



LSE

	سخهٔ نهایی: ۱۳۸۸/۱۱/۲۱)	(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۱/۱ ؛ دریافت ن	
(S) –	(FWHM)	(s)

پارامترهای تحرک پذیری، مقاومت، ثابت شبکه و گاف نـواری آلیاژ مذکور را گزارش نمودهاند [۴].

بهدلیل گستردگی گاف نواری از ناحیه مادون قرمز تا ماورای بنفش (۶/۲eV») در نیمرساناهای نیتروژندار و اهمیت آنها در کاربردهای صنعتی بهویژه در صنایع اپتوالکترونیک ازجمله بهکارگیری آن در ساخت دیودهای نورگسیل [۵-۸] که پایهٔ تولید منابع نوری جدید می باشند و به کارگیری آنها در ساخت قطعات توان و نیز قطعات فرکانس بالا [۹ و ۱۰]، مطالعهٔ این مواد و نانوساختارهای آنها هم از جنبهٔ نظری و هم از جنبهٔ عملی حائز اهمیت بوده و در بسیاری از مراکز پژوهشی مورد توجه می باشد.

یکی از اهـداف مهـم در پـروژههـای تحقیقـاتی مربـوط بـه دیودهای نورگسیل بـهویـژه LED سـفید[۱۱]، رسـیدن بـه بـازدهٔ نیمرسانای نیتروژندار، ترکیبی از عناصر گروه سوم جدول تناوبی با عنصر نتیروژن میباشد که دارای ساختارهای بلوری ورتسایتس(WZ) و زینک بلند (ZB) بوده که ساختار ورتسایتس از نظر ترمودینامیکی پایدارتر است در حالی که ساختار مکعبی آن در فشار بالا قابل دستیابی میباشد [۱ و ۲]. آلیاژهای سه تایی و چهارتایی این نیمرساناها که از ترکیب دوتایی آنها تهیه میشوند دارای ویژگیهای منحصر بفردیاند که کاربردهای میشوند دارای ویژگیهای منحصر بفردیاند که کاربردهای میشوند دارای ویژگیهای منحصر بفردیاند که مارند. برای میشوند دارای در قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی دارند. برای مثال از ترکیب نیمرسانای GaN و Alx آلیاژ میباشد. به وجود میآید که x کسر مولی Al در این آلیاژ میباشد. ویژگیهای این آلیاژ از دههٔ ۲۰ میلادی به بعد مورد بررسی قرار گرفت[۳] و این تحقیقات هم اکنون نیز ادامه دارد. یوشیدا و همکارانش تحقیقات گستردهای را در این زمینه انجام داده و

1. Power devices



شکل ۱. تغییرات دمایی قلهٔ طیف فتولومینسانس نمونههای آلایش دار و بدون آلایش(نقاط هندسی معرف دادههای تجربی بـوده و خطـوط توپر براساس مدل تئوری LSE ترسیم شده است).

نوري بالابه منظورجايگزيني لامپهاي روشنايي فعلي با نىسل جديمد منابع نورى برپايمهٔ LED مى باشىد. وجود چگالی بالای نقایص ناشی از عدم انطباق ثابت شبکه لایه با زیرلایـه درآلیـاژ نیمرسـانای نیتروژنـدار بـهویـژه چـاه کوانتومی GaN/AlGaN، بازدہ نوری را کاہش میںدھند کے غالبا ناشی از بهوجـود آمـدن مراکـز بازترکیـب غیـر نـوری در نانوساختارهای مربوطه می باشد. از طرفی جایگزیدگی اكسيتون ها در افت و خيزهاي پتانسيل، حساسيت بازده نوری به چگالی نقایص را کاهش میدهد. به عبارت دیگر افت وخیزهای پتانسیل باعث به تله افتادن به مراکز غیر نوری جلوگیری میکند و در نتیجه افزایش بازدهٔ نوری را به همراه دارد[۱۲]. به همین جهت بررسی مسئلة جايگزيدگي اكسيتون ها ازجنبة تجربي با كمك طيف نمايي فتولومينـسانس وابـسته بـه دمـا داراي اهميـت مدل های نظری مختلفی از جمله مدل حالات جایگزیده (مطرح می باشد که در این مقاله سعی داریم با کمک مدل مـذكور دادههـاي تجربـي مربـوط بـه وابـستگي دمـايي طيـف فتولومینـسانس چـاههـای کوانتـومی GaN/AlGaN بـدون الایـش

اكسيتون ها درحالات جايگزيده گرديده و از رسيدن آنها زیادی است. بـ منظور بررسـی جایگزیـدگی اکـسیتونهـا

1. Localized States Ensembles (LSE)

و آلایــش دار را مــورد مطالعــه قــرار دهــیم. در ایــن مقالــه ابتــدا نمونه های مورد مطالعه معرفی و بهدنبال آن تغییرات دمایی طیف گسیلی نمونهها بررسی میشود و سپس ضمن ارائه مدل LSE بـه تحليـل و تفـسير كمـي نمونـههـا مـيپـردازيم و در انتها جمعبندی نتایج حاصل از این مطالعه ارائه می گردد.

نمونههای مورد مطالعه متشکل از نانوساختار چاههای کوانتومی چند گانه GaN/AlGaN میباشند که در روی زیـر لایـه اکـسید آلومينيوم با جهت ترجيجي (٥٠٠١) رشد يافتهاند. جزئيات مربوط به سـاختار نمونـههـا و روش سـنجش اپتیکـی آنهـا در مقالات قبلي مولفين گزارش شده است [۱۴، ۱۴]. اين نمونه ها چاههای کوانتومی چندگانه بدون آلایش (Undoped) وآلایش يافته (Doped) با مقادير مختلف سيليكون شامل نمونه هاي: آلایش کم(°[−]m cm)، آلایش متوسط (°[−]m cm) و آلایش زیاد (۳-۳ cm) می باشند.

نقراط هندسری در شکل ۱ تغییرات دمایی قلهٔ طیف فتولومینسانس (PL) نمونههای چاه کوانتومی GaN/ Al.,.vGa.,qrN آلایش دار و بدون آلایش را نشان میدهد که به طور تجربی مورد سنجش قرار گرفتهاند[۱۴] و خطوط توپر بر اساس مـدل تئوری حالات جایگزیده ترسیم شده است که در ادامه مورد بحث قرار می گیرد. همان طوری که در شکل ۱ دیده می شود، در تمام دماها با افزایش مقدار آلایش، ابتدا قله طيف PL چاه كوانتومي به سمت انرژي بالاتر(جابهجايي أبي) انتقال مي يابد که ناشی از استتار میدان. ای پیزوالکتریک داخلی به علت افزایش الکترونها در چاه کوانتـومی می باشـد[۱۵] و بـا ادامـه افزایش میزان آلایش، قلـهٔ طیف PL بـه سـمت انـرژی پایین (جابهجایی قرمز) متمایل می گردد که این روند به اثر بازبهنجارش گاف نواری نسبت داده می شود [۱۴، ۱۶].

انرژی قلهٔ طیف PL نمونه بدون آلایـش دارای جابـهجـایی قرمز – ابی – قرمز متوالی (رفتار S گونه) بوده که این رفتار به



شکل ۲. طرحواره پتانسیل محصورشدگی برای دو نمونه با میزان افت و خیز پتانسیل متفاوت (افت و خیز پتانسیل در نمونه بدون آلایش بیشتر از نمونه آلایش یافته می باشد). دوایر توخالی و توپر به نرتیب نماینده اکسیتونهای غیر جایگزیده و جایگزیده هستند. فلش ها فرآیند ریلکس شدن اکسیتونها به داخل کمینههای انرژی موضعی و مطلق را نشان می دهند.نقاط خط چین مبین طرحواره نمونهٔ با افت و خیز پتانسیل بزرگتراست. بر و مراق می باشند[۷۷]. پتانسیل برای چاههایی با پتانسیل موضعی و مطلق می باشند[۷۷].

جایگزیدگی اکسیتون ها در افت و خیزهای پتانسیل در چاه کوانتومی و یا فصل مشترک چاه و سد نسبت داده می شود. با افزایش مقدار آلایش در سد، رفتار S گونه کاهش یافته که به علت پرشدگی حالات جایگزیده ناشی از افزایش الکترون ها در چاه بر اثر یونیزه شدن اتمهای سیلیکون در ناحیهٔ سد می باشد و این روند تا جایی ادامه می یابد که رفتار S گونه تقریبا ناپدید می گردد. با ادامهٔ افزایش مقدار آلایش سیلیکونی رفتار S گونه ناحیهٔ سد به علت چگالی خیلی بالای آلایش سیلیکونی در سد بوده و منجر به ایجاد حالات جایگزیده در نوار ظرفیت گردیده و به دنبال آن باعث جایگزیدگی حفره ها و در نتیجه اکسیتون ها به زمان قابل توضیح است [۱۴].

برای بررسی رفتار S گونهٔ نمونه ها در دمای پایین از طرحواره باز توزیع حرارتی اکسیتون ها در افت و خیزهای پتانسیل نوار رسانش استفاده میکنیم (شکل ۲). موقعی که دمای نمونه افزایش مییابد ابتدا حامل های جایگزیده انرژی لازم برای انتقال به پتانسیل عمیق (به بزرگی ³گ) و عمیق تر (به بزرگی ³گ) را کسب میکنند و سپس با ادامهٔ افزایش دما انرژی لازم برای

بیرون آمدن از پتانسیل های عمیق و گذار به پتانسیل های بالاتر را بهدست می آورند [۱۷]. بنابراین باز توزیع حرارتی اکسیتون ها در افت وخیزهای پتانسیل در نمونهٔ بی آلایش منجر به رفتار S گونه می گردد. با افزایش میزان آلایش در نمونه، افت و خیزهای پتانسیل استتار شده و ارتفاع سد پتانسیل کاهش می یابند (خطوط توپر در شکل ۲) و این موجب کاهش رفتار S گونه می شود به طوری که در نمونه با آلایش متوسط بیشینه استتار رخ می دهد و رفتار S گونه تقریبا ناپدید می گردد (شکل ۱ – مثلت توپر). همان طوری که قبلا نیز اشاره شد با ادامه افزایش آلایش نقایص ساختاری به وجود می آید که این امر موجب پدیدار شدن مجدد رفتار S گونه می شود.

در دماهای بالا رفتار دمایی قله طیف PL تمام نمونهها شبیه نیمرسانای ایده آل بوده و از رابطهٔ تجربی ورشنی پیروی میکند[۱۸] $E_g(T) = E_{\circ} - \alpha T^{*} / (\Theta + T)$, (۱)

در این رابطه α و Θ به ترتیب پارامتر ورشنی و دمای دیای میباشند که از انطباق رابطهٔ (۱) با داده های تجربی در شکل ۱ در دماهای بالا، پارامترهای مذکور برای تمام نمونه ها به ترتیب ۸۸۰ و ۸ ۸۰۸ به دست می آیند که در توافق خوبی با مقادیر گزارش شده با گروه های تحقیقاتی دیگر از جمله لروکس و همکارانش دارد[۱۹].

انرژی جایگزیدگی اکسیتونها در دمای پایین از اختلاف بین انرژی جایگزیدگی اکسیتونها در دمای پایین از اختلاف ورشنی(PL = 4 و انرژی به دست آمده از رابطه ورشنی($E_g(T)$) محاسبه می شود که برای نمونه های بی-، کم-، متوسط و زیاد آلایش یافته به ترتیب ۱۴ meV کم-، متوسط و زیاد آلایش یافته به ترتیب ۱۴ meV و می ۱۲ meV و ۱۹ ساما به دست می آید. این روند کاهشی افزایشی انرژی جایگزیدگی اکسیتونها به کاهش و افزایش افت و خیزهای پتانسیل نسبت داده می شود. در ادامه ضمن معرفی مدل نظری حالات جایگزیده (LSE) به بررسی کمی تغییرات دمایی طیف گسیلی می پردازیم.

(LSE)

مدل نظری حالات جایگزیده (LSE) که براساس باز توزیع

$$\frac{dN(E,T)}{dt} = G(E) + \gamma_c \int \frac{N(E',T)}{\tau_{tr}} e^{(E'-E_a)/k_B T} dE'$$
$$\times \frac{\rho(E)}{\int_E \rho(E)dE} - \frac{N(E,T)}{\tau_{tr}} e^{(E-E_a)/k_B T} - \frac{N(E,T)}{\tau_r}.$$
 (Y)

در رابطهٔ بالا از سمت راست جمله اول (G(E)) آهنگ تولید اکسیتونها ناشی از تحریک الکتریکی یا اپتیکی می باشد که متناسب با تابع توزیع چگالی حالات جایگزیده است ($E(E) = k\rho(E)$ که k ثابت تناسب می باشد). جملهٔ دوم آهنگ افزایش چگالی اکسیتونهای جایگزیده به علت باز به تله افتادن اکسیتونها در حالات جایگزیده را نشان می دهد. جملهٔ سوم و چهارم مبین کاهش جمعیت اکسیتونهای جایگزیده به ترتیب ناشی از برانگیخته شدن آنها با کسب انرژی دمایی (فرار می باشد. در رابطهٔ (۲)، E_a سد پتانسیلی است که اکسیتونها می باشد. در رابطهٔ (۲)، E_a سد پتانسیلی است که اکسیتونها باید بر آن غلبه نموده تا به حالات دیگر انتقال یابند، T_T و T_T به ترتیب زمان انتقال و زمان بازترکیب تابشی اکسیتونها می باشد.

با اعمال شرط حالت پایا (ثابت بودن چگالی جمعیت اکسیتون های جایگزیده) طرف چپ معادلهٔ (۳) صفر می گردد و در نتیجه جواب معادلهٔ مذکور به صورت زیر نوشته می شود: (۴) N(E,T) = g(T)n(E,T). بهطوری که g(T) صرفا تابع دما و n(E,T) تابع دما و انرژی بوده و از روابط زیر پیروی می کند:

$$g(T) = \frac{\kappa \tau_{tr}}{(\gamma - \gamma_C) + (\tau_{tr} / \tau_r) \gamma_C \xi_{\gamma}(T) / \Lambda}, \qquad (interpretent)$$

$$n(E,T) = \rho(E) f(E,T), \qquad (interpretent)$$

 $\xi_{1}(T) = \int_{-\infty}^{+\infty} n(E',T)dE'$ کے در رابط ۂ (۵– الف) $f(E,T) = \int_{-\infty}^{+\infty} n(E',T)dE'$ می باشند و در رابط ۂ (۵– ب) f(E,T) عبارت است از:

$$f(E,T) = \frac{1}{e^{(E-E_a)/k_B T} + \tau_{tr} / \tau_r}$$
(9)

(E,T) در رابطهٔ بالا به عنوان تابع توزیع حالات جایگزیده می باشد. با توجه به شباهت بین تابع توزیع حالات جایگزیده و حرارتی حامل ها (مطابق شکل ۲) بنا نهاده شده ، برای توصیف و تفسیر کمی رفتار دمایی قله و پهنا و سطح زیر منحنی طیف گسیل اپتیکی نیمرساناهای دارای حالات جایگزیده به ویژه نیمرساناهای نیتروژندار در محدودهٔ دمای پایین به کار می رود. این مدل اولین بار توسط لی و همکارانش در سال ۲۰۰۵ ارائه گردید[۲۰] و آنرا برای توصیف کمی InGaN/GaN و آنها کوانتومی InGaN/GaN و تغییرات نمیرات دمایی طیف گسیلی نقاط کوانتومی InGaA/GaN و د. دمایی طیف گسیلی چاه های کوانتومی GaAsSb/AlGaAs و لورنکو و همکارانش در سال ۲۰۰۷ با کمک این مدل تغییرات دمایی طیف گسیلی چاه های کوانتومی GaAsSb/AlGaAs و دمایی طیف گسیلی چاه های کوانتومی InGaAs/GaAs و یرداخته و سپس با پارامترهای مهم این مدل تغییرات دمایی پرداخته و سپس با پارامترهای مهم این مدل تغییرات دمایی طیف گسیلی چاه های کوانتومی GaN/AlGaN با آلایش های

همان طوری که در بخش قبل اشاره شد موقعی که دمای نمونه افزایش می یابد حامل ها برانگیخته شده و به حالات جایگزیده منتقل می گردند (شکل ۲). این امر موجب باز توزیع حرارتی حامل های جایگزیده شده به طوری که این فرآیند روی تغییرات دمایی طیف گسیلی نمونه تأثیر می گذارد و در محدودهٔ دمای پایین رفتار غیر عادی در قله و پهنای طیف PL مشاهده می شود.

در آلیاژهای نیمرساناهای نیتروژندار، بازترکیب تابشی غالب از نوع اکسیتونهای جایگزیده بوده [۱۳–۱۶] و تابع توزیع چگالی حالات اکسیتونهای جایگزیده به صورت زیر در نظر گرفته می شود[۲۰]:

$$\rho(E) \propto \exp[-(E - E_{\circ})^{\mathsf{r}} / \mathsf{r}\sigma^{\mathsf{r}}], \qquad (\mathsf{r})$$

که \mathcal{F}_{\circ} و σ به ترتیب مرکز و پهنای تابع توزیع گاوسی فوق را نشان میدهد. بنابراین در یک سیستم با مجموعهای از حالات جایگزیده به چگالی حالات ($\rho(E)$ ، آهنگ تغییر چگالی جمعیت اکسیتونهای جایگزیده در انرژی E و دمای Tجمعیت اکسیتونهای جایگزیده در انرژی او دمای (N(E,T))زیر پیروی می کند[۲۰]:

تابع توزیع فرمی – دیراک می توان نیتجه گرفت که مفهوم نزدیکی بین E_a و تراز فرمی وجود دارد به طوری که تمام حالات جایگزیده با انرژی کمتر از E_a در دمای صفر کلوین اشغال شدهاند. موقعیت E_a نسبت به F_a روی رفتار دمایی طیف گسیلی سیستمهای فیزیکی تأثیر می گذارد[۲۳]. در محاسبات بالا مقادیر τ_r و τ_r صرفا به نمونه مورد مطالعه بستگی داشته و از وابستگی دمایی آنها چشم پوشی شده است.

از روی رفتار دمایی r_r r_r یا معادل آن n(E,T)، تغییرات دمایی شکل طیف لومینسانس حالات جایگزیده و در نتیجه تغییرات دمایی قله، پهنا و سطح زیر منحنی طیف گسیلی ناشی از حالات جایگزیده شبیه سازی می شوند. با کمک ناشی از حالات جایگزیده شبیه سازی می n(E,T) در دماهای مختلف از رابطهٔ زیر به دست می آید:

$$E = E_{\circ} - x(T)k_BT \tag{V}$$

در رابطهٔ بالا (x(T ضریب بدون بعد وابسته بـ ه دمـا بـ وده کـ ه مقدار آن از حل عددی معادلهٔ زیر به دست میآید:

$$xe^{x} = \left(\frac{\tau_{r}}{\tau_{tr}}\right) \left[\left(\frac{\sigma}{k_{B}T}\right)^{\mathsf{r}} - x\right] e^{(E_{*} - E_{a})/k_{B}T} . \tag{A}$$

معادلهٔ قبل صرفا یک جواب در محدودهٔ $(\sigma/k_BT)^* > x > \cdot$ دارد. بستگی دمایی در رابطهٔ (۷) صرفا ناشی از توزیع حرارتی اکسیتونها به حالات جایگزیده در دمای پایین بوده که از ترکیب آن با رابطهٔ ورشنی می توان تغییرات دمایی قله طیف گسیلی را مطابق رابطهٔ زیر در دماهای مختلف به دست آورد:

$$E = E_{\bullet} - \alpha T^{*} / (\Theta + T) - x(T)k_{B}T .$$
(9)

تغییرات دمایی پهنای طیف (FWHM) شامل دو بخش می باشد: بخش اول ناشی از حالات جایگزیده در دماهای پایین بوده که از حل عددی معادلهٔ ۲/(*E_p*,*T*) بهدست می آیـد (*E_P* از حل عددی معادلهٔ ۲/(*n(E_p*,*T)* بهدست می آیـد (*e_p* انرژی قلهٔ تابع (*n(E,T) می* باشد) و بخش دوم ناشی از پراکندگی فونونها و همچنین نقایص شـبکه و ناخالـصیها بـوده کـه از رابطهٔ زیر پیروی میکند[۲۴]:

$$\Gamma(T) = \Gamma_{\circ} + \sigma_A T + \frac{\gamma_{LO}}{e^{h\omega_{LO}/k_B T}}$$
(1.0)

در رابطهٔ بالا، جملهٔ اول پهـن شـدگی طيـف گـسيلی ناشـی از پراکندگی حامل ها از نقايص شبکه و ناخالصی ها بـوده و جملـهٔ

دوم و سوم به ترتیب پهن شدگی ناشی از پراکنـدگی حامـلهـا بهواسطه فونـونهـای آکوسـتیکی و اپتیکـی طـولی مـیباشـند. پارامترهـای σ_A و $_{2V}$ بـه ترتیـب شــدت جفــت شــدگی اکسیتونها با فونونهای آکوستیکی و اپتیکی بوده و $\hbar\omega_{LO}$ بـه انرژی فونون اپتیکی معروف میباشد.

سطح زیـر منحنـی طیـف لومینـسانس نیـز بـا تعـداد کـل حاملهای جایگزیده متناسـب بـوده و از رابطـهٔ زیـر بـهدسـت میآید[۲۰]:

$$I(T) \propto \left\{ 1 + (1 - \gamma_c) \cdot \exp\left[\frac{(E_* - E_a) + k_B T \cdot \ln(\tau_r / \tau_{tr})}{\sqrt{(k_B T)^{\mathsf{Y}} + \mathsf{Y}(\sigma / \mathsf{Y}, \mathfrak{F}))^{\mathsf{Y}}}}\right] \right\}^{-1}$$
(11)

خاموشی حرارتی لومینسانس از روی ضریب باز به تله افتادن(r_c) و آهنگ فرار حرارتی اکسیتون های جایگزیده ابل پیش بینی می باشد به طوری که (($(1/\tau_{tr})e^{(E-E_a)/k_BT}$) نمونیه هیای بیا ضریب _۲۶ کوچیکتیر و پیارامتر بیزرگتیردارای خاموشی حرارتی حرارتی حرارتی جاموشی حرارتی $(1/\tau_{tr})e^{(E-E_a)/k_BT}$ لومینسانس سریع ترمی باشند[۲۲ و ۲۳]. آهنگ فرار حرارتی حامل ها را می توان برای ارتباط آن با E_a - E_a به صورت زیـر باز نويسي كرد: 🔹 $(1/\tau_{tr})e^{(E-E_a)/k_BT} = (1/\tau_{tr})e^{(E_*-E_a)/k_BT}e^{(E-E_*)/k_BT}.$ (17) در رابطهٔ بالا \mathbf{C} نــشان داده و ($(1/ au_{tr})e^{(E_{c}-E_{a})/k_{B}T}$ در رابطهٔ بالا آنرا پارامتر خاموشی نمونه مینامیم به طوری که نمونه با پارامتر C بےزرگتے دارای خاموشے حرارتے لومینےسانس سريع ترمي باشد. با يكسان فرض نمودن τ_r براي نمونه ها، و بـا توجه به اینکه مقدار پارامتر ۲٫٬ / ۲٫٫ در محاسبات مشخص میا شد، با بازنویسی پارامتر C به صورت ی حرارتیں حرار ($(\tau_r \ / \ \tau_{tr})e^{(E_*-E_a)/k_BT}$)× ($(\prime / \ \tau_r)$ لومينسانس نمونهها برحسب ١/ ٦٦ قابل مقايسه مي باشد. حال مدل LSE را برای دو حالت خاص مورد بررسی قرار مىدھيم:

الف) برای حالت $\sigma = \sigma$ (چگالی حالت با تابع دلتای دیراک)،

^{1.} Thermal quenching of luminescence



اکسیتونها (طرف راست) نسبت به مقدار آلایش سیلیکون در سد.

رفتار S گونه می باشد (شکل ۱)، به طوری که نمونه بی آلایش با داشتن کمترین مقدار .E_a - E_a، بیشترین رفتار S شکل را دارد و در نمونه آلایش متوسط با داشتن بیشترین مقدار .E_a - E_a، رفتار S گونه تقریبا ناپدید می گردد. از طرفی با افزایش مقدار آلایش ، انرژی جایگزیدگی رفتار کاهشی – افزایشی داشته که دارای روندی مشابه مقدار .E_a - E_a و رفتار S شکل می باشد (شکل ۳).

پارامتر دیگری که متاثر از مقدار آلایش میباشد، پارامتر است. با افزایش مقدار آلایش (تا آلایش متوسط) این پارامتر کاهش یافته و رفتار دمایی نمونه به سمت رفتار دمایی گاف نواری نزدیک میشود که این امر موید استتار افت و خیزهای پتانسیل بهدلیل افزایش حامل ها میباشد ولی با ادامه افزایش مقدار آلایش، پارامتر σ افزایش یافته (جدول ۱) که این نشانه غالب شدن مجدد فرآیند باز توزیع حرارتی حامل ها بوده که به دلیل ظهور مجدد افت و خیزهای پتانسیل ناشی از نقایص ساختاری میباشد.

شکل ۴ تغییرات دمایی پهنای طیف گسیلی نمونهها را نشان می دهد که در دمای بالا رفتاری مشابه نیمرساناهای گروه III-V از خود نشان می دهد به طوری که با افزایش دما، پهنای طیف گسیلی افزایش می یابد ولی در دمای پایین چنین رفتاری مشاهده نمی شود. تغییرات دمایی پهنای طیف نمونه ها در دماهای بالا انطباق خوبی با رابطهٔ (۱۰) داشته و مقادیر پارامترهای انطباقی Γ_a و Δ_A در جدول ۲ آمده است. σ_a و

جدول ۱. پارامترهای انتخابی برای مدلLSE برای نمونـههـای مـورد

مطالعه.

$\tau_{\rm r}/\tau_{\rm tr}$	σ (meV)	E_a - E_{\circ} (meV)	<i>E</i> . (eV)	نمونه
10000	۶	-A	37030	بى آلايش
70000	٣	۶	2/222	آلایش کم
0	٣	۲.	37/244	آلايش متوسط
٩۵۰۰	۶/۵	۲	37/242	آلايش زياد

تابع فوق مدل معروف خاموشی حرارتی کومینسانس برای $\sigma = \circ$ تابع فوق مدل معروف خاموشی حرارتی از مینسانس برای $\sigma = \circ$ سیستم دو ترازی را توصیف می کند[۲۵]. در حالت $\circ = \sigma$ توزیع حرارتی اتفاق نمی افتد و سیستم عملا توسط یک سیستم دو ترازی، دو ترازی هم ظرفیت توصیف می شود. در سیستم دو ترازی، مقدار a می از a می مقدار a - b به عنوان انرژی فعالسازی حرراتی حامل ها می باشد. می باشد. $(\frac{\tau_r}{\tau_{tr}})e^{(E_r - E_a)/k_B T} >> 1$ می از کاری مدل دنبالهٔ نواری تبدیل می گردد[۲۶].

LSE

موقعیت قلهٔ طیف گسیلی در دماهای مختلف را می توان با کمک رابطهٔ (۹) و انتخاب مناسب پارامترهای τ_{tr} / τ_{tr} و $E_a - E_a$ با کمک مدل LSE شبیه سازی نمود. بهترین انتخاب برای پارامترهای بالا در جدول ۱ آمده است. خطوط توپر در شکل ۱ نتایج مربوط به محاسبات مدل LSE را نشان می دهد و انطباق نسبتا خوبی با دادههای تجربی دارد. در این محاسبات پارامتر ورشنی و دمای دبای ماده برای تمام نمونهها به ترتیب مقادیر ۸۰۷K و ۸۰ در نظر گرفته شده است.

همان طوری که قبلا اشاره شد پارامتر E_a دارای اهمیت ویژه ای می باشد به طوری که موقعیت آن نسبت به E روی رفتار دمایی طیف گسیلی نمونه تأثیر می گذارد. با افزایش مقدار آلایش، مقدار E_a - E افزایش و سپس کاهش می یابد (جدول ۱) که این امر به ترتیب متناظر با تضعیف و تقویت

^{1.} Thermal quenching model

Y. Band tail model



شکل ۴. تغییرات دمایی پهنای طیف فتولومینسانس نمونههای آلایش دار و بدون آلایش(نقاط هندسی معرف داده ای تجربی بوده و خطوط توپر براساس مدل تئوری LSE و رابطهٔ (۱۰) ترسیم شده است).

ħ@_{LO} در اغلــب نیمرســاناهای نیتروژنــدار بــه ترتیـ ۰/۰۰۱۲ meV/K و ۳۵ me در نظر گرفته شده است[۱۱ و۱۲]. تغییرات دمایی پهنای طیف نمونه ها در دمای پایین از رابط ه (۱۰) منحرف شده و از پهنای طيف لومينـسانس حـالات جایگزیده (n(E,T)) ناشی از جایگزیدگی اکسیتون ها پیروی می کند. خطوط توپر در شکل ۴ نتایج مربوط به پهنای حاصل از تركيب رابطه (١٠) و پهناي ناشي طيف لومينسانس حالات جایگزیده را نشان میدهد. پهنای طیف گسیلی اغلب نمونهها در دماهای پایین تقریبا ثابت بوده و از دمای K ۴۰ K به بعد یکباره افزایش می یابد و از رابطه (۱۰) پیروی میکند. پهنای که از مدل LSE برای دماهای پایین بهدست می آید برای نمونههای کم- و زیاد- آلایش یافته انطباق نسبتا خوبی داشته و برای نمونههای بدون آلایش و متوسط-آلایـش یافتـه انطبـاقی کمـی دیده می شود که این عدم انطباق برای نمونه بدون آلایش ناشمی از عمق زیاد افت و خیزهای پتانسیل میباشد در حالی که در نمونه با آلایش متوسط رفتار خاصی مشاهده شده که با روند کلی تغییرات در نمونههای دیگر هماهنگی لازم را نـدارد و در حال حاضر دلیل قانع کنندهای برای آن نمی توان ارائه داد (شکل ۴).

_ی جهت محاسبهٔ پهنای طیف گسیلی برای	جدول ۲ . پارامترهای انتخاب _و
---	--

مطالعه.	مورد	نمونههاي
---------	------	----------

$\hbar\omega_{LO}$ (meV)	γ <i>LO</i> (meV)	σ_A (meV/K)	Г. (meV)	نمونه
۳۵	110	°/°°IY	11	بدون آلايش
۳۵	170	°/°°\Y	۱۱/۵	آلایش کم
۳۵	۱۳۰	°/°°IY	۶۰/۸	آلايش متوسط
۳۵	۱۵۰	°/°°\Y	۶۶/۵	آلايش زياد

مقدار کمیت au_r برای تمام نمونهها بزرگتراز یک بوده و در نیتجه زمان انتقال حاملها به حالات جایگزیده کمتر از زمان بازترکیب تابشی می باشد و بنابراین حاملها قبل از بازترکیب تابشی به افت و خیزهای پتانسیل منتقل می گردند.

تغییرات دمایی سطح زیر منحنی طیف گسیلی نمونه ها با افزایش دما کاهش می یابد (نقاط هندسی در شکل ۵) به طوریکه با افزایش مقدار آلایش، خاموش لومینسانس کند شده (تا آلایش متوسط) و سیس تسریع می گردد. با قراردادن پارامترهای و E_a - E_a مربوط به هر نمونه در رابطهٔ (۱۱) و σ ، τ_r / τ_{tr} انطباق این رابطه با دادههای تجربی، تغییرات دمایی سطح زیر منحنى طيف گسيلي هر نمونه پارامتر ، بهدست ميآيد. ايس پارامتر برای نمونه های بدون آلایش ، کم ، متوسط و زیاد آلایـش يافته به ترتيب ۰/۹۹۸۰، ۰/۹۹۹۰، ۵/۹۹۸۰ و ۹۹۸۸/۰ بهدست می آید. همان طوری که قبلا اشاره شد در نمونه هایی که دارای پارامتر ۷ کوچک ترمی باشند، خاموشی لومینسانس سریع تر رخ میدهد. بنابراین انتظار میرود که خاموشی حرارتـی لومینـسانس به ترتیب سریع بودن برای نمونه های بدون آلایش ، کم- ، زیاد-و متوسط- آلایش یافته رخ میده. مقادیر ۲ برای اغلب نمونهها نزدیک ۱ بوده و اختلاف ناچیزی دارند و تأثیر این پارامتر روی خاموشی حرارتی لومینسانس نمونے ہے قابل چےشم پوشی است بنابراین پیش بینی میشود که پارامتر آهنگ انتقال حاملها تأثير بسزايي روى خاموشي لومينسانس نمونهها داشته باشد به طوریکه در نمونه های با آهنگ انتقال حامل بیشتر، خاموشى حرارتى لومينسانس سريع تراتفاق مىافتد.

وجود حالات جایگزیده در چاه کوانتومی به دلیل وجود افت وخیزهای پتانسیل در چاه کوانتومی و یا در فصل مشترک چـاه و سد (تا مقدار آلایش متوسط) و نقایص موجود در ناحیه سـد(در آلایش بالا) می باشد. تغییرات دمایی طیف گسیلی نمونیه بدون آلایش و آلایش دار با کمک مدل حالات جایگزیده (LSE) قاب ، بررسی بوده و با استفاده از یارامترهای معرفی شده در ایس مدل مانند σ ، τ_r / τ_t و σ_r - E_{\circ} مانند مایی نمونه ها به خوبی قابل S توصيف است. با توجه به مقدار پارامتر $E_a - E_a$ می توان رفتار گونه نمونهها را پیش بینی کرد بهطوریکه نمونه بـدون آلایـش بـا كمترين E_a - E و نمونه با آلايش متوسط با بيشترين E_a - E به ترتیب قویترین و ضعیفترین رفتار S گونه را دارا میباشند. پارامتر پهنای چگالی حالات جایگزیده () با میزان استتار افت و خیزهای پتانسیل رابطهٔ معکوس دارد یعنی نمونهٔ آلایش یافته نسبت به نمونه بدون آلایش با داشتن کمترین مقدار σ دارای بیشترین استتار افت و خیزهای پتانسیل هستند. نسبت زمان بازتركیب تابشی به زمان انتقال حامل ها برای تمام نمونهها بزرگتر از یک بوده و در نتیجه حامل ها قبل از بازترکیب به حالات جایگزیده منتقل می گردند. بین پارامترهای ضریب باز به تله افتادن و آهنگ انتقال حامل ها، پارامتر اخیر تأثیر بیشتری را روی خاموشی حرارتی لومینسانس نمونهها دارد. این بدان معنبی است که نمونه بدون آلایش با بزرگترین آهنگ انتقال حامل و نمونه متوسط آلایش یافته با کمترین آهنگ انتقال حامل به ترتیب دارای سريعترين و كندترين خاموشي حرارتي لومينسانس ميباشند.

مولفان از آقای پرفسور هیروشی آمانو و همکارانش در دانشگاه میجو ژاپن برای تهیه نمونهها و دکتر لی و همکارانش از دانشگاه هنگ کنگ بهخاطر همکاری صمیمانه علمی سپاسگزاری مینمایند.

Nitride Semiconductors and Devices, ed. by H Morkoc, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, (1999), Springer Series in Materials Science, Vol. 32.



شکل ۵. تغییرات دمایی سطح زیرمنحنی طیف فتولومینسانس نمونههای آلایش دار و بدون آلایش (نقاط هندسی معرف داده های تجربی بوده و خطوط توپر با انطباق رابطهٔ ۱۰ با داده های تجربی و انتخاب مناسب پارامتر _۲ ترسیم شده است).

به عنوان مثال پارامتر خاموشی برحسب ۲٫۰ در دمای ۱۰۰K می به عنوان مثال پارامتر خاموشی برحسب E_a - E_a برای نمونههای با توجه به پارامترهای ۲٫۰ (۲٫۲ و E_a - E_a برای نمونههای بادون آلایش ، کم ، متوسط و زیاد آلایش یافته به ترتیب مقادیر ۱۰^{*} ۱۰×۲/۵۳ ، ۲۰۱×۹/۹۵ ، ۱۰^{*} ۱۰×۷/۹۲ بهدست می آید. این مقادیر نشان می دهد که خاموشی حرارتی لومینسانس نمونهها در دمای ۱۰۰K به ترتیب سریع بودن به صورت زیر می باشد : بادون آلایش، کم - ، زیاد – و متوسط – آلایش یافته که با دادههای تجربی (شکل۵) در توافق است.

با افزایش آلایش در چاه کوانتومی چند گانه GaN/AlGaN ابتدا انرژی قلهٔ طیف فتولومینسانس به سمت انرژیهای زیاد و سپس به سمت انرژیهای کم جابهجا میشود و همچنین پهنای طیف افزایش و سپس کاهش مییابد (در دمای پایین). این روند به علت

- 1. B Gil, Group III Nitride Semiconductor Compounds: Physical and Applications, Oxford Univ. Press, New York (1998).
- 2. R Hull, R M Osgood, Jr. H Sakaki and A Zunger,

Iwaya, H Amano and I Akasaki, *Phys. Stat. Sol. (a)* **201** (2004) 2251.

- 14. H Haratizadeh, P P Paskov, G Pozina, P O Holtz, and B Monemar, *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 1373.
- M Gallart, A Morel, T Taliercio, P Lefebvre, B Gil, J Allègre, H Mathieu, N Grandjean, M Leroux, J Massies, *Phys. Stat. Sol. (a)* 180 (2000) 127.
- F Bernardini, V Fiorentini, and D Vanderbilt, *Phys. Rev. B* 56, (1997) R10024.
- 17. S A Lourenco, I F L Dias, J L Duarte, E Laureto, V M Aquino, and J C Harmand, *Brazilian Journal of Physics* 37 (2007) 1212.
- 18. Y P Varshni, *Physica* **34** (1967) 149.
- M Leroux, N Grandjean, B Beaumont, G Nataf, F Semond, J Massies and P Gibart, J. Appl. Phys. 86 (1999) 3721.
- 20. Q Li, S J Xu, M H Xie and S Y Tong, *Euro. Phys. Lett.* **71** (2005) 994.
- 21. Q Li, S J Xu, W C Cheng, M H Xie, S Y Tong, C M Che and H Yang, *Appl. Phys. Lett* **79** (2001) 1810.
- 22. Z F Wei, S J Xu, R F Duan, Q Li, J Wang, Y P Zeng and H C Liu, J. Appl. Phys **98** (2005) 084305.
- 23. Z F Wei, S J Xu and Q Li, *J. Appl. Phys* **100** (2006) 124311.
- 24. J V D Veliadis, J B Khurgin, Y J Ding, A G Cui, and D S Katzer, *Phys. Rev. B* **50** (1994) 4463.
- 25. D Curie, *Luminescence in Crystals*, Methuen, London (1963) 206.
- 26. P G Eliseev, P Perlin, J Lee and M Osi'nski, *Appl. Phys. Lett.* **71** (1997) 569.

- 3. J Hagen, R D Metcalfe, W Clark, and D Wickenden, J. Phys. C: Solid State Phys. 11 (1978) L143.
- S Yoshida, S Misawa, and S Gonda, J. Appl. Phys. 53 (1982) 6844.
- I Akasaki, H Amano, K Itoh, H Sakai, T Tanaka and K Manaba, *Inst. Phys. Conf. Ser.* 129 (1992) 851.
- 6. S Nakamura, T Mukai and M Senoh, *Appl. Phys. Lett.* **64** (1994) 1687.
- S Nakamura and G Fasol, The Blue Laser Diode -GaN-Based Light Emitters and Lasers, Heidelberg: Springer-Verlag (1997).
- G A Smith, T N Dang, T R Nelson, J L Brown, D Tsvetkov, A Usikov, V Dmitriev, J. Appl. Phys. 95 (2004) 8247.
- J K Gillespie, R C Fitch, N Moser, T Jenkins, J Sewell, D Via, A Crespo, A M Dabiran, P P Chow, A Osinsky, M A Mastro, D Tsvetkov, V Soukhoveev, A Usikov, V Dmitriev, B Luo, S J Pearton, F Ren, Solid State Electronics 47 (2003) 1859.
- M J Manfra, N G Weimann, O Mitrofanov, T Waeehtler, D M Tennant, *Phys. Stat. Sol.* (a) **200** (2003) 175.
- 11. S Chichibu, K Wada, S Nakamura, *Appl. Phys. Lett.* **71** (1997) 2346.
- 12. T Okimoto, M Tsukihara, K Kataoka, A Kato, K Nishino, Y Naoi and S Sakai, *Phys. Stat. Sol. (c)* **5** (2008) 3066.
- 13. B Monemar, P P Paskov, H Haratizadeh, J P Bergman, E Valcheva, V Darakchieva, B Arnaudov, T Paskova, P O Holtz, G Pozina, S Kamiyama, M