



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش حالت جامد

بررسی خواص الکتریکی و اپتیکی دیودهای نورگسیل III-V و III-N

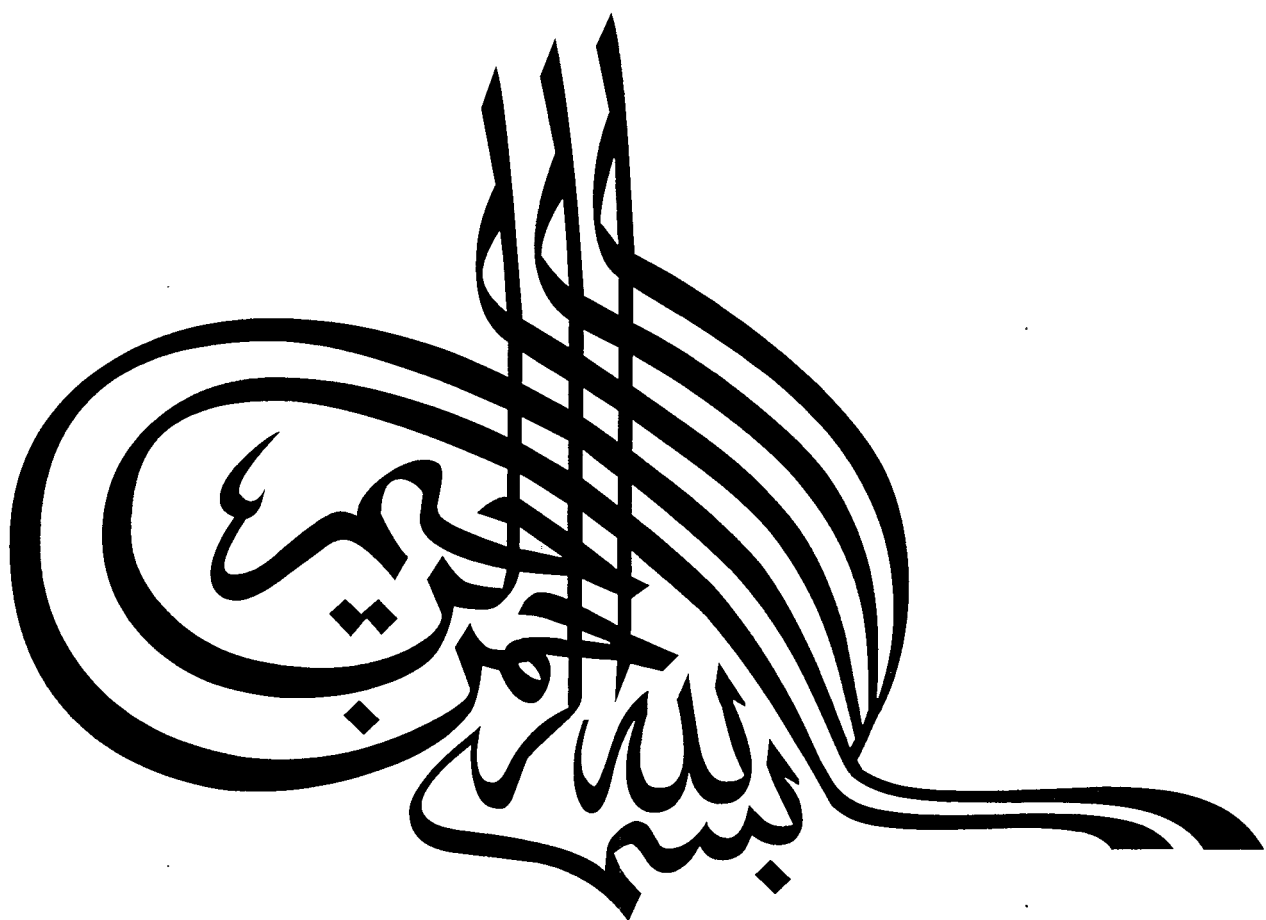
استاد راهنما:

دکتر حسین عشقی

نگارش:

مریم محمودی

شهریورماه ۱۳۸۴



من علمنی حرفا فقد صیرنی عبدا

با تشکر از استاد ارجمند جناب آقای دکتر حسین عشقی که بحق کار
علمی و اخلاق متعالی ایشان بر کسی پوشیده نیست و تمامی مراحل این
پروژه حاصل راهنماییهای ایشان می باشد .

تقدیم به

همسر ، پدر ، مادر و برادران مهربانم

که تمامی لحظات زندگی ام سرشار از محبت‌های بی دریغ آنهاست

با تشکر فراوان از خانمها فروغ طبسی ، زهرا حسینی ، عطیه اسلامیان ، سعیده معروف ، سهیلا دیانی ، سمیرا زند ، زهره رضایی ، راهله طوسی ، نجمه طوسی و آقایان علی مهاجر و مسعود مهربان بخاطر زحماتی که در به پایان رساندن این پایان نامه متحمل شدند .

چکیده

موضوع مورد بحث در رساله پیش رو، بررسی خواص الکتریکی و اپتیکی دیودهای نور گسیل III-V و بویژه III-N است. برای بررسی این LED ها از ترکیب های GaAs و GaN در هر دو ساختار همگون و ناهمگون به عنوان نمونه استفاده شده است. مشخصه جریان - ولتاژ ترکیب GaAs نشان می دهد که مکانیزم غالب در جریان های پایین، جریان بازترکیب بار فضایی و در جریانهای بالاتر، جریان پخشی است. مشخصه تابش - جریان نشان می دهد که در جریانهای پایین، تابش عمدتاً توسط بازترکیبات وابسته به ترازهای نقایص و در جریانهای بالاتر، توسط بازترکیبات نوار به نوار ایجاد می شود. بررسی مشخصه جریان - ولتاژ LED های GaN با ساختار همگون نشان می دهد که مکانیزم حاکم در حرکت حاملها در ولتاژهای پایین ($V < 2/5 V$) تونل زنی و در ولتاژهای بالاتر، جریان بازترکیب در ناحیه بار فضایی است. تجزیه و تحلیل مشخصه تابش - جریان این LED دلالت بر غالب بودن نقش جریانهای پخشی و بازترکیب در ناحیه بار فضایی در تابش است که در این بازه جریان ترازهای وابسته به نقایص اشباع شده اند و بازترکیبهای نوار به نوار غالب می شوند. در این نمونه بازده نسبی بر حسب جریان، بیشینه مقدار بازده در جریان 40 mA مشاهده می شود. با توجه به این اطلاعات انتظار می رود هر گاه ترازهای وابسته به نقایص در جریانهای کوچکتری اشباع شوند، در تبدیل توان ورودی الکتریکی به خروجی اپتیکی، بازدهی بالاتری به دست می آید. همچنین بررسی طیف گسیلی LED همگون در دماهای مختلف نشان می دهد که با افزایش دما، سازوکار بازترکیب از ترازهای وابسته به نقایص به بازترکیبهای نوار به نوار انتقال می یابد. همچنین با افزایش دما، شدت نیم - بیشینه طیف افزایش می یابد و این به معنی گستردگی طیف تابشی قطعه و دور شدن آن از شرایط تکفامی در دمای اتاق می شود. برای رفع این ایرادها غالباً از ساختارهای ناهمگون InGaN/AlGaIn/GaN در ساخت LED ها استفاده می شود. اختلاف درگاف نواری لایه های مجاور و پدیده حبس کوانتومی در این ساختارها به افزایش بازده دیود منجر می شود. بررسی مشخصه

جریان- ولتاژ دیود با ساختار ناهمگون حاکی از غالب بودن سازوکار تونل زنی در جابجایی حاملهاست که مسیر این تونل زنی ها با توجه به مشخصه شدت تابش بر حسب جریان در ولتاژهای کمتر از V و بالاتر از آن با یکدیگر متفاوت است . مشخصه بازده نسبی بر حسب جریان این LED ها حاکی از آن است که بیشینه بازدهی در حدود 3 mA اتفاق می افتد که در مقایسه با ساختار همگون ، در حدود یک مرتبه بزرگی کوچکتر است و این خود یکی از امتیازات LED های با ساختار ناهمگون بر ساختار همگون می باشد . با مقایسه مشخصه شدت تابش بر حسب جریان در LED های با ساختار ناهمگون GaN و GaAs و یکی بودن جریان اشباع وابسته به نقایص آنها، با توجه به اینکه چگالی نقایص ساختاری در GaN در حدود 10^{10} cm^{-2} در مقایسه با GaAs که در حدود 10^4 cm^{-2} می باشد، انتظار می رود نقایص ساختاری مربوط به GaN ماهیتی متفاوت در مقایسه با نقایص GaAs برخوردار باشد.

مقدمه

برای شناخت عملکرد LED ها که غالباً مبتنی بر بازترکیب الکترونها با ترازهای خالی می باشد، می توان از اندازه گیریهای جریان - ولتاژ، همچنین شدت تابش الکترولومینسانس بر حسب تابعی از جریان اعمالی و نیز بررسی طیف مزبور در دماها و جریان های مختلف استفاده کرد

فصل ۱ این رساله مروری بر پژوهشهایی که تا به حال در مورد ساخت دیودهای نور گسیل آبی با ساختارهای همگون و ناهمگون انجام شده است. در فصل ۲ به بررسی موادی می پردازیم که در ساخت قطعات LED ها مورد استفاده قرار می گیرند و در فصل ۳ به عملکرد و خواص الکتریکی و اپتیکی این قطعات می پردازیم . در فصول ۴ و ۵ داده های تجربی LED های GaN و GaAs مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و در پایان نتایج حاصل از این بررسیها جمع آوری شده است .

فهرست

۱	۱- مروری بر مقالات
۴	منابع فصل
۵	۲- مواد سازنده LED
۵	۲- ۱ ویژگی های مطلوب مواد سازنده دیود نوری
۶	۲- ۲ ترکیبات دو تایی
۶	GaAs ۱-۲-۲
۸	GaN ۲-۲-۲
۱۰	۲- ۳ ترکیبات سه تایی
۱۰	AlGaAs ۱-۳-۲
۱۲	InGaN ۲-۳-۲
۱۴	منابع فصل
۱۵	۳- عملگری دیودهای نور گسیل
۱۵	۳- ۱ پیوندگاه pn
۱۶	۳-۱-۱ پیوندگاه در حالت مدار باز
۱۸	۳- ۱- ۲ پیوندگاه با اعمال پیش ولت موافق
۱۹	۳- ۱- ۳ پیوندگاه با اعمال پیش ولت مخالف
۲۰	۳- ۱- ۴ پیوند گاه های همگون و نا همگون

- ۲۳ ۲-۳ خواص الکتریکی دیود نور گسیل
- ۲۳ ۱-۲-۳ جریان پخشی
- ۲۴ ۲-۲-۳ جریان بازترکیبی بار فضایی
- ۲۵ ۳-۲-۳ جریان تونل زنی
- ۲۷ ۴-۲-۳ وابستگی دمایی مشخصه جریان - ولتاژ
- ۲۸ ۵-۲-۳ وابستگی شدت کلی تابش به جریان اعمالی
- ۲۸ ۳-۳ خواص اپتیکی دیود نور گسیل
- ۲۸ ۱-۳-۳ سازوکارهای بازترکیبی در دیود نور گسیل
- ۲۹ ۲-۳-۳ سازوکار بازترکیب تابشی
- ۳۱ ۳-۳-۳ تئوری بازترکیب غیر تابشی
- ۳۲ ۴-۳-۳ عوامل مؤثر بر بازترکیب
- ۳۴ ۵-۳-۳ طیف تابشی
- ۳۶ ۴-۳ بازده دیود نور گسیل
- ۳۶ ۱-۴-۳ بازده تزریقی
- ۳۷ ۲-۴-۳ بازده کوانتومی داخلی
- ۳۷ ۳-۴-۳ بازده کوانتومی خارجی
- ۳۹ منابع فصل

۴- بررسی دیود های نور گسیل GaAs و تجزیه و تحلیل داده ها

- ۴۰ ۱-۴ دیود های نور گسیل GaAs
- ۴۰ ۱-۱-۴ دیود نور گسیل با ساختار همگون GaAs

۴۳	۴-۱-۲ دیود نور گسیل با ساختار ناهمگون
۴۸	منابع فصل
۴۹	۵- بررسی دیود های نور گسیل GaN و تجزیه و تحلیل داده ها
۴۹	۵-۱- دیودهای با ساختار همگون
۴۹	۵-۱-۱- ساختار دیود
۵۲	۵-۱-۲ مشخصه جریان - ولتاژ
۵۳	۵-۱-۳ مشخصه شدت لومینسانس - جریان
۵۴	۵-۱-۴ بازده دیود
۵۵	۵-۱-۵ طیف گسیلی
۵۸	۵-۲ دیود های با ساختار ناهمگون
۵۹	۵-۲-۱ ساختار دیود
۶۰	۵-۲-۲ مشخصه جریان - ولتاژ
۶۲	۵-۲-۳ مشخصه شدت لومینسانس - جریان
۶۴	۵-۲-۴ بازده دیود
۶۵	۴-۳-۵ طیف گسیلی
۶۹	منابع فصل
۷۰	نتیجه گیری

فصل ۱

مروری بر مقالات

آنچه که در پی می آید ، مروری کوتاه بر تاریخچه و پژوهش های انجام شده بر دیود های نورگسیل GaN می باشد . ترکیب GaN بیش از ۷۰ سال پیش توسط جانسون و همکارانش [۱] در سال ۱۹۳۲ با عبور دادن آمونیاک از روی گالیم داغ به دست آمد . در این روش GaN به صورت میله ای تولید می شد . جوزا و همکارش [۲] نیز ساختار بلوری و ثابت شبکه GaN را مورد بررسی قرار دادند . دو دهه بعد ، گرمیس و همکارانش [۳] در سال ۱۹۵۹ همان روش را برای تولید بلورهای کوچک GaN ، به منظور اندازه گیری طیف لومینسانس استفاده کردند . در سال ۱۹۶۹ ، ماروسکا و همکارش [۴] روش انتقال بخار کلراید را برای ساخت لایه ای از GaN روی بستر sapphire به کار بردند . تمام GaN های ساخته شده تا آن زمان با وجود هیچگونه آلایش خواسته ، دارای رسانندگی نوع n بود . تحقیقات ماروسکا منجر به فعال شدن آزمایشگاه ها در این زمینه شد ، بویژه هنگامی که اولین دیود نوری آبی بوسیله آلاینده Zn در GaN در سال ۱۹۷۲ به دست آمد [۵] . این دیود بسته به تراکم Zn می توانست رنگهای آبی ، سبز ، زرد و قرمز را از خود گسیل کند . ماروسکا و همکارانش [۶] در سال ۱۹۷۳ برای اولین بار از آلایش Mg برای تابش بنفش در این دیودها استفاده کردند .

ساخت LED بسیار درخشنده ای گزارش شد که ساختار آن چاه کوانتومی یگانه InGaN / GaN بود و به طرز شگفت آوری بازده و خلوص رنگ دیودهای نوری آبی را افزایش داد [۱۳].

- 1- W. C. Johnson, J. B. Parsons, M. C. Crew, journal of physics chemistry, **234**, 2651(1932)
- 2- R. Juza, E. Hahn, Z. Anorg. Allgem. Chem, **234**, 282(1938)
- 3- H. Grimmeiss, H. Koelmans: Z. Naturfg, **14a**, 264(1959)
- 4- H. P. Maruska, J. J. Tietjen: journal of Applied Physics Letter, **15**, 367(1969)
- 5- J.I. Pankove, E. A. Miller J . E. Berkeyheiser : journal of Luminescence, **5**, 84(1972)
- 6- H. P. Maruska, D. A.stevenson, J. I. Pankove: journal of Applied Physics Letter, **22**, 303(1973)
- 7- I . Akasaki, T. Kozowa, K. Hiramatsu, N. Sawak, K.Ikeda, Y. Ishii, Journal of Luminescence, **40**, 121 (1988)
- 8- H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, I. Akasaki: Jpn. journal of Applied Physics, **28**, L2112(1989)
- 9- J. A. Van Vechten, J. D. Zook, R. D. Horning: journal of Applied Physics, **31**, 3662(1962)
- 10- S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh: journal of Applied Physics, **30**, L1998(1991)
- 11- H. Amano et al, journal of Applied Physics Letter, **48**, 353(1986)
- 12- S.Nakamura, T. Mukai, journal of Applied Physics Letter, **64**, 1687 (1994)
- 13- Daniel. Steigerwald,journal of material, **49**, 18 (1997)

فصل ۲

مواد سازنده LED ها

۱-۲ ویژگی های مطلوب مواد سازنده دیود نوری

موادی که در ساخت دیودهای نوری به کار می روند ، باید دارای سه ویژگی باشند . اول اینکه ، گاف نواری ماده نیمرسانا با انرژی فوتون مورد نیاز برابر باشد . اگر تابش گسیل شده با طول موج λ و گاف نواری ماده با E_g نشان داده شود ، با استفاده از رابطه

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-2)$$

می توان ماده مورد نیاز را برای تابش طول موج دلخواه انتخاب کرد . دومین شرط لازم این است که ماده باید دارای سازوکار بازترکیب تابشی باشد. در مواد با گاف غیر مستقیم ، احتمال بازترکیب تابشی بسیار کم است بنابراین مواد با گاف نواری مستقیم مهمترین گزینه برای ساخت LED ها می باشند . سومین شرط این است که ماده مورد نظر قابلیت آرایش برای ایجاد رسانندگی از نوع n و p را داشته باشد . این شرط برای ساخت پیوندگاه p-n ، که یکی از بخش های اصلی دیود های نوری است ، لازم و ضروری می باشد .

مواد نیمرساناهایی که در LED ها استفاده می شوند ، می توانند از ترکیب دو ، سه و یا چهار عنصر ساخته شوند . در ادامه بحث خود در مورد ترکیبات دوتایی به دیودهای نوری ساخته شده از GaAs و GaN و در ترکیبات سه تایی به نیمرساناهای آلیاژی AlGaAs و InGaN می پردازیم .

۲-۲ ترکیبات دوتایی

GaAs ۱-۲-۲

GaAs دارای گاف انرژی مستقیم $E_g = 1.42 \text{ eV}$ (متناظرا طول موج 860 nm) در دمای اتاق است، که بزرگترین گاف مستقیم، به غیر از ترکیبات نیتریدی، را در بین ترکیبات III - V داراست [۱]. انرژی این گاف منجر به تولید فوتون هایی با نور فرو سرخ می شود. از آزمایشات تجربی مشاهده شده است که گاف نواری این ترکیبات با افزایش دما کاهش می یابد. این بستگی دمایی را می توان چنین نوشت [۵]:

$$E_g = E_g(0) - \alpha T^2 / (T + \beta) \quad (۲-۲)$$

که در آن $E_g(0)$ مقدار گاف نواری در صفر مطلق، α ثابت تناسب و β تقریبا برابر دمای دمای است. این رابطه برای GaAs به صورت زیر در می آید [۱۰]:

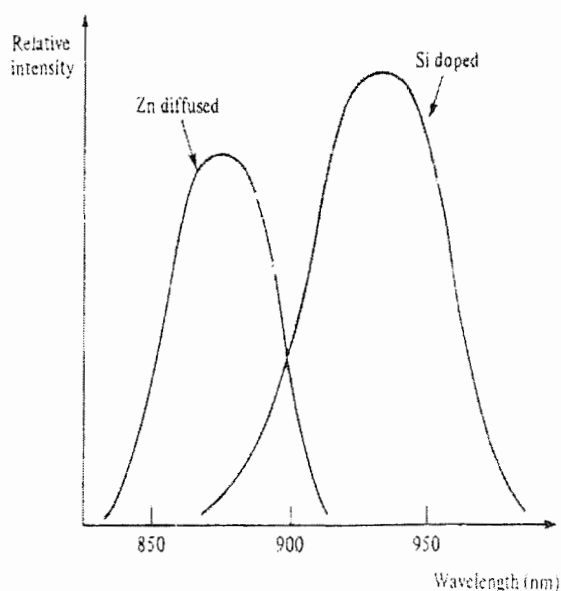
$$E_g(T) = 1.52 - \frac{5.8 \times 10^{-4} T^2}{T + 300} \quad (۳-۲)$$

برای ایجاد رسانندگی در GaAs از آلاینده هایی مانند Si و Zn استفاده می شود. برای آشنایی بیشتر به ترتیب این آلاینده ها را بررسی می کنیم:

نکته قابل توجه در مورد ناخالصی Si این است که چنانچه این عنصر در دمای رشد بیش از 820°C به صورت آلاینده وارد شود در ماده ایجاد رسانندگی نوع n و چنانچه در دمای پایین تر از آن استفاده شود، به صورت آلاینده نوع p عمل می کند. علت این امر ناشی از جایگزینی Si در جایگاه شبکه ای Ga و یا As است. بنابراین با کنترل دما در حین رشد می توان پیوند گاه p-n را ایجاد کرد. از آنجا که، در دماهای پایین، فرایند باز ترکیب غالب ما بین ترازهای دهنده و پذیرنده اتفاق می افتد. بلور نسبت به نور تولید شده کاملا شفاف بوده و در نتیجه بازده خارجی بالایی به دست می دهد [۲]. لازم به ذکر است که ناخالصی Si، باعث ایجاد ترازهایی بالای نوار ظرفیت می شود و بنابراین در دمای اتاق تابش از انتقال بین نوار رسانش و ترازهای پذیرنده ایجاد می شود. طول موج قله انتقال بین 910 nm

و 1020 nm قرار می گیرد. این تابش انرژی کافی برای فراهم سازی گذار نوار به نوار ندارد و بنابراین پدیده باز جذب کاهش می یابد. در این دیود ها می توان بازده کوانتومی خارجی بیش از ۱۰ درصد به دست آورد [۳].

در GaAs آلییده با Zn، از آنجایی که باز ترکیب الکترونها و حفره ها، فوتونهایی با انرژی بسیار نزدیک به گاف نواری GaAs تولید می کند، جذب داخلی افزایش می یابد. بنابراین پیوندگاه باید تا حد امکان کم عمق باشد. اما از طرف دیگر، پیوندگاه کم عمق باعث افزایش باز ترکیبات غیر تابشی سطحی می شود. به همین دلیل، توان خروجی این دیود ها پایین است. شکل ۱-۲ طیف تابشی این دیود با هر دو نوع آلیش را نشان می دهد:



شکل ۱-۲ طیف خروجی دیود نوری GaAs با آلیش های Zn و Si. [۳]

قله ایجاد شده به وسیله آلیش Si ناشی از فرایند باز ترکیب بین ترازهای دهنده و پذیرنده است. بنابراین گسیل ایجاد شده دارای انرژی کمتر از گاف نواری GaAs است و دچار جذب داخلی نمی شود و این به بهبود بازده LED کمک می کند. اما در Zn: GaAs چون تابش ناشی از انتقالات نوار به

نوار است جذب داخلی افزایش می یابد . در این حالت، برای کاهش باز- جذب ، پیوندگاه را نزدیک سطح دیود قرار می دهند و این باعث افزایش بازترکیبات غیر تابشی سطحی می شود . بنابراین شدت گسیل این دیود ها کمتر از دیود GaAs آلاینده با Si است.

جدول ۱-۲ مقایسه ای بین GaAs با دو آلیش متفاوت Zn و Si را ارائه می دهد :

جدول ۱-۲ مقایسه ترکیبات GaAs با دو آلیش مختلف [۱] .

	GaAs :Zn	GaAs :Si
طول موج (nm)	900	940
بازده کوانتومی خارجی	3-4 %	9-14 %
توان خروجی در جریان $50mA$ (μW)	2-3	6-9
بستر	GaAs	GaAs
ساختار قطعه	همگن	همگن

GaN ۲-۲-۲

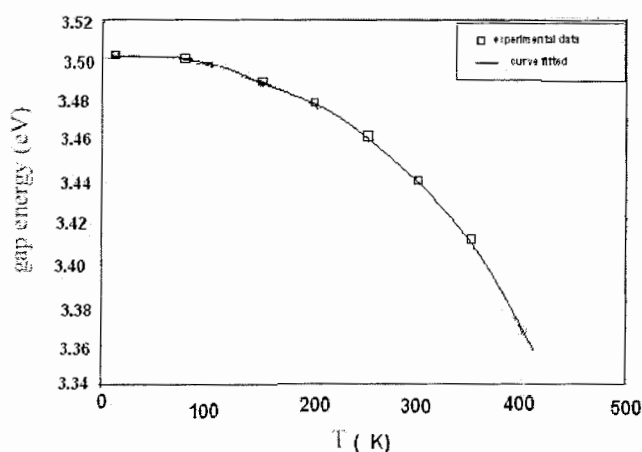
GaN دارای گاف نواری مستقیم با انرژی $3/4 eV$ (متناظر با طول موج $365 nm$) در دمای اتاق است که برای LED های آبی مناسب است. اندازه گیری گاف نواری GaN را گروههای زیادی انجام داده- اند و اندازه گیری های مونمار [۴] به عنوان معتبر ترین داده ها شناخته شده است . مونمار داده

هایش را از نمونه فیلم برآرستی GaN که روی sapphire رشد داده شده بود ، به دست آورده و در دماهای مختلف آن را بررسی کرده است . بررسی ها نشان می داد که با افزایش دما ، E_g کاهش می یابد .

$$E_g(T) = 3.556 - \frac{9.9 \times 10^{-4} \times T^2}{T + 600} \quad (4-2)$$

شکل ۲-۲ مقادیر تجربی بستگی دمایی گاف نواری را که با رابطه (۴-۲) منطبق شده ، نشان می

دهد :



شکل ۲-۲ تغییرات دمایی گاف نواری برای GaN . داده های تجربی از [۵] .

به علت وجود جاهای خالی اتمهای نیتروژن در شبکه GaN ، این بلور ، در حالی که هیچ گونه آلاینش بخصوصی به کار گرفته نشود ، دارای رسانش نوع n می باشد [۲] . و به همین دلیل ایجاد GaN نوع p با کیفیت عالی سخت است . برای تهیه رسانش نوع p ، از عناصر گروه II و IV مانند Mg و Zn استفاده می شود . Mg یک تراز پذیرنده عمیق در حدود ۵۵۰ meV بالای نوار ظرفیت به وجود می آورد . ناخالصی Zn نیز ترازهای پذیرنده ای در گاف نواری GaN ایجاد می کند که دارای انرژی

فعالسازی 330 meV می باشد. برای افزایش چگالی الکترون های آزاد نیز می توان از آلاینده Si و Ge استفاده کرد. Ge با جایگزین شدن در مکان های اتم Ga می تواند نقش ناخالصی دهنده را ایفا کند. انرژی فعالسازی تراز Si حدود 27 meV است [۶] و با افزایش چگالی ترازهای آلاینده، کاهش می یابد [۲].

فقدان بستر مناسب یکی دیگر از عواملی است که رشد GaN را با مشکل مواجه کرده است. بستری که غالباً برای ساخت دیود GaN بکار می رود، sapphire است که در گستره مرئی شفاف است و بنابراین بازده خارجی LED را افزایش می دهد. اما این ماده از نظر ساختاری و گرمایی با شبکه GaN جور نبوده و باعث ایجاد چگالی نقایص در لایه رشد داده شده می شود. بسترهای دیگری که در حال بررسی است SiC، MgO و ZnO هستند. جور نشدگی شبکه ای بین sapphire و GaN حدود ۱۵٪ است در حالی که این جور نشدگی برای ZnO و MgO حدود ۴٪ است. البته می توان از تک بلور GaN نیز به عنوان بستر استفاده کرد. در این صورت به علت جور شدگی مطلوب بین بستر و لایه برآرستی چگالی نقایص تا حدود زیادی کاهش می یابد [۷].

۲-۳ ترکیبات سه تایی

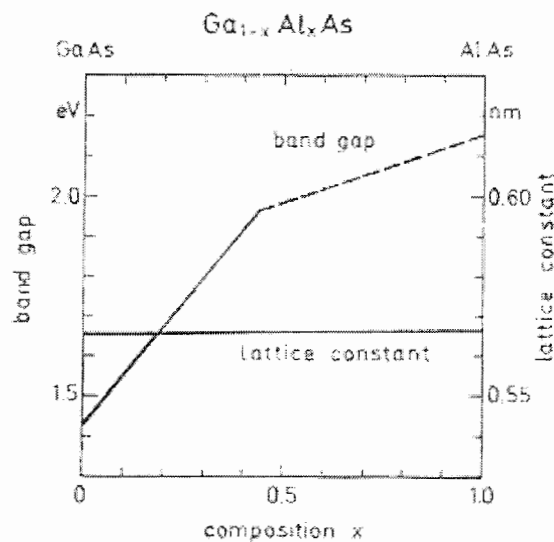
AlGaAs ۱-۳-۲

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ یکی از ترکیبات سه تایی است که قابل استفاده در دیود های نوری می باشد و از ترکیب دو نیمرسانای GaAs با گاف مستقیم 1.42 eV و AlAs با گاف نواری غیر مستقیم 1.5 eV به دست می آید. از ویژگی های بارز $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ، تغییر گاف نواری از مستقیم به غیر مستقیم بر حسب مقدار x ، در بازه $x=0$ تا $x=1$ می باشد. گاف نواری تا $x = 0.44$ ($E_g = 1.96 \text{ eV}$) مستقیم و بعد از آن غیر مستقیم است [۷]. بنابراین گاف نواری این نیمرسانا طبق قانون وگارد از

رابطه

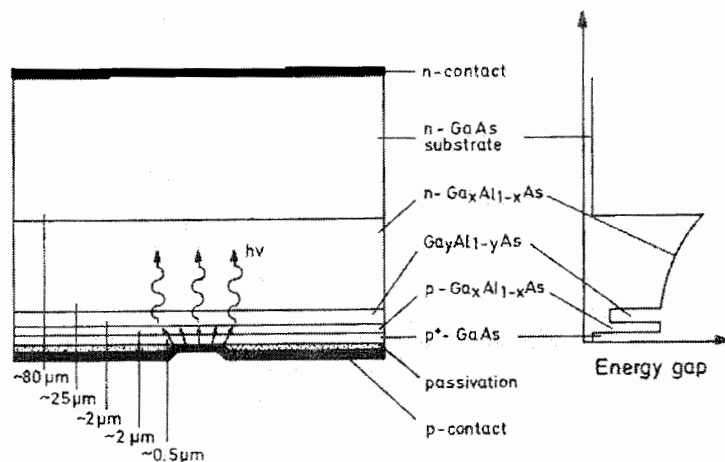
$$E_g(\text{AlGaAs}) = 2.15x + 1.42(1-x) - bx(x-1) \quad (5)$$

پیروی می کند . b پارامتر خمش است و طبق آخرین تحقیقات آنجرر و همکارانش [۷] حدود 3 ± 0.1 eV می باشد . شکل ۲-۳ تغییرات گاف نواری را به همراه ثابت شبکه نشان می دهد . در این شکل ناحیه خط چین نشانگر محدوده ای است که گاف نواری به صورت غیر مستقیم است .



شکل ۲-۳ بستگی گاف نواری $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ به مقدار x [۷] .

یک ویژگی مهم $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ، همان طور که در شکل پیداست ، مستقل بودن ثابت شبکه از مقدار x است . این خصوصیت ، رشد برآراستی ترکیب را آسان کرده و شرایط را برای رشد بلور بر روی بستر GaAs ، به منظور ساخت دیود های نوری با ساختار ناهمگون مساعد می کند [۷] . شکل ۲-۴ ترتیب لایه ها و گاف نواری در لایه های مختلف یک دیود نوری $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ با ساختار ناهمگون دو گانه را نشان می دهد . نمودار سمت راست این شکل، تغییرات گاف نواری را در لایه های مختلف نشان می دهد .



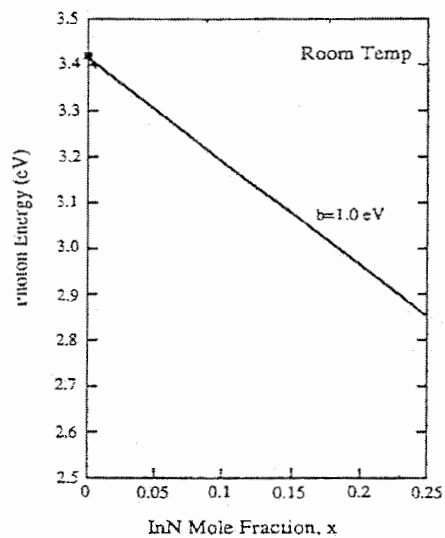
شکل ۲-۴ ساختار ناهمگون $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ و ترتیب گاف نواری لایه ها. [۱]

InGaN ۲-۳-۲

یکی دیگر از ترکیبات سه تایی که به عنوان لایه فعال در LED های چاه کوانتومی بسیار استفاده می شود InGaN است که از ترکیب GaN با گاف مستقیم $3/4 \text{ eV}$ و InN با گاف مستقیم $0/7 \text{ eV}$ [۸] به دست می آید. لازم به ذکر است در مورد گاف نواری InN گستره وسیعی تا حدود 2 eV گزارش شده است. به همین دلیل اطلاع از مقدار دقیق این کمیت نیاز به تحقیق بیشتر دارد. با در نظر گرفتن مقدار اخیر برای InN می توان انتظار داشت گاف نواری آلیاژ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ از رابطه زیر پیروی کند:

$$E_g(x) = 0.7x + 3.4(1-x) - bx(1-x) \quad (۶-۲)$$

برای b ناکامورا [۹] عدد 1 eV را گزارش کرده است. شکل ۲-۵ تغییرات گاف نواری این ماده را گزارش شده است نشان می دهد [۶].



شکل ۲-۵ بستگی گاف نواری $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ به مقدار x [۶].

با توجه به کوچکتر بودن گاف نواری $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ نسبت به GaN این ماده ای مناسب به عنوان لایه فعال چاه کوانتومی در ساختار ناهمگون $\text{GaN}/\text{InGaN}/\text{GaN}$ بشمار می آید که سبب افزایش بازده در LED های ساختار ناهمگون شود. استفاده از این ساختار در فصل ۵ مورد بحث قرار گرفته است.

- 1- K. Gillsson, W. Schairer, *Light Emitting Diodes* (Prentice – Hall international series inoptoelectronics 1987)
- 2- M. George Craford, Frank M. Steranka, *Journal of Applied Physics*, **8** (1994), 485
- 3- Wilson, Hawkas, *Optoelectronics An Introduction* (Prentice – Hall international series 1979)
- 4- O. Lagerstedt. B. Monemar, *Physical Review*, **19**, 3064 (1979)
- 5- Ching Hua Su, W. Halasz, S. L. Lenhook, *Crystal Growth*, **235**, 111(2002)
- 6- H. Markoc, *Nitride Semiconductor and Devices*, (Springer 1998)
- 7- S. C. jain, M. Willander, *Journal of Applied Physics*, **87**, 965 (2000)
- 8- J. Wu. W. Walukiewicz, *Physical Review. B*, **10**, 676
- 9- S. Nakamura, T. Mukai, *Journal Vaccum society of Technology A*, **13**, 6844 (1995)
- 10- C. M. Wolfe, N. Holonakjr, G. E. Stillman, *Physical Properties Of Semiconductor* (Prentice – Hall international series, 1989)

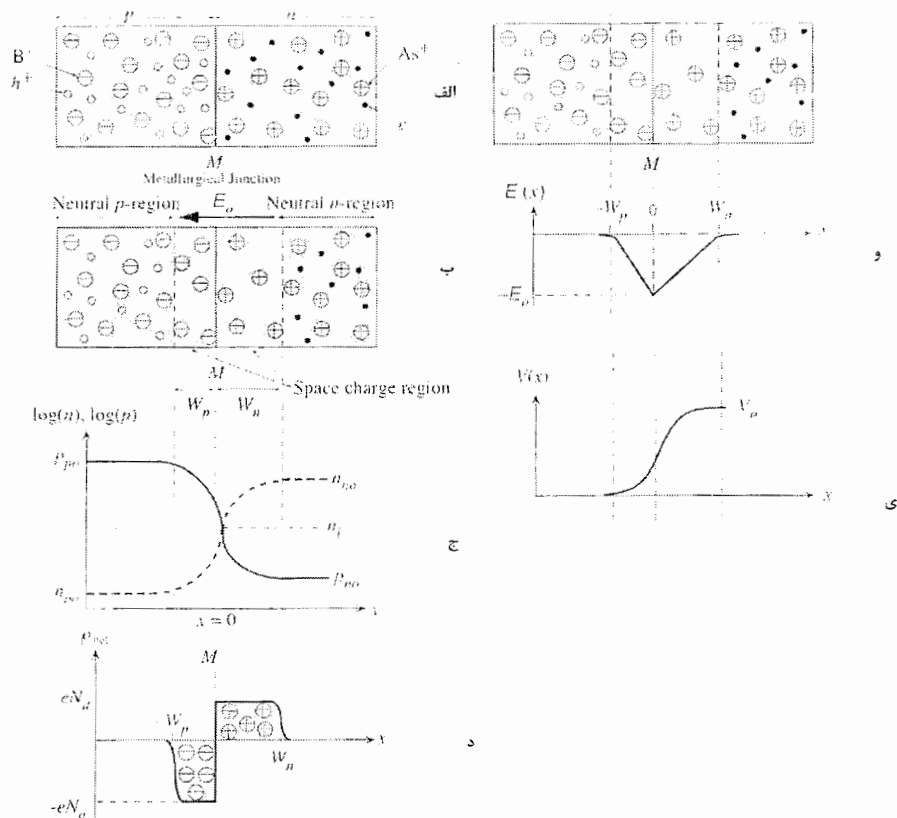
بارزترین ویژگی های مورد نظر در دیودهای نور گسیل تبدیل انرژی الکتریکی ورودی به اپتیکی خروجی با بیشترین کارایی است. با مطالعه خواص الکتریکی و اپتیکی این قطعات و بررسی سازوکارهای حاکم بر آن می توان LED های بسیار درخشنده، با بازدهی بالا تولید کرد. از آنجا که این قطعه اصولاً یک اتصال p-n تشکیل شده از نیمرساناهای یکسان (پیوندگاه همگون) و یا متفاوت (پیوندگاه ناهمگون) است، در این فصل نخست به بررسی خواص الکتریکی پیوندگاه p-n در شرایط اعمال بایاس به آن و جریانهای ناشی از جابجایی حاملها در پیوندگاه پرداخته و سپس به بررسی خواص اپتیکی شامل باز ترکیب حاملها، طیف تابشی و بازده این نوع دیودها خواهیم پرداخت.

۳-۱ پیوند گاه p-n

اساس کار دیودهای نور گسیل، پیوندگاه p-n و فرایندهای حاکم در آن در شرایط بایاس مستقیم است. با اعمال ولتاژ به پیوندگاه، فرایند باز ترکیب در سازوکارهای گوناگون آغاز شده که قسمتی از آنها به تابش می انجامد. برای افزایش بازدهی دیود نور گسیل باید ساختار پیوندگاه را بهینه کرد و به همین جهت ساختارهای متعددی برای آن طراحی شده است. در این بخش به بررسی پیوند گاه و ساختارهای مختلف آن می پردازیم.

۳-۱-۱ پیوندگاه در شرایط تعادل گرمایی

هنگامی که مواد نوع n و p قبل از تشکیل پیوندگاه، از نظر فیزیکی از هم جدا هستند، تراز فرمی در ماده نوع n نزدیک به لبه نوار رسانش، و در ماده نوع p نزدیک به لبه نوار ظرفیت است. وقتی این مواد در شرایط تعادل گرمایی به هم متصل می شوند، به علت گرادیان تراکم، حفره ها از سمت p (که در آن $p = p_{p0}$) به سمت n و الکترونها از سوی n به طرف ناحیه p پخش می شوند و باز ترکیب صورت می گیرد. بدین ترتیب در دو سوی پیوندگاه در ناحیه باریکی، که بستگی به میزان آرایش نواحی n و p دارد، حامل آزادی وجود نخواهد داشت. در عوض در این ناحیه تنها اتمهای ناخالصیها به صورت یونیده باقی می مانند که به آن ناحیه بار فضایی و یا ناحیه تهی گفته می شود. شکل ۳-۱) الف) وضعیت توزیع فضایی حاملهای آزاد قبل از اتصال و شکل (ب) پس از اتصال را نشان می دهد. شکلهای (ج)، (د)، (و) و (ی) بترتیب تغییرات چگالی حاملهای آزاد، توزیع بار فضایی، میدان الکتریکی و تغییرات پتانسیل الکتریکی را در طول قطعه نمایش می دهد.



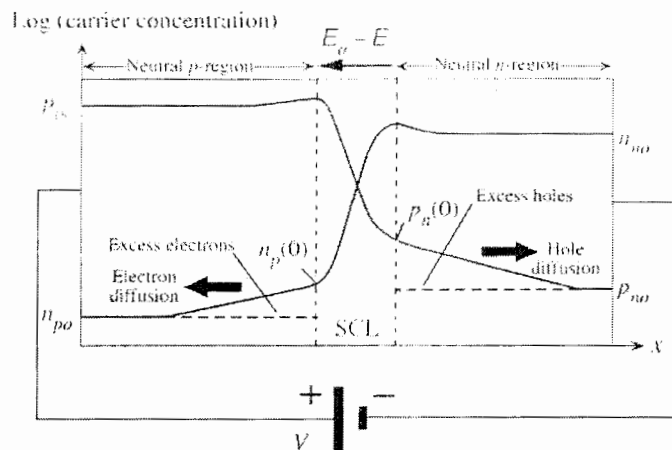
شکل ۳-۱ پیوند گاه p-n در شرایط تعادل گرمایی ، توضیحات در متن آمده است [۱] .

بر اثر بازترکیب الکترونها و حفره ها در دو سوی پیوندگاه ، در ناحیه بار فضایی ، یک میدان الکتریکی داخلی (E_0) ایجاد می شود . وجود این میدان ، پس از رسیدن سیستم حاملها به شرایط تعادل ، از ادامه عمل پخش حاملها جلوگیری کرده در نتیجه تهی لایه مرزهایی در مکانهای W_p و W_n پیدا می کند . از آنجا که همواره بایستی شرایط خنثایی بار برقرار بماند ، در این شرایط داریم :

$$N_a W_p = N_p W_n \quad (1-3)$$

که در آن N_p و N_a به ترتیب چگالی یونهای دهنده و پذیرنده می باشد . علاوه بر این ، بخاطر وجود میدان الکتریکی در این ناحیه یک اختلاف پتانسیل داخلی (V_0) در دو سوی پیوندگاه ایجاد می شود . ارتفاع این پتانسیل بیانگر انرژی مورد نیاز برای پخش بیشتر حامل ها از نواحی خنثی است .

۳-۱-۲ پیوندگاه با اعمال بایاس مستقیم



شکل ۳-۲ پیوند گاه p-n با اعمال بایاس مستقیم و تزریق حامل های اقلیت [۱] .

با اعمال ولتاژ خارجی مستقیم (V) در عرض پیوند گاه p-n ، میدان ایجاد شده توسط منبع تغذیه ارتفاع سد پتانسیل را به اندازه eV کاهش می دهد . در این شرایط ، احتمال اینکه الکترون ها و حفره ها بتوانند از آن عبور کنند متناسب با $\exp[-e(V_0-V)/kT]$ افزایش می یابد . در این صورت تراکم حاملهای اقلیت تزریقی به مرزهای ناحیه خنثی n ، $p_n(0)$ ، و ناحیه خنثی p ، $n_p(0)$ ، نسبت به مقادیر حالت تعادل گرمایی شان (n_{p0} و p_{n0}) به صورت نمایی با ولتاژ تغییر می کند [۱] :

$$p_n(0) = p_{n0} \exp\left[\frac{e(V)}{kT}\right] \quad (۲-۳)$$

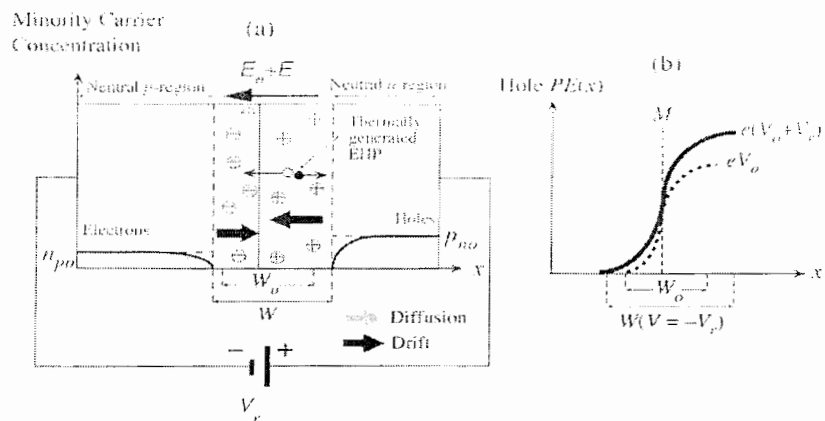
$$n_p(0) = n_{p0} \exp\left[\frac{eV}{kT}\right] \quad (۳-۳)$$

حاملهای تزریقی در نواحی خنثی بر اثر باز ترکیب با حاملهای اکثریت این ناحیه به صورت نمایی کاهش می یابند . این کاهش تراکم حاملها از طریق تزریق حامل ها توسط منبع ولتاژ خارجی تامین

می گردد. این جریان ها که توسط پخش حامل های اقلیت ایجاد می شود به جریانهای پخشی موسوم است که در بخش ۲-۳ به آنها پرداخته شده است.

۳-۱-۳ پیوندگاه با اعمال بایاس مخالف

اگر سر منفی باتری را به ناحیه p و سر مثبت را به ناحیه n متصل کنیم، یک بایاس معکوس به پیوندگاه اعمال می شود. سر منفی باتری باعث می شود حفره ها در ناحیه p از پیوندگاه دور می شوند و بنابراین W_p افزایش می یابد. به طور مشابه، سر مثبت باتری الکترونهای ناحیه n را جذب کرده و W_n را افزایش می دهد. میدان الکتریکی ناشی از اعمال بایاس معکوس در جهت میدان داخلی تهی لایه E_0 ، است و آن را تقویت می کند. بنابراین ارتفاع سد پتانسیل در عرض لایه فضایی افزایش یافته و مقدار آن به $V_0 + V_r$ می رسد. در این صورت، بزرگی جریان پخشی بسیار کوچک خواهد شد. در این شرایط کسر ناچیزی از حاملهای اقلیت نواحی n و p که بتوانند خود را به تهی لایه برسانند، می توانند تحت تاثیر میدان داخلی به سمت مقابل رفته و جریان کوچک سوق I_0 را به وجود آورند.



شکل ۳-۳ پیوندگاه p-n با اعمال بایاس مخالف و تزریق حامل های اقلیت [۱].

مقدار I_0 به نوع ماده وابسته است و هیچ وابستگی نسبت به ولتاژ ندارد و از رابطه زیر به دست می

آید [۲]:

$$I_0 = \left(\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \right) A \quad (4-3)$$

که در آن D ثابت پخش، L طول پخش و A سطح مقطع دیود است. علاوه بر جریان اشباعی یاد شده، تولید گرمایی جفت الکترون - حفره، EHP، در ناحیه بار فضایی، که در شکل ۳-۳ نشان داده شده است، نیز می تواند در جریان معکوس سهم داشته باشد. میدان داخلی این ناحیه الکترونها و حفره های تولید شده را از هم جدا کرده و آنها را به سمت نواحی خنثی n و p می راند. این به یک جریان اضافی علاوه بر جریان معکوس ناشی از پخش حامل ها منجر می شود. جریان تولیدی از رابطه:

$$I_{gen} = \frac{eVn_i}{\tau_g} A \quad (5-3)$$

به دست می آید که در آن τ_g ، زمان میانگین تولید جفت الکترون - حفره، A سطح مقطع، V ولتاژ اعمالی و n_i تراکم حامل های ذاتی می باشد [۱].

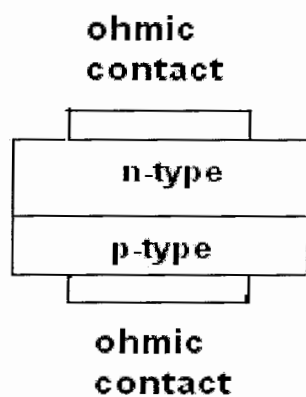
بایاس معکوس عرض تهی گاه و در نتیجه I_{gen} را افزایش می دهد. جریان معکوس کل با صرف نظر از جریان پخشی از مجموع مولفه های سوق و تولیدی به دست می آید [۱]:

$$I_{rev} = \left(\frac{eD_p}{L_p N_d} + \frac{eD_n}{L_n N_a} \right) n_i^2 A + \frac{eWn_i}{\tau_g} A \quad (6-3)$$

۳-۱-۴ پیوند گاه های همگون و نا همگون

پیوند گاه همگون: هرگاه نواحی n و p پیوند گاه از یک نوع ماده نیم رسانا (E_g) هر دو ناحیه یکسان باشد) با آرایش های متفاوت ساخته شده باشد، آن را پیوند گاه همگون می نامند (شکل ۴-۳). ساخت این نوع پیوند گاه می تواند با تغییر نوع آرایش ماده در طی فرایند رشد صورت گیرد. اما مشکلی که این نوع پیوند گاه با آن مواجه است، وجود دو شرط مخالف یکدیگر است. پیوند گاه باید حتی الامکان نازک و نزدیک به سطح باشد. این سبب می شود فوتون های تولید

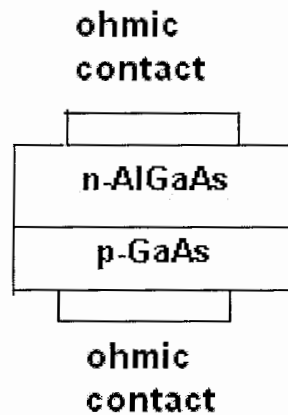
شده دچار باز جذب نشده و بتوانند با کمترین اتلاف از سطح دیود خارج شوند . اما با نزدیک شدن پیوند گاه به سطح ، احتمال این که تعدادی از حامل ها بتوانند خود را به سطح برسانند و با نقایص بلوری سطحی، که مراکز بازترکیب غیر تابشی هستند ، بازترکیب شوند، افزایش می یابد . این فرایندها به کاهش توان و در نتیجه کاهش تابش خروجی می شود . محدودیت های پیوند گاه های همگون با ساخت ساختارهای ناهمگون برطرف می شود .



شکل ۳-۴ طرحی از ساختار پیوند گاه همگون .

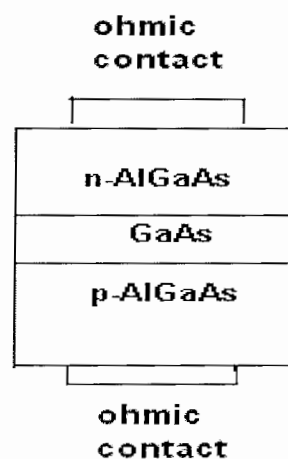
پیوندگاه ناهمگون: برای تهیه پیوندگاههای ناهمگون دو حالت امکان پذیر است ، پیوندگاه ناهمگون یگانه و پیوندگاه ناهمگون دوگانه . در ادامه به بررسی این دو نوع ساختار می پردازیم .

الف) پیوند گاه نا همگون یگانه : این نوع پیوند گاه از دو نوع ماده با گاف نواری متفاوت ساخته می شود . در این ساختار لایه ها می توانند به اندازه کافی ضخیم باشند تا جریان پخشی به خوبی توزیع شده و بازترکیب سطحی به حداقل برسد . شکل ۳-۵ ساختار ناهمگون یگانه GaAs/AlGaAs را نشان می دهد . از مزایای این ساختار این است که بخشی از تابش که به سمت بالا گسیل می شوند جذب نمی گردد لکن قسمتی که به طرف پایین هدایت می شود ، توسط لایه زیرین جذب شده و بازدهی قطعه را کاهش می دهد .



شکل ۳-۵ طرحی از پیوندگاه با ساختار ناهمگون یگانه .

(ب) پیوند گاه با ساختار ناهمگون دوگانه (چاه کوانتومی) : این ساختار دارای بالاترین بازدهی بوده و در آن لایه فعال (با گاف انرژی کوچک) بین دو لایه با گاف نواری بزرگتر ساندویچ می شود. این ساختار علاوه بر این که مزایای ساختار ناهمگون یگانه را دارد ، جذب تابش گسیل شده به سمت پایین را نیز کاهش می دهد . لایه فعال ، نازکتر از لایه های مجاور است . حبس حامل ها (carrier confinement) در ناحیه فعال به بازترکیبهای سریع تر منجر می شود . تنها اشکال این ساختار مشکل بودن رشد آن است . شکل ۳-۶ یک ساختار ناهمگون دو گانه با نیمرساناهای AlGaAs/GaAs/AlGaAs را نشان می دهد .



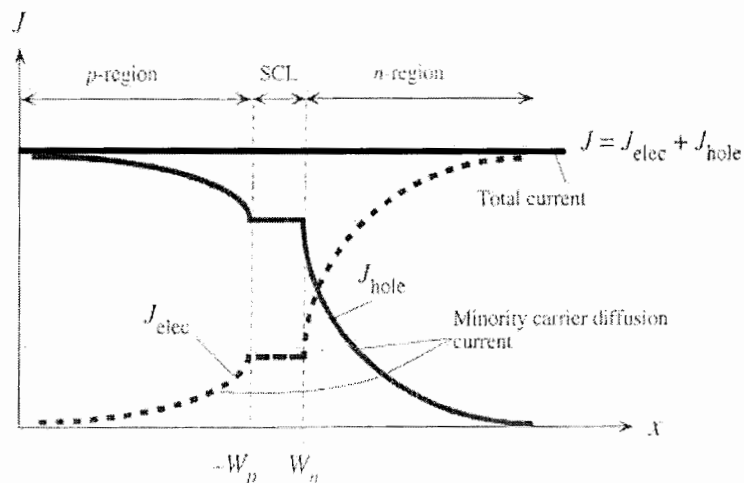
شکل ۳-۶ ساختار ناهمگون دو گانه AlGaAs/GaAs/AlGaAs .

۳-۲ خواص الکتریکی دیودهای نورگسیل

برای درک عملگری دیود های نور گسیل ، لازم است انواع سازوکارهایی را که در مولفه های جریان در شرایط بایاس مستقیم مشارکت دارند مورد بررسی قرار دهیم . در ادامه به بررسی این سازوکارها می پردازیم .

۳-۲-۱ جریان پخشی

همان طور که در بخش ۳-۱-۲ اشاره شد ، در بایاس مستقیم ، پخش حامل های اقلیت در نواحی n و p منجر به ایجاد جریان های الکتریکی در قطعه می شود . این جریان ها که به جریانهای پخشی موسوم اند در شکل ۳-۷ نشان داده شده است . در این شکل خط پر به مولفه چگالی جریان پخشی حفره ها (J_{hole}) و نمودار خط چین به مولفه چگالی جریان پخشی الکترونها (J_{elec}) مربوط است . جریان کل ، مجموع این جریانهای مولفه ای است که با توجه به مطالب ذکر شده در بخشهای ۳-۱-۳ و ۳-۱-۳ عبارت خواهد بود از:



شکل ۳-۷ جریان های پخش الکترونی و حفره ای در هر نقطه [۱] .

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (7-3)$$

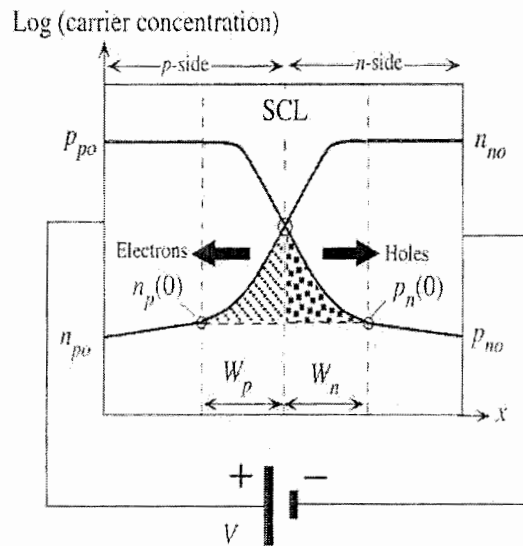
این معادله به معادله جریان - ولتاژ دیود ایده آل موسوم است که در آن I_0 جریان اشباع ، k ثابت بولتزمن و T دمای مطلق است . با توجه به این معادله، با افزایش ولتاژ مستقیم ، جریان های پخشی تزریقی از نواحی n و p افزایش می یابد . شکل ۷-۳ نشانگر وضعیتی است که در آن بازترکیب حاملها در تهی لایه صرفنظر شده است که امری غیر واقعی است و بایستی آن را در محاسبات در نظر گرفت .

۳-۲-۲ جریان بازترکیبی در ناحیه بار فضایی

در یک پیوندگاه $p-n$ متقارن ، همان طور که در شکل ۸-۳ دیده می شود ، تراکم حاملها با عبور از ناحیه بار فضایی کاهش می یابد . این به علت بازترکیب الکترونها و حفره ها با یکدیگر در حین عبور از این ناحیه است . در واقع ، جریان باز ترکیبی ناحیه بار فضایی ناشی از باز ترکیب الکترونها در محدوده W_p در ناحیه p و باز ترکیب حفره ها در محدوده W_n در ناحیه n است که در این شکل با نواحی سایه خورده نشان داده شده است . این جریان از رابطه

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (8-3)$$

پیروی می کند .



شکل ۳-۸ باز ترکیب الکترونی و حفره ای در ناحیه بار فضایی به هنگام اعمال بایاس مستقیم [۱].

هرگاه بخواهیم جریان کلی را بیان کنیم که هر دو نوع جریان پخشی و باز ترکیبی را در بر بگیرد، می توان نوشت:

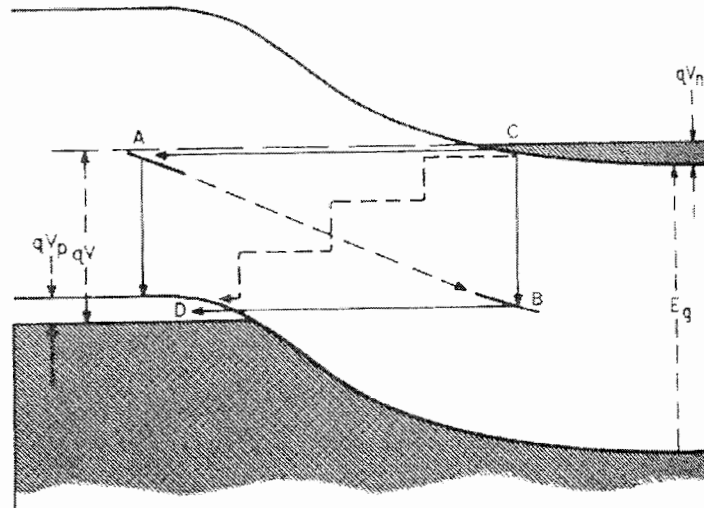
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (9-3)$$

که در آن n ضریب ایده آلی نام دارد که برای جریان پخشی برابر ۱ و برای جریان باز ترکیبی بار فضایی برابر ۲ است. به رابطه فوق، معادله دیود (Diode Equation) گفته می شود. لازم به ذکر است که اگرچه قسمتی از حاملهای تزریق شده در نواحی پیوندگاه و خنثی در فرایند باز ترکیب رو به کاهش می گذارند، این کمبود توسط منبع تغذیه خارجی تامین می شود.

۳-۲-۳ جریان تونلی

سومین سازوکار محتمل برای جریان (حرکت حاملها در بین حالتها) جریان تونلی است. جریان تونلی می تواند از راههای گوناگونی صورت پذیرد. شکل ۳-۹ این مسیرها را نشان می دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می شود که یک الکترون در نقطه C واقع در نوار رسانش می تواند مسیر CAD،

CBD، CABD و یا مسیر پلکانی را طی کند. مسیر اخیر تنها در صورتی امکان پذیر است که تراکم ترازهای میانی بالا باشد [۲].



شکل ۳-۹ ساختار نواری ترازهای شرکت کننده در جریان تونلی [۲].

محاسبات نظری نشان می دهند که جریان تونلی به صورت کلی [۲]

$$I \propto \exp(\alpha V) \quad (10-3)$$

است که در آن مقدار α مستقل از دما و وابسته به نوع پیوندگاه است. در پیوندگاه های همگون p-n

مقدار α از رابطه زیر پیروی می کند: [۴]

$$\alpha = \frac{\pi^2 \sqrt{m^*} \varepsilon}{2h\sqrt{N}} \quad (11-3)$$

که در آن m^* جرم موثر حامل، ε ثابت دی الکتریک نیمرسانا و N تراکم آلاینده است. این کمیت در

پیوند گاه های با ساختار ناهمگون از رابطه زیر به دست می آید [۳]:

$$\alpha = \frac{8\pi \sqrt{m^*} \varepsilon}{3h\sqrt{N}} \quad (12-3)$$

که در آن m^* ، ε و N مشخصه های وابسته به نیمرسانای با گاف نواری بزرگتر هستند.

۳-۲-۴ وابستگی دمایی مشخصه های گوناگون جریان - ولتاژ

همانگونه که از معادله دیود (معادله ۳-۹) برای جریانهای پخشی و بازترکیبی پیداست ، این سازوکارهای جریان در تابع نمایی و نیز جریان اشباعی به دما وابسته اند . در صورتی که ولتاژ اعمالی مستقیم بزرگتر از $3kT/q$ باشد ، با تقریب خوبی می توان معادله دیود را به صورت زیر نوشت :

$$I \approx I_0 e^{qV/nkT} \quad (۱۳-۳)$$

اکنون برای بررسی چگونگی تغییرات جریان با دما می توان نوشت :

$$\frac{dI}{dT} = I \left(\frac{1}{I_0} \frac{dI_0}{dT} - \frac{qV}{nkT^2} \right) \quad (۱۴-۳)$$

که در آن با توجه به معادله ۳-۶ :

$$I_0 \propto n_i^2 \propto T^3 e^{-E_{g0}/nkT} \quad (۱۵-۳)$$

که در آن E_{g0} گاف نواری نیمرسانا در دمای صفر کلوین است.

بنابراین داریم :

$$\frac{1}{I_0} \frac{dI_0}{dT} = \frac{3}{T} + \frac{E_g}{nkT^2} \approx \frac{E_{g0}}{nkT^2} \quad (۱۶-۳)$$

تقریب انتهایی معادله اخیر بخاطر آن است که در اغلب موارد ، جمله اول قابل اغماض است . از

نشاندن این معادله در رابطه (۱۴-۳) خواهیم داشت :

$$\frac{1}{I} \frac{dI}{dT} = \frac{E_{g0} - qV}{nkT^2} \quad (۱۷-۳)$$

. به این ترتیب می توان تغییرات مشخصه جریان - ولتاژ را در دماهای مختلف به دست آورد .

برخلاف جریانهای پخشی و بازترکیبی ، جریان تونلی (معادله ۳-۱۰) وابستگی بسیار ناچیزی به دما

داشته که در اغلب موارد قابل صرفنظر است. معمولاً از همین ویژگی معمولاً برای تمایز آن از دیگر

سازوکارهای جریان استفاده می شود .

۳-۲-۵ بستگی " شدت کلی تابش" * به جریان اعمالی

بررسیها نشان داده است که شدت کلی نور خروجی از دیود های نور گسیل با جریان عبوری درقطعه مرتبط است . شواهد تجربی گزارش شده در این مورد که در فصول ۴ و ۵ نیز آمده ، حاکی از همین واقعیت می باشد . مطالعات انجام گرفته حکایت از آن دارد که شدت کلی تابش با شدت گسیلی در قله L_{max} متناسب است [۸] . بدین ترتیب به منظور مطالعه بستگی جریان با شدت کلی تابش تنها کفایت L_{max} را به ازای جریان های مختلف پیدا کرد . معلوم شده است [۹] غالباً رابطه بین این دو کمیت به صورت :

$$L \sim I^m \quad (۳-۱۸)$$

می باشد . L گسیل در قله الکترو لومینسانس است . توان m در این رابطه به ازای $۱ \sim m$ مربوط به جریان پخشی و $۲ \sim m$ مربوط به جریان باز ترکیبی است [۱۰] .

۳-۳ خواص اپتیکی دیود نور گسیل

۳-۳-۱ سازوکارهای باز ترکیبی در دیودهای نور گسیل

باز ترکیب الکترونها و حفره ها با یکدیگر می تواند تابشی و یا غیر تابشی باشد. شکل ۳-۱۰ ، مجموعه ای از فرایندهای باز ترکیب تابشی و غیر تابشی را نشان می دهد. این فرایندها عبارتند از

(۱) باز ترکیب الکترون آزاد- حفره آزاد

(۲) باز ترکیب اکسیتونی

(۳) باز ترکیب الکترون آزاد - حفره مقید به پذیرنده

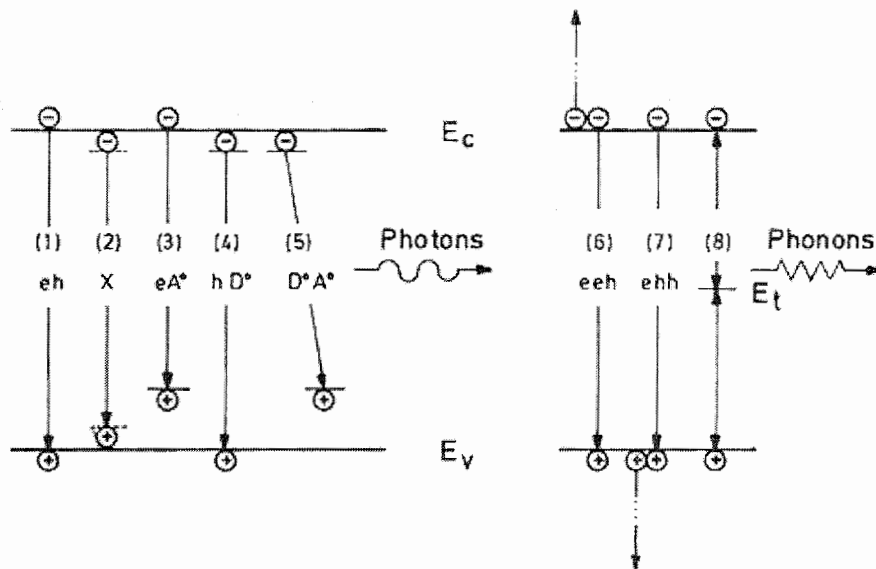
(۴) باز ترکیب الکترون مقید به دهنده - حفره آزاد

(۵) باز ترکیب زوج الکترون - حفره مقید

* The integrated radiation intensity*

(۶) و (۷) بازترکیب اوزده بترتیب در نوارهای رسانش و ظرفیت^۱

(۸) بازترکیب به کمک فونونها در تله های عمیق



شکل ۳-۱۰ نمودار ترازهای شرکت کننده در فرایندهای بازترکیب تابشی و غیر تابشی [۶].

اکنون به بررسی این سازوکارها می پردازیم :

۳-۳-۲ سازوکارهای بازترکیب تابشی

مسیرهای بازترکیب تابشی به دو دسته ذاتی و غیر ذاتی طبقه بندی می شوند. ذاتی به این معنا است که آلایش در باز ترکیب حامل ها نقشی ندارد، در حالی که در بازترکیب غیر ذاتی ترازهای وابسته به ناخالصیها مهم اند. بازترکیب ذاتی می تواند ناشی از حامل های آزاد (نوار به نوار) یا اکسیتونهای آزاد باشد (سازوکارهای ۱ و ۲ در شکل ۳-۱۰) که هر دوی آنها تابشی نزدیک به گاف انرژی دارند. به علت جرم مؤثر کوچک الکترون و اثر پوششی ثابت دی الکترونیک نیمرسانا، انرژی بستگی اکسیتون حد ود 10 meV [۶] است و بنابراین اکسیتونها قادر نیستند در دمای اتاق، که $kT \sim 25 \text{ meV}$ است، به طور مؤثری تشکیل شوند. در نتیجه در دمای اتاق، که غالبا قطعات در این

^۱ در بازترکیب غیر تابشی اوزده، انرژی آزاد شده در طی بازترکیب یک الکترون و یک حفره آزاد به یک الکترون آزاد دیگر (فرایند eeh) و یا حفره آزاد دیگر (فرایند ehh) داده می شود (توضیحات بیشتر در بخش ۳-۳-۳).

دما به کار گرفته می شوند ، فقط باز ترکیب حامل های آزاد و احتمالا برخی از حاملهای جایگزیده در ترازهای عمیق با اهمیت اند . از مشخصه دیگر باز ترکیب حامل های آزاد انتقال تابش به انرژی های بالاتر است . این اثر که در دیودهای نور گسیل فرورسرخ GaAs مشاهده شده است [۶] ، ناشی از پیر شدن نوار ، هنگامی که سرعت باز ترکیب کمتر از سرعت تزریق است، می باشد .

دو فرایند مهم باز ترکیب غیر ذاتی، باز ترکیب الکترون های جایگزیده در تراز دهنده و یا الکترونها ی آزاد با حفره های جایگزین در تراز پذیرنده است (فرایندهای ۳ و ۵ در شکل ۳-۱۰). در فرایند ۳ ، انرژی فوتونهای گسیلی ناشی از باز ترکیب الکترونها ی نوار رسانش به تراز های پذیرنده از رابطه زیر به دست می آید :

$$h\nu \approx E_g - E_a + \frac{1}{2}kT \quad (۱۹-۳)$$

که در آن E_a انرژی فعالسازی اتم پذیرنده و جمله $\frac{1}{2}kT$ متناظر با وضع تقریبی قله توزیع حاملها در نوار است (به شکل ۳-۱۲ مراجعه شود)

در فرایند ۵ انرژی تابش ناشی از گذار الکترون بین دو تراز مقید است :

$$h\nu = E_g - (E_d + E_a) + \frac{e^2}{\epsilon_s r} \quad (۲۰-۳)$$

که شامل انرژی کولنی بین اتمهای یونیده به فاصله r از هم نیز می باشد .

در آرایش های بالا (بیش از 10^{16} cm^{-3} در نیمرسانای GaAs [۶]) الکترونها و حفره ها قادر نیستند به مدت زیادی جایگزیده بمانند، در عوض آنها ترازهای دنباله ای کم عمقی را زیر نوار رسانش و بالای نوار ظرفیت تشکیل می دهند . بدین ترتیب ، لبه نوار ظرفیت و رسانش را بترتیب به سمت بالا و پایین انتقال داده و به کاهش گاف نواری مؤثر منجر می شود .

۳-۳-۳ نظریه بازترکیب غیر تابشی

بازترکیبهای غیر تابشی که عمدتاً توسط ناکاملیهای شبکه ای نیمرسانا بوجود می آید ، بازدهی دیود نوری را بشدت کاهش می دهد . شناخت مراکز بازترکیب غیر تابشی و ممانعت از به وجود آمدن آنها می تواند به بهتر شدن بازدهی دیود کمک موثری کند . در ادامه به معرفی سازوکارهای بازترکیبهای غیر تابشی در دیود های نور گسیل می پردازیم .

در شرایط آرایش بالا ، $(10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3})$ ، امکان وقوع بازترکیب غیر تابشی اوژه (فرایندهای ۶ و ۷ در شکل ۳-۱۰) افزایش می یابد [۶] . اثر اوژه یک فرایند سه ذره ایست که در آن انرژی بازترکیب جفت الکترون - حفره به ذره سوم منتقل می شود . ذره سوم می تواند یک الکترون و یا حفره رسانشی باشد . این فرایند با ایجاد فونون ، گرما تولید می کند . به علت ماهیت سه ذره ای این فرایند ، آهنگ فرایند بازترکیب اوژه وابسته به تراکم سومین ذره است [۶] :

$$r_{nr} = c_n n^2 p \quad eeh - process \quad (21-3)$$

$$r_{nr} = c_p p^2 n \quad eh h - process \quad (22-3)$$

به طوری که c_p و c_n ضرایب اوژه برای مواد نوع n و p هستند .

بازترکیب ترازهای عمیق نیز معمولاً غیر تابشی بوده و در صورتی که در برخی موارد تابشی باشد ، فوتون گسیلی تنها به گسترده شدن پهنای طیفی می انجامد .

بازترکیب در سطح یا فصل مشترک ، سازوکار بازترکیب غیر تابشی دیگری است که در کاهش بازده اثر می گذارد . بنابراین تا حد امکان باید پیوند گاه را از سطح دور قرار داد . اما این نیز باید مورد توجه قرار بگیرد که هر چه فاصله پیوندگاه تا سطح بیشتر باشد ، احتمال جذب تابش در ماده افزایش می یابد .

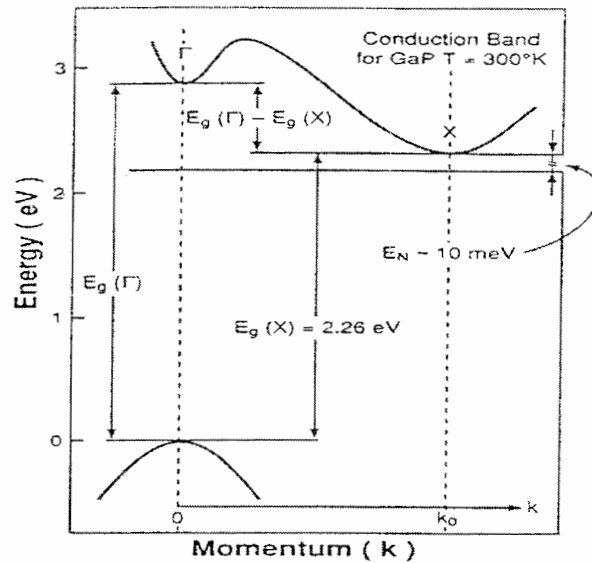
۳-۳-۴ عوامل مؤثر بر باز ترکیب

احتمال وقوع باز ترکیب های تابشی و غیر تابشی به ویژگیهای ساختاری نیمرسانا مانند گاف نواری و ناخالصی آلایش دهنده و دررفتگیها در بلور بستگی دارد. با بهینه کردن ساختار نیمرسانا می توان احتمال باز ترکیب های تابشی را افزایش داد. در زیر به بررسی عوامل مؤثر بر باز ترکیبهای تابشی می پردازیم:

الف) گاف نواری مستقیم و غیر مستقیم: در مواد با گاف مستقیم، مینیمم گاف نواری در نقطه ای اتفاق می افتد که هم الکترون و هم حفره دارای اندازه حرکت بلوری صفر هستند. باز ترکیب تابشی به آسانی در این ناحیه صورت می گیرد. در نیمرسانای غیر مستقیم، حفره ها در ناحیه ای با اندازه حرکت بلوری صفر لکن الکترونها در مینیمم نوار رسانش با اندازه حرکت بلوری غیر صفر قرار دارند. در این موقعیتهای باز ترکیبهای تابشی نمی توانند سرعت اتفاق بیفتند. در این نوع مواد، باز ترکیب تابشی فقط با همراهی یک برهمکنش اضافی (وجود انرژی ارتعاشی شبکه یا فونونها) به منظور فراهم شدن پایستگی اندازه حرکت بلوری لازم می آید، می تواند رخ دهد. در این مواد، با توجه به طولانی تر بودن زمان باز ترکیب (τ_r)، دستیابی به بازده کوانتومی بالا دشوار است.

ب) ناخالصی ها: با وجود مشکلات موجود در نیمرساناهای غیر مستقیم، این مواد به طور گسترده ای در ساخت LED ها مورد استفاده قرار می گیرند. برای این منظور با افزودن ناخالصی های ایزوالکترونیک بازده قابل قبولی به دست می آید. ناخالصی ایزوالکترونیک یک ناحیه جایگزیده در بلور ایجاد می کند که می تواند یک الکترون را به دام اندازد. از آن جایی که الکترون به شدت جایگزیده شده است، عدم قطعیت مکانی آن کوچک بوده و در نتیجه بنابر اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، عدم قطعیت اندازه حرکت بلوری آن زیاد خواهد بود. بنابراین، الکترونهای به دام افتاده در ناخالصی های ایزوالکترونیک در گستره اندازه حرکت توزیع پهنی خواهند داشت و این احتمال نیز فراهم می شود که الکترون بتواند اندازه حرکت بلوری صفر داشته باشد و به صورت تابشی باز ترکیب

نماید. این رفتار برای GaP با آرایش N در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۱ ساختار نوار انرژی در GaP [۷].

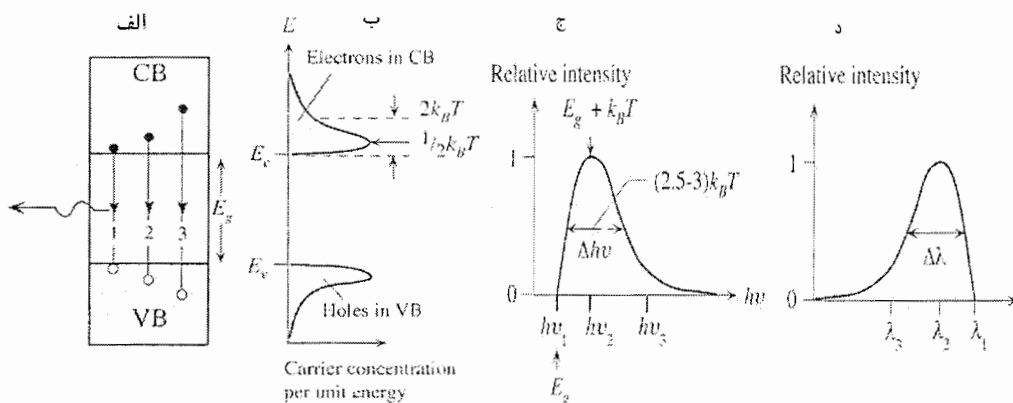
حتی با اضافه کردن ناخالصی‌های ایزوالکترونیک، طول عمر بازترکیب همچنان طولانی‌تر از نیمرساناهای مستقیم بوده و بازده کوانتومی داخلی این قطعات پایین است. با وجود بازدهی پایین، در صورتی که به فوتونهایی با انرژی کمتر از گاف انرژی ماده مورد نظر نیاز باشد، می‌توان با ایجاد مراکز بازترکیب غیر لبه‌ای، مانند آلاینده‌های ایزوالکترونیک، انرژی گسیلی مورد نظر را به دست آورد.

ج) دررفتگیها: از جمله عواملی است که می‌تواند به بازترکیبهای غیر تابشی منجر شود. به منظور کاهش نقایص بلوری، جور بودن شبکه بلوری لایه‌های برآرستی و بستر و همچنین نزدیک بودن ضرایب دمایی لایه‌ها پارامترهای مهمی هستند که بایستی در نظر گرفته شوند. لزوم قابل قیاس بودن ضرایب دمایی آن است که لایه‌های برآرستی که در دمای بالا رشد می‌یابند باید تا دمای اتاق سرد شوند. تفاوت در ضرایب انبساط بین این دو می‌تواند منجر به بروز ناراستیهای بلوری شده و باعث افزایش دررفتگیها شود.

۳-۳-۵ طیف تابشی

معمولا انرژی فوتون های حاصل از بازترکیب نوار به نوار در دیوهای نورگسیل به سادگی برابر گاف نواری نیستند ، علت این امر ناشی از توزیع غیر یکنواخت انرژی الکترونها در نوار رسانش و نیز توزیع انرژی حفره ها در نوار ظرفیت است. شکل ۳- توزیع انرژی الکترونها و حفره ها را در نوار رسانش و نوار ظرفیت نشان می دهد . تراکم الکترونها در بازه انرژی dE در نوار رسانش از $g(E)f(E)dE$ به دست می آید که در آن تعداد حالت ها در بازه انرژی E و $E+dE$ و $f(E)$ تابع توزیع فرمی - دیراک (احتمال یافتن الکترون در یک حالت با انرژی E) است. توزیع انرژی متناظری نیز برای حفره ها در نوار ظرفیت برقرار است .

تراکم الکترون ها در نوار رسانش تابعی از انرژی بوده و قله ای در حدود $\frac{1}{2}kT$ بالای لبه نوار رسانش E_c ، دارد . پهنای انرژی این الکترونها، همان طور که در شکل زیر نشان داده شده است ، حدودا در فاصله $2kT$ از E_c است . تراکم حفره ها نیز به طور مشابه نسبت به E_v پهن شده است . لازم به یادآوری است که آهنگ بازترکیب مستقیم با تراکم هر دو نوع حامل (الکترونها و حفره ها) متناسب است . بدین ترتیب احتمال گذار مستقیم الکترونها در انرژی E_c و حفره ها در انرژی E_v . با توجه به کم بودن تراکم حاملها در نزدیک این لبه ها بسیار اندک بوده و همان طور که در شکل (ج) دیده می شود شدت نسبی نور به ازای این انرژی فوتونی، $h\nu_1$ ، بسیار کوچک است .



شکل ۳-۱۲ (الف) دیاگرام نوار انرژی با مسیر بازترکیبات محتمل (ب) توزیع انرژی الکترونها در نوار رسانش و حفره ها در نوار ظرفیت (ج) نمودار شدت تابش بر حسب انرژی فوتون (د) نمودار شدت تابش بر حسب طول موج [۱].

گذارهای متناظر با موقعیت بیشینه تراکم حفره ها و الکترونها (گذار ۲) از بیشترین احتمال وقوع (متناظر با قله شدت) برخوردار بوده و دارای انرژی $h\nu_2$ است. گذار وابسته به بازترکیب ۳ فوتونهایی را با بیشترین انرژی تولید می کند اما به علت پایین بودن تراکم الکترون ها و حفره های شرکت کننده در این انرژی ها، شدت تابش وابسته به این فوتون ها نیز کوچک خواهد بود. نمودار شدت نسبی نور گسیلی بر حسب انرژی نوعا شبیه به شکل ج است. پهنای طیف تابشی دیودهای نور گسیل به صورت فاصله بین دو طول موج طیف که دارای شدتی برابر نصف بیشینه هستند (موسوم به تمام پهنای در نصف شدت بیشینه - FWHM)، تعریف می شود. این کمیت در شکل د با $\Delta\lambda$ (و یا $\Delta h\nu$ در شکل ج) نشان داده شده است. این کمیت محکی از تکفامی نور گسیل شده است.

از آنجایی که دما بر روی توزیع انرژی الکترونها و حفره ها در نوارهای رسانش و ظرفیت اثر می گذارد بنابراین انتظار می رود با تغییرات آن پهنای طیفی تغییر پیدا کند.

طول موج وابسته به شدت بیشینه طیف تابشی آشکارا به توزیع الکترونها و حفره ها در نوارهای رسانش و ظرفیت بستگی دارد که این خود به خواص فیزیکی نیمرسانای به کار رفته در دیود نورگسیل بستگی دارد. از آنجا که انرژی فوتون قله گسیل تقریبا برابر $E_g + kT$ (شکل ب) است،

بنابراین بررسی طیف تابشی قطعه مورد نظر می تواند اطلاعاتی را در مورد گاف نواری نیمرسانای به کار برده شده به ما بدهد. البته همانگونه که در بخش ۳-۳-۴ در خصوص تاثیر آرایش بالا بر گاف نواری نیمرسانا ذکر شد ، در صورت استفاده از چنین لازم است به کاهش گاف نواری نیز توجه داشت.

۳-۴ بازده دیود های نور گسیل

در عمل تمامی جریان ورودی به یک دیود نور گسیل به تابش تبدیل نمی شود و بخش قابل ملاحظه ای از آن از طریق بازترکیبهای غیر تابشی از دست می رود. این بازترکیبهای غیر تابشی شامل بازترکیبهای سطحی و بازترکیبهای وابسته به نقایص بلوری ، در جریان تونلی حاملها می شود. علاوه بر این کسر قابل توجهی از تابش تولید شده در لایه فعال به دلایل مختلف از جمله این عوامل می توان به جذب تابش در لایه های برآرستی دیود و نیز بازتاب به هنگام عبور از فصل مشترک لایه ها از دست می رود و تنها بخش ناچیزی از قطعه خارج شود. بنابراین از اعمال ولتاژ تا خروج نور ، می توان بازده های متفاوتی برای دیود نور گسیل در نظر گرفت که در ادامه به معرفی آنها می پردازیم .

۳-۴-۱ بازده تزریق (۷)

بر اثر اعمال ولتاژ خارجی به یک دیود نور گسیل ، مولفه های جریان موثر در مشخصه I-V قطعه عبارتند از : جریان های پخشی الکترونی (I_n) و حفره ای (I_p)، جریان بازترکیب بار فضایی (I_{rec}) و جریان تونلی (I_t). غالباً جریان تونلی فقط در جریان های پایین آشکار می شود و با افزایش جریان اثر آن بسیار کم و قابل چشمپوشی می شود [۵].

بازده تزریق ، به کسری از جریان کل اطلاق می شود که می تواند بازترکیب تابشی تولید کند و به صورت زیر تعریف می شود [۵] :

$$\gamma = \frac{I_n}{I_n + I_p + I_{rec}} \quad (۳-۲۳)$$

علت این تعریف ناشی از آن است که در LED های واقعی لومینسانس عمدتاً از جریان پخشی الکترونی ناشی می شود و جریان پخش حفره ای ، به دلیل تحرک کمتر حفره ها ، در مقایسه با

جریان پخش الکترونی قابل چشمپوشی است. باز ترکیب در ناحیه بار فضایی نیز فقط هنگامی موثر است که ترازهای ناخالصی در وسط گاف نواری باشند. از آنجا که ما بیشتر علاقه مند به داشتن فوتونهای حاصل از باز ترکیب الکترون - حفره نوار به نوار هستیم بنابراین، فوتونهای حاصل از باز ترکیب های ناحیه بار فضایی که از انرژی کمتری برخوردار هستند، اهمیت چندانی ندارند.

۳-۴-۲ بازده کوانتومی داخلی (η_{int})

یک هدف بدیهی در طراحی LED ها، بیشینه کردن باز ترکیب تابشی حاملها نسبت به باز ترکیب غیر تابشی آنهاست. بازده تزریق فقط مربوط می شود به کسری از جریان که می تواند در باز ترکیب تابشی شرکت کند، اما تمام الکترونهایی که خود را به طرف p می رسانند لزوماً باز ترکیب تابشی پیدا نمی کنند، از اینرو بازده کوانتومی داخلی را به صورت نسبت تعداد فوتونهای تولید شده به تعداد حامل های تزریق شده تعریف می کنند که می توان آن را پس از ساده سازی به صورت زیر نیز نوشت [۵]:

$$\eta_{int} = \frac{1/\tau_r}{1/\tau_r + 1/\tau_{nr}} \quad (24-3)$$

در این عبارت، $1/\tau_r$ احتمال وقوع فرایند تابشی و $1/\tau_{nr}$ احتمال وقوع فرایند غیر تابشی است.

۳-۴-۳ بازده کوانتومی خارجی (η_{ext})

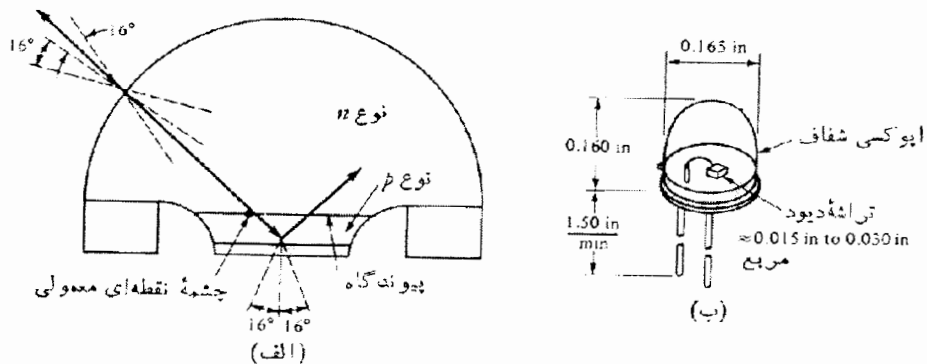
مهمترین پارامتر در مطالعه دیود های نور گسیل، بازده کوانتومی خارجی است. این کمیت ممکن است به دلیل وجود پدیده هایی همچون جذب و بازتاب های کلی داخلی نور به طور قابل ملاحظه ای از بازده کوانتومی داخلی کوچکتر باشد. بنابراین بازده خارجی یک LED می تواند به مولفه های زیر وابسته باشد:

(۱) بازده تزریق (γ) که جریان پخشی الکترونی و سهم آن در جریان کل را توصیف می کند.

(۲) بازده داخلی (η_{int}) که نشانگر کسری از الکترونهای تزریق شده، از طریق جریان پخشی است که

به تابش می انجامند. این کمیت به خواص و کیفیت ماده نیمرسانا وابسته است.

(۲) احتمال فرار (η_c)، همه فوتون های تولید شده نمی توانند از درون دیود خارج شوند و بخشی از آن مجدداً به داخل بازتاب کلی پیدا می کنند. مقدار این کمیت از رابطه $\eta_c = \sin^2 \theta_c$ [۶] به دست می آید که در آن زاویه بحرانی برای بازتاب داخلی کلی در ماده است. بازتاب داخلی را می توان با استفاده از یک دیود گنبدی (شکل ۳-۱۳ الف) کاهش داد. در این مورد ماده رشد داده را به صورتی شکل می دهند که بیشتر نور گسیل شده از پیوند گاه، در زاویه ای کوچکتر از زاویه بحرانی به سطح نیمرسانا برسد. عیب این روش نیاز آن به مقدار زیادی ماده نیمرسانا است. روش عملی تر، استفاده از یک محیط شفاف نوری با ضریب شکستی بین هوا و نیمرساناست (شکل ۳-۱۳ ب).



شکل ۳-۱۳ ساختار دیود های نور گسیل گنبدی الف) با گنبد نیمرسانای نوع n ب) با گنبد اپوکسی شفاف [۵].

بدین ترتیب بازده کوانتومی خارجی را می توان از حاصلضرب عوامل یاد شده به دست آورد:

$$\eta_{\text{ext}} = \gamma \eta_{\text{int}} \eta_c \quad (3-25)$$

- 1- J. W. Allen, P. E. Gibbons, pn junction devices An e – booklet Electrical Engineering Department , University of Saskatchewan Canada (2001)
- 2- S. M. SZE, *Semiconductor Devices Physics and Technology*, (John Wiley 1985)
- 3- L. Martil, E. Redondo, *Journal of Applied Physics*, **8**, 2442 (1997)
- 4- G. Franssen, E. Litwin, *Journal of Applied Physics*, **94**, 6122 (2003)
- 5- Edward S. Yang, *Fundamentals of Semiconductor Devices* (Springer 1978)
- 6- K. Gillessen, W. Schaier, *Light Emitting Diodes*, (Prentice – Hall international series in optoelectronics 1987)
- 7- M. George Craford, Frank. M. Steranka, *Encyclopedia of Applied Physics*, **8**, 485(1994)
- 8- K. G. Zolina, V. E. Kudryashov, internet journal Nitride Semiconductor, **1**, Nom 11,(1998)
- 9- M. G. Craford, F. M. Steranka, *Encyclop Applied Physics* **8**, 485 (1994)
- 10- S. Nakamura, *Jpn. journal of Applied Physics*, **30**, L1998 (1991)
- 11- A. G. Chynoweth, W. L. Feldmann, R. A. Logan, *Physics Review*, **121**, 684 (1961)

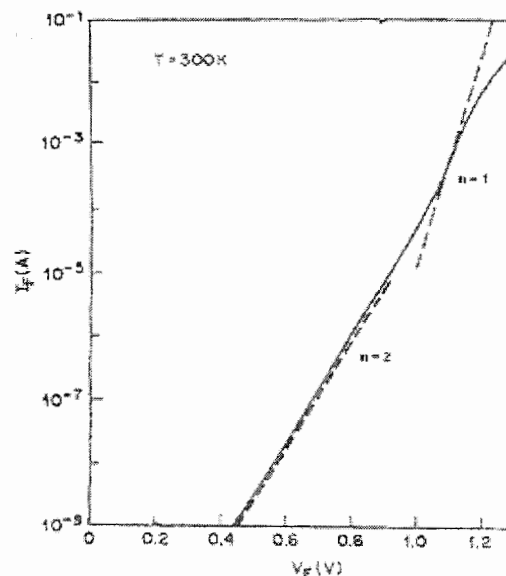
فصل ۴

بررسی دیودهای نور گسیل GaAs و تجزیه و تحلیل داده ها

دیودهای نور گسیل از جنس GaAs در زمره اولین دیودهای فرورسرخ است. این ماده نیمرسانا به علت توانایی رشد با کیفیت بالای آن از اهمیت زیادی در قطعات وابسته به اپتوالکترونیک برخوردار است. در این فصل به بررسی خواص الکتریکی و اپتیکی در ساختارهای همگون و ناهمگون این قطعات می-پردازیم.

۴-۱ دیودهای با ساختار همگون

شکل ۴-۱ نمودار جریان - ولتاژ نوعی این دیودها را نشان می دهد.



شکل ۴-۱ مشخصه جریان - ولتاژ دیود GaAs. خط پر، نشانگر داده های تجربی [۱] و خط چینها از انطباق

تئوری به دست آمده است (به متن مراجعه شود).

این نمودار با توجه به معادله (۳-۹) به ازای ولتاژهای اعمال شده از رابطه

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)$$

پیروی می کند. همان طور که در فصل ۳ گفته شد، وقتی جریان پخشی غالب شود n برابر ۱ و هنگامی که جریان بازترکیب بار فضایی غالب باشد ضریب ایده آلی (n) برابر ۲ می گردد. در صورتی که هر دو جریان با یکدیگر قابل مقایسه باشند، n دارای مقداری بین ۱ و ۲ خواهد بود.

همان طور که از مشخصه $I-V$ پیداست، در ولتاژهای پایین سازوکار جریان بازترکیب بار فضایی در دیود حکمفرماست. با افزایش ولتاژ عرض ناحیه بار فضایی کاهش یافته و تعداد حامل های اقلیت بیشتری می توانند وارد نواحی n و p شوند. بدین ترتیب بمرور، بزرگی جریان بازترکیب بار فضایی کاهش یافته و جریان پخشی در دیود غالب می شود. در ازای اعمال ولتاژهای باز هم بالاتر، ضریب ایده آلی مربوط به جریان عبوری از قطعه از $n = 1$ فاصله گرفته و با شیب کمتری با ولتاژ مستقیم افزایش می یابد. این پدیده به دو اثر مقاومت های متوالی قطعه (R) و تزریق بالا مربوط می شود. در ترازهای جریان پایین و متوسط، افت IR در مقایسه با $\frac{kT}{q}$ کوچک است اما با افزایش ولتاژ، مقدار IR قابل توجه می شود. در این صورت، جریان دیود از رابطه:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V-IR)}{kT}\right)$$

پیروی می کند. این به معنای آن است که جریان به اندازه $\exp\left(\frac{qIR}{kT}\right)$ کاهش می یابد. همچنین در حد جریان های بالا، چگالی حامل های اقلیت تزریق شده با چگالی حاملهای اکثریت قابل مقایسه خواهد شد. به این معنا که در طرف n پیوندگاه داریم:

$$P_n = n_n$$

با قرار دادن این رابطه در رابطه چگالی حاملها:

$$P_n n_n = P_{n0} n_{n0} e^{\frac{qV}{kT}} = n_i^2 e^{\frac{qV}{kT}}$$

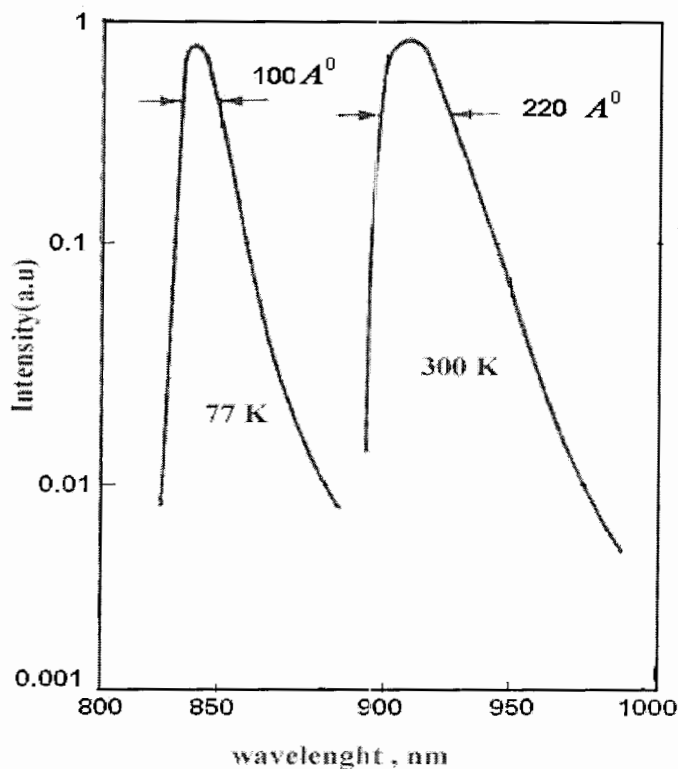
به دست می آوریم :

$$P_n = n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$$

که نشانگر آن است که جریان به طور تقریبی با $\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$ متناسب می شود. بدین ترتیب، در

تزریق بالا جریان با آهنگ آهسته تری افزایش می یابد.

شکل ۴-۲ طیف تابشی دیود نوری GaAs را در دو دمای متفاوت نشان می دهد [۲].



شکل ۴-۲ طیف گسیلی یک LED از جنس GaAs در ۳۰۰ K و ۷۷ K [۲].

در این شکل با کاهش دما دو مورد قابل توجه است، یکی انتقال به سوی آبی قله طیف گسیلی و دیگری کاهش تمام پهنای طیف در نصف بیشینه (FWHM) است. مورد اول با توجه به افزایش گاف

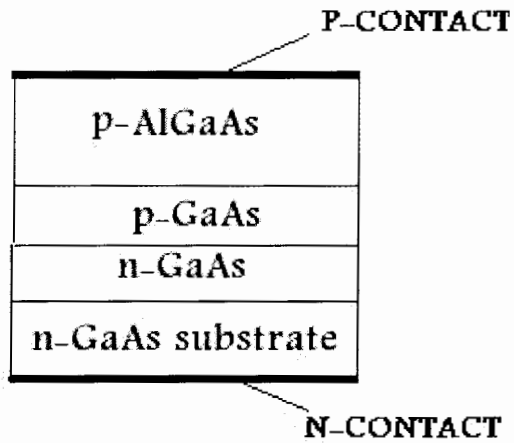
نواری نیمرسانا با کاهش دما (معادله ۲-۳) قابل توجه است. در این نمودار قله تابش از حدود ۸۴۰ nm در ۹۰۰ در دمای اتاق به حدود ۷۷۰ nm انتقال پیدا کرده است که معادل تغییر انرژی میانگین فوتونها در حدود ۰/۱ eV است. این در حدود تغییرات گاف نواری GaAs است. مورد دوم، یعنی کاهش تمام پهنای طیف در نصف بیشینه از $220^\circ A$ به $100^\circ A$ است. این اثر می تواند ناشی از کاهش گستردگی توزیع انرژی الکترونها و حفره ها در نوارهای رسانش و ظرفیت باشد، که نقش اصلی را در باز ترکیب نوار به نوار به عهده دارند.

به علت کارایی پایین ($\eta_{ext} = 10\%$) [۳] این نوع دیودهای همگون نور گسیل، این قطعات چندان مورد توجه قرار نگرفته است. همانگونه که در بخش بعد آمده، به منظور دستیابی به کارایی بیشتر ($\eta_{ext} = 20\%$) [۳] از دیودهای نور گسیل با ساختار ناهمگون استفاده می شود.

۲-۴ دیود نور گسیل با ساختار ناهمگون AlGaAs/GaAs

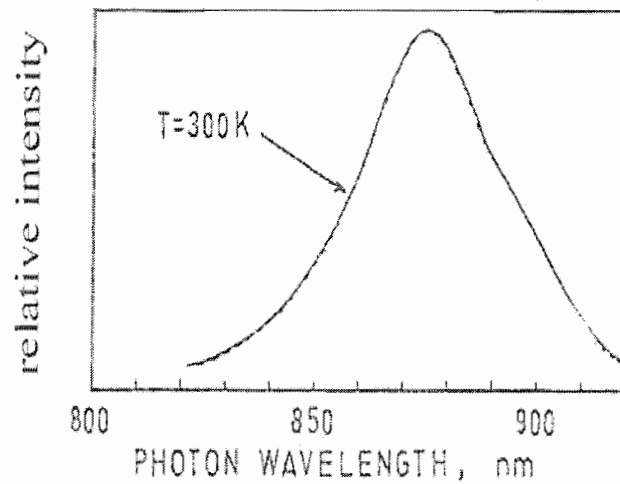
در ساختارهای ناهمگون با توجه به تزریق الکترونها از سمت n و حفره ها از سمت p به لایه فعال (چاه کوانتومی)، احتمال باز ترکیب بین الکترونها در ترازهای رسانش و حفره ها در ترازهای ظرفیت افزایش یافته و بازدهی تابشی افزایش می یابد. هم چنین از آنجایی که فوتونهای تولید شده در لایه فعال از انرژی کمتری در مقایسه با لایه های سد (AlGaAs) برخوردارند، بنابراین جذب فوتونها کاهش می یابد.

شکل ۳-۴ ساختار یک دیود نور گسیل AlGaAs/GaAs و شکل ۴-۴ طیف تابشی دیود مذکور در دمای اتاق را نشان می دهد:



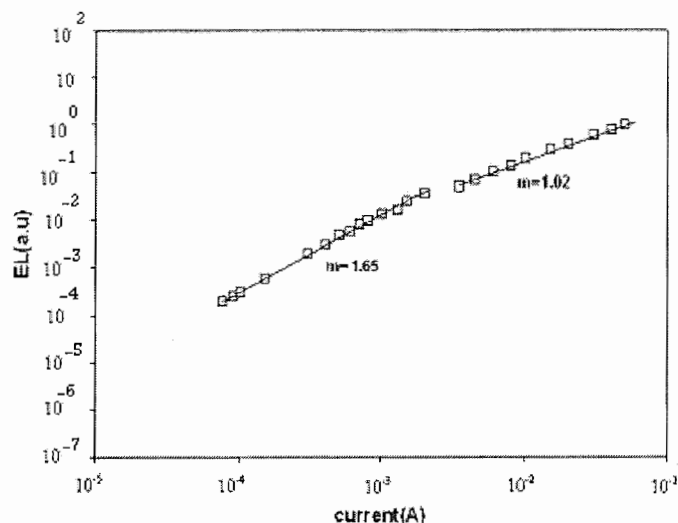
شکل ۴-۳ ساختار لایه ای یک دیود نور گسیل GaAs با ساختار ناهمگون یگانه [۴] .

قله طیف برابر با انرژی گاف نواری لایه فعال (GaAs) است .



شکل ۴-۴ طیف تابشی دیود نور گسیل AlGaAs/GaAs [۴] .

شکل ۴-۵ نمودار شدت تابش الکترولومینسانس را بر حسب جریان در این دیود نشان می دهد با توجه به بحث مربوط به بخش (۳-۲-۵) و توجه به این نکته که در این شکل محورهای نمودار به صورت لگاریتمی هستند، وابستگی شدت الکترولومینسانس با جریان به صورت $L \propto I^m$ است .



شکل ۴-۵ وابستگی شدت تابش به جریان در یک دیود نورگسیل AlGaAs/GaAs در دمای اتاق [۵] .

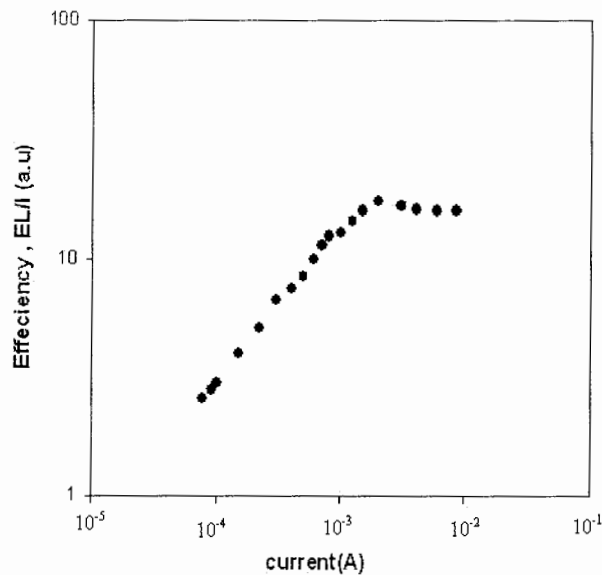
با کمک روش انطباق کوچکترین مربعات (least square fit) می توان این نظریه را در دو ناحیه جریانی کمتر از ۱ mA و بزرگتر از آن به کار گرفت . محاسبات ما نشان داد :

$$L \propto I^{1.65} \quad : I < 10^{-3} A$$

$$L \propto I^{1.02} \quad : I > 10^{-3} A$$

این تغییر شیب را می توان چنین تفسیر کرد که در محدوده جریان های کمتر از ۱ mA تابش گسیلی ناشی از بازترکیب الکترونها و حفره ها با ترازهای وابسته به نقایص (اعم از ناخالصی ها و یا ترازهای وابسته به دررفتگیها) است . با افزایش جریان، ترازهای وابسته به نقایص اشباع شده و بتدریج بازترکیب های نوار به نوار غالب می شوند .

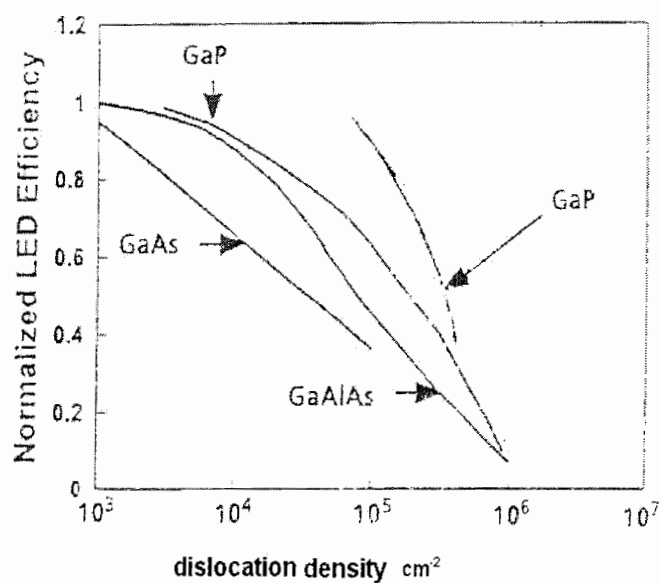
شکل ۴-۶ بازده نسبی بر حسب جریان ورودی (EL/I) این دیود نور گسیل را نشان می دهد که برگرفته از داده های شکل ۴-۵ است :



شکل ۴-۶ نمودار بازده نسبی بر حسب جریان در دیودهای نوری AlGaAs/GaAs.

همانگونه که پیداست، بازده تبدیل انرژی الکتریکی ورودی به انرژی نوری خروجی تا جریان ۱ mA افزایش یافته و با بیشتر شدن جریان به حالت اشباع می رسد. در جریان های بالاتر از ۱ mA، به علت پر شدن ترازهای وابسته به نقابص، در ناحیه فعال بازترکیب نوار به نوار غالب می شود که در اثر پدیده باز-جذب فوتونهای تولید شده، بازده نسبی قدری کاهش پیدا می کند.

همانگونه که در بخش (۳-۳-۴) گفته شد، وجود دررفتگیها می تواند به کاهش بازدهی قطعه منجر شود. شکل ۴-۷ رابطه بین بازده دیودهای نوری و چگالی دررفتگیها را برای دیودهای GaAs و GaP و AlGaAs (که در شرایط مختلف رشد داده شده است) نشان می دهد. همانگونه که دیده می شود دررفتگیهای ساختاری، بازده قطعات را محدود کرده و تقریباً در همه آنها، با رسیدن چگالی دررفتگیها به 10^6 cm^{-2} بازده قطعه به صفر نزدیک می شود.



شکل ۴-۷ وابستگی بازده دیود نوری به چگالی دررفتگیها در ترکیبات III-V [۶] و [۷] و [۸].

اکنون با توجه به شناخت دیود نور گسیل GaAs که از قدمت بیشتری برخوردار بوده و توانایی رشد بلورین آن با کیفیت بالا فراهم می باشد ، در ادامه بحث خود به بررسی دیود نور گسیل از جنس GaN که با توجه به مطالب فصل اول ، در یک دهه اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است ، می پردازیم .

- 1- S .M. SZE, *Semiconductor Devices Physics and Technology* (John Wiley 1985)
- 2- J, Wilson & J.F.B hawhes , *Optoelectronic a Introduction* (Prentice – Hall international series , 1989)
- 3- J.W. Allen, P. E. Gibbons, pn junction devices An e – booklet Electrical Engineering Department , University of Saskatchewan Canada (2001)
- 4- A. Lastras, Martinez, journal of Applied Physics, **49**, 3565 (1977)
- 5- L.Martil, E. Redondo, Journal of Applied Physics, **8**, 2442 (1997)
- 6- H. Herzog, D. I. KeunçJ ournal of Applied Physics, **43**, 600 (1972)
- 7- R. J. Roedel, A. R. Von Neida, Journal of Electrochemistry society, **126**, 641 (1979)
- 8- W. A. Brantley, O. G.Lorimor, Journal of Applied Physics, **46**, 2629 (1975)

فصل ۵

بررسی دیود های نور گسیل GaN و تجزیه و تحلیل داده ها

در این فصل خواص الکتریکی و اپتیکی دیودهای GaN با پیوندگاههای همگون و ناهمگون را به طور جداگانه مورد بررسی قرار می دهیم . در هر بخش نخست به معرفی ساختار هندسی و نیز نواری این دیود پرداخته و در ادامه به تجزیه و تحلیل مشخصه های جریان - ولتاژ ، شدت لومینسانس - جریان ، طیف گسیلی و بازدهی مربوط به این قطعات می پردازیم .

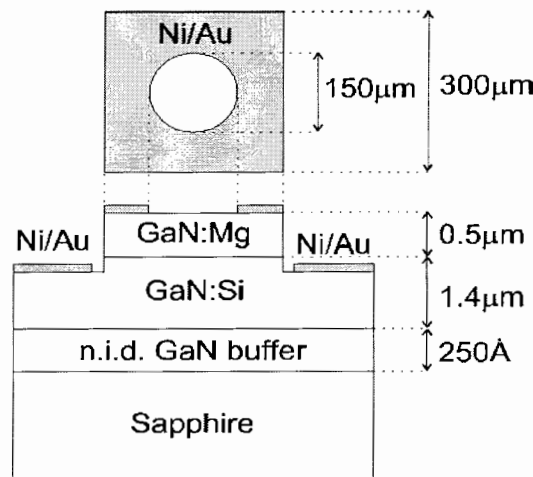
۵-۱ دیودهای با پیوندگاه همگون

معمولا در ساخت دیودهای نور گسیل در نخستین مرحله ، محققین از ساختار همگون مواد برای آگاهی از میزان آلاینش و کیفیت بلوری لایه ها استفاده می کنند . گرچه این ساختار ، همان گونه که در فصل قبل به آن اشاره شد ، از بازدهی پایین تبدیل انرژی الکتریکی به نوری و نیز گستردگی طیف الکترو لومینسانس برخوردار است، به لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه بوده و می تواند در کاربردهای تجاری (صفحات نمایش) مورد استفاده قرار می گیرد .

۵-۱-۱ ساختار دیود

دیود نوری که در این بخش مورد مطالعه قرار می گیرد برگرفته از آزمایشات . *Calle et . al* [۱] می باشد . در این دیود نوری از Si برای آلاینش نوع n و Mg برای آلاینش نوع p استفاده شده است . ساختار دیود ، که سطح مقطع آن در شکل ۵-۱ نشان داده شده است ، به روش MOVPE رشد یافته

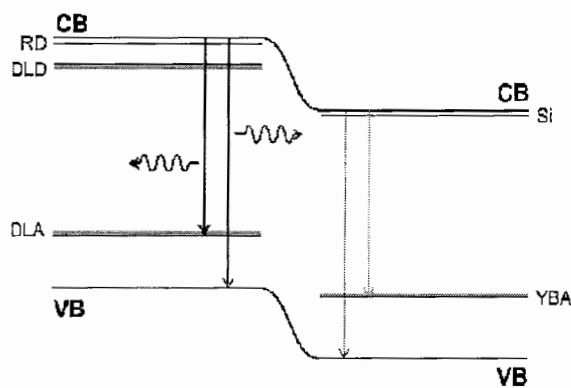
است. یک لایه نازک واسط GaN که به طور خواسته آلاینش نشده (n.i.d)، بر روی زیر لایه sapphire رشد داده شده است. بر روی آن لایه هایی از GaN که با Si با تراکم 10^{18} cm^{-3} و Mg با تراکم 10^{20} cm^{-3} آلاینده شده اند و به ترتیب دارای ضخامت $1/4 \mu\text{m}$ و $0/5 \mu\text{m}$ است، قرار می گیرد. در این شکل بخشهایی که به رنگ تیره سایه خورده، اتصالات اهمی قطعه هستند. از آن جا که انرژی فعالسازی Si، بسیار کم و در حدود $20-30 \text{ meV}$ است [۲]، بنابراین انتظار می رود در دمای اتاق تقریباً اکثر اتمهای دهنده یونیده شده باشند و الکترون مربوط به آنها به صورت الکترون آزاد در نوار رسانش ناحیه n حضور داشته باشند، در ناحیه p اتمهای Mg به علت انرژی فعالسازی زیادشان، حدود $0/55 \text{ eV}$ ، تنها بخشی برانگیخته شده و انتظار می رود تراکم حفره ها چیزی در حدود 10^{17} cm^{-3} باشد.



شکل ۱-۵ برشی از سطح مقطع دیود نور گسیل GaN همگن [۱] .

شکل ۲-۵ ساختار نواری این دیود را به همراه ترازهای ناخالصی ها که در ترابری حاملها نقش دارند، نشان می دهد. در این تصویر ترازهای دهنده کم عمق (Residual Donor) مربوط به اتمهای Si و DLD (Deep Level Donor) ترازهای دهنده ناخواسته ای هستند که در حین رشد در ناحیه p ایجاد می شوند. علت حضور ترازهای RD ناشی از آن است که به هنگام لایه نشانی ابتدا Si و سپس Mg

را وارد می کنند ، بنابراین قسمتی از Si در حین رشد GaN آلائیده با Mg در ماده نفوذ کرده و باعث ایجاد ترازهای دهنده ناخواسته در ناحیه p می شود . ترازهای *DLA* (*Deep Level Acceptor*) تراز پذیرنده عمیق وابسته به اتمهای Mg است و *YBA* (*Yellow Band Acceptor*) نیز تراز پذیرنده ناخواسته ایست که در حین رشد در اثر دررفتگی ها در ناحیه n ایجاد می شود و منجر به گسیل تابش زرد رنگ از دیود می گردد .



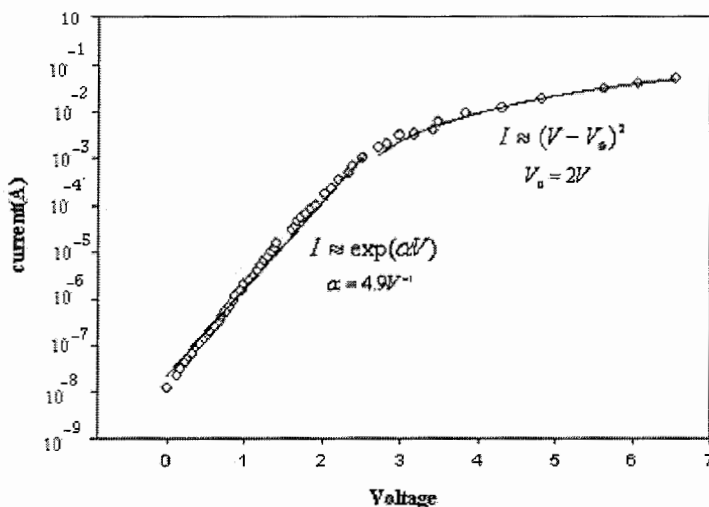
شکل ۲-۵ دیاگرام انرژی و ترازهای شرکت کننده در بازترکیب دیود نوری GaN همگن [۱] .

در ناحیه n دو نوع تابش دیده می شود : تابش زرد ، که از بازترکیب الکترونهاى نوار رسانش با حفره های تراز پذیرنده (*YBA*) ایجاد می شود و تابش فرابنفش ، که ناشی از بازترکیب نوار به نوار است . در ناحیه p نیز دو نوع تابش داریم : تابش آبی ، که منشا آن بازترکیب الکترونهاى نوار رسانش یا تراز *RD* با حفره های تراز پذیرنده عمیق *DLA* است و تابش فرابنفش ، که از بازترکیب نوار به نوار ایجاد می شود . ترازهای دهنده عمیق *DLD* در بازترکیب نقشی ندارند .

با توجه به جرم موثر کوچکتر الکترونها ($0.22 m_0$) در مقایسه با جرم موثر حفره ها ($0.18 m_0$) [۳] ، الکترونها از تحرک بیشتری برخوردار بوده و در نتیجه با اعمال بایاس مستقیم و کوتاه شدن ارتفاع سد پتانسیل وابسته به لایه بار فضایی با احتمال بزرگتری عبور کرده و به ناحیه مقابل وارد می شوند . بنابراین انتظار می رود عمده بازترکیبهای تابشی در ناحیه p صورت گیرد .

۵-۱-۲ مشخصه ولتاژ - جریان

شکل ۳-۵ مشخصه جریان - ولتاژ این LED را در شرایط بایاس مستقیم نشان می دهد :



شکل ۳-۵ نمودار ولتاژ - جریان دیود نوری GaN همگون در شرایط بایاس مستقیم در دمای اتاق [۱] . لوزی ها نشانگر داده های تجربی و خطوط پر مربوط به انطباق نظریه ها می باشند .

همان گونه که در این نمودار پیداست ، بسته به بزرگی بایاس اعمال شده ، جریان عبوری از قطعه از دو رفتار متفاوت برخوردار است :

(۱) در ولتاژهای پایین ($V < 2/5 V$) جریان به صورت نمایی نظیر معادله (۳-۱۰) با ولتاژ افزایش می یابد . از طرفی از آنجا که طبق گزارش . Calle et . al شیب این جریان در بازه دمایی K ۳۰۰-۴ تغییر پیدا نکرده است می توان در این بازه ولتاژ ، جریان غالب حاملها را جریان وابسته به تونل زنی در میان تله های عمیق و یا کم عمق دانست [۴] . مقدار شیب تغییرات (α) که به کمک روش انطباق کوچکترین مربعات به دست آورده ایم ، $4/9 V^{-1}$ است که با مقدار گزارش شده ($4/86 V^{-1}$) توافق بسیار خوبی دارد [۱] .

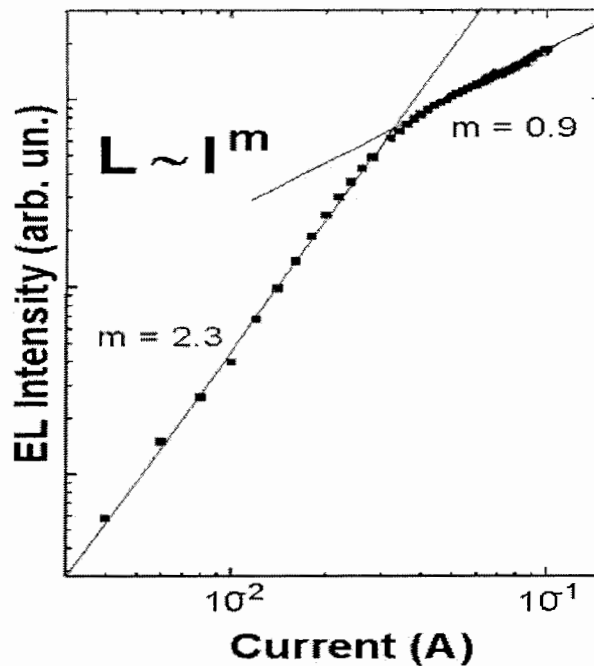
(۲) در ولتاژهای بالاتر ($V > 2/5 V$) جریان عبوری از قطعه به صورت $I \sim (V - V_0)^2$ با ولتاژ مستقیم اعمالی تغییر می کند .

که برای این قطعه $V_0=2V$ است و بنا به گزارش مزبور ، با کاهش دما افزایش می یابد. ($V=4/75$ در دمای 4 K) این رفتار که به مجموعه جریان های تولید - باز ترکیب و تونلی در ناحیه بار فضایی و نیز جریان پخشی نسبت داده می شود، برای نیم رساناهای با گاف نواری مستقیم و پهن مانند SiC گزارش شده است [۵] . در این محدوده ولتاژ اعمالی به علت کوچک شدن ارتفاع سد، امکان وجود جریان های پخشی (معادله ۳-۷) و باز ترکیبی (معادله ۳-۸) در ناحیه بار فضایی وجود دارد . در قطعات نیم رسانای با گاف نواری باریک نظیر GaAs و GaP (به ترتیب $1/4\text{ eV}$ و $2/26\text{ eV}$) سازوکار غالب جریان پخشی است . این جریان در پیوندگاه ها یی اتفاق می افتد که لایه های رشد یافته از کیفیت بلوری مناسبی برخوردار بوده و چگالی در رفتگیها پایین باشد . اما در دیود GaN که گاف پهنی در حدود $3/4\text{ eV}$ دارد و کیفیت لایه های رشد داده شده نیز از کیفیت بالایی برخوردار نیستند ، جریان غالب در محدوده ولتاژهای نه چندان زیاد ($2/5$ تا 4) با اطمینان قابل پیش بینی نیست . لکن به ازای ولتاژهای بالاتر از 4 V ، همانگونه که در بخش بعدی آمده است ، جریان پخشی سهم عمده را داراست.

البته لازم به ذکر است که *Fedisson et . al* رفتار مشابهی را در محدوده جریان های پایین مشاهده کرده اند، اما آنها توانسته اند در محدوده جریان های بالا شاهد جریان پخشی باشند [۴] .

۳-۱-۵ مشخصه شدت الکترو لومینسانس بر حسب جریان

شکل ۴-۵ مشخصه شدت تابش الکترو لومینایی بر حسب جریان این قطعه را در دمای اتاق نشان می دهد .

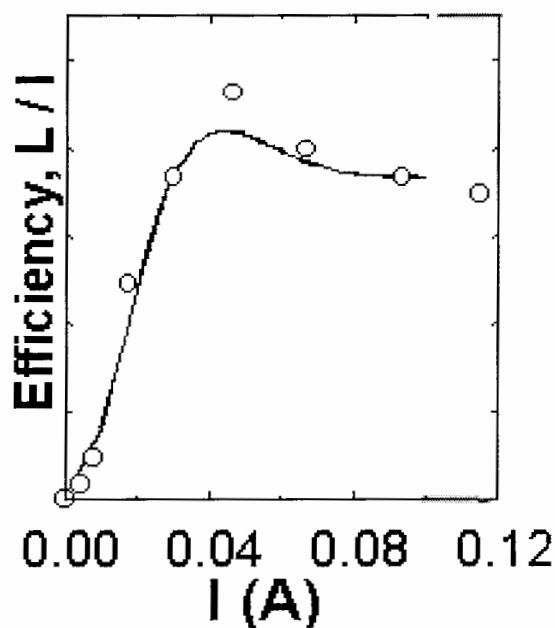


شکل ۴-۵ مشخصه ولتاژ - جریان دیود نوری GaN همگون [۱].

همان طور که در شکل پیداست، شدت کلی مربوط به EL تابعی از جریان الکتریکی عبوری از قطعه است. این بستگی به صورت معادله $L \sim I^m$ است. محاسبات ما نشان داده است که در محدوده جریانهای کوچکتر از ۳۰ mA به ازای $m = 2/3$ و در محدوده جریان های بالا به ازای $m = 0/9$ در داده های تجربی منطبق می شود. این مقادیر با نتایج بحث شده در بخش مربوط به مشخصه I-V قطعه که در محدوده ولتاژهای پایین جریان باز ترکیبی و در محدوده ولتاژهای بالاتر از ۴ V جریان پخشی را پیش بینی می کند، مطابقت دارد.

۴-۱-۵ بازده دیود

در شکل ۵-۵ بازده نسبی برای این دیود بر حسب جریان تزریقی نشان داده شده است. طبق این داده ها بیشینه بازده به ازای جریان ۴۰ mA رخ داده است که متناظر با جریانی است که در شکل ۴-۵ تغییر شیب اتفاق افتاده است.

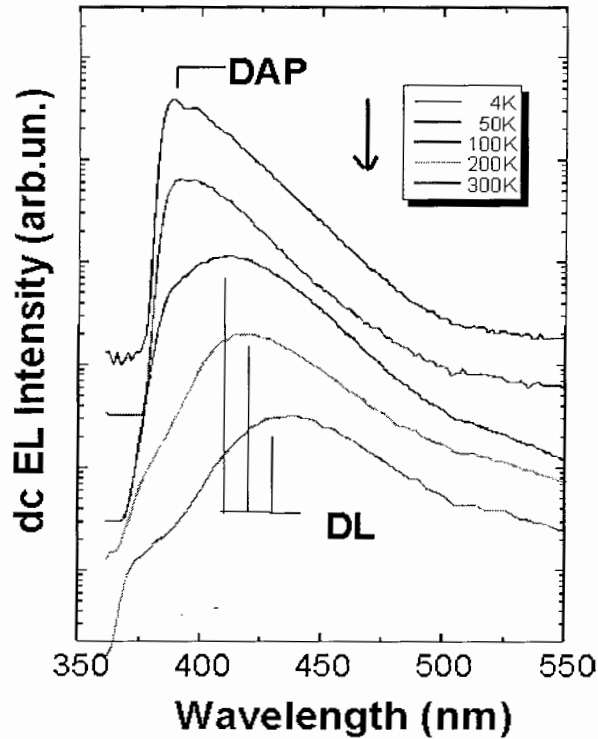


شکل ۵-۵ نمودار بازده نسبی دیود GaN بر حسب جریان تزریقی [۱] .

با توجه به نتایج مربوط به شکل‌های ۴-۵ و ۵-۵ می‌توان دریافت در صورتی که اشباع ترازهای مربوط به نقایص بلوری در جریان کوچکتري رخ دهد ، انتظار می‌رود بازدهی بیشینه تبدیل انرژی الکتریکی ورودی به انرژی تابشی در جریان اعمالی کوچکتري واقع می‌شود . همچنین با توجه به داده‌های شکل ۵-۵ در جریانهای بالا ، بازدهی کاهش می‌یابد . این می‌تواند ناشی از گرم شدن قطعه و افزایش تراکم فونونها در قطعه باشد .

۴-۱-۵ طیف گسیلی

شکل ۵-۶ طیف الکترو لومینسانس همین LED را در دماهای مختلف نشان می‌دهد . این طیفها حاصل اعمال جریان مستقیم نسبتاً پایین $10 \mu A$ در دمای $4 K$ و $10 mA$ در دمای اتاق است .



شکل ۵-۶ طیف الکترو لومینسانس دیود نوری GaN همگون در دماهای مختلف [۱] .

همان گونه که پیداست ، با کاهش دما علاوه بر اینکه شدت EL در تمامی گستره طول موجها افزایش می یابد ، قله تابش گسیلی به سوی طول موج های پایین تر انتقال می یابد . این نتایج حاکی از آن است که در دمای ۴ K قله تابش در ۳۸۸ nm ($2/2 \text{ eV}$) نور UV عمدتاً ناشی از باز ترکیب الکترونها در حالت های جایگزیده اتم های بخشنده و حفره های تزریقی در نوار ظرفیت می باشد . با افزایش دما (دمای اتاق) بخشی از پذیرنده های کم عمق اشغال بوده و در نتیجه فرایند باز ترکیب غالباً بین الکترونها در نوار رسانش و ترازهای نسبتاً عمیق وابسته به اتمهای پذیرنده Mg در میانه گاف نواری واقع شده و در نتیجه قله ای در ۴۳۰ nm ($2/88 \text{ eV}$) - نور آبی- ظاهر می شود . علت کاهش شدت کلی تابش با افزایش دما را می توان ناشی از این امر دانست که الکترونها در نوار رسانش تحرک نسبتاً بالایی داشته و همین سبب کاهش احتمال باز ترکیب آنها با حفره ها و ترازهای پذیرنده می گردد .

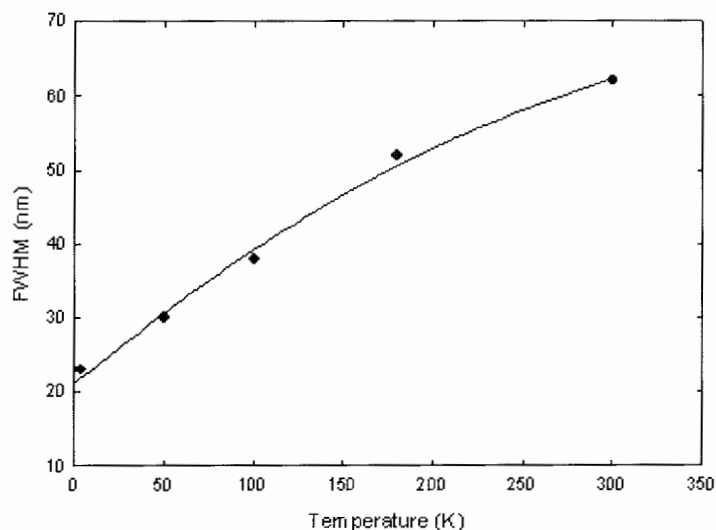
با توجه به گزارشات به دست آمده از طیف لومینسانس نوری (photoluminescence) معلوم شده است که در لایه های GaN آلاینده با Mg طیف مزبور دارای گسیلی پهن با بیشینه ای در ناحیه آبی می باشد [۶] . این نتیجه می تواند به معنای این باشد که در صورت حضور هر نوع فرایند جریان ، فرایند باز ترکیب رنگ آبی در ناحیه نوع n پیوندگاه صورت می گیرد . گسیل نور فرابنفش (UV) در هر دو ناحیه n و p امکان وقوع دارد . علاوه بر نورهای آبی و فرابنفش خط طیفی دیگری نیز در طیف کلی گسیلی حضور دارد . این خط طیفی وابسته به نور زرد بوده و آن ناشی از گسیل الکترونها به یک نوار پذیرنده در ناحیه n است . شاهد این مدعا ، عدم مشاهده چنین خطی در طیف PL نمونه GaN با آرایش نوع p است [۶] . این پذیرنده های عمیق در ناحیه n را به ناراستیهای وابسته به جاهای خالی Ga و ترکیب آن با H مربوط می دانند [۷] .

از دیگر نکات وابسته به شکل ۵-۶ ، پهن شدگی طیف گسیلی EL است . کمیت معرف این پهن شدگی توسط پارامتر " تمام پهنای ازای نصف بیشینه " (FWHM) ، که در بخش ۳-۳-۵ به آن اشاره شد ، مشخص می شود . همانگونه که پیداست بزرگی این کمیت با زیاد شدن دما افزایش می یابد ، این به معنی آن است که نور گسیلی با افزایش دما از حالت ایده آل تکفام دور می شود . با استخراج مقادیر متناظر از طیف EL می توان نمودار شکل ۵-۷ را به دست آورد . با توجه به این نتایج می توان تغییرات پهن شدگی را بر حسب دما (در محدوده ۳۰۰-۴ K) با معادله زیر تقریب زد :

$$FWHM(T) = FWHM(4K) + \alpha T + \beta T^2 \quad (5-1)$$

$$= 21.2 + 0.2T - 2.2 \cdot 10^{-4} T^2$$

در این رابطه FWHM بر حسب nm ، T بر حسب کلوین و α و β بر حسب nm/K و nm/K^2 است



شکل ۵-۷ نمودار تمام پهنا به ازای نصف بیشینه طیف EL شکل ۵-۶ بر حسب دما. خط پر نشانگر انطباق معادله (۱-۵) در داده هاست.

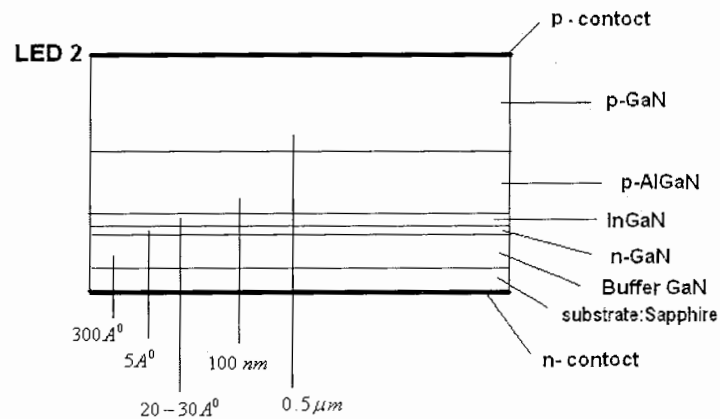
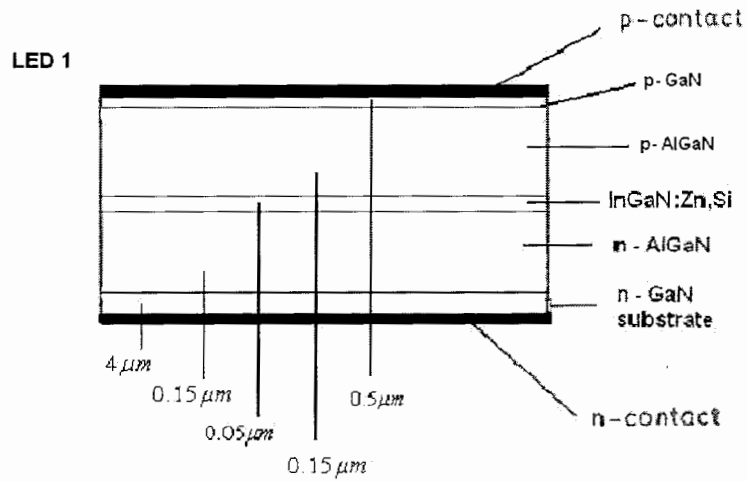
اگرچه ساخت دیودهای نوری GaN همگون به دلایل تجاری مقرون به صرفه تر است، لکن به دلیل پهن شدگی نسبتاً بزرگ طیف گسیلی در دمای اتاق و نیز حصول بازدهی بیشینه در جریانهای نسبتاً بالا به لحاظ تکنولوژیکی چندان مناسب نیست. به منظور برطرف کردن این ایرادها می توان از دیود نوری با ساختار ناهمگون استفاده کرد. در ادامه بحث به بررسی این نوع ساختار می پردازیم.

۵-۲ دیودهای با ساختار ناهمگون

در این بخش به بررسی عملکرد دو دیود نور گسیل با ساختار ناهمگون $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ می پردازیم به طوری که این دو تنها از نظر مقدار کسر مولی In با هم اختلاف دارند. در یکی مقدار $x = 0.06$ و در دیگری $x = 0.2$ می باشد. برای راحتی، داده های تجربی دیود نورگسیل $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.96}\text{N}/\text{AlGa}/\text{GaN}$ [۸] را LED ۱ و داده های تجربی دیود نورگسیل $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{AlGa}/\text{GaN}$ [۹] را LED ۲ می نامیم. در ادامه به بررسی ساختار این دو دیود نور گسیل و مقایسه خواص الکتریکی و اپتیکی آنها می پردازیم.

۵-۲-۱ ساختار دیود

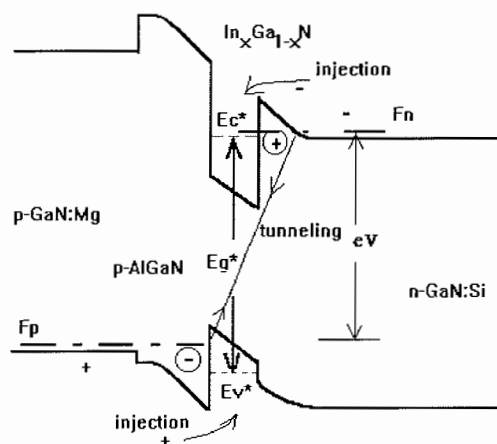
هر دو دیود نور گسیل مورد مطالعه در این بخش با روش رسوب گذاری بخار شیمیایی مواد آلی فلزی (MOCVD) رشد یافته اند. شکل ۵-۸ ساختار هندسی این دیودها را نشان می دهد:



۵-۸ برش عرضی LED ۱ [۸] و LED ۲ [۹].

شکل ۵-۹ ساختار نواری و ترازهای انرژی را در نواحی مختلف در شرایط بایاس مستقیم نشان می دهد. در این شکل F_p و F_n بترتیب ترازهای فرمی در نواحی p و n همچنین E_c^* و E_v^* بترتیب

ترازهای پایه الکترونها و حفره ها در لایه فعال هستند. E_g^* نشانگر فاصله ترازهای انرژی بین E_c^* و E_v^* است که به علت پدیده حبس کوانتومی، از گاف نواری InGaN قدری بزرگتر می باشد.

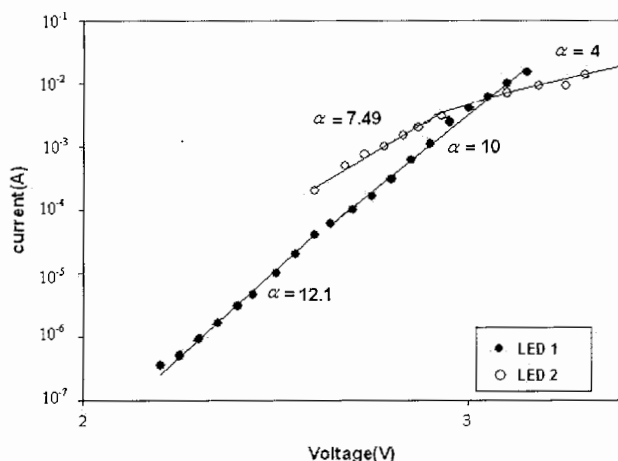


شکل ۹-۵ ساختار نوارها و ترازهای انرژی ساختار ناهمگون $In_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N/GaN$ تحت بایاس مستقیم eV [۹]

یکی از مزایای مهم این ساختار، جذب نشدن فوتون تولید شده در لایه فعال است که ناشی از کوچکتر بودن گاف نواری این لایه از لایه های کناری است. این پدیده سبب افزایش بازده تابشی دیود نوری می شود.

۲-۲-۵ مشخصه جریان - ولتاژ

مشخصه جریان - ولتاژ این دیودها، در شکل ۱۰-۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰ مشخصه جریان - ولتاژ در دیود های نوری با ساختار ناهمگون $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ در LED ۱ و LED ۲. دایره های پر و خالی داده های تجربی و خط پر پیش بینی نظریه انطباق یافته است.

در این مشخصه ها دو ناحیه با شیبهای متفاوت دیده می شود. با توجه به گزارش محققین [۸ و ۹] بزرگی این شیبها در بازه صفر تا 80°C مستقل از دما بوده و جریان اشباع معکوس I_0 نیز به مقدار ناچیزی با دما تغییر می کند. این نحوه تغییرات همانگونه که در دیگر مقالات [۱۰] نیز گزارش شده است، به جریان تونلی وابسته است که رابطه کلی آن به صورت نمایی (معادله ۳-۱۰) است. با کمک روش انطباق کوچکترین مربعات بزرگی α را در دو ناحیه به دست آوردیم که مقادیر آن برای هر دو نوع LED در جدول ۵-۱ نشان داده شده است.

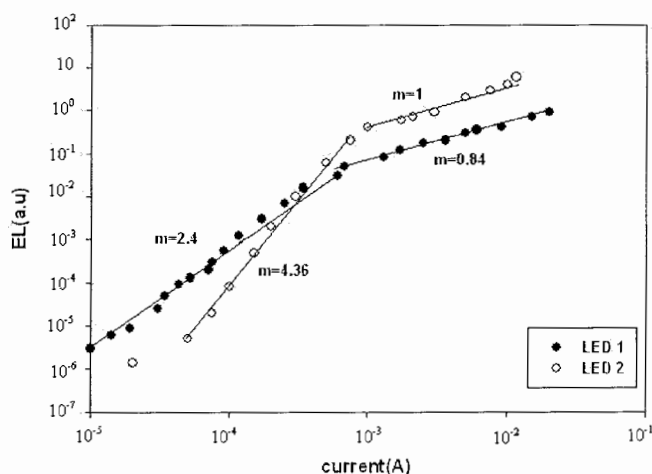
جدول ۵-۱ مقایسه مقادیر α در ولتاژهای مختلف در LED ۱ و LED ۲.

	LED 1		LED 2	
	$\alpha(V < 2.6)$	$\alpha(V > 2.6)$	$\alpha(V < 2.9)$	$\alpha(V > 2.9)$
ولتاژ بایاس مستقیم (V)				
مقادیر حاصل از انطباق (V^{-1})	12.1	10	7.49	4

اگرچه هر دو نوع رسانش ناشی از انتقال تونل زنی می باشد ، اما مسیرهای تونل زنی با هم متفاوت - اند . همان طور که در شکل ۵-۹ نشان داده شده است در ولتاژهای پایین ، تونل زنی توسط ترازهای عمیق صورت می گیرد [۸] . احتمال بازترکیب تابشی از طریق تونل زنی در ترازهای عمیق بسیار کوچک است و در نتیجه جریان تونلی به شدت الکترو لومینسانس قابل توجهی منجر نمی شود . در ولتاژهای بالا ، از آن جایی که با افزایش ولتاژ ، عرض و ارتفاع بار فضایی کمتر می شود . حاملها ی بار(الکترونها و حفره ها) می توانند در عرض پیوندگاه تونل زده ، وارد ترازهای انرژی ظرفیت و رسانش لایه فعال شوند و در آنجا با یکدیگر بازترکیب تابشی نوار به نوار انجام دهند .

۳-۲-۵ مشخصه شدت الکترو لومینسانس - جریان

شکل ۵-۱۱ مشخصه EL - I این دیود ها را نشان می دهد.



شکل ۵-۱۱ تغییرات شدت تابش الکترو لومینسانس بر حسب جریان در دیودهای با ساختار ناهمگون GaN [۸] و

[۹]. خطوط پر انطباق نظریه ها در داده های تجربی است .

با انطباق داده های تجربی در رابطه نظری $L \propto I^m$ بسته به مقادیر m ، دو ناحیه قابل تشخیص

است که در جدول ۵-۲ نشان داده شده است .

جدول ۵-۲ مقایسه مقادیر m انطباق یافته در داده های تجربی شکل ۵-۱۰ در بازه های جریانی مختلف در LED ۱ و LED ۲.

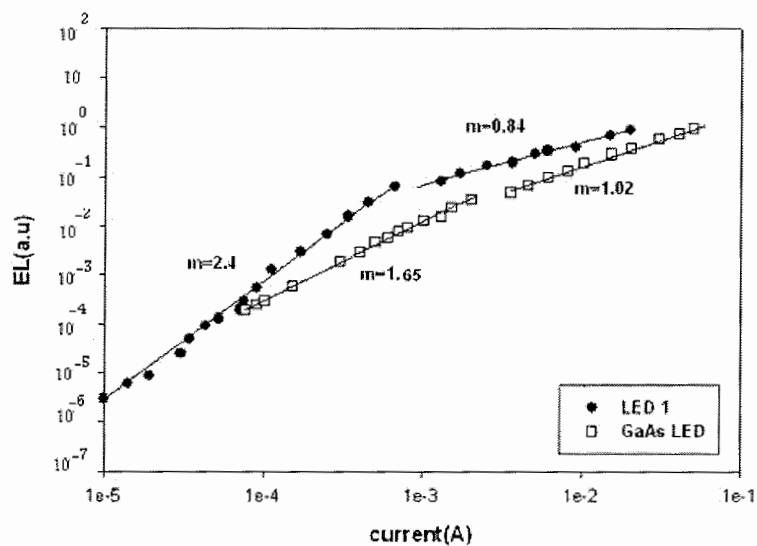
- دیود نوری	مقادیر حاصل از انطباق	
	m (LED 1)	m (LED 2)
$I < 10^{-3} A$	2.4	4.36
$I > 10^{-3} A$	0.84	1

ناحیه $m > 1$ ، مستقیماً به جریانهایی با ترکیبی در سازوکار تونل زنی ما بین ترازهای نقایص و نیز ناخالصی ها مربوط می شود که با افزایش جریان این ترازها اشباع شده و زمان واهلش آنها افزایش یافته و در نتیجه آهنگ بازترکیب کاهش می یابد. با زیادتر شدن جریان اعمالی نمودار به مرور به حالت خطی ($m \sim 1$) نزدیک می شود که نشان از غالب شدن گسیل تابشی ناشی از بازترکیبهای نوار به نوار است.

از مقایسه مقادیر m این دو قطعه در جریانهایی پایین ($I < 1 \text{ mA}$) ملاحظه می شود که مقدار m در قطعه ۲ با درصد I_n بیشتر، بزرگتر از مقدار مزبور در قطعه ۱ است. علت را شاید بتوان ناشی از این امر دانست که با افزایش کسر مولی I_n ، ثابت شبکه آن بزرگتر می شود. این امر منجر به ناهماهنگی بزرگتری در ثابت شبکه لایه فعال نسبت به لایه های مجاور شده و در نتیجه ساختار بلوری لایه فعال در حوالی فصل مشترک دچار شکستگی پیوندها و یا ایجاد دررفتگیهایی می گردد. بدین ترتیب با افزایش نقایص، m افزایش می یابد.

به منظور مقایسه بین دیودهای GaN و GaAs نمودار شدت الکترو لومینسانس بر حسب جریان آنها در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است. همانگونه که در فصل ۴ بیان شد، دیودهای GaAs نیز از رابطه مشابهی برای شدت الکترو لومینسانس بر حسب جریان پیروی می کند. نکته قابل توجه در این شکل، نزدیک بودن جریان اشباع نقایص ($1-3 \text{ mA}$) در این دیود هاست. این در حالی است که

چگالی دررفتگیها در GaN در حدود 10^{10} cm^{-2} و چگالی دررفتگیها در GaAs در حدود 10^5 cm^{-2} است (بخش ۲-۴). این می تواند حاکی از این واقعیت باشد که نقایص ایجاد شده در GaN همگی در بازترکیبها نقش غیر تابشی ندارند.



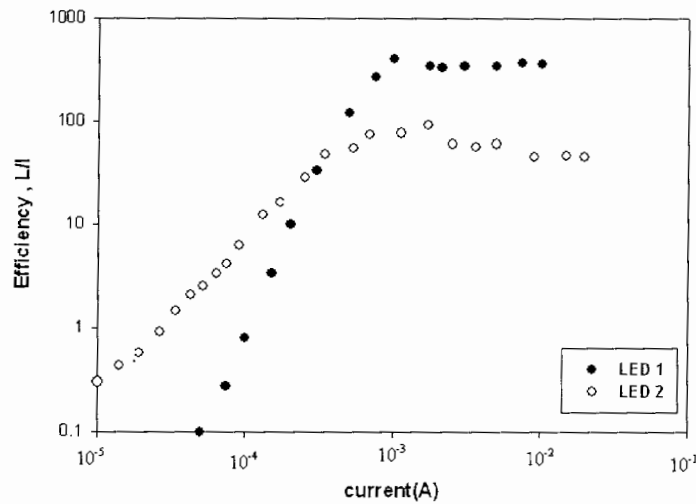
شکل ۱۲-۵ نمودار $EL - I$ در دیودهای GaN و GaAs [۸] .

این نشان می دهد که نقایص دیود های نوری نیتريدی ماهیتی متفاوت از دیودهای آرسنیدی و فسفیدی دارد . . . *Lester et al.* پیشنهاد کرده اند که علت تفاوت دیودهای نوری متکی بر مواد نیتروژن دار ممکن است منشا گرفته از مشخصه یونی پیوندها باشد که موجب چنین رفتار غیر عادی شده است [۱۱] . اما اینکه این نقایص با چه سازوکاری در تابش شرکت می کنند ، معمایی است که هنوز جوابی برای آن ارائه نشده و بررسی این موضوع به مطالعه بیشتر نیازمند است .

۴-۲-۵ بازده دیود

شکل ۱۳-۵ نمودار بازده نسبی این دیودها را بر حسب جریان نشان می دهد . همان طور که پیداست ، بازده نسبی در هر دو قطعه به ازای حدود ۱-۳ mA به بیشینه خود می رسد . این نکته قابل ذکر است که بازده نسبی بیشینه در این مورد ، در مقایسه با ساختار همگون ، در جریانی در حدود یک

مرتبه بزرگی کوچکتر رخ داده است که این خود یکی از امتیازات دیود نوری با ساختار ناهمگون بر ساختار همگون می باشد. کاهش بازده نسبی ورای جریان حدود ۳ mA می تواند ناشی از آثار گرمایی در قطعه و تکثیر فونونها در ناحیه فعال باشد.

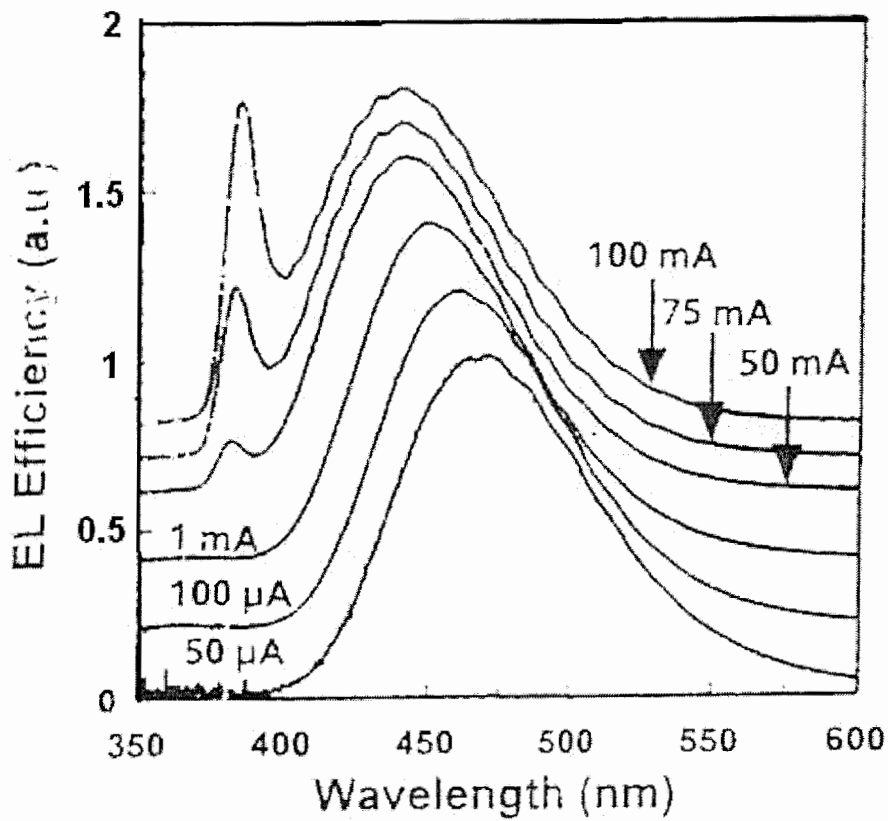


شکل ۵-۱۳ نمودار بازده نسبی بر حسب جریان در دیودهای LED ۱ و LED ۲ (این داده ها مستخرج از داده های تجربی شکل ۵-۱۲ هستند).

نکته جالب توجه در این است که برای هر دو دیود نور گسیل ، با آن که میزان نقایص آنها با هم متفاوت است ، بیشینه بازده نسبی در حدود 10^{-3} A رخ می دهد بنابراین می توان نتیجه گرفت که افزایش درصد In احتمالاً به افزایش بازترکیبهای غیر تابشی وابسته به نقایص منجر می شود .

۵-۲-۵ طیف تابشی

اکنون با توجه به اطلاعات خود از مشخصه های I-V و L-I و نیز بازدهی نسبی بر حسب جریان برای این دیودها، اکنون به بررسی طیف گسیلی این دو دیود به طور جداگانه می پردازیم .
شکل ۵-۱۴ طیف الکترولومینسانس LED ۱ را در جریان های مختلف نشان می دهد .

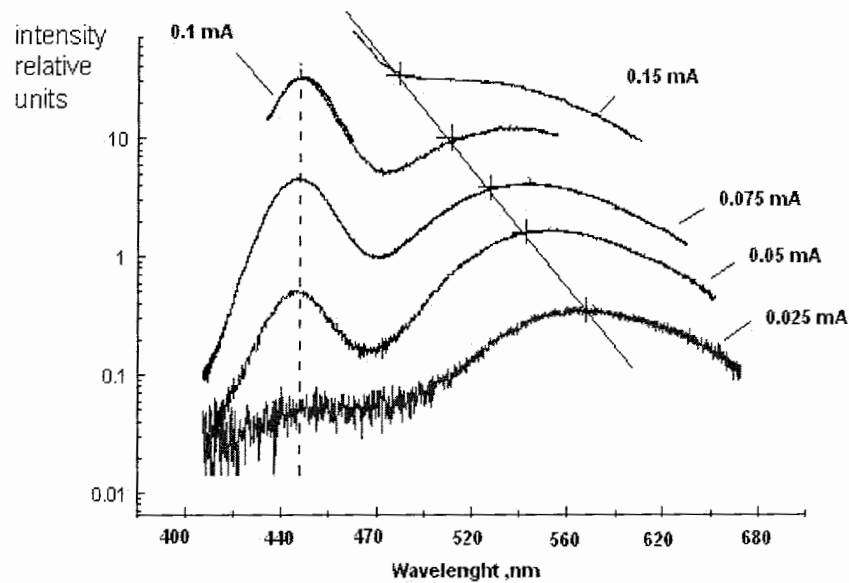


شکل ۵-۱۴ طیف تابشی LED 1 در جریان های مختلف در دمای اتاق [۱۱].

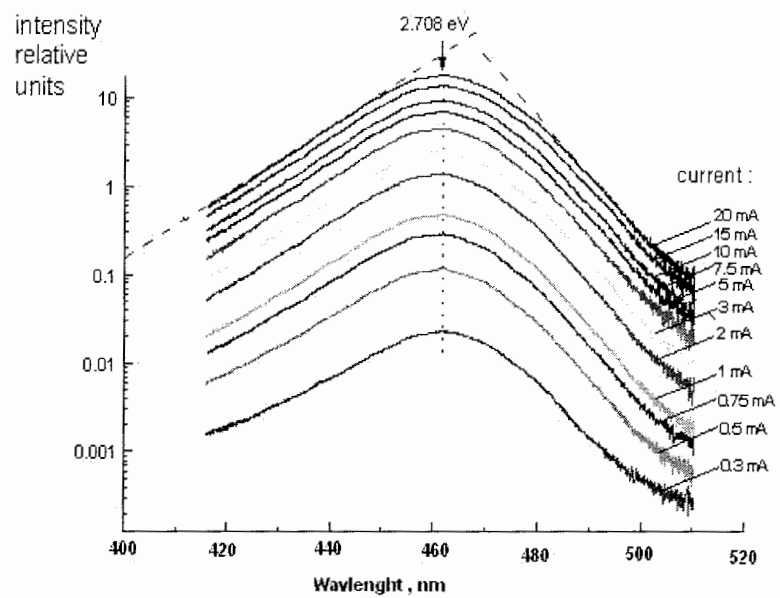
طیف گسیلی برای جریانهای زیر 1 mA تنها شامل یک گسیل تک قله و پهن است و با افزایش جریان، این قله به سمت طول موجهای کوتاهتر انتقال می یابد. این نحوه تغییر موضع قله توسط دیگر پژوهشگران از جمله Nakamura et al. [۱۲] نیز گزارش شده است که آن را به سازوکار بازترکیب D-A (دهنده - پذیرنده) نسبت داده است. در این قطعه که مورد بررسی ماست این قله ناشی از آرایش Zn در لایه فعال است. این گسیل با افزایش جریان، اشباع شده و در جریان های بالاتر بتدریج بازترکیب نوار به نوار در ۳۷۹ nm غالب می شود.

شکل ۵-۱۵ طیف گسیلی LED ۲ را در جریانهای اعمالی پایین و شکل ۵-۱۶ طیف گسیلی را در بازه جریان های بالاتر نشان می دهد. رفتار کلی این قطعه نیز شبیه به LED 1 (شکل ۵-۱۴) است. با این تفاوت که در قطعه ۱ تا جریان کوچکتر از حدود ۵۰ mA عمدتاً تنها یک قله گسیلی مشاهده می

شود و بمرور حضور دو قله آشکار می گردد . در حالی که در قطعه ۲ شرایط تک قله ای تا جریان حدود ۰/۰۲۵ mA مشاهده می شود و از آن پس دو قله ظاهر می گردد (یکی وابسته به جریان متناظر با باز ترکیب D-A و دیگری ثابت - در حدود ۲/۷ eV متناظر با باز ترکیب نوار به نوار) . پیدایش قله نوار به نوار در جریانهای بسیار پایین در قطعه ۲ می تواند حاکی از انتقال برخی از حاملها از طریق ترازهای انرژی وابسته به تراکم بالای دررفتگیها به ترازهای متناظر با چاه کوانتومی لایه فعال باشد .



شکل ۵-۱۵ طیف لومینسانس دیود ۲ LED در جریان های کم [۹] .



شکل ۵-۱۶ طیف لومینسانس دیود نور گسیل LED ۲ [۹] .

- 1- F. Calle E. Monroy, internet journal Nitride Semiconductor, **3**, No 24 (1998)
- 2- H. Morkoc, nitride semiconductur and devices, (1998)
- 3- G. Franssen, journal of Applied Physics, **94** 6122 (2003)
- 4- J. B. Fedison, T. P. chow, Applied Physics Letter, **72**, 2841 (1998)
- 5- J. A. Edmond, K. Das, journal of Applied Physics **63**, 922 (1988)
- 6- F. J. Sanchez, F. Calle, internet journal Nitride Semiconductor, **2**, No 98 (1997)
- 7- J. Neugebauer, CG Van de walle, Applied Physics Letter, l **69**, 503 (1996)
- 8- I. Martil E . Redona, journal of Applied Physics, l **81**, No 5 (1997)
- 9- K. G. Zolina, V. E. Kudryashov, internet journal Nitride Semiconductor, 1, No 11,(1998)
- 10- H.C.Casey, J. Muth, Applied physics letter, **68**, 2867 (1996)
- 11- D. Lester, F. A. Ponce, journal Applied Physic Letter, **66**, 1249 , (1995)
- 12- S. Nakamura, T. Mukai, journal of Applied Physics, **76**, No 12 (1994)

نتیجه گیری

با پیشرفتهای انجام گرفته در یک دهه اخیر جهت تهیه لایه های GaN با رسانندگی نوع p راه برای ساخت قطعات نیمرسانا با استفاده از این ماده هموار گردیده است. یکی از این قطعات، دیودهای نور گسیل (LED) در گستره طول موج آبی، بنفش و فرابنفش است که می تواند منشا تحول در صنایع اپتو الکترونیک شود. ما در این رساله به منظور درک هر چه بیشتر رفتار گسیلی این دیودها نخست به عملگری دیودهای GaAs و سپس به بررسی خواص الکتریکی و اپتیکی ساختارهای همگون و ناهمگون LED های مبتنی بر GaN پرداخته ایم.

بررسی مشخصه جریان - ولتاژ LED های GaN با ساختار همگون نشان می دهد که سازوکار حاکم در ترابری حاملها در ولتاژهای پایین ($V < 2/5 V$) تونل زنی از طریق ترازهای عمیق یا کم عمق و در ولتاژهای بالاتر، جریان باز ترکیب در ناحیه بار فضایی است. تجزیه و تحلیل مشخصه تابش - جریان این LED دلالت بر کم رنگ بودن نقش جریان های باز ترکیبی تونلی (کمتر از 40 mA) در ایجاد لومینسانس دارد و جریان غالب در ایجاد لومینسانس به ازای بیشتر از 40 mA، عمدتاً ترکیبی از جریانهای پخشی و باز ترکیب در ناحیه بار فضایی است. این سازوکارها از طریق شیب منحنی L-I بخوبی آشکار می گردد. محل این تغییر نشانگر جریانی است که به ازای آن ترازهای وابسته به نقایص اشباع شده اند و از آن پس باز ترکیبهای نوار به نوار غالب می شوند. با توجه به نمودار بازده نسبی بر حسب جریان، بیشینه مقدار بازده در جریان 40 mA مشاهده می شود. با این اطلاعات می توان انتظار داشت هر گاه ترازهای وابسته به نقایص در جریان کوچکتری اشباع شوند، انرژی گرمایی کمتری تولید شده و در تبدیل توان ورودی الکتریکی به خروجی اپتیکی، بازدهی بالاتری به دست می آید. بررسی طیف گسیلی LED همگون در دماهای مختلف، نشان می دهد که با افزایش دما، سازوکار باز ترکیب از ترازهای وابسته به ناخالصیهای دهنده و حفره ها (محدوده UV) به باز ترکیبهای

الکترونیهای رسانشی و ترازهای عمیق پذیرنده (محدوده نور آبی) انتقال می یابد. همچنین با افزایش دما، پارامتر شدت نیم - بیشینه افزایش یافته و منجر به پهن شدن طیف و دوری از شرایط تکفامی در دمای اتاق می شود. بمنظور دستیابی به خصوصیتی همچون حصول بازدهی بیشینه در جریانهای پایینتر و کاهش پهن شدگی نسبتاً بزرگ طیف گسیلی در دمای اتاق می توان از ساختارهای ناهمگون GaN در ساخت LED ها استفاده نمود.

در ساختارهای ناهمگون یک لایه فعال InGaN با گاف نواری کوچکتر بین دو لایه $AlGaN$ با گاف نواری بزرگتر قرار می گیرد. اختلاف در گاف نواری لایه های مجاور، باعث کاهش جذب فوتونهای تولید شده در لایه فعال و افزایش بازده دیود می شود. همچنین به علت پدیده حبس کوانتومی، احتمال بازترکیب نوار به نوار حاملها افزایش یافته و در نتیجه شدت تابش قطعه افزایش می یابد. بررسی مشخصه جریان - ولتاژ دیود با ساختار ناهمگون $InGaN / AlGaN / GaN$ حاکی از غالب بودن سازوکار تونلی در ترابری حاملهاست. در ولتاژهای کمتر از $2/6 V$ ، تونل زنی از طریق ترازهای عمیق و در ولتاژهای بالاتر از $2/6 V$ تونل زنی حاملها در عرض فصل مشترک با لایه فعال صورت می پذیرد. مشخصه شدت تابش بر حسب جریان این LED ها حاکی از آن است که در جریانهای کمتر از $1 mA$ تابش ناشی از بازترکیب در ترازهای وابسته به نقایص است و با افزایش جریان، این ترازها پر شده و به حالت اشباع می رسد. در جریانهای بالاتر از $1 mA$ ، آهنگ بازترکیب از طریق ترازهای وابسته به نقایص کاهش یافته و بازترکیب نوار به نوار غالب می شود.

مشخصه بازده نسبی بر حسب جریان با ساختار ناهمگون GaN در حدود $3-1 mA$ به بیشینه مقدار خود می رسد که در مقایسه با ساختار همگون، در حدود یک مرتبه بزرگی کوچکتر است. این خود یکی از امتیازات ساختار ناهمگون بر ساختار همگون می باشد.

مقایسه مشخصه شدت تابش بر حسب جریان در LED های با ساختار ناهمگون GaN و GaAs، ماهیت جدیدی از نقایص ساختاری GaN را به دست می دهد. با توجه به چگالی نقایص ساختاری

بالا در GaN، که در حدود 10^{10} cm^{-2} و در GaAs در حدود 10^4 cm^{-2} است، انتظار می‌رود تغییر شیب نمودار تابش - جریان که ناشی از اشباع نقایص می‌تواند باشد در GaN در جریانهای بالاتری نسبت به GaAs صورت پذیرد، در صورتی که این جریان برای هر دو ترکیب تقریباً یکسان است این به معنای آن است که برخی نقایص ساختاری GaN در تابش دخیل بوده و همه آنها مراکز بازترکیب غیر تابشی نیستند. این نشان می‌دهد که نقایص ساختاری دیودهای نور گسیل نیتريدی ماهیتی متفاوت از دیودهای آرسنیدی دارد.