

LSE

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۱/۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۸/۱۱/۲۱)

( S ) -

(FWHM)

( S )

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

به دلیل گستردگی گاف نواری از ناحیه مادون قرمز تا  
ماورای بنفش (۰/۷-۶/۲eV) در نیمرساناهای نیتروژندار و  
اهمیت آنها در کاربردهای صنعتی به ویژه در صنایع  
اپتوالکترونیک از جمله به کارگیری آن در ساخت دیودهای  
نورگسیل [۵-۸] که پایه تولید منابع نوری جدید می‌باشند و  
به کارگیری آنها در ساخت قطعات توان<sup>۱</sup> و نیز قطعات فرکانس  
بالا [۹ و ۱۰]، مطالعه این مواد و نانوساختارهای آنها هم از  
جنبه نظری و هم از جنبه عملی حائز اهمیت بوده و در بسیاری  
از مراکز پژوهشی مورد توجه می‌باشد.

یکی از اهداف مهم در پروژه‌های تحقیقاتی مربوط به  
دیودهای نورگسیل به ویژه LED سفید [۱۱]، رسیدن به بازده

نیمرسانای نیتروژندار، ترکیبی از عناصر گروه سوم جدول  
تناوبی با عنصر نیتروژن 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  
گسترده‌ای در قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی دارند. برای  
مثال از ترکیب نیمرسانای GaN و AlN آلیاژ  $Al_xGa_{1-x}N$   
به وجود می‌آید که x کسر مولی Al در این آلیاژ می‌باشد.  
ویژگی‌های این آلیاژ از دهه ۷۰ 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

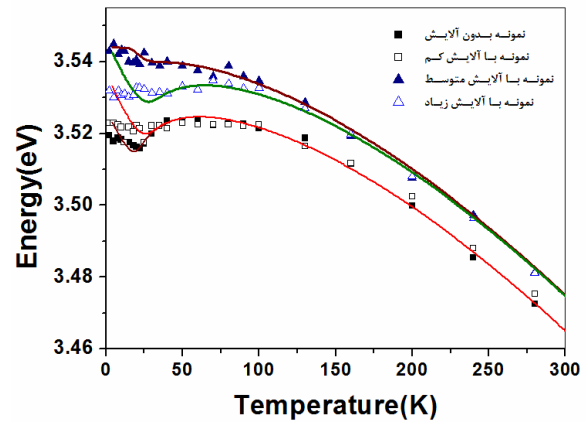
۱. Power devices

و آرایش دار را مورد مطالعه قرار دهیم. در این مقاله ابتدا نمونه‌های مورد مطالعه معرفی و به دنبال آن تغییرات دمایی طیف گسیلی نمونه‌ها بررسی می‌شود و سپس ضمن ارائه مدل LSE به تحلیل و تفسیر کمی نمونه‌ها می‌پردازیم و در انتها جمع‌بندی نتایج حاصل از این مطالعه ارائه می‌گردد.

نمونه‌های مورد مطالعه متشکل از نانو ساختار چاه‌های کوانتومی چند گانه GaN/AlGaN می‌باشند که در روی زیر لایه اکسید آلومینیوم با جهت ترجیحی (۰۰۰۱) رشد یافته‌اند. جزئیات مربوط به ساختار نمونه‌ها و روش سنجش اپتیکی آنها در مقالات قبلی مولفین گزارش شده است [۱۳، ۱۴]. این نمونه‌ها چاه‌های کوانتومی چندگانه بدون آرایش (Undoped) و آرایش یافته (Doped) با مقادیر مختلف سیلیکون شامل نمونه‌های: آرایش کم ( $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )، آرایش متوسط ( $4/2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) و آرایش زیاد ( $9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) می‌باشند.

نقاط هندسی در شکل ۱ تغییرات دمایی قله طیف فتولومینسانس (PL) نمونه‌های چاه کوانتومی GaN/Al<sub>0.۰۷</sub>Ga<sub>0.۹۳</sub>N آرایش دار و بدون آرایش را نشان می‌دهد که به طور تجربی مورد سنجش قرار گرفته‌اند [۱۴] و خطوط توپر بر اساس مدل تئوری حالات جایگزیده ترسیم شده است که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد. همان‌طوری که در شکل ۱ دیده می‌شود، در تمام دماها با افزایش مقدار آرایش، ابتدا قله طیف PL چاه کوانتومی به سمت انرژی بالاتر (جابه‌جایی آبی) انتقال می‌یابد که ناشی از استتار میدان‌های پیزوالکتریک داخلی به علت افزایش الکترون‌ها در چاه کوانتومی می‌باشد [۱۵] و با ادامه افزایش میزان آرایش، قله طیف PL به سمت انرژی پایین (جابه‌جایی قرمز) متمایل می‌گردد که این روند به اثر بازبهنجارش گاف نواری نسبت داده می‌شود [۱۴، ۱۶].

انرژی قله طیف PL نمونه بدون آرایش دارای جابه‌جایی قرمز - آبی - قرمز متوالی (رفتار S گونه) بوده که این رفتار به



شکل ۱. تغییرات دمایی قله طیف فتولومینسانس نمونه‌های آرایش دار و بدون آرایش (نقاط هندسی معرف داده‌های تجربی بوده و خطوط توپر بر اساس مدل تئوری LSE ترسیم شده است).

نوری بالا به منظور جایگزینی لامپ‌های روشنایی فعلی با نسل جدید منابع نوری بر پایه LED می‌باشد. وجود چگالی بالای نقایص ناشی از عدم انطباق ثابت شبکه لایه با زیر لایه در آلیاژ نیم رسانای نیتروژن‌دار به ویژه چاه کوانتومی GaN/AlGaN، بازده نوری را کاهش می‌دهد که غالباً ناشی از به وجود آمدن مراکز باز ترکیب غیر نوری در نانو ساختارهای مربوطه می‌باشد. از طرفی جایگزیدگی اکسیتون‌ها در افت و خیزهای پتانسیل، حساسیت بازده نوری به چگالی نقایص را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر افت و خیزهای پتانسیل باعث به تله افتادن اکسیتون‌ها در حالات جایگزیده گردیده و از رسیدن آنها به مراکز غیر نوری جلوگیری می‌کند و در نتیجه افزایش بازده نوری را به همراه دارد [۱۲]. به همین جهت بررسی مسئله جایگزیدگی اکسیتون‌ها از جنبه تجربی با کمک طیف نمایی فتولومینسانس وابسته به دما دارای اهمیت زیادی است. به منظور بررسی جایگزیدگی اکسیتون‌ها مدل‌های نظری مختلفی از جمله مدل حالات جایگزیده<sup>۱</sup> مطرح می‌باشد که در این مقاله سعی داریم با کمک مدل مذکور داده‌های تجربی مربوط به وابستگی دمایی طیف فتولومینسانس چاه‌های کوانتومی GaN/AlGaN بدون آرایش

۱. Localized States Ensembles (LSE)

بیرون آمدن از پتانسیل‌های عمیق و گذار به پتانسیل‌های بالاتر را به دست می‌آورند [۱۷]. بنابراین باز توزیع حرارتی اکسیتون‌ها در افت و خیزهای پتانسیل در نمونه بی آرایش منجر به رفتار S گونه می‌گردد. با افزایش میزان آرایش در نمونه، افت و خیزهای پتانسیل استتار شده و ارتفاع سد پتانسیل کاهش می‌یابد (خطوط توپر در شکل ۲) و این موجب کاهش رفتار S گونه می‌شود به طوری که در نمونه با آرایش متوسط بیشینه استتار رخ می‌دهد و رفتار S گونه تقریباً ناپدید می‌گردد (شکل ۱- مثلث توپر). همان طوری که قبلاً نیز اشاره شد با ادامه افزایش آرایش در نمونه، افت و خیزهای پتانسیل در نوار ظرفیت به دلیل ایجاد نقایص ساختاری به وجود می‌آید که این امر موجب پدیدار شدن مجدد رفتار S گونه می‌شود.

در دماهای بالا رفتار دمایی قله طیف PL تمام نمونه‌ها شبیه نیمرسانای ایده آل بوده و از رابطه تجربی و روشنی پیروی می‌کند [۱۸]

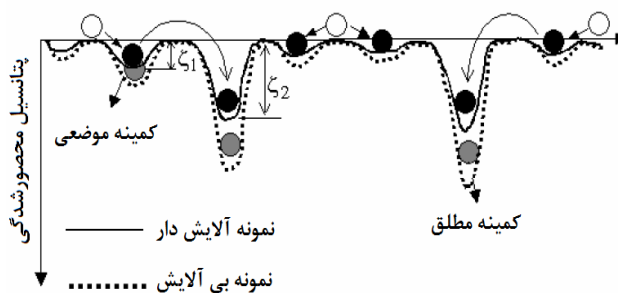
$$E_g(T) = E_0 - \alpha T^2 / (\Theta + T), \quad (1)$$

در این رابطه  $\alpha$  و  $\Theta$  به ترتیب پارامتر و روشنی و دمای دبای می‌باشند که از انطباق رابطه (۱) با داده‌های تجربی در شکل ۱ در دماهای بالا، پارامترهای مذکور برای تمام نمونه‌ها به ترتیب  $0.9 \text{ meV/K}$  و  $880 \text{ K}$  به دست می‌آیند که در توافق خوبی با مقادیر گزارش شده با گروه‌های تحقیقاتی دیگر از جمله لروکس و همکارانش دارد [۱۹].

انرژی جایگزیدگی اکسیتون‌ها در دمای پایین از اختلاف بین انرژی قله طیف PL و انرژی به دست آمده از رابطه و روشنی ( $E_g(T)$ ) محاسبه می‌شود که برای نمونه‌های بی-، کم-، متوسط- و زیاد آرایش یافته به ترتیب  $14 \text{ meV}$ ،  $12 \text{ meV}$ ،  $6 \text{ meV}$  و  $10 \text{ meV}$  به دست می‌آید. این روند کاهشی-افزایشی انرژی جایگزیدگی اکسیتون‌ها به کاهش و افزایش افت و خیزهای پتانسیل نسبت داده می‌شود. در ادامه ضمن معرفی مدل نظری حالات جایگزیده (LSE) به بررسی کمی تغییرات دمایی طیف گسیلی می‌پردازیم.

### (LSE)

مدل نظری حالات جایگزیده (LSE) که براساس باز توزیع



شکل ۲. طرحواره پتانسیل محصورشدگی برای دو نمونه با میزان افت و خیز پتانسیل متفاوت (افت و خیز پتانسیل در نمونه بدون آرایش بیشتر از نمونه آرایش یافته می‌باشد). دوائر توخالی و توپر به ترتیب نماینده اکسیتون‌های غیر جایگزیده و جایگزیده هستند. فلش‌ها فرآیند ریلکس شدن اکسیتون‌ها به داخل کمیته‌های انرژی موضعی و مطلق را نشان می‌دهند. نقاط خط چین مبین طرحواره نمونه با افت و خیز پتانسیل بزرگ‌تر است.  $\xi_1$  و  $\xi_2$  به ترتیب ارتفاع سد پتانسیل برای چاه‌هایی با پتانسیل موضعی و مطلق می‌باشند [۱۷].

جایگزیدگی اکسیتون‌ها در افت و خیزهای پتانسیل در چاه کوانتومی و یا فصل مشترک چاه و سد نسبت داده می‌شود. با افزایش مقدار آرایش در سد، رفتار S گونه کاهش یافته که به علت پرشدگی حالات جایگزیده ناشی از افزایش الکترون‌ها در چاه بر اثر یونیزه شدن اتم‌های سیلیکون در ناحیه سد می‌باشد و این روند تا جایی ادامه می‌یابد که رفتار S گونه تقریباً ناپدید می‌گردد. با ادامه افزایش مقدار آرایش سیلیکونی رفتار S گونه دوباره نمایان می‌شود که این امر ناشی از نقایص ایجاد شده در ناحیه سد به علت چگالی خیلی بالای آرایش سیلیکونی در سد بوده و منجر به ایجاد حالات جایگزیده در نوار ظرفیت گردیده و به دنبال آن باعث جایگزیدگی حفره‌ها و در نتیجه اکسیتون‌ها می‌گردد. این نتیجه از روی طیف نمایی فتولومینسانس وابسته به زمان قابل توضیح است [۱۴].

برای بررسی رفتار S گونه نمونه‌ها در دمای پایین از طرحواره باز توزیع حرارتی اکسیتون‌ها در افت و خیزهای پتانسیل نوار رسانش استفاده می‌کنیم (شکل ۲). موقعی که دمای نمونه افزایش می‌یابد ابتدا حامل‌های جایگزیده انرژی لازم برای انتقال به پتانسیل عمیق (به بزرگی  $\xi_1$ ) و عمیق‌تر (به بزرگی  $\xi_2$ ) را کسب می‌کنند و سپس با ادامه افزایش دما انرژی لازم برای

$$\frac{dN(E,T)}{dt} = G(E) + \gamma_c \int \frac{N(E',T)}{\tau_{tr}} e^{(E'-E_a)/k_B T} dE' \quad (3)$$

$$\times \frac{\rho(E)}{\int_E \rho(E) dE} - \frac{N(E,T)}{\tau_{tr}} e^{(E-E_a)/k_B T} - \frac{N(E,T)}{\tau_r}$$

در رابطه بالا از سمت راست جمله اول ( $G(E)$ ) آهنگ تولید اکسیتون‌ها ناشی از تحریک الکتریکی یا اپتیکی می‌باشد که متناسب با تابع توزیع چگالی حالات جایگزیده است ( $G(E) = k\rho(E)$  که  $k$  ثابت تناسب می‌باشد). جمله دوم آهنگ افزایش چگالی اکسیتون‌های جایگزیده به علت باز به تله افتادن اکسیتون‌ها در حالات جایگزیده را نشان می‌دهد. جمله سوم و چهارم مبین کاهش جمعیت اکسیتون‌های جایگزیده به ترتیب ناشی از برانگیخته شدن آنها با کسب انرژی دمایی (فرار از حالات جایگزیده) و باز ترکیب تابشی اکسیتون‌های جایگزیده می‌باشد. در رابطه (۲)،  $E_a$  سد پتانسیلی است که اکسیتون‌ها باید بر آن غلبه نموده تا به حالات دیگر انتقال یابند،  $\tau_r$  و  $\tau_{tr}$  به ترتیب زمان انتقال و زمان باز ترکیب تابشی اکسیتون‌ها هستند و  $\gamma_c$  ضریب (بدون بعد) باز به تله افتادن اکسیتون‌ها می‌باشد.

با اعمال شرط حالت پایا (ثابت بودن چگالی جمعیت اکسیتون‌های جایگزیده) طرف چپ معادله (۳) صفر می‌گردد و در نتیجه جواب معادله مذکور به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$N(E,T) = g(T)n(E,T). \quad (4)$$

به طوری که  $g(T)$  صرفاً تابع دما و  $n(E,T)$  تابع دما و انرژی بوده و از روابط زیر پیروی می‌کند:

$$g(T) = \frac{k\tau_{tr}}{(\gamma_c - 1) + (\tau_{tr}/\tau_r)\gamma_c \xi_1(T)/\Lambda}, \quad (5-الف)$$

$$n(E,T) = \rho(E)f(E,T), \quad (5-ب)$$

که در رابطه (۵-الف)  $\xi_1(T) = \int_{-\infty}^{+\infty} n(E',T)dE'$

$\Lambda = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(E')dE'$  می‌باشند و در رابطه (۵-ب)  $f(E,T)$  عبارت است از:

$$f(E,T) = \frac{1}{e^{(E-E_a)/k_B T} + \tau_{tr}/\tau_r} \quad (6)$$

$f(E,T)$  در رابطه بالا به عنوان تابع توزیع حالات جایگزیده می‌باشد. با توجه به شباهت بین تابع توزیع حالات جایگزیده

حرارتی حامل‌ها (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 محدوده دمایی پایین به کار می‌رود. این مدل اولین بار توسط لی و همکارانش در سال ۲۰۰۵ ارائه گردید [۲۰] و آنرا برای توصیف کمی تغییرات دمایی طیف گسیلی نقاط کوانتومی InGaN/GaN، InGaAs/GaAs و GaInAsN/GaAs [۲۱-۲۳] استفاده نمود. لورنکو و همکارانش در سال ۲۰۰۷ با کمک این مدل تغییرات دمایی طیف گسیلی چاه‌های کوانتومی GaAsSb/AlGaAs و GaAsSbN/GaAs را مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. در این بخش قصد داریم ابتدا به طور مختصر به توصیف مدل LSE پرداخته و سپس با پارامترهای مهم این مدل تغییرات دمایی طیف گسیلی چاه‌های کوانتومی GaN/AlGaAs با آرایش‌های مختلف را بررسی نماییم.

همان طوری که در بخش قبل اشاره شد موقعی که دمایی نمونه افزایش می‌یابد حامل‌ها برانگیخته شده و به حالات جایگزیده منتقل می‌گردند (شکل ۲). این امر موجب باز توزیع حرارتی حامل‌های جایگزیده شده به طوری که این فرآیند روی تغییرات دمایی طیف گسیلی نمونه تأثیر می‌گذارد و در محدوده دمایی پایین رفتار غیرعادی در قله و پهنا طیف PL مشاهده می‌شود.

در آلیاژهای نیمرساناهای نیتروژندار، باز ترکیب تابشی غالب از نوع اکسیتون‌های جایگزیده بوده [۱۳-۱۶] و تابع توزیع چگالی حالات اکسیتون‌های جایگزیده به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۲۰]:

$$\rho(E) \propto \exp[-(E-E_e)^2/2\sigma^2], \quad (2)$$

که  $E_e$  و  $\sigma$  به ترتیب مرکز و پهنا طیف 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 دمایی  $T$  ( $N(E,T)$ ) با توجه به باز توزیع حرارتی اکسیتون‌ها از رابطه زیر پیروی می‌کند [۲۰]:

دوم و سوم به ترتیب پهن شدگی ناشی از پراکندگی حامل‌ها به واسطه فونون‌های آکوستیکی و اپتیکی طولی می‌باشند. پارامترهای  $\sigma_A$  و  $\gamma_{LO}$  به ترتیب شدت جفت شدگی اکسیتون‌ها با فونون‌های آکوستیکی و اپتیکی بوده و  $\hbar\omega_{LO}$  به انرژی فونون اپتیکی معروف می‌باشد.

سطح زیر منحنی طیف لومینسانس نیز با تعداد کل حامل‌های جایگزیده متناسب بوده و از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۰]:

$$I(T) \propto \left\{ 1 + (1 - \gamma_C) \cdot \exp \left[ \frac{(E_0 - E_a) + k_B T \cdot \ln(\tau_r / \tau_{nr})}{\sqrt{(k_B T)^2 + 2(\sigma / 2.4)^2}} \right] \right\}^{-1} \quad (11)$$

خاموشی حرارتی لومینسانس<sup>۱</sup> از روی ضریب باز به تله افتادن ( $\gamma_C$ ) و آهنگ فرار حرارتی اکسیتون‌های جایگزیده  $(\tau_r / \tau_{nr}) e^{(E_0 - E_a) / k_B T}$  قابل پیش بینی می‌باشد به طوری که نمونه‌های با ضریب  $\gamma_C$  کوچک‌تر و پارامتر  $(\tau_r / \tau_{nr}) e^{(E_0 - E_a) / k_B T}$  بزرگ‌تر دارای خاموشی حرارتی لومینسانس سریع‌تری باشند [۲۲ و ۲۳]. آهنگ فرار حرارتی حامل‌ها را می‌توان برای ارتباط آن با  $E_0 - E_a$  به صورت زیر باز نویسی کرد:

$$(\tau_r / \tau_{nr}) e^{(E_0 - E_a) / k_B T} = (\tau_r / \tau_{nr}) e^{(E_0 - E_a) / k_B T} e^{(E_0 - E_a) / k_B T} \quad (12)$$

در رابطه بالا  $(\tau_r / \tau_{nr}) e^{(E_0 - E_a) / k_B T}$  را با پارامتر C نشان داده و آنرا پارامتر خاموشی نمونه می‌نامیم به طوری که نمونه با پارامتر C بزرگ‌تر دارای خاموشی حرارتی لومینسانس سریع‌تری باشد. با یکسان فرض نمودن  $\tau_r$  برای نمونه‌ها، و با توجه به اینکه مقدار پارامتر  $\tau_r / \tau_{nr}$  در محاسبات مشخص می‌باشد، با بازنویسی پارامتر C به صورت  $(\tau_r / \tau_{nr}) e^{(E_0 - E_a) / k_B T}$ ، خاموشی حرارتی لومینسانس نمونه‌ها برحسب  $\tau_r$  قابل مقایسه می‌باشد.

حال مدل LSE را برای دو حالت خاص مورد بررسی قرار

می‌دهیم:

**الف)** برای حالت  $\sigma = 0$  (چگالی حالت با تابع دلتای دیراک)،

تابع توزیع فرمی - دیراک می‌توان نتیجه 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 کلویین اشغال شده‌اند. موقعیت  $E_a$  نسبت به  $E_0$  روی رفتار دمایی طیف گسیلی سیستم‌های فیزیکی تأثیر می‌گذارد [۲۳]. در محاسبات بالا مقادیر  $\tau_r$  و  $\tau_{nr}$  صرفاً به نمونه مورد مطالعه بستگی داشته و از وابستگی دمایی آنها چشم پوشی شده است.

از روی رفتار دمایی  $N(E, T) / \tau_r$  یا معادل آن  $n(E, T)$  تغییرات دمایی شکل طیف لومینسانس حالات جایگزیده و در نتیجه تغییرات دمایی قله، پهنای و سطح زیر منحنی طیف گسیلی ناشی از حالات جایگزیده شبیه سازی می‌شوند. با کمک  $\partial n(E, T) / \partial t = 0$ ، موقعیت قله تابع  $n(E, T)$  در دماهای مختلف از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E = E_0 - x(T) k_B T \quad (7)$$

در رابطه بالا  $x(T)$  ضریب بدون بعد وابسته به دما بوده که مقدار آن از حل عددی معادله زیر به دست می‌آید:

$$x e^x = \left( \frac{\tau_r}{\tau_{nr}} \right) \left[ \left( \frac{\sigma}{k_B T} \right)^2 - x \right] e^{(E_0 - E_a) / k_B T} \quad (8)$$

معادله قبل صرفاً یک جواب در محدوده  $0 < x < (\sigma / k_B T)^2$  دارد. بستگی دمایی در رابطه (۷) صرفاً ناشی از توزیع حرارتی اکسیتون‌ها به حالات جایگزیده در دمای پایین بوده که از ترکیب آن با رابطه ورشنی می‌توان تغییرات دمایی قله طیف گسیلی را مطابق رابطه زیر در دماهای مختلف به دست آورد:

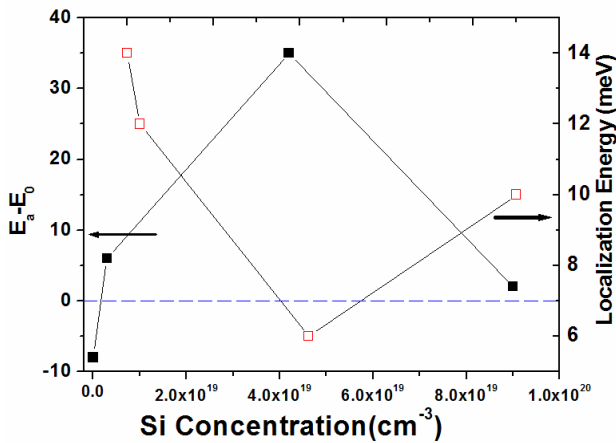
$$E = E_0 - \alpha T^2 / (\Theta + T) - x(T) k_B T \quad (9)$$

تغییرات دمایی پهنای طیف (FWHM) شامل دو بخش می‌باشد: بخش اول ناشی از حالات جایگزیده در دماهای پایین بوده که از حل عددی معادله  $n(E, T) = n(E_p, T) / 2$  به دست می‌آید  $(E_p)$  انرژی قله تابع  $n(E, T)$  می‌باشد) و بخش دوم ناشی از پراکندگی فونون‌ها و همچنین نقایص شبکه و ناخالصی‌ها بوده که از رابطه زیر پیروی می‌کند [۲۴]:

$$\Gamma(T) = \Gamma_0 + \sigma_A T + \frac{\gamma_{LO}}{e^{\hbar\omega_{LO} / k_B T} - 1} \quad (10)$$

در رابطه بالا، جمله اول پهن شدگی طیف گسیلی ناشی از پراکندگی حامل‌ها از نقایص شبکه و ناخالصی‌ها بوده و جمله

۱. Thermal quenching of luminescence



شکل ۳. تغییرات  $E_a - E_0$  (طرف چپ) و انرژی جایگزیدگی اکسیژن‌ها (طرف راست) نسبت به مقدار آلایش سیلیکون در سد.

رفتار S گونه می‌باشد (شکل ۱)، به طوری که نمونه بی آلایش با داشتن کمترین مقدار  $E_a - E_0$ ، بیشترین رفتار S شکل را دارد و در نمونه آلایش متوسط با داشتن بیشترین مقدار  $E_a - E_0$ ، رفتار S گونه تقریباً ناپدید می‌گردد. از طرفی با افزایش مقدار آلایش، انرژی جایگزیدگی رفتار کاهش می‌یابد - افزایشی داشته که دارای روندی مشابه مقدار  $E_a - E_0$  و رفتار S شکل می‌باشد (شکل ۳).

پارامتر دیگری که متأثر از مقدار آلایش می‌باشد، پارامتر  $\sigma$  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 به دلیل افزایش حامل‌ها می‌باشد ولی با ادامه افزایش مقدار آلایش، پارامتر  $\sigma$  افزایش یافته (جدول ۱) که این نشانه غالب شدن مجدد فرآیند باز توزیع حرارتی حامل‌ها 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 می‌دهد که در دمای بالا رفتاری مشابه نیمرساناهای گروه III-V از خود نشان می‌دهد به طوری که با افزایش دما، پهنای طیف گسیلی افزایش می‌یابد ولی در دمای پایین چنین رفتاری مشاهده نمی‌شود. تغییرات دمایی پهنای طیف نمونه‌ها در دماهای بالا انطباق خوبی با رابطه (۱۰) داشته و مقادیر پارامترهای انطباقی  $\Gamma$  و  $\gamma_{LO}$  در جدول ۲ آمده است.  $\sigma_A$  و

جدول ۱. پارامترهای انتخابی برای مدل LSE برای نمونه‌های مورد مطالعه.

نمونه	$E_0$ (eV)	$E_a - E_0$ (meV)	$\sigma$ (meV)	$\tau_r / \tau_{tr}$
بی آلایش	۳/۵۳۵	-۸	۶	۱۰۰۰۰
آلایش کم	۳/۵۳۵	۶	۳	۲۰۰۰۰
آلایش متوسط	۳/۵۴۴	۲۰	۳	۵۰۰۰۰
آلایش زیاد	۳/۵۴۵	۲	۶/۵	۹۵۰۰

تابع فوق مدل معروف خاموشی حرارتی<sup>۱</sup> لومینسانس برای سیستم دو ترازوی را توصیف می‌کند [۲۵]. در حالت  $\sigma = 0$  توزیع حرارتی اتفاق نمی‌افتد و سیستم عملاً توسط یک سیستم دو ترازوی هم ظرفیت توصیف می‌شود. در سیستم دو ترازوی، مقدار  $E_a - E_0$  به عنوان انرژی فعالسازی حرارتی حامل‌ها می‌باشد.

ب) در دماهای بالا با اعمال شرط  $\frac{\tau_r}{\tau_{tr}} e^{(E_0 - E_a)/k_B T} \gg 1$  مدل LSE به مدل دنباله نواری<sup>۲</sup> تبدیل می‌گردد [۲۶].

### LSE

موقعیت قله طیف گسیلی در دماهای مختلف را می‌توان با کمک رابطه (۹) و انتخاب مناسب پارامترهای  $\sigma$ ،  $\tau_r$  /  $\tau_{tr}$  و  $E_a - E_0$  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 می‌دهد و انطباق نسبتاً خوبی با داده‌های تجربی دارد. در این محاسبات پارامتر ورشنی و دمای دمای ماده برای تمام نمونه‌ها به ترتیب مقادیر ۰/۹ meV/K و ۸۸۰ K در نظر گرفته شده است.

همان طوری که قبلاً اشاره شد پارامتر  $E_a$  دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد به طوری که موقعیت آن نسبت به  $E_0$  روی رفتار دمایی طیف گسیلی نمونه تأثیر می‌گذارد. با افزایش مقدار آلایش، مقدار  $E_a - E_0$  افزایش و سپس کاهش می‌یابد (جدول ۱) که این امر به ترتیب متناظر با تضعیف و تقویت

۱. Thermal quenching model

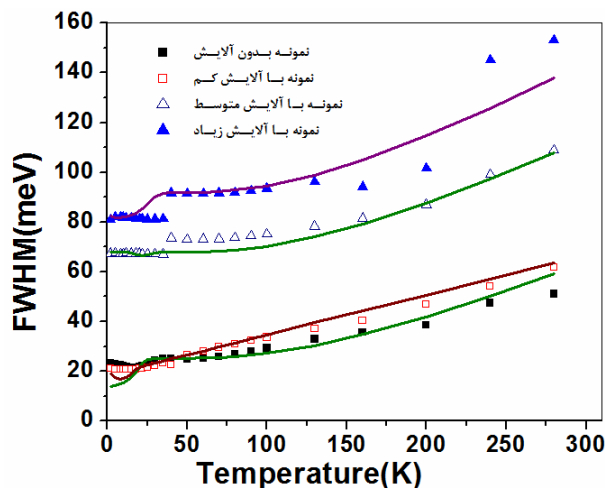
۲. Band tail model

جدول ۲. پارامترهای انتخابی جهت محاسبه پهنای طیف گسیلی برای نمونه‌های مورد مطالعه.

نمونه	$\Gamma_0$ (meV)	$\sigma_A$ (meV/K)	$\gamma_{LO}$ (meV)	$\hbar\omega_{LO}$ (meV)
بدون آلیش	۱۱	۰/۰۰۱۲	۱۱۰	۳۵
آلیش کم	۱۱/۵	۰/۰۰۱۲	۱۲۰	۳۵
آلیش متوسط	۶۰/۸	۰/۰۰۱۲	۱۳۰	۳۵
آلیش زیاد	۶۶/۵	۰/۰۰۱۲	۱۵۰	۳۵

مقدار کمیت  $\tau_r / \tau_{rr}$  برای تمام نمونه‌ها بزرگ‌تر از یک بوده و در نتیجه زمان انتقال حامل‌ها به حالات جایگزیده کمتر از زمان بازترکیب تابشی می‌باشد و بنابراین حامل‌ها قبل از بازترکیب تابشی به افت و خیزهای پتانسیل منتقل می‌گردند.

تغییرات دمایی سطح زیر منحنی طیف گسیلی نمونه‌ها با افزایش دما کاهش می‌یابد (نقاط هندسی در شکل ۵) به طوری که با افزایش مقدار آلیش، خاموش لومینسانس کند شده (تا آلیش متوسط) و سپس تسریع می‌گردد. با قراردادن پارامترهای  $E_a - E_0$  و  $\sigma$ ،  $\tau_r / \tau_{rr}$  مربوط به هر نمونه در رابطه (۱۱) و انطباق این رابطه با داده‌های تجربی، تغییرات دمایی سطح زیر منحنی طیف گسیلی هر نمونه پارامتر  $\gamma_c$  به دست می‌آید. این پارامتر برای نمونه‌های بدون آلیش، کم، متوسط و زیاد آلیش یافته به ترتیب  $۰/۹۹۸۰$ ،  $۰/۹۹۹۰$ ،  $۰/۹۹۸۵$  و  $۰/۹۹۸۸$  به دست می‌آید. همان طوری که قبلاً اشاره شد در نمونه‌هایی که دارای پارامتر  $\gamma_c$  کوچک ترمی باشند، خاموشی لومینسانس سریع تر رخ می‌دهد. بنابراین انتظار می‌رود که خاموشی حرارتی لومینسانس به ترتیب سریع بودن برای نمونه‌های بدون آلیش، کم، زیاد-متوسط-آلیش یافته رخ می‌دهد. مقادیر  $\gamma_c$  برای اغلب نمونه‌ها نزدیک ۱ بوده و اختلاف ناچیزی دارند و تأثیر این پارامتر روی خاموشی حرارتی لومینسانس نمونه‌ها قابل چشم پوشی است بنابراین پیش بینی می‌شود که پارامتر آهنگ انتقال حامل‌ها تأثیر بسزایی روی خاموشی لومینسانس نمونه‌ها داشته باشد به طوری که در نمونه‌های با آهنگ انتقال حامل بیشتر، خاموشی حرارتی لومینسانس سریع تر اتفاق می‌افتد.

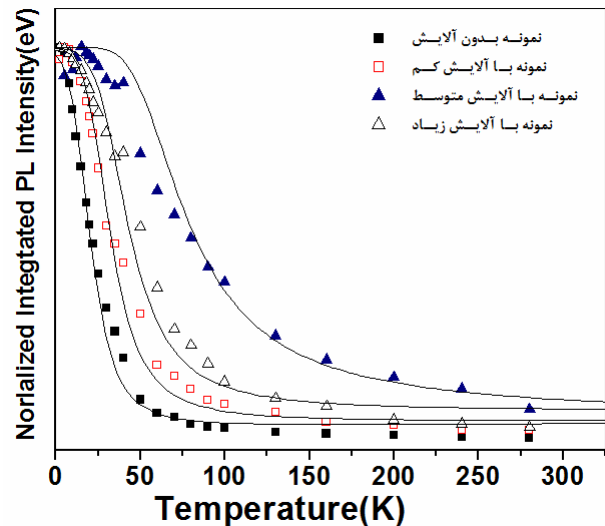


شکل ۴. تغییرات دمایی پهنای طیف فتولومینسانس نمونه‌های آلیش دار و بدون آلیش (نقاط هندسی معرف داده‌های تجربی بوده و خطوط توپر براساس مدل تئوری LSE و رابطه (۱۰) ترسیم شده است).

در اغلب نیم‌رساناهای نیتروژندار به ترتیب  $\hbar\omega_{LO}$  در  $۳۵$  meV و  $۰/۰۰۱۲$  meV/K در نظر گرفته شده است [۱۱ و ۱۲]. تغییرات دمایی پهنای طیف نمونه‌ها در دمای پایین از رابطه (۱۰) منحرف شده و از پهنای طیف لومینسانس حالات جایگزیده  $n(E,T)$  ناشی از جایگزیدگی اکسیتون‌ها پیروی می‌کند. خطوط توپر در شکل ۴ نتایج مربوط به پهنای حاصل از ترکیب رابطه (۱۰) و پهنای ناشی طیف لومینسانس حالات جایگزیده را نشان می‌دهد. پهنای طیف گسیلی اغلب نمونه‌ها در دماهای پایین تقریباً ثابت بوده و از دمای  $۴۰$  K به بعد یکباره افزایش می‌یابد و از رابطه (۱۰) پیروی می‌کند. پهنای که از مدل LSE برای دماهای پایین به دست می‌آید برای نمونه‌های کم- و زیاد-آلیش یافته انطباق نسبتاً خوبی داشته و برای نمونه‌های بدون آلیش و متوسط-آلیش یافته انطباق کمی دیده می‌شود که این عدم انطباق برای نمونه بدون آلیش ناشی از عمق زیاد افت و خیزهای پتانسیل می‌باشد در حالی که در نمونه با آلیش متوسط رفتار خاصی مشاهده شده که با روند کلی تغییرات در نمونه‌های دیگر هماهنگی لازم را ندارد و در حال حاضر دلیل قانع کننده‌ای برای آن نمی‌توان ارائه داد (شکل ۴).

وجود حالات جایگزیده در چاه کوانتومی به دلیل وجود افت و خیزهای پتانسیل در چاه کوانتومی و یا در فصل مشترک چاه و سد (تا مقدار آلیش متوسط) و نقایص موجود در ناحیه سد (در آلیش بالا) می باشد. تغییرات دمایی طیف گسیلی نمونه بدون آلیش و آلیش دار با کمک مدل حالات جایگزیده (LSE) قابل بررسی بوده و با استفاده از پارامترهای معرفی شده در این مدل مانند  $\sigma$ ،  $\tau_r / \tau_{nr}$  و  $E_a - E_c$  رفتار دمایی نمونه‌ها به خوبی قابل توصیف است. با توجه به مقدار پارامتر  $E_a - E_c$  می توان رفتار S گونه نمونه‌ها را پیش بینی کرد به طوری که نمونه بدون آلیش با کمترین  $E_a - E_c$  و نمونه با آلیش متوسط با بیشترین  $E_a - E_c$  به ترتیب قوی ترین و ضعیف ترین رفتار S گونه را دارا می باشند. پارامتر پهنای چگالی حالات جایگزیده ( $\sigma$ ) با میزان استتار افت و خیزهای پتانسیل رابطه معکوس دارد یعنی نمونه آلیش یافته نسبت به نمونه بدون آلیش با داشتن کمترین مقدار  $\sigma$  دارای بیشترین استتار افت و خیزهای پتانسیل هستند. نسبت زمان بازترکیب تابشی به زمان انتقال حامل‌ها برای تمام نمونه‌ها بزرگتر از یک بوده و در نتیجه حامل‌ها قبل از بازترکیب به حالات جایگزیده منتقل می گردند. بین پارامترهای ضریب باز به تله افتادن و آهنگ انتقال حامل‌ها، پارامتر اخیر تأثیر بیشتری را روی خاموشی حرارتی لومینسانس نمونه‌ها دارد. این بدان معنی است که نمونه بدون آلیش با بزرگترین آهنگ انتقال حامل و نمونه متوسط آلیش یافته با کمترین آهنگ انتقال حامل به ترتیب دارای سریعترین و کندترین خاموشی حرارتی لومینسانس می باشند.

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



شکل ۵. تغییرات دمایی سطح زیرمنحنی طیف فتولومینسانس نمونه‌های آلیش دار و بدون آلیش (نقاط هندسی معرف داده‌های تجربی بوده و خطوط توپر با انطباق رابطه  $10^\circ$  با داده‌های تجربی و انتخاب مناسب پارامتر  $\gamma$  ترسیم شده است).

به عنوان مثال پارامتر خاموشی برحسب  $1/\tau_r$  در دمای  $100\text{K}$  با توجه به پارامترهای  $\tau_r / \tau_{nr}$  و  $E_a - E_c$  برای نمونه‌های بدون آلیش، کم، متوسط و زیاد آلیش یافته به ترتیب مقادیر  $4 \times 10^4$ ،  $2/53 \times 10^4$ ،  $9/95 \times 10^3$ ،  $4/88 \times 10^3$ ،  $7/92 \times 10^3$  به دست می آید. این مقادیر نشان می دهد که خاموشی حرارتی لومینسانس نمونه‌ها در دمای  $100\text{K}$  به ترتیب سریع بودن به صورت زیر می باشد: بدون آلیش، کم، زیاد- و متوسط- آلیش یافته که با داده‌های تجربی (شکل ۵) در توافق است.

با افزایش آلیش در چاه کوانتومی چند گانه GaN/AlGaIn ابتدا انرژی قله طیف فتولومینسانس به سمت انرژی‌های زیاد و سپس به سمت انرژی‌های کم جابه‌جا می شود و همچنین پهنای طیف افزایش و سپس کاهش می یابد (در دمای پایین). این روند به علت



- 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.
  15. 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.
  16. 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.
  19. 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 Osiński, *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.
  4. S Yoshida, S Misawa, and S Gonda, *J. Appl. Phys.* **53** (1982) 6844.
  5. 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.
  7. S Nakamura and G Fasol, *The Blue Laser Diode - GaN-Based Light Emitters and Lasers*, Heidelberg: Springer-Verlag (1997).
  8. G A Smith, T N Dang, T R Nelson, J L Brown, D Tsvetkov, A Usikov, V Dmitriev, *J. Appl. Phys.* **95** (2004) 8247.
  9. 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.
  10. M J Manfra, N G Weimann, O Mitrofanov, T Waechtler, 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