیه فعال انتخاب میکنند. همچنین میتوان ناحیه فعال را نزدیک سطح خارجی قطعه ساخت، البته این امر نواقص شبکه را افزایش میدهد.

> ب- بازتاب داخلی از سطح قطعه بدلیل تفاوت ضریب شکست قطعه با محیط خارجی. از رابطه اسنل برای ضریب بازتاب داریم:

$$R = \left(\frac{n_{r2} - n_{r1}}{n_{r2} + n_{r1}}\right)^2 \tag{17-5}$$

که n_{r1} ضریب شکست محیط خارجی و n_{r2} ضریب شکست قطعه میباشند. در نتیجه هرچه تفاوت ضریب شکست دو محیط در ناحیه بازتاب کمتر باشد احتمال خروج نور از سطح افزایش مییابد. بدین منظور از یک لایه شفاف میانی معمولاً از جنس اپوکسی(Epoxy) با ضریب شکستی مابین قطعه و هوا استفاده می شود.

ج- بازتاب کلی برای پرتوهای با زاویه کمتر از زاویه حد زوایای بزرگتر از زاویه حد:

$$\theta_c = Sin^{-1} \left(\frac{n_{r1}}{n_{r2}} \right) \tag{18-5}$$

برای موج خارج شونده از سطح قطعه بازتاب کامل در بر خواهد داشت. لذا انتخاب شکل هندسی سطوح حائز اهمیت است. با انتخاب سطح خارجی قطعه بصورت کروی میتوان زاویه برخورد نور به سطح مشترک نیمرسانا و محیط را تغییر داد تا پرتوهای نوری بیشتری در محدوده کمتر از زاویه حد قرار گیرند. از آنجا که رشد نیمرسانا به شکل کروی مشکل و پر هزینه است بدین منظور سطح خارجی اپوکسی را کروی انتخاب می-کنند(شکل ۴–۷).تغییر سطح خارجی قطعه بصورت ایجاد کردن ناهمواریها با روش etching نیز افزایش بازده خروج نور را در بر دارد.



بازدهی خروج نور بسیار موثر است .

در نهایت بازدهی کل LED بصورت حاصلضرب چهار بازدهی تعریف می شود: $\eta = \eta_{in \, j} \eta_{int} \eta_{exc} \eta_{res}$ (19–5) که $\eta_{in \, j}$ بازدهی تزریق حاملها به ناحیه فعال توسط منبع الکتریکی و η_{int} بازدهی بازتر کیب نور گسیل حاملها و $\eta_{in \, j}$ بازدهی خروج نور از LED به محیط و η_{res} بازدهی روشنایی LED برای چشم انسان می باشند. در

جدول ۴-۱ نمونههایی از LEDهای تجاری در دسترس با رنگهای مختلف آورده شده است.

Table 1 Commercial available III-V LED materials[13]											
Active layer	Color	Peak emission	Luminous efficiency (lm/w)	External efficiency	Device type						
AlInGaP	Red	636 nm	35	24%	DH						
AlGaAs	Red	650 nm	8.0	16%	DH						
AlGaInP	Amber	590 nm	40	10%	DH						
InGaN	Blue	470 nm	10	11%	QW						
InGaN	Green	520 nm	34	10%	QW						
InGaN	UV	372 nm	0	7.5%	DH						
InGaN	Amber	590 nm	14	3.5%	QW						
ZnSe	Blue	512 nm	17	5.3%	DH						
SiC	Blue	470 nm	0.02	0.02%	H						

جدول ۴-۱ LED های تجاری در دسترس با رنگهای مختلف[۱۲۲]

فصل پنجم

معرفی نمونهها و تحلیل نتایج

۵-۱ عوامل موثر در محاسبه مقدار گاف انرژی موثر در رنیمرساناهای نیتروژندار

- ۲-۵ گیراندازی و محدودیت حاملها
- ۵-۳ روشهای مطالعه نمونههای این پایاننامه
- ۵-۴ ساختار نمونههای مورد مطالعه در این پایاننامه
 - ۵-۵ اثر تغییر دما در فرآیندهای بازترکیب
- ۵-۶ اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی در فرآیندهای بازترکیب

۵-۱ عوامل موثر در محاسبه مقدار گاف انرژی موثر در رنیمرساناهای نیتروژندار

رنگ نور گسیلی از نیمرسانا تابعی از گاف نوار انرژی نیمرسانا است. روشهای مختلف تغییر گاف نواری نیمرساناها عبارتنداز:

- ۱- آلایش دو یا چند نیمه هادی.
- ۲- استفاده از ساختارهای ناهمگون برای بوجود آوردن محدودیت کوانتمی یا تشکیل ابر شبکهها.
 ۳- استفاده از تنش در حین رشد.

همچنین عوامل دیگری در محاسبه گاف انرژی موثر باید در نظر گرفته شوند که در ادامه به آنها اشاره میشود.

۵-۱-۱ تقریب وگارد برای محاسبه گاف انرژی

محاسبه گاف نوار انرژی آلیاژها بدلیل قرار گیری اتمهای آلایش بطور رندم و غیر تناوبی حتی اگر آلیاژها شبکه کاملی داشته باشند (ولی بلور کامل نیستند) کار مشکلی است بنابراین از تقریب بلوری مجازی استفاده می شود برای آلیاژ $A_x B_{1-x}$ گاف نواری عبارت است از :

$$E_{gAB} = E_{gA} x + E_{gB} (1 - x)$$
(1-6)

در بیشتر آلیاژها یک اثر خمش (bowing) بدلیل افزایش بی نظمی ناشی از آلایش حضور دارد، در این حالت انرژی گاف نواری با رابطه

$$E_{gAB} = E_{gA}x + E_{gB}(1-x) - bx(1-x)$$
(2-6)

بیان می شود که b پارامتر خمش میباشد. همچنین محاسبه ثابت شبکه آلیاژ کار سختی است اما در اکثر موارد ساختار کریستالی مؤلفههای آلیاژ یکسان است که در این صورت ثابت شبکه از قانون وگارد پیروی می کند بدین صورت که میانگین وزنی ثابتهای شبکه مؤلفههای آلیاژ بعنوان ثابت شبکه آلیاژ در نظر گرفته می شود. بنابراین برای ثابت شبکه آلیاژ $A_x B_{1-x}$ داریم:

$$a_{A} = a_{A}x + a_{B}(1 - x) \tag{3-6}$$

۵-۱-۵ اثر دما و فشار در گاف انرژی

چون گاف نواری یک نیمرسانا تابع فاصلهٔ میانگین اتمهاست و این فاصله با تغییر دما و فشار تغییر می کند، گاف نواری تابعی از دما و فشار خواهد بود. در یک نیمرسانای کپهای وابستگی گاف نواری به دما و فشار طبق رابطهٔ تجربی ورشنی به صورت زیر میباشد:

$$\Delta E_{g} = \left(\frac{\partial E_{g}}{\partial P}\right)_{T} \Delta P + \left(\frac{\partial E_{g}}{\partial T}\right)_{P} \Delta T$$
(4-6)

با افزایش دما گاف انرژی کوچک شده و با افزایش فشار پهن تر می شود. با تغییر دما در یک نیمه هادی اثرات متعددی در شبکه بوجود می آید. شبکه منبسط یا منقبض می شود و نوسانات اتمها پیرامون مکان میانگینشان افزایش یا کاهش خواهد یافت. واکنش الکترون با شبکه نیز با حرارت تغییر می کند. پتانسیل ناخالصیهای بخشنده و پذیرنده کم عمق نیز از دما تاثیر می پذیرد, هرچند انرژی یونیزاسیون ناخالصیها نسبتاً ثابت میماند. مشاهدات تجربی همچنین نشان دهنده تغییر گاف انرژی با دما می اسد. این وابستگی در محدودههای دمایی متفاوت تغییر می کند و تقریبا از رابطه تجربی زیر که برای اولین بار توسط ورشنی [۱۲۴] ارائه شد پیروی می نماید:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}$$
(5-6)

که در آن $E_s(T)$ گاف انرژی در دمای T و $E_s(0)$ گاف انرژی در دمای صفر کلوین است و lpha و eta ثابتهای ورشنی هستند که از فیت کردن مقادیر تجربی گاف انرژی در دماهای مختلف با رابطه بالا بدست می آیند.

۵-۱-۵ انرژی حالت پایه اکسیتون در چاه کوانتمی

فاصله بین الکترون و حفره معمولاً بعنوان شعاع بوهر موثر ، ه*ه اکسیتون نامیده میشود. انرژی بستگی اکسیتون xE می اشد که جرمهای موثر بزرگ الکترونها و حفرهها منجر به xB های بزرگ می شوند. وقتی چگالی حاملهای پس زمینه و تولید شده توسط نور زیاد می شود، بر همکنش کولنی استتار شده و انرژی بستگی کاهش می یابد. در مورد اکسیتون درون چاه، وقتی پهنای چاه بسیار بزرگتر از ه*ه در ماده کپهای باشد انتظار تغییر قابل ملاحظه ی در xE را نداریم زیرا اکسیتونها محیط را شبیه ماده کپهای احساس می کنند. با کاهش پهنای چاه تا مرتبه ه*ه یا کمتر، توابع موج الکترون و حفره در چاه محدود شده و روی هم افتاد گیشان افزایش می یابد. این امر موجب بالا رفتن انرژی بستگی اکسیتونها می شود. بطور تئوری نشان داده شده که انرژی بستگی اکسیتونها در محدوده دو بعد چهار برابر بزرگتر از ماده کپهای است[Bastard et. al. این می میونای در محدوده دو بعد چهار برابر بزرگتر از ماده کپهای است[افتاد گیشان افزایش می یابد. این امر موجب بالا رفتن انرژی بستگی اکسیتونها می شود. بطور تئوری نشان داده سد و کاهش انرژی بستگی اکسیتونها در محدوده دو بعد چهار برابر بزرگتر از ماده کپهای است[اعموا]. اگرچه در سیستمهای واقعی چاههای بسیار باریک منجر به نشت بخش عمدهای از توابع موج به خارج سد و کاهش انرژی بستگی اکسیتونها می شود. بنابراین انرژی بستگی اکسیتونها بصورت یکنواخت تا مقدار ماکزیمم افزایش یافته وسپس با کاهش پهنای چاه کاهش می یابد. این پدیده برای اکسیتونهای مقدار باسارد و همکارانش[۱۹۸۲] با روش کمترین انرژی، انرژی بستگی اکسیتونه است[Moore et. al ای است[باسارد و همکارانش[د. در این روش هامیلتونی اکسیتون بصورت زیر تعریف می شود:

$$H = H_e(z_e) + H_h(z_h) + H_{e-h}(\vec{r})$$
(6-6)

که

$$H(z) = \left\{ -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + V(z) \right\}$$
(7-6)

 H_c هامیلتونی توصیف کننده الکترون مقید در چاه و H_h هامیلتونی توصیف کننده حفره مقید در چاه میباشد H_c و پتانسیل جاذب H_{e-h} هامیلتونی متشکل از سهم انرژی جنبشی حرکت نسبی اکسیتونها در صفحه X-Y و پتانسیل جاذب H_{e-h} و پتانسیل جاذب الکترون و حفره در سه بعد میباشد و Z_h) مختصات z الکترون(حفره) و \bar{r} بردار نسبی بین الکترون و حفره است. تابع موج زیر بعنوان تابع متغیر در نظر گرفته شده

$$\psi = A\xi(r)\phi_{e,1}(z_e)\phi_{h,1}(z_h)$$
(8-6)

که
$$(r)$$
 که (r) که عمپوشانی اکسیتون، بعنوان تابع آزمایشی میباشد. در نهایت
 $E_{ex} = \min < \psi \mid H \mid \psi >$
(9-6)
بدست میآید. بنابراین کمترین انرژی رزونانس اکسیتون وابسته به حالت پایه در چاه برابر خواهد بود با

$$E_{res} = E_g + E_{z,1}^{e} + E_{z,1}^{h} - E_x$$
(10-6)

که $E_{z,1}^{h}(z)$ انرژی حالت پایه الکترون (حفره) مقید در چاه میباشد.

:

 هستند که باعث خمش چاه شده و حالتهای بازترکیب تابشی، ناشی از حالتهای موجود در گوشه چاه میباشند این خمش باعث دور شدن توابع موج الکترن و حفره شده در نتیجه زمان بازترکیب تابشی افزایش مییابد که کاهش بازدهی را در بر دارد اما در نانوساختارهای چاه کوانتمی InGaN/GaN اثر میدانهای قطبشی در خمش چاه کمتر بوده و احتمال رخ دادن بازتزکیبهای تابشی از حالتهای جایگزیده پایینتر از گوشه چاه مثلثلی زیاد است. در شکل ۵-۱ خمش چاه کوانتمی AlGaN/GaN نشان داده شده است. در جدول ۵-۱ مقادیر کرنش و مولفههای قطبش خودبخودی و پیزوالکتریک برای نیمرساناهای (In, Ga, Al) آورده شده است.



(ب)

(الف)



ضخامت بحرانی In_xGa_{1-x}N (۱۳۶) بیشتر از ۴ نانومتر گزارش شده (Amano,Akazaki) مخامت بحرانی ۱۳۲(۱۵۵) (۱۲۳]

	P_{Sp} (c/m ²)	P_{P_2} i (c/m^2)	e_{33} (c/m ²)	e_{31} (c/m ²)	С ₃₃ (Gpa)	С ₃₁ (Gpa)	$a(W_Z)$ (A)	c/a	ε_1
AlN	-•/• ٩ •	-•/•Å١	١/۵٠	- • /۵٣	۳۷۷	٩۴	۳/۱۱۲	۱/۶۰۰۹	۶/٩
GaN	-•/•٣۴	-•/•٢٩	•/81	- • /٣۴	304	۶٨	٣/١٨٩	1/8809	١/٨
InN	-•/• 47	-•/•٣٢	٠/٨١	-•/۴١	۲۰۵	٧٠	344	1/8186	۴/۰

برای حل دقیق ترازهای انرژی در نمونههای چاه کوانتمی InGaN/GaN، در معادله شرودینگر، پتانسیل چاه متناهی و مثلثی باید در نظر گرفت. سینه (Singh) اولین تراز انرژی تحت میدان اعمالی را برای چاه مثلثی متناهی بصورت زیر بدست آورد[۱۲۶]:

$$E_{1} = \frac{3\Delta E}{4} - \frac{\pi^{2}\hbar^{2}}{4m^{*}L_{w}^{2}} [\{1 + 32[\frac{5\Delta E^{2}}{2\pi^{2}} + (\frac{eE_{w}L_{w}}{\pi})^{2}]\frac{L_{w}^{4}m^{*2}}{\pi^{4}\hbar^{4}}\}^{1/2} - 1]$$
(11-6)

که با در نظر گرفتن انرژی بستگی Eb وانرژی جایگزیدگی Elocal اکسیتون انرژی گاف موثر بصورت زیر بدست میآید:

$$E_{PL} = E_g + E_{1e} + E_{1hh} - E_b - E_{local}$$
(12-6)

بطور خلاصه خصوصیات خاص III-نیترایدها و InGaN ورتسایت در مقایسه با دیگر ترکیبات مشابه نیمرساناهای گروه V-III از قبیل InP و GaAs عبارتند از :

- ۱- نیترایدها در خصوصیات اپتیکی شان رفتار اکسیتونی از خود نشان میدهند
 ۲- ساختار ورتسایت بالاترین تقارن در جهت تولید میدانهای قطبشی خودبخودی را دارد همچنین تانسور پیزوالکتریک ناشی از تنش سه مولفه مستقل غیر صفر دارد در غیاب میدانهای خارجی قطبش پلاریزه ماکروسکوپ، P ، مجموع قطبش خودبخودی در حالت تعادل (P) و قطبش پیزوالکتریک ناشی از تنش (P_{pz}) میباشد.
- ۳- آلیاژهای InGaN گاف متغییر دارند و معمولاً نوار لومینسانس پهنی را نشان میدهند (Nakamura and Fasol, 1997a) که نشان دهنده گاف نواری موثر غیر همگن می باشد.

۲-۵ گیراندازی و محدودیت حاملها

محدودیت حاملهای تزریقی به ناحیه چاه کوانتمی روی هم افتادگی توابع موج الکترون و حفره را افزایش میدهد که منجر به بازترکیب تابشی سریعتر و پربازدهتر می گردد . برای کاهش دادن نرخ بازترکیب غیرتابشی، ضخامت چاههای کوانتمی InGaN باید از طول پخش شدگی حاملهای اقلیت که در حدود چند نانومتر است کمتر باشد . چاههای کوانتمی نازک باعث زیاد شدن چگالی حاملها می شود که برای حذف فرآیندهای غیرتابشی توسط اشباع حالتهای نواقص شبکه موجود در ناحیه فعال بسیار مفید میباشد . همچنین نازک بودن ناحیه فعال در بهبود خروج نور بدلیل کاهش یافتن جذب نوری مؤثر است .

پذیرفته شده که اثرات گیراندازی حاملها ناشی از عدم توزیع یکنواخت ایندیم و نوسانات ضخامت چاه کوانتمی میباشد و این ناهمگنی ناشی از اختلاف بزرگ در پایداری حرارتی و ثابتهای شبکه بین InN و GaN است . اثرات گیراندازی، بازترکیب تابشی را به دو دلیل بهبود میدهند: اول اینکه نواحی شبه نقطه کوانتمی غنی از In در آلیاژ InGaN حاملها را گیر انداخته و اکسیتونهای موضعی را شکل می دهد. این امر روی هم افتادگی الکترون و حفره را بیشتر کرده و نرخ بازترکیبشان را بیشتر می کند . دوم اینکه اثرات گیراندازی از دسترسی حاملها به نواقص شبکه جلوگیری میکند و در نتیجه بازترکیب غیرتابشی را کاهش میدهد. ساختارهای نانو مقیاس شبه نقطه کوانتمی (QD) در ساختارهای InGaN توسط MEM رزولوشن بالا اندازه گیری شدهاند (IP). نوسانات گسیل زیرمیکرون از نواحی تفکیک شده In با تصاویر کاتدولومینانس (CL) بوضوح مشاهده شده اند [۹۴]. افزایش اندازه متوسط این QD ها با افزایش درصد In نشان دهنده نوسانات شدیدتر ترکیب و اثرات گیراندازی قوی تر در مواد Mac می باشد .

یک مشخصه LEDهای بر پایه InGaN شیفت آبی پیک EL با افزایش جریان ورودی است که میتواند مربوط به پر شدن نوارهای انرژی حالتهای جایگزیده در مینیمم پتانسیل در صفحه چاه کوانتمی باشد. شکل۵-۲ طیف LED یک LED سبز InGaN MQW UV LED و یک AlGaN MQW UV LED در ۳۰۰K بصورت تابعی از جریان ورودی را نشان می دهد.



شکل ۵-۲- طیف EL یک LED سبز InGaN MQW UV LED و یک AlGaN MQW UV LED در ۳۰۰K می ۲۰۵ ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ ۲۰۰۰

طیف LED سبز بسیار پهنتر است و ۵۴ meV شیفت آبی با افزایش جریان از ۲۰۱۳۸ تا ۲۰۱۳۸ را نشان می دهد. در مقایسه، پیک طیف گسیلی FWHM ، UV LED حدود ۳۰ ۳ و پایداری در برابر تغییرات جریان ورودی را نشان میدهد. این موضوع نوسانات پتانسیل کمتر و جایگزیدگی کمتر چاههای کوانتمی AIGaN را میرساند. بنابراین حاملها تمایل بیشتری به گیر افتادن در مراکز بازترکیب غیرتابشی نواقص شبکه را دارند. این امر دلیل کم بازدهتر بودن LED های AIGaN UV است. فهمیده شده که خصوصیات اپتیکی AIGaN با وارد کردن کمی In برای تشکیل ترکیب چهارتایی AIGaN است. فهمیده شده که خصوصیات اپتیکی ۱۲۷۱] بعلاوه با تغییر غلظت آلیاژهای چهارتایی، گاف نواری و ثابت شبکه برای دستیابی به ساختارهای با تطابق شبکه بالا و چگالی دررفتگی و میدان پیزوالکتریک کاهش یافته بطور مستقل قابل تنظیم هستند AIInGaN ساخته شده اند[۲۷].

عامل دیگر شیفت آبی EL ، میدان الکتریکی قوی (تا چند *MVcm⁻¹)* در چاههای کوانتمی InGaN ناشی از قطبش خودبخودی و پیزوالکتریک می باشد[۱۲۹]. قطبش پیزوالکتریک از تنش دو محوری باقی مانده در ساختارهای ناهمگون، ناشی از عدم تطابق ثابت شبکه بین لایههای چاه و سد بوجود میآید. میدان الکتریکی کف چاه پتانسیل را کج می *ک*ند و توابع موج الکترون و حفره را در چاههای پتانسیل مثلثی شکل در دو سمت مخالف از هم جدا می کند . وقتی حاملها به درون چاههای کوانتمی تزریق می شوند و بارهای قطبشی را استتار می کنند، روی هم افتادگی توابع موج الکترون و حفره بازسازی می گردد و در نتیجه پیک انرژی شیفت آبی خواهد داشت [۱۳۱]. در LEDهای با چاههای کوانتمی نازک InGaN (کمتر از ۳nm) ، محدودیت کوانتمی و جایگزیدگی به اثر نامطلوب پیزوالکتریک غلبه می کنند ، همچنین آلایش لایه سد GaN با Si بطور مؤثر بارهای ناشی از قطبش را در سطح مشترک چاه و سد کاهش می دهد[۱۳۲]. این تکنیک در LEDهای تجاری آبی و سبز بطور گسترده بکار می رود[۱۳۳]. بنابراین شیفت آبی LED سبز در شکل۵-۲ بیشتر وابسته به پر شدن حالتهای جایگزیده است .

شناخت بهتر نقش حالتهای جایگزیده در فرآیندهای تابشی LEDهای بر مبنای InGaN با بررسی رفتار دمایی لومینسانس این قطعات بدست میآید. سه LED (سبز و آبی و UV) با ساختار رشد مشابه توسط تغییر درصد Al و In در چاههای کوانتمی و لایه های درپوش در محدوده دمایی ۵ تا ۳۰۰ کلوین مشخصهیابی شدهاند. درصد In آنها بترتیب ۳۵ و ۲۰ و ۴ درصد است .



شكل ۵–۳- شيفت پيک انرژي LED ها با جريان ورودي ۱mA تحت تغيير دما [۱۳۰]

در شکل ۵-۳ شیفت پیک انرژی LED ها با جریان ورودی ۱۳۸ تحت تغییر دما مشاهده می شود. یک شیفت آبی، سپس یک شیفت قرمز برای تمام LEDها با مقدار متفاوت دیده می شود. شیفت قرمز برای UV LED بین ۷۷ و ۲۰۰ K به بزرگی ۵۰me۷ است. با فرض اینکه تغییر دمایی گاف انرژی GaN حدود ۲۶me۷ است مقدار جابجایی شیفت وابسته به لبه نوار در این LED ، ۷۶me۷- است. این شیفت قرمز توسط واهلش حاملها توصیف می شود [۸۸]. هنگامی که دما کاهش می یابد طول عمر حاملها به دلیل کاهش نرخ بازتر کیبهای غیرتابشی افزایش مییابد در نتیجه فرصت بیشتری برای جایگزیدگی در حالتهای جایگزیده با انرژی پایدارتر پیدا می کنند. شیفت قرمز و در نتیجه درجه واهلش حاملها با افزایش مقدار In کاهش مییابد. از LED سبز پیک حدود VomeV در محدوده دمایی ۱۵۰K تا ۲۵۰K شیفت قرمز ۲/۳ eV در دماهای پائین پایدار می شود. این رفتار بعنوان نتیجه اثرات مثبت جایگزیدگی در LEDها توجیه می شود. در مقایسه LEDهای VU مکانیزمهای گسیل متفاوتی را در محدوده های دمایی متفاوت نشان می دهند. بطوریکه حالتهای بازتر کیب جایگزیده زیر دمای ۲۰۰K و انتقالهای نوار به نوار در دماهای بالاتر غالب هستند. در حقیقت با افزایش دما بالاتر از ۲۰۰K پیک LED و انتقالهای نوار به نوار در دماهای بالاتر غالب هستند. در حقیقت با افزایش دما می الاتر از ۲۰۰K پیک LE در DL های VU یک شیفت قرمز را نمایان می کند که از خاصیت وابسته به دمای انقباض (Shrinkage) گاف نواری GaN پیروی می کند [۸۸]. انرژی حرارتی در ۱۵۰K (حدود ۱۳m)

شکلL - I خصوصیات L - I (شدت = L) برای LED ها در دمای ۵K را نشان میدهد. تغییر شدت L در محدوده تزریق پائین برای تمام قطعات بطور خطی با I مشخص کننده باز ترکیب تابشی غالب و بازدهی کوانتمی ثابت میباشد. با افزایش جریان، نور خروجی تا حدی اشباع را نشان میدهد تا جایی که در تزریق های بالاتر نمودار L - I غیرخطی ([m] - L) میشود .



شکل ۵-۴- خصوصیات L – I (شدت = L) برای LED های سبز آبی و ماورای بنفش در دمای ۵K[۱۳۰]

نقطه انتقال به حالت اشباع با افزایش درصد In به جریان های بالاتر منتقل می شود. در دمای پائین گیراندازی حاملها مشکلتر است. در LED تنها تعداد محدودی از حالتهای جایگزیده وجود دارد و بنابراین تعداد کمی از حاملهای تزریق شده امکان جایگزیدگی می یابند در حالیکه تعداد زیادی از حاملها از چاههای کوانتمی InGaN فرار می کنند. همانطور که انتظار می رود تعداد زیاد حالتهای جایگزیده در LED سبز امکان گیراندازی بیشتری برای حاملها میسر می سازد. در شکل ۵–۵ تغییر طیف EL یک یک LED می و در (۲۸۰nm) با افزایش درما مشاهده می شود.



شکل ۵–۵- تغییر طیف EL یک UV LED عمیق(۲۸۰nm) با افزایش دما [۱۳۰]

با افزایش دما کاهش ۴۸ درصدی شدت EL را در بر دارد که نشان دهنده تأثیر زیاد جایگزیدگی روی کارآیی LED LEDها در دماهای بالا است.



شکل۵-۶-وابستگی EL به جریان برای یک LED آبی[۱۳۰]

در شکل ۵-۶ طیف وابستگی EL به جریان برای یک LED آبی نشان داده شده است. در جریانهای کمتر از ۰/۰۲mA (ولتاژ مستقیم کمتر از ۷ ۲/۵) گسیل پهن با مرکز ۵۵۰nm غالب میباشد.

با افزایش جریان ، گسیل چاه کوانتمی در ۴۶۰nm سریعاً گسترش مییابد. از آنجا که گسیل ترازهای عمیق اشباع می شود، پیشنهاد می کند که لومینسانس زرد نواقص و تونل زنی حاملها ممکن است به حالتهای با نواقص بالا در ناحیه بار – فضا وابسته باشند.

گسیل از نواقص قویتری در LEDهای UV AlGaN مشاهده شده است [۹۹و ۱۰۰]، که دارای چگالی حالتهای نقص بیشتری بودهاند. مشخصههای L – I یک LED در یک ناحیه با تزریق خاص را می توان با قانون توانی نقص بیشتری بودهاند. مشخصههای L – I یک LED در یک ناحیه با تزریق خاص را می توان با قانون توانی $L \propto I^m$ فیت کرد . پارامتر m تأثیر حالتهای نواقص شبکه در فرآیند بازترکیب حاملها را نشان میدهد [۱۰۰] . هنگامی که بازترکیب غیرتابشی غالب میشود، L یک وابستگی فوق خطی با I (m > l) را نشان میدهد می دهد. در این مورد بازده کوانتمی با افزایش جریان کاهش مییابد. وقتی حالتهای نقص اشباع میشوند و بازترکیب تابهای نقص اشباع میشوند و استگی فوق خطی با I (m > l) را نشان بازترکیب تابشی غالب می مود، L یک وابستگی فوق خطی با I (m > l) را نشان میدهد. در این مورد بازده کوانتمی با افزایش جریان کاهش مییابد. وقتی حالتهای نقص اشباع می شوند و بازترکیب تابشی غالب می شود . L ا

شکل۵-۷ خصوصیات L – I یک InGaN / GaN MQW UV LED که در دماهای ۵ و ۷۷ و ۱۵۰ و ۳۰۰ خصوصیات L – I یک L میک I^2 در ۳۰۰ کلوین تغییر می کند که تأثیر

نواقص حتی در چگالی بالای جریان را نشان میدهد با کاهش بیشتر دما، نقطه گذار از بازترکیب غیرتابشی به سمت جریان های تزریقی پائینتر جابجا میشود. در LEDهای با کیفیت بالای آبی و سبز در دمای اتاق در تمامی محدودههای تزریق یک رابطه خطی LEDهای با کیفیت بالای آبی و سبز در دمای در تمامی محدودههای تزریق یک رابطه خطی بین L و I میتوان بدست آورد که بیانگر نقش بسیارکمتر حالتهای ناکاملی میباشد .



۵ و ۷۷ InGaN / GaN MQW UV LED یک L – I یک InGaN / GaN MQW UV در دماهای ۵ و ۷۷ و ۱۵۰ و ۳۰۰ کلوینی اندازه گیری شدهاند[۱۳۰]

هنگام بازترکیب نوری اکسیتونها یا حاملهای آزاد در صورت جایگزیدگی آنها, طبق قانون بقای ممنتوم نیاز به حضور یک فونون می باشد. محتمل ترین فونون در فرآیند بازترکیب نوری معمولاً فونون اپتیکی طولی یا LO-فونون می باشد. وجود رد پای LO – فونون که در طیف لومینسانس گسیلی از InGaN در حدود meV فونون می باشد. وجود رد پای حامل مشاهده می گردد تأییدی بر جایگزیدگی اکسیتونها یا حاملهای آزاد میباشد گروه فضایی ترکیبات III-نیتراید، (Al,Ga,In) ،با ساختار ورتسایتز س⁴60 است. سلول واحد دو مولکول دارد بنابراین ۱۲ مد فونونی برای یک بردار موج داده شده وجود دارد.

۵-۳ روشهای مطالعه نمونههای این پایاننامه

روشهای مطالعه در نظر گرفته شده برای لومینسانس چاههای کوانتمی تغییرات : پیک انرژی، پهنای طیف در نصف ماکزیمم (FWHM) و شدت طیف PL میباشند.

الف) چگالی تحریک

میدانهای الکتریکی ناشی از قطبش منجر به جدایی حاملها و شیفت قرمز در PL می شود، بدین صورت که چاه کوانتمی ضخمیمتر افت پتانسیل بیشتری با یک میدان الکتریکی داده شده دارد و شیفت قرمز با افزایش ضخامت چاه افزایش می یابد.

از دادهها فهمیده میشود که FWHM با افزایش درصد ایندیم افزایش مییابد. از خصوصیات ویژه چاههای کوانتمی InGaN/GaN مقادیر بزرگ FWHM در دمای اتاق است که دلایل مختلفی برای این موضوع ارائه شده است. منشا طیف پهن، ناهمگنی در غلظت ایندیم، ضخامت و تنش در چاه کوانتمی InGaN میباشد که لومینسانس ناشی از مجموع فوتونهای تولید شده در مکانهای متفاوتی از چاه میباشد. اگر این مکانها در خصوصیاتی که روی انرژی فوتون گسیلی تاثیر میگذارد (از قبیل : غلظت InIn، تنش، ضخامت چاه) متفاوت باشند در نتیجه فوتونهای گسیلی از این مکانها انرژیهای متفاوت خواهند داشت. اگر تغییر پیوسته و رندم در این خصوصیات در ناحیه فعال وجود داشته باشد طیف PL مجموع، گاوسی شکل خواهد بود که پهنای آن به اندازه این تغییرات وابسته است.

یکی از معمولترین دلایل این تغییرات، توزیع غیر همگن ایندیم در چاه کوانتمی میباشد. حاملها در نانوکلاسترهای غنی از ایندیم جایگزیده میشوند. حال اگر این نواحی در درصد ایندیم تفاوت داشته باشند گاف انرژی آنها متفاوت خواهد بود در نتیجه انرژی گسیلی متفاوتی خواهند داشت. بطور مشابه تغییر در اندازه نانوکلاسترها در انرژی حالتهای مقید تاثیر خواهد داشت. منشا دیگر تغییر، تغییر در ضخامت چاه کوانتمی میباشد در این حالت نیازی به در نظر گرفتن حالتهای جایگزیده نیست زیرا با توجه به حل معادله شرودینگر پهنای چاه متفاوت، ترازهای انرژی متفاوت را در بر خواهد داشت. در این حالت شیفت قرمز ناشی از جدایی حاملها به پهنای چاه متفاوت، ترازهای انرژی متفاوت را در بر خواهد داشت. در این حالت شیفت قرمز ناشی از جدایی با افزایش درصد ایندیم میباشد که میتواند مربوط به تغییر بیشتر پهنای چاه یا اندازه نانوکلاسترها باشد که با افزایش درصد ایندیم میباشد که میتواند مربوط به تغییر بیشتر پهنای چاه یا اندازه نانوکلاسترها باشد که با افزایش درصد ایندیم میباشد.

ب) شدت پيک

شدت پیک اطلاعات مفیدی را در بر خواهد داشت زیرا به بازدهی تبدیل حاملهای تحریک شده به فوتون مربوط میباشد. بدین صورت که نمونهی با بیشترین شدت پیک بیشترین بازدهی را خواهد داشت. یکی از خصوصیات ویژه چاه InGaN لومینسانس قوی آن با وجود چگالی بالای دررفتگیهای آن است . جایگزیدگی حاملها در نواحی غنی از ایندیم مانعی در رسیدن آنها به مراکز بازترکیب غیر تابشی که معمولاً در نواحی دررفتگیاند میباشد. عوامل زیادی در شدت طیف دخیلند مثل تغییر در شدت لیزر فرودی یا دقت اندازه گیری طیف خروجی (موقعیت عدسیها) و حتی بازدهی اسپکترومتر برای طول موجهای مختلف. بدین دلیل محاسبه بازدهی روش خوبی برای مقایسه دقیق نمونههای مختلف نمیباشد.

۵-۴ ساختار نمونههای مورد مطالعه در این پایاننامه

نمونه های مورد مطالعه در این پایاننامه چاههای کوانتومی چندگانه InGaN/GaN با ضخامت چاههای InGaN در حدود ۴۰ تا ۶۰ نانومتر رشد داده شده بروی زیر لایه Sapphire می باشند که حاوی
//۱۸/۷ ، //۱۳/۹ ، //۱۸ و // ۳/۵ ایندیم اند. سنجش های اپتیکی بروش فتولومینسانس و با تحریک لیزر آرگون از دمای پایین تا دمای اتاق به انجام رسیده است. تغییرات طیف فتولومینسانس (PL) در اثر تغییر دما و تغییر شدت (توان) لیزر فرودی برای چهار نمونه دادههای تجربی ما میباشند. برای بررسی مکانیزم بازترکیبها پارامترهای مختلفی را بررسی کردهایم که به هر کدام بطور جداگانه پرداخته میشود.

۵-۵-اثر تغییر دما در فرآیندهای بازترکیب

۵–۵–۱– بررسی جابجایی انرژی پیک قلههای PL در اثر تغییر دمای نمونه برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر

بطور کلی کاهش گاف انرژی بدلیل تغییرات دمایی در InGaN, AlGaN, GaN را می توان بوسیله معادله تجربی ورشنی [۱۲۶] $\frac{\alpha T^2}{\beta + T} = (0) = E_g(0) = E_g(0) = E_g(0)$ انرژی گذار گاف انرژی در دمای T است. $\alpha \in \beta$ هم ثابتهای گرمایی ورشنی هستند که از مطالعات فتورفلکتانس مقادیر آنها $\alpha = 1$ meV/K و مم ثابت. $\alpha = 1$ meV/K است. $\alpha \in \beta$ هم ثابتهای گرمایی ورشنی هستند که از مطالعات فتورفلکتانس مقادیر آنها $\beta = 1$ MeV/K و $\beta = 1$ MeV/K است. $\beta = 1196$ برای $\beta = 1196$ برای $\beta = 10.14$ Ga0.86N بدست آمده است. $\beta = 1196$ برای $\beta = 10.14$ Ga0.86N بدست آمده است. $\beta = 1196$ برای $\beta = 10.14$ Ga0.86N با درصد ایندیم $\beta = 10.14$ Ca $\beta = 10.14$ Ga.86N با درصد ایندیم $\beta = 10.14$ Ca $\beta = 10.14$ Ga/2000 با درصد ایندیم $\beta = 10.14$ Ca β

شکل (۵–۸– الف و ب) تغییرات طیف فتولومینسانس چاههای کوانتومی In_xGa_{1-x}N را بترتیب برای دو نمونه با درصدهای ایندیم ۸٫۱٪ و ۱۸٫۷٪ با افزایش دما نشان میدهد.

مطابق شکل (۵–۸–الف) برای نمونه با درصد ایندیم ۸٫۱٪ زمانی که دما از ۲۱/۶ K افزایش مییابد، در قله طیف PL یک جابجایی ۲۵me۷ بسمت انرژیهای پایین دیده میشود که این مقدار حدود ۷ برابر مقدار پیشبینیشده توسط رابطه ورشنی در این بازه دمایی فوق است. از طرفی در شکل(۵–۸–ب) مشاهده میشود که با تغییر دما از ۸۲ تا ۸۰K مقدار این جابجایی برای نمونه با درصد ایندیم ۱۸٫۷٪، ۲۸me۷ است که حدود ۵ برابر مقدار پیشبینیشده توسط رابطه ورشنی در این بازه دمایی است. از موانی است. با افزایش دما از ۲۸ K برای نمونه In_{0.08}Ga_{0.92}N و ۸۰K برای نمونه In_{0.18}Ga_{0.82}N انتقال به انرژی های بالا (Blue Shift) در قله طیف فتولومینسانس داریم که اگر کاهش گاف انرژی ناشی از افزایش دما طبق رابطه ورشنی در این بازه را لحاظ کنیم، مقدار واقعی این جابجایی از مقداری که در شکل ۵–۸ دیده می شود بیشتر است.



(الف)



(ب)

شكل A-A- الف) تغييرات طيف فوتولومينسانس In_{0.08}Ga_{0.92}N ب) تغييرات طيف

فوتولومينس In_{0.18}Ga_{0.82}N با دما

همانطور که در شکل ۵–۸ مشاهده می کنیم، تا دمای ۶۱K برای نمونه In_{0.08}Ga_{0.92}N و نیز تا دمای ۸۰K برای نمونه In_{0.14}Ga_{0.86}N در طیف فوتولومینسانس (PL) انتقال به انرژیهای پایین (Red Shift) دیده می شود. از آنجا که در این محدوده دمایی بازترکیبهای تابشی نسبت به بازترکیبهای غیرتابشی غالبند، با افزایش دما طول عمر حاملها افزایش می یابد. این امر باعث می شود که حاملها قبل از بازترکیب فرصت بیشتری داشته باشند تا در حالات با انرژی کمتر که بوسیله افت و خیزهای ناهمگن پتانسیل ایجاد می شود، افزایش دما طول عمر حاملها افزایش می یابد. این امر باعث می شود که حاملها قبل از بازترکیب فرصت بیشتری داشته باشند تا در حالات با انرژی کمتر که بوسیله افت و خیزهای ناهمگن پتانسیل ایجاد می شود، قرار گیرند. این رفتار باعث کاهش گسیل با انرژی با انرژی بالاتر می گردد و بنابراین با افزایش دما یک انتقال به انرزی های پایین در مکان قله انرژی ایجاد می شود.

برای دمای بالاتر از ۲۹۱K برای نمونه Ino.08Ga0.92N و ۲۰۸ برای نمونه Ino.14Ga0.86N از آنجا که فرایندهای غیرتابشی غالب می شوند، با افزایش دما طول عمر حامل ها شدیداً کاهش می یابد و مستقل از انرژی های گسیلی می شود. لذا بعلت کاهش طول عمر، این حامل ها قبل از رسیدن به حالات با انرژی های پایینتر بازتر کیب می کنند که این امر باعث پهن شدگی در انرژی های گسیلی و در نهایت انتقال به انرژی های بالا (Blue Shift) در قله انرژی می شود. بنابراین جنبه های گسیل خودبخودی مربوط به InGaN شدیداً تحت تأثیر دینامیک بازتر کیب حامل هایی است که حالات انرژیهای پایین قله طیفی فتولومینسانس (band-tail) را اشغال می کنند. ناهمگنی هایی از قبیل نوسانات آلیاژی ایندیم، تغییرات ضخامت لایه در چاه های کوانتومی چندگانه یا نواقص بلوری که با دما تغییر می کنند منشاء ایجاد حالات فوق می باشند که موجب جایگزیدگی بیشتر اکسیتونها می گردد.

در شکل۵-۹ مکان قله انرژی بر حسب تغییر دما برای چهار نمونه رسم شده است. دو جابجایی اولیه (ابندا قرمز و سپس آبی) این رفتار S گونه در تمام نمونههای ما با جابجایی قرمز بیشتر از پیش بینی رابطه ورشنی دیده می شود.



(۵-۹-الف)



(ب)



(ა)

شکل۵–۹- جابجایی انرژی پیک قلههای PL در اثر تغییر دمای نمونهها با مقادیر ایندیم الف) ٪۱۸/۷ ب) ٪۱۳/۹ (این نمونه دارای دو قله میباشد) ج) ٪۸/۱ د) ٪ ۳/۵

۵–۵–۲ بررسی تغییرات شدت پیک قلههای PL در اثر تغییر دمای نمونه برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر

PL با مقایسه تغییرات شدت PL با تغییر دما مشاهده می شود که با افزایش درصد ایندیم شدت پیک PL در دماهای بالاتری به صفر نزدیک می شود (شکل ۵–۱۰).



شکل۵–۱۰- مقایسه تغییرات شدت پیک قلههای PL در اثر تغییر دما برای سه نمونه با درصدهای ایندیم ۸/۵، ۸ و ۱۸/۷

زیرا با افزایش درصد ایندیم امکان حضور حالتهای جایگزیده با عمق بیشتر بدلیل کاهش بیشتر گاف نواری ناحیه غنی از ایندیم (بدلیل تجمع بیشتر ایندیم) یا پهنای بیشتر بدلیل بزرگتر شدن اندازه ناحیه غنی از ایندیم (بدلیل ازدیاد ایندیم) با افزایش ایندیم میسر گشته و در نتیجه حالتهای جایگزیده با انرژی جایگزیدگی قویتر بوجود میآیند که دمای بالاتری برای غلبه بر این انرژی جایگزیدگی نیاز خواهد بود.

۵–۵–۳ بررسی تغییرات مساحت زیر نمودار PL در اثر تغییر دمای نمونه برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر برای هر طیف PL یک پیک گاوسی مربوط به بازترکیبهای اکسیتونی فیت شده و مساحت زیر نمودار با peakfit بدست آمده است. برای تمام نمونهها با افزایش دما شدت قله PL و همچنین مساحت زیر نمودار PL کاهش مییابد(شکل۵–۱۱).



شکل۵–۱۱- تغییرات مساحت زیر نمودار PL در اثر تغییر دمای نمونه برای نمونههای با ایندیم. ۲/۵٪ و ۱۸/۷٪ و ۱۸/۷٪ .

زیرا با افزایش دما طول عمر حاملها بیشتر شده و امکان قرار گرفتن حاملها در مراکز بازترکیب غیر تابشی بیشتر میشود همچنین زمانی که حاملها با گرفتن انرژی در اثر افزایش دما از حالتهای جایگزیده خارج می شود احتمال رخ دادن بازترکیبهای غیر تابشی بسیار زیاد شده بطوریکه شدت قله PL به صفر نزدیک می شود. با مقایسه نمونهها با یکدیگر مشاهده می شود که نمونههای با درصد ایندیم بیشتر نرخ کاهش شدت قله PL و مساحت زیر نمودار PL کمتری دارند و این موضوع نشان می دهد که هر چه مقدار x بیشتر می شود تجمع مساحت زیر نمودار L کمتری دارند و این موضوع نشان می دهد که هر چه مقدار x بیشتر می شود تجمع خوشههای ایندیم (یا نانوکلاسترهای غنی از ایندیم) بیشتر شده در نتیجه تنوع بیشتری در عمق و پهنای حالتهای جایگزیده بوجود خواهد آمد که این بمعنی افزایش تعداد حالتهای جایگزیدگی است. در نتیجه تعداد مراکز بازترکیب تابشی افزایش می یابد. بدلیل حضور حالتهای جایگزیده عمیق تر و پهن تر با افزایش درصد ایندیم امکان فرار این حاملها در دماهای بالاتری فراهم می شود در نتیجه افت شدت I در دمای بالاتری صورت می گیرد و از طرفی عمق چاههای با درصد ایندیم بیشتر با توجه به قانون وگارد بیشتر می باشد که این ۵–۵–۴ بررسی تغییرات FWHM قلههای PL در اثر تغییر دمای نمونه برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر

از طرفی با بررسی و مقایسه منحنیهای فتولومینسانس در دمای ۶۱K همانطور که در شکل ۵–۱۲ دیده میشود، با افزایش درصد ایندیم از ۸ درصد به ۱۸ درصد، پهنای طیف در نصف ماکزیمم(FWHM) بمیزان ۱۵me۷ افزایش می یابد. دلیل این پدیده افزایش درجه افت و خیزها و یا افزایش ناکاملیهای فصل مشترک با افزایش درصد ایندیم می باشد.



شکل In_{0.08}Ga_{0.92}N مقایسه پهنای در نیمه طیف FWHM فتولومینسانس In_{0.08}Ga_{0.92}N و In_{0.18}Ga_{0.82}N در دمای ۶۰K .

۵-۶ اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی در فر آیندهای بازتر کیب

۵-۶-۱ بررسی تغییرات شدت قلههای PL در اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر

با افزایش شدت لیزر فرودی شدت قله PL برای سه نمونه (بجز نمونه۱۳ درصدی) تقریباً بطور خطی افزایش مییابد. البته بمقدار کمی شیب نمونههای با درصد ایندیم کمتر بیشتر از نمونههای با درصد ایندیم بیشتر است به بیان دیگر نرخ افزایش شدت با کاهش x افزایش یافته است. با افزایش شدت لیزر فرودی تعداد حاملهای بیشتری برای بازترکیبهای تابشی و غیر تابشی تحریک می شوند و بعلت حضور حالتهای جایگزیده بازترکیبهای تابشی غالباند و تعداد این بازترکیبها با افزایش تعداد اکسیتونهای جایگزیده افزایش مییابد.

با کاهش درصد ایندیم تنوع حالتهای جایگزیده کمتر شده و توان لیزر فرودی تعداد بیشتری حالتهای با انرژی یکسان را برانگیخته می کند پهنای زیاد چاه (۴۰ تا ۶۰ نانومتر) در نمونههای ما مانع اشباع این حالتها شده در نتیجه تاثیر لیزر در افزایش تعداد این بازترکیبها با انرژی مساوی بیشتر خواهد بود یعنی نرخ افزایش بیشتری را در بر دارد.



شکل۵-۱۲- تغییرات شدت قلههای PL در اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی

۵-۶-۲ بررسی تغییرات جابجایی انرژی پیک قلههای PL در اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر

با افزایش شدت لیزر فرودی هیچ گونه جابجایی انرژی در مکان پیک قله PL برای نمونه های مشاهده نشده است. هچنین FWHM برای تمام نمونه ها با افزایش شدت لیزر فرودی تغییر نیافته است(شکل۵–۱۳)



(۵–۱۳–الف)



(۵–۱۳–ب)



(۵-۳۳-ج)



(۵-۱۳-۵)

شکل ۵–۱۳- تغییرات جابجایی انرژی پیک و FWHM قلههای PL در اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی با مقادیر ایندیم الف) ٪۱۸/۷ ب) ٪۱۳/۹ ج) ٪۸/۱ د) ٪ ۳/۵

با افزایش شدت لیزر فرودی تعداد حاملهای موثر در بازترکیب تابشی افزایش مییابد در نتیجه با پر شدن ترازهای انرژی حالتهای جایگزیده توسط این حاملها، ترازهای با انرژی بالاتر پر خواهند شد که این امر جابجایی آبی در پیک قله PL در بر خواهد داشت که در نمونههای دیگران (ناکامورا و ...) این شیفت آبی برای چاههای با پهناهای در حدود چند نانومتر مشاهده شده است.

اما با افزایش شدت لیزر فرودی در نمونههای ما این شیفت وجود ندارد که دلیل آن پر نشدن حالتهای جایگزیده در توانهای بالای لیرز فرودی بدلیل پهنای زیاد چاه InGaN (۴۰ تا ۶۰ نامتر) در نمونههای ما میباشد. بدلیل زیاد بودن پهنای چاه اثرات میدان pz کم بوده و بازترکیبهای تابشی بیشتر از مراکز جاگزیدگی ناشی از نانو کلاسترهای غنی از ایندیم میباشند تا حالتهای با انرژی پایین موجود در گوشههای چاه مثلثی. همچنین تعداد این مراکز آنقدر زیاد است که در توانهای بالای لیزر فرودی اشباع نمیشوند. پس همواره بازترکیبهای تابشی غالب بازترکیبهای تابشی ناشی از حالتهای پایه جایگزیدگی میباشند به این دلیل FWHM هم تغییر نمیکند.

۵-۶-۳ بررسی تغییرات مساحت زیر نمودار PL در اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی برای هر نمونه و مقایسه با نمونههای دیگر

مساحت زیر قله PL که با تقریب خوب با نرم افزار Peakfit با در نظر گرفتن قله گاوسی شکل محاسبه شده با افزایش شدت لیزر فرودی افزایش خطی دارد که شیب آنها برای دو نمونه بررسی شده (.//۵/ ع و //۱/ (.x=۸/۱) یکسان میباشد. برای نمونه با درصد ایندیم بیشتر این مساحت بیشتر میباشد که نشان دهنده بازدهی بالاتر این نمونه میباشد دلیل این امر افزایش تعداد حالتهای جایگزیدگی بدلیل افزایش تنوع در پهنا FWHM ایندیم در چاه میباشد. افزایش ایندیم و تجمع خوشههای ایندیم در چاه میباشد. افزایش تنوع در پهنا با افزایش درصد ایندیم نیز موید این مطلب است زیرا تنوع حالتهای بازترکیب تابشی جایگزیده بیشتر می-شود(شکل۵–۱۴).



شکل۵-۱۴- تغییرات مساحت زیر نمودار PL در اثر تغییر شدت (توان) لیزر فرودی

۵-۷ بررسی تغییرات شدت دو قله انرژی نمونه با غلظت ایندیم ۱۳/۹ درصد در اثر تغییر دما

مشاهده میشود با افزایش دما کاهش شدت قله انرژی برای قله با انرژی بالاتر سریعتر از قله با انرژی پایین تر است (شکل ۵–۱۴)



(الف)





شکل۵-۱۴- تغییرات شدت دو قله انرژی نمونه با غلظت ایندیم ۱۳/۹ درصد در اثر تغییر دما الف)مكان قلهها ب)طيف PL

دلیل این امر احتمالاً حضور چاههای کوانتمی با دو پهنای متفاوت در این نمونه میباشد. از حل معادله شرودینگر چاه متناهی میدانیم که تراز انرژی پایه در چاه با پهنای بیشتر پایین تر از تراز انرژی پایه در چاه با پهنای کمتر است در نتیجه گاف نواری در چاه باریکتر بیشتر است (شکل ۵–۱۵). از اینرو تراز انرژی پایه دو چاه با عمق یکسان و پهنای متفاوت برای چاه باریکتر بیشتر است (شکل ۵–۱۵). از اینرو تراز انرژی پایه دو چاه با عمق یکسان و پهنای متفاوت برای چاه باریکتر بیشتر است (شکل ۵–۱۵). از اینرو تراز انرژی پایه دو چاه با عمق یکسان و پهنای متفاوت برای چاه باریکتر به سطح انرژی سد نزدیکتر است و حاملهای قرار گرفته در این تراز با کسب انرژی کمتری نسبت به حاملهای قرار گرفته در تراز انرژی پایه چاه پهن تر از درون چاه بیرون میآیند. بنابراین با افزایش دما تعداد حاملهای که انرژی لازم برای خارج شدن از چاه را از انرژی گرمایی میگیرند برای چاه باریکتر نسبت به چاه پهن تر بیشتر بوده و قله انرژی چاه باریک کاهش شدت سریعتری نسبت به قله انرژی چاه باریک کاهش شدت سریعتری



شکل۵-۱۵ گاف نواری برای چاه باریکتر بزرگتر است.

ضميمه





 $SO_3^{\circ}(H^+)$

PEDT/PSS











TDATA

 $\alpha\text{-}6T \ (\mathbf{R} = \mathbf{R}' = \mathbf{H})$

DEtDOc6T (R = C_8H_{17} , R' = C_2H_5)

مواد تزريق كننده حفره



مولكولهاى تغيير شكل يافته Alq3











PF-6P

spiro-PBD



PyPySPyPy



сот

مواد انتقال دهنده الكترون



آلایندههای سبز







AAAP

DCDDC

DCJTB (R = t-Bu; R' = H) DCJTI (R = i-Pr; R' = H) DCJMTB (R = t-Bu; R' = OCH₃)







آلایندههای قرمز

сн₃



TBSA







terfluorene (Tg 296°C)

Fig. 18. Miscellaneous blue-emitting materials.

مواد آبی گسیل



Fig. 19. Triplet emitting materials and related intermediates.

سه رنگ

] C. M. Wolf, N. H. Holonoyak, G. E. Stillman; Physical Properties of Semiconductors, Prentice-Hall, \[

New Jersy, US (1989)

] M. Izadifard; Optical Characterization of dilute nitride semiconductors and related quantum Υ[structures; dissertation No.**995**, Linkoping University- IFM, (2006)

] R. Dingle, W. Wiegmann, and C. H. Henry; Phys. Rev. Lett. 33, 827 (1974) [

] J. Frenkel; Phys. Rev. **37**, 1276 (1931) ^{*\varphi*}

] M. A. Gilleo, P. T. Bailey, and D.E. Hill; Phys. Rev. 174, 898 (1968)^[]

[Chiang, C.K., et al., Phys. Rev. Lett. (1977) 39, p. 1098-1101[⁹]

. Heeger, A.J., Synth. Met. (2002) 125, p. 23-42[1.]

MacDiarmid, A.G., Synth. Met. (2002) 125, p. 23-42[11]

. Shirakawa, H., Synth. Met. (2002) 125, p. 3-10[17]

. Heeger, A.J., et al., <u>http://www.nobel.se/chemistry/laureates/2000/[17]</u>

. Burroughes, J.H., et al., Nature (1990) 347, p. 539-54116. Bradley, D.D.C., et al., Synth. [14] Met. (1991) 43, p. 3135-3141

> .Proceedings of the 2000 International Conference on Science and Technology[14] of Synthetic Metals, Synth. Met. (2001) 119-121, p. 1-1905

> > . Sheats, J.R., et al., Science (1996) 273, p. 884-888[19]

. Suzuki, H., Adv. Mater. (1996) 8, p. 657-659[17]

. Proceedings of the 1996 International Conference on Science and Technology[1A]

of Synthetic Metals, Synth. Met. (1997) 85, p. 1173-1444

. D'Andrade, B.W., et al., Adv. Mater. (2002) 14, p. 147-150[19]

. Aratani, S., et al., J. Electron. Mat. (1993) 22, p. 745-749[Y.]

. Zhang, C., et al., J. Electron. Mat. (1994) 23, p. 453-458[11]

. Cao, Y., et al., Nature (1999) 397, p. 414-417[77]

Gustafsson, G., et al., Nature (1992) 357, p. 477-479[٢٣]

M. Uchida, T. Izumizawa, T. Nakano, S. Yamaguchi, K. Tamao, K. Furukawa, Chem. [٢۴] Mater. 13 (2001) 2680.

L.T. Canham, Appl. Phys. Lett. 57 (1990) 1946. [٢۵]

W. Theifl/Surface Science Reports 29 (1997) 91 192[79]

M. Stutzmann, J. Weber, M.S. Brandt, H.D. Fuchs, M. Rosenbauer, P. Deak, A. Hrpfner [YY] and A. Breitschwerdt, in: Festkrrperprobleme, Adv. Solid State Phys. 32 (1992) 179.

W. Theifl/Surface Science Reports 29 (1997) 91 192[YA]

S. Nakamura, Y. Harada, and M. Senoh, "Novel MetalorGaNic Chemical Vapor [۵۷] Deposition

System for GaN Growth," Appl. Phys. Lett., 58 (1991), p. 2021.

F.A. Ponce, "Defects and Interfaces in GaN Epitaxy," MRS Bulletin, 22 (1997) p. 51[a]

Jpn. J. Appl. Maruska, H. M. Wang, and E. Kuokstis, M. A. Khan, M. Shatalov, H. P.[۵٩] Phys. 2005, 44, 7191.

Semiconductor Blue Sota, in Introduction to Nitride S. F. Chichibu, Y. Kawakami, and T.[*s*.]F. Chichibu, Taylor and Francis, Emitting Diodes, ed. S. Nakamura and S. Lasers and Light New

York, 2000.

1258. T. Mukai, Jpn. J. Appl. Phys. 1992, 31, S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh, and [91]

353. Y. Toyoda, Appl. Phys. Lett. 1986, 48, H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and [97]

30, L1705. S. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys. 1991, [97]

and T. Perlin, I. Grzegory, J. Jun, S. Porowski, M. Leszczynski, T. Suski, H. Teisseyre, P.[۶۴] 76, 4909. D. Moustakas, J. Appl. Phys. 1994,

Appl. Phys. Ager III, W. Götz, and R. S. Kern, J. L. T. Romano, C. G. Van de Walle, J. W.[۶۵] 2000, 87, 7745.

1995, and D. A. Steigerwald, Appl. Phys. Lett. S. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. Craford, [87] 66, 1249.

S. J. Keller, U. K. Mishra, S. P. DenBaars, and D. Kapolnek, X. H. Wu, B. Heying, S.[97] 1541. Speck, Appl. Phys. Lett. 1995, 67,

DenBaars, J. Mack, S. Keller, P. M. Petroff, S. P. X. H. Wu, C. R. Elsass, A. Abare, M. [9A] Appl. Phys. Lett. 1998, 72, 692. S. Speck, and S. J. Rosner,

E. A. D. S. Lee, V. N. Merai, A. Parkeh, D. Lu, D. I. Florescu, S. M. Ting, J. C. Ramer, [99] Phys. Lett. 2003, 83, 33. Armour, and L. Chernyak, Appl. Lett. 1997, 79, Ruvimov, and J. Washburn, Phys. Rev. Z. Liliental-Weber, Y. Chen, S.[v.] 2835.

Craford, J. Appl. Phys. 1972, 43, 600. A. H. Herzog, D. L. Keune, and M. G. [٧1]

Phys. Lett. 1996, Craford, and D. A. Steigerwald, Appl. S. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. [Y7] 66, 1249.

Appl. Phys. 1999, 38, 5735. T. Mukai and S. Nakamura, Jpn. J. [vr]

Martin, F. Wu, J. V. Lauduyt, K. P. O'Donnell, R. L. Nistor, H. Bender, A. Vantomme, M. [٧۴] Phys. Lett. 2000, 77, 507. K. Jacobs, and I. Moerman, Appl.

Appl. Phys. Lett. 1997, 71, 2346. S. Chichibu, K. Wada, and S. Nakamura, [va]

Middleton, Phys. Rev. Lett. 1999, 82, 237. K. P. O'Donnell, R. W. Martin, and P. G. [V9]

2002, C. H. Chen, L. Y. Huang, Y. F. Chen, H.X. Jiang, and J. Y. Lin, Appl. Phys. Lett. [vv] 80, 1397.

A. Zukauskas, M. A. Khan, J. W. Yang, J. G. Tamulaitis, K. Kazlauskas, S. Jursenas, [YA] Gaska, Appl. Phys. Lett. 2000, 77, 2136. Zhang, G. Simin, M. S. Shur, and R.

C. Chen, E. Kuokstis, A. Chitnis, M.Shatalov, M. A. Khan, V. Adivarahan, J. P. Zhang, [٧٩] J. Appl. Phys. 2001, 40, L1308. J. W. Yang, and G. Simin, Jpn.

091101. H. Hirayama, J. Appl. Phys. 2005, 97, [A+]

A. El- Roberts, S. M. Bedair, E. L. Piner, and N. F. G. McIntosh, K. S. Boutros, J. C.[A1] Masry, Appl. Phys. Lett. 1996, 68, 40.

A. Di Carlo, and P. Lugli, Phys. Rev. B F. Bernardini, V. Fiorentini, F. Della Sala, [AT]

1999, 60, 8849.

Appl. Phys. Sota, S. Chichibu, and S. Nakamura, T. Deguchi, A. Shikanai, K. Torii, T.[٨٣] Lett. 1998, 72, 3329.

and I. M. Komori, H. Takeuchi, H. Amano, T. Takeuchi, S. Sota, M. Katsuragawa, [A۴] 36, L382. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 1997,

Lett. 2005, W. Tang, and K. M. Lau, Appl. Phys. Y. D. Qi, H. Liang, D. Wang, Z. D. Lu, [Aa] 86, 101903. DenBaars, Minsky, E. Hu, U. K. Mishra, and S. P. Y. H. Cho, J. J. Song, S. Keller, M. S. [A9] 1128. Appl. Phys. Lett. 1998, 73,

K2.4.1. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2002, 722, A. E. Yunovich and S. S. Mamakin, [AV]

S. P. J. J. Song, S. Keller, U. K. Mishra, and Y. H. Cho, G. H. Gainer, A. J. Fischer, [AA] 73, 1370. DenBaars, Appl. Phys. Lett. 1998,

Goldenberg, Appl. J. Hwang, J. J. Song, and B. W. Shan, T. J. Schmidt, X. H. Yang, S. [19] 985. Phys. Lett. 1995, 66,

Phys. Jiang, M. Asif Khan, and Q. Chen, Appl. M. Smith, G. D. Chen, J. Y. Lin, H. X.[9.] Lett. 1996, 69, 2837.

B. Monemar, Phys. Rev. B 1974, 10, 676.[91]

1, 5. S. Nakamura, JSAP International, 2000, [97]

2005, 85, Lin, and H. X. Jiang, Appl. Phys. Lett. M. Khizar, Z. Y. Fan, K. H. Kim, J. Y.[97] 173504.

J. Kaplar, Crawford, K. H. A. Bogart, S. R. Lee, R. A. J. Fischer, A. A. Allerman, M. H. [٩۴] W. Fullmer, and J. J. W. W. Chow, S. R. Kurtz, K.

24. J. Edmond and J. Lagaly, JOM 1997, 9, [9a]

and N. Hiller, Bruderl, D. Eisert, U. Strauss, A. Lell, V. Harle, B. Hahn, H. J. Lugaauer, G. [97] 2000, 6, 81. Compound Semiconductors

Lett. W. E. Plano, and D. F. Welch, Appl. Phys. F. A. Ponce, B. S. Krusor, J. S. Major, Jr., [97] 1995, 67, 410.

Davis, Ailey, E. Carlson, W. G. Perry, and R. F. T. W. Weeks, Jr., M. D. Bremser, K. S. [٩٨] Appl. Phys. Lett. 1995, 67, 401.

Cryst. Growth 1997, 170, 329. S. Tanaka, S. Iwai, and Y. Aoyagi, J.[99]

K. H. Ploog, M. Ramsteiner, M. Reiche, M. Qi, and P. Waltereit, O. Brandt, A. Trampert, [1...] 3660. Appl. Phys. Lett. 1999, 74,

Appl. M. Holtz, S. Nikishin, and H. Temkin, G. Kipshidze, V. Kuryatkov, B. Borisov, [1.1] Phys. Lett. 2002, 80, 3682. 1999, 75, Jr., and I. Berishev, Appl. Phys. Lett. C. A. Tran, A. Osinski, R. F. Karlicek, [1+7] 1494.

Krost, Appl. Phys. Bläsing, K. Fehse, A. Diez, and A. A. Dadgar, M. Poschenrieder, J.[1.v] Lett. 2002, 80, 3670.

2004, 272, Egawa, and T. Jimbo, J. Cryst. Growth H. Ishikawa, B. Zhang, K. Asano, T.[1+۴] 322.

2005, 86, Liu, and T. Jimbo, Appl. Phys. Lett. B. Zhang, T. Egawa, H. Ishikawa, Y.[1+a] 071113.

Fall Meeting, Boston, MA, 2004. J. Li, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, MRS[1.9]

Lebedev, S. Shokhovets, R. Goldhahn, J. H. P. D. Schenk, G. D. Kipshidze, V. B. [1.7]

Cryst. Growth 1999, 201-202, 359. Kräußlich, A. Fissel, and W. Richter, J.

Temkin, Appl. Phys. Zubrilov, V. G. Antipov, and H. S. A. Nikishin, N. N. Faleev, A. S[1+A] 3028. Lett. 2000, 76,

Nemanich, Shmagin, J. F. Muth, R. Kolbas, R. J. C. M. Balkas, Z. Sitar, L. Bergman, I. K. [1.9] Growth 2000, 208, 100. and R. F. Davis, J. Cryst.

Phys. K. Takemoto, and H. Seki, Jpn. J. Appl. Y. Kumagai, H. Murakami, A. Koukitu,[11.] 2000, 39, L703.

G. R. Brandes, and J. Chaudhuri, J. Cryst. X. Xu, R. P. Vaudo, C. Loria, A. Salant,[111] Growth 2002, 246, 223.

G. R. Brandes, Phys. Stat. Sol. (a) 2005, X. Xu, R. P. Vaudo, J. Flynn, J. Dion, and [117] 202, 727.

Cowen, S. D. Arthur, and W. Wang, Appl. X. A. Cao, H. Lu, S. F. LeBoeuf, C.[117]

Phys. Lett. 2005, 87, 053503.

I. Arslan and N. D. Browning[114]

Raghothamachar, M. Dudley, and L. J. J. C. Rojo, G. A. Slack, K. MorGaN, B.[116]

317. Schowalter, J. Cryst. Growth 2001, 231,

Whitlock, K. MorGaN, S. B. Schujman, B. L. J. Schowalter, G. A. Slack, J. B. [119] Evans, Phys. Stat. Sol. (c) 2003, 0, 1997. Raghothamachar, M. Dudley, and K. R.

Trybus, W. A. Doolittle, M. Losurdo, P. G. Namkoong, S. Burnham, K. K. Lee, E.[117] Nause, Appl. Phys. Lett. 2005, 87, 184104. Capezzuto, G. Bruno, B. Nemeth, and J.

2005, I. Akasaki, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. S. Kamiyama, M. Iwaya, H. Amano, and [11A] 831,

U. K. Mishra, J. S. Speck, S. Nakamura, H. Masui, A. Chakraborty, B. A. Haskell, [119]

2005, 44, L1329. and S. P. DenBaars, Jpn. J. Appl. Phys.

Fairman H.S., Brill M.H., <u>Hemmendinger H.</u> (1997). "How the CIE 1931 Color-Matching [\\Y] Functions Were Derived from the Wright–Guild Data". Color Research and Application 22 (1): 11-23. and Fairman H.S., Brill M.H., Hemmendinger H. (1998). "Erratum: How the CIE 1931 Color-Matching Functions Were Derived from the Wright–Guild Data". Color Research and Application 23 (4): 259.

Irena Fryc . Yoshi Ohno Optical Engineering 44. 11., 111309. November 2005[11A]

D. L. Macadam, Color measurement, Springer-Verlag, New York (1985)[119]

CIE Commission Internationale de l'Eclairage Proceedings, 1931, Cambridge [17.] University Press, Cambridge (1932)

Xiaoyun Guo dissertation, Effect of current crowding and device structure on operation [171] of gallium nitride based light emitting diodes Boston university, school of engineering, 2002,P 20-45

S.Nakamura and S.F.Chichibu Taylor&Francis London and New York (2000) [177]

] F. Bernardini, V. Fiorentini, and D. Vanderbilt, Phys. Rev. B 63, 193201 (2001).[117]

Y. P. Varshni, *Physica* **34**, 149 (1967). [۱۲۴]

morteza thesis[17۵]

J. Singh, Appl. Phys. Lett. 64, 2694 (1994)[179]

J. C. Bhat, A. Kim, D. Collins, R.Fletcher, R. Khare, and S. Rudaz, *ISCS*, Tokyo, Japan, October **2001**. [\YY] *Phys. Lett.* **2004**, 84, 855. P. DenBaars, and S. Nakamura, *Appl.* T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. [\YA] Park, *J. Appl. Phys.* **2003**, 93, 9383. C. Huh, K. S. Lee, E. J. Kang, and S. J. [\YA] **2005**, 86, 173504. Lin, and H. X. Jiang, *Appl. Phys. Lett.* M. Khizar, Z. Y. Fan, K. H. Kim, J. Y. [\Y] ,III–Nitride Light-Emitting Diodes on Novel Substrates 2007 WILEY-VCH Verlag GmbH & Xian-An Cao[18.]

Co. KGaA, Weinheim

X. Jiang, Appl. Phys. Lett. 2004, 84, 466. T. N. Oder, K. H. Kim, J. Y. Lin, and H. [\\YY]
J. J. Wierer, M. R. Krames, J. E. Epler, N. F. Gardner, M. G. Craford, J. R. Wendi, J.

Phys. Lett. **2004**, 84, 3885. A. Simmons, and M. M. Sigalas, Appl.[۱۳۳]] W. Shan, T. J. Schmidt, X. H. Yang, S. J. Hwang, J. J. Song, and B. Goldenberg, Appl. Phys. Lett. **66**, 985 (1995); W. Shan, B. D. **7** [[۱۳۴] ong, Z. C. Feng, M. Schurman, and R. A. Stall, *ibid.* **69**, 3315 (1996). Little, J. J.

ثقبث