

## وابستگی انرژی گذارهای اپتیکی در نانوساختارهای چاههای کوانتومی GaN/AlGaN به پهنای سد و چاه کوانتومی

حمید هراتی زاده<sup>۱،۲</sup>، مرتضی اسمعیلی<sup>۱</sup> و پر اولاف هولتز<sup>۲</sup>

۱. دانشکده فیزیک دانشگاه، صنعتی شاهرود، بلوار دانشگاه ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱، شاهرود، ایران

۲. انستیتوی فیزیک و تکنولوژی سنجش دانشگاه لینشوپینگ ۵۸۱۸۳، لینشوپینگ، سوئد

پست الکترونیکی: hamha@walla.com

(دریافت مقاله: ۸۵/۵/۳ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۲/۱۲)

### چکیده

در این مقاله اثر پهنای سد و پهنای چاه کوانتومی GaN/AlGaN بر روی انرژی گذارهای اپتیکی و طیف فتولومینسانس آنها با استفاده از تکنیک فتولومینسانس مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه طیف فتولومینسانس این چاههای کوانتومی در دماهای پایین نشان می‌دهد که نحوه تغییرات انرژی گذار اپتیکی بر حسب پهنای سد در ساختارهای کوانتومی GaN/AlGaN بر خلاف آنچه که در سایر نیمرساناها از قبیل آلیاژهای GaAs مشاهده شده، می‌باشد و با کاهش پهنای سد در این نوع چاههای کوانتومی جابه‌جایی به سمت انرژیهای بیشتر در قله طیف فتولومینسانس دیده می‌شود که علت آن با یک بحث نظری توضیح داده شده است. نحوه تغییرات انرژی گذارهای اپتیکی بر حسب پهنای چاه در چاههای کوانتومی چندگانه GaN/AlGaN به صورت تئوری محاسبه شده و نشان داده شده است که با نتایج تجربی به خوبی همخوانی دارد. همچنین در این کار نشان داده‌ایم که پهنای چاه کوانتومی در میزان همپوشانی فضایی توابع موج الکترون و حفره و استتار کردن میدانهای قطبشی داخلی اثر مستقیم دارد.

واژه‌های کلیدی: چاههای کوانتومی چندگانه GaN/AlGaN، فتولومینسانس، فوتولومینسانس وابسته به زمان، میدانهای قطبشی، نانوساختارهای نیمرسانا، میدان پیزوالکتریک

### ۱. مقدمه

و قطعات به کار گرفته شده در دماهای بالا و محیطهای شیمیایی و نیز قطعات توان و سنسورهای گرمایی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند [۲]. در اکثر این قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی به منظور افزایش کارایی و بازدهی از ساختار چاههای کوانتومی چندگانه و سایر نانوساختارها در ناحیه فعال استفاده می‌شود.

نیمرساناها نیتروژندار اکثراً در وضعیت تعادل ترمودینامیکی دارای ساختار ورتسایتس می‌باشند و یکی از ویژگیهای آنها به دلیل عدم تقارن مراکز بارهای مثبت و منفی در ساختار ورتسایتس وجود بارهای قطبشی در سطوح مشترک قطعات حاوی این ساختارهاست که باعث به وجود آمدن

نیمه هادیهای نیتروژندار که شامل ترکیبات InN و AlN و GaN و آلیاژهای آنها می‌باشند، به دلیل داشتن ویژگیهای منحصر به فرد از جمله گاف انرژی پهن و گسترده (۰/۷ - ۶/۲eV) که محدوده وسیعی از طیف الکترومغناطیسی از IR تا UV را شامل می‌شود، کاربردهای فراوانی در قطعات اپتوالکترونیکی مانند دیودهای نوری (LEDs) و دیودهای لیزری (LDs) پیدا کرده‌اند [۱]. نیمرساناها نیتروژندار علاوه بر خصوصیات اپتیکی به دلیل پایداری شیمیایی خوب و عملکرد مناسب در دماهای بالا در قطعات الکترونیکی فرکانس بالا مانند ساختارهای<sup>۱</sup> HEMT

۱. High Electron Mobility Transistor (HEMT)

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های مورد مطالعه.

نوع نمونه	تعداد چاه کوانتومی	پهنای چاه (nm)	پهنای سد (nm)	Al درصد	روش رشد نمونه
GaN /Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N SQW <sub>s</sub>	۱	۴/۱	۳۰	۰/۱۷~	MBE
GaN /Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N MQW <sub>s</sub>	۴	۴/۱	۳۰	۰/۱۷~	MBE
GaN /Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N MQW <sub>s</sub>	۴	۴/۱	۵	۰/۱۷~	MBE
GaN /Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N MQW <sub>s</sub>	۶	۸، ۶، ۴، ۲/۵، ۱/۵، ۱	۱۰	۰/۱۷~	MBE
GaN /Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N MQW <sub>s</sub>	۵	۱/۵	۷/۲	۰/۰۷~	MOCVD
GaN /Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N MQW <sub>s</sub>	۵	۳/۰	۷/۲	۰/۰۷~	MOCVD
GaN /Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N MQW <sub>s</sub>	۵	۴/۵	۷/۲	۰/۰۷~	MOCVD

کوانتومی GaAs/AlGaAs به پهنای سد بستگی دارد به گونه‌ای که با کاهش ضخامت سد یک انتقال انرژی گسیلی به سمت انرژیهای بیشتر (انتقال آبی) در انرژی گسیلی چاههای کوانتومی GaN/AlGaN مشاهده می‌شود.

## ۲. روش آزمایشگاهی و نمونه‌ها

نمونه‌های مورد بررسی در این مقاله، چاههای کوانتومی GaN/AlGaN می‌باشند. دو دسته از این چاههای کوانتومی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دسته اول شامل سه نمونه با میزان ۱۷٪ آلومینیوم در آلیاژ سد (AlGaN) می‌باشند که به روش MBE و در جهت (۰۰۰۱) زیر لایه سفایر (اکسید آلومینیوم) و بر روی لایه بافر GaN به ضخامت ۳μm رشد داده شده‌اند و دارای سدهای با پهنای متفاوت و چاههای با ضخامت ۴/۱nm می‌باشند (جدول ۱). بر روی تمام نمونه‌هایی که با روش MBE رشد پیدا کرده‌اند یک لایه پوششی<sup>۴</sup> با ضخامت ۳۰nm رشد داده شده است. دسته دوم شامل سه نمونه چاه کوانتومی GaN/AlGaN با میزان ۷٪ آلومینیوم در آلیاژ سد (AlGaN) می‌باشند که به روش رسوب گذاری بخار شیمیایی (MOCVD) و در جهت (۰۰۰۱) زیر لایه اکسید آلومینیوم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) رشد داده شده‌اند. در این گروه به روی زیر لایه اکسید آلومینیوم یک لایه AlN به ضخامت ۲۰ nm و یک لایه GaN بافر بدون آلیاژ به ضخامت تقریبی ۲μm رشد داده شده و سپس ناحیه

میدانهای قطبشی داخلی بزرگ در این ساختارها می‌شود، و این به نوبه خود روی مکانیزم بازترکیب تابشی و سایر خواص اپتیکی و الکترونیکی این ساختارها تأثیر خواهد داشت [۳-۷]. در حقیقت یکی از دلایل منحصر به فرد بودن گروه تری نیترایدها وجود همین میدانهای قطبشی است که هر دو نوع میدانهای قطبشهای پیزوالکتریک<sup>۱</sup> و خودبه‌خودی<sup>۲</sup> را شامل می‌شود. حضور این میدانها باعث خمش نوارهای رسانش و ظرفیت، تأثیر روی تراکم حاملها در ناحیه فعال و شیفت انرژی گسیلی ناشی از گذارهای اپتیکی به سمت انرژیهای کمتر (شیفت قرمز) به علت اثر محدودیت کوانتومی استارک<sup>۳</sup> می‌شود [۸] و راندمان بازترکیب تابشی را در این ساختارها به دلیل کاهش همپوشانی توابع موج الکترون و حفره کاهش می‌دهد [۹-۱۰]. لازم به ذکر است که میدان پیزوالکتریک به هندسه و ابعاد ساختار مورد بررسی از قبیل پهنای چاه و پهنای سد و تعداد چاههای کوانتومی بستگی دارد [۱۱-۱۲].

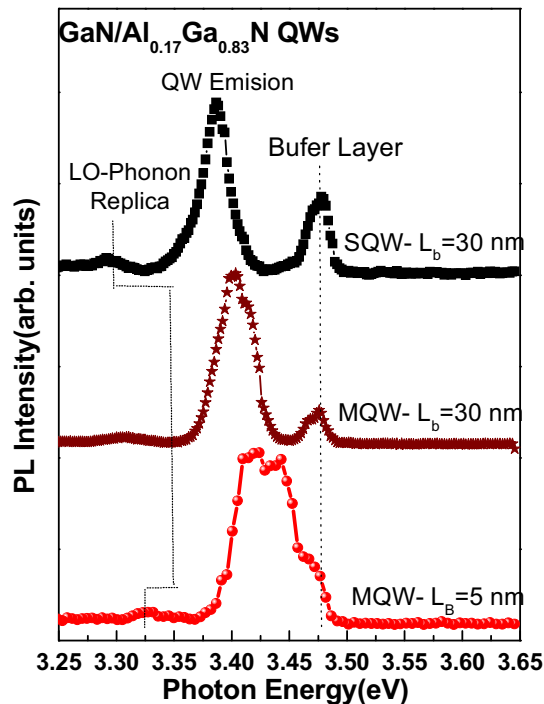
در این مقاله با استفاده از روش فتولومینسانس اثر پهنای سد و پهنای چاه بر روی گسیل اپتیکی تعدادی از نانو ساختارهای نیتروژندار GaN/AlGaN مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات نشان می‌دهد که انرژی گسیلی در اثر بازترکیب نوری در چاههای کوانتومی GaN/AlGaN برخلاف چاههای

۱. Piezoelectric polarizations(pz)

۲. Spontaneous polarizations(sp)

۳. Quantum Confined Stark Effect(QCSE)

۴. Cap layer



شکل ۱. طیف فتولومینسانس نمونه‌های رشد یافته به روش MBE در دمای هلیوم مایع (۲K) (الف) چاه کوانتومی یگانه GaN/Al<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>N با پهنای سد ۳۰ nm (ب) چاه کوانتومی چندگانه GaN/Al<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>N با پهنای سد ۵ nm (ج) چاه کوانتومی چندگانه GaN/Al<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>N با پهنای سد ۵ nm.

به سمت انرژیهای بیشتر (جابه‌جایی آبی) نشان می‌دهد. همان طور که پیش از این اشاره شد مشاهده یک چنین رفتاری برخلاف آن چیزی است که در ساختارهای چاه کوانتومی GaAs/AlGaAs دیده می‌شود.

در چنین نیم‌رساناهایی با کاهش پهنای سد، انرژی حالت پایه الکترون و حفره به علت جفت‌شدگی توابع موج گرفتار شده در داخل چاهها افزایش پیدا می‌کند. همان طور که در ادامه نشان خواهیم داد چنین رفتاری مربوط به حضور میدانهای قطبشی در این چاهها می‌باشد. در ادامه اندازه این میدانها را برآورد خواهیم کرد و می‌بینیم که این میدانها در ساختارهای ناهمگون ورتسایتس نیتروژندار شدید بوده و در سرتاسر ناحیه سد و چاه حضور دارند. از بقای بردار جابه‌جایی الکتریکی  $(\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0)$  در امتداد فصل مشترک ناحیه سد و چاه در ساختار ناهمگون به رابطه زیر می‌رسیم

فعال متشکل از پنج لایه گالیم نیتراید و آلومینیم گالیم نیتراید به تناوب و به ضخامتهای به ترتیب ۳ nm و ۷ nm رشد داده شده است (جدول ۱).

برای مطالعات اپتیکی به کمک تکنیک فتولومینسانس، نمونه‌ها در کرایوستات محتوی He مایع (دمای ۲K) قرار داده شده و با هارمونیک چهارم لیزر Nd-Vanadate (دارای طول موج ۲۶۶ nm) برانگیخته شده‌اند. سیگنال فتولومینسانس به وسیله یک توری تک رنگ کننده پراکنده و به وسیله یک دوربین CCD آشکار سازی شده است. برای آزمایشهای فتولومینسانس وابسته به زمان<sup>۱</sup> (TRPL) از هارمونیک سوم لیزر پالسی Ti-Sapphire به عنوان منبع تحریک استفاده شده است و آشکار سازی سیگنالهای TRPL با سینکرواسکن هاماماتسو با دقت بیشتر از ۱۰ ps انجام گرفته است [۱۳].

### ۳. نتایج و بحث

در شکل ۱ طیف فتولومینسانس نمونه‌های گروه اول نشان داده شده است. شکل ۱-الف طیف فتولومینسانس یک چاه کوانتومی یگانه GaN با پهنای چاه ۴/۱ nm که بین سدهای Al<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>N با ضخامت ۳۰ nm قرار دارد را در دمای ۲K نشان می‌دهد. همان طور که از روی شکل مشخص است بیشینه انرژی گسیلی از چاه کوانتومی در ۳/۳۹ eV قرار دارد که از مقدار مربوط به گاف انرژی GaN که در حدود ۳/۴۸ eV است به میزان تقریبی ۹۰ meV کمتر است. دلیل این کاهش انرژی (جابه‌جایی قرمز) همان گونه که اشاره شد اثر محدودیت کوانتومی استارک ناشی از حضور میدانهای قطبشی در این ساختار می‌باشد. همین موضوع در یک چاه کوانتومی چندگانه که دارای ساختار کاملاً مشابه با نمونه اول می‌باشد (شکل ۱-ب) نیز مشاهده شده است. شکل ۱-ج طیف فتولومینسانس یک چاه کوانتومی چندگانه از همین نوع با پهنای چاه مشابه ۴/۱ nm ولی دارای پهنای سد ۵ nm را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشخص است با کاهش پهنای سد قله انرژی گسیلی چاه کوانتومی (QW) جابه‌جایی به اندازه ۳۵ meV

اصلی چاه کوانتومی (QW) مشاهده می‌شود [۱۶-۱۵]. لذا مشاهده ردپای LO- فونون در طیف فتولومینسانس گسیلی، نشانه جایگزیدگی حاملها در هنگام باز ترکیب می‌باشد. همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد ردپای LO فونون برای هر یک از چاهها نشان داده شده است.

شکل ۲- الف طیف PL چاه کوانتومی چندگانه رشد یافته با روش MBE شامل چاههای با پهنای ۱ nm، ۱/۵، ۲/۵، ۴، ۶، ۸ می‌باشد که این چاهها توسط سدهای ۱۰ nm از هم جدا شده‌اند. همان گونه که مشاهده می‌کنیم قله انرژی گسیلی به پهنای چاه بستگی دارد و با افزایش پهنای چاه قله انرژی گسیلی به دلیل اثر محدودیت کوانتومی حاملها در درون چاه کوانتومی به سمت انرژیهای کمتر انتقال می‌یابد (جابه‌جایی قرمز). تعدادی از قله‌های نشان داده شده در شکل ۲- الف مربوط به ردپای فونون اپتیکی طولی (LO- فونون) برخی از چاههای کوانتومی می‌باشد و همان گونه که قبلاً اشاره شد نشانگر جایگزیدگی اکسیتونها در داخل چاهها است. این بستگی انرژی گسیلی به پهنای چاه در طیف فتولومینسانس نمونه‌های گروه دوم که شامل سه نمونه چاههای کوانتومی چندگانه با پهنای ۱/۵ nm، ۳، ۴/۵ می‌باشد (شکل ۲- ب) نیز به وضوح مشاهده می‌شود. این گروه از نمونه‌ها به روش MOCVD رشد یافته‌اند. طیف فتولومینسانس حاصل از نمونه‌های با پهنای چاههای متفاوت نشان می‌دهد (شکل ۲) که طیف گسیلی از چاههای کوانتومی با پهنای کمتر از ۴ nm (ضخامت بحرانی در GaN) نسبت به قله مربوط به GaN کپه‌ای (۳/۴ eV) به دلیل وجود اثر محدودیت کوانتومی به سمت انرژیهای بیشتر انتقال پیدا می‌کند در حالی که در چاههای با ضخامت بیشتر از ۴ نانومتر به دلیل وجود بارهای قطبشی و در نتیجه میدان الکتریکی تقریباً قوی نوارهای رسانش و هدایت خمیده می‌شوند و چاه کوانتومی مربعی به مثلثی تبدیل می‌شود و در نتیجه به دلیل اثر کوانتومی محدود فرانس- کلدیش<sup>۱</sup> متوسط انرژی تولید شده در اثر باز ترکیب الکترون و حفره به سمت انرژیهای کمتر شیفیت پیدا می‌کند [۱۷]. در حقیقت اثر کوانتومی

$$\varepsilon_w E_w - \varepsilon_b E_b = P_b - P_w, \quad (1)$$

که در آن  $\varepsilon_w$  ( $\varepsilon_b$ ) ثابت دی الکتریک استاتیکی چاه (سد)،  $E_w$  ( $E_b$ ) میدان الکتریکی در ناحیه چاه (سد) و  $P_w$  ( $P_b$ ) قطبش در ناحیه چاه (سد) می‌باشد. رابطه (۱) در دو حالت حدی ساده سازی می‌شود: حالت اول حالتی است که پهنای سد در نمونه‌ای که دارای چاه کوانتومی یگانه است به بینهایت میل می‌کند که در آن صورت

$$E_w = (P_b - P_w) / \varepsilon_w, \quad (2)$$

و حالت دوم حالتی است که نمونه دارای تعداد زیادی چاه کوانتومی است که در این صورت شرط مرزی تناوبی  $L_w E_w + L_b E_b = 0$  منجر به رابطه (۳) برای اندازه میدان الکتریکی در ناحیه چاه می‌شود که در آن فرض شده ثابت دی الکتریک چاه و سد تفاوت چندانی با هم ندارند [۱۴]:

$$E_w = L_b (P_b - P_w) / (L_b + L_w) \varepsilon \varepsilon_0, \quad (3)$$

و به همین ترتیب میدان در ناحیه سد از رابطه

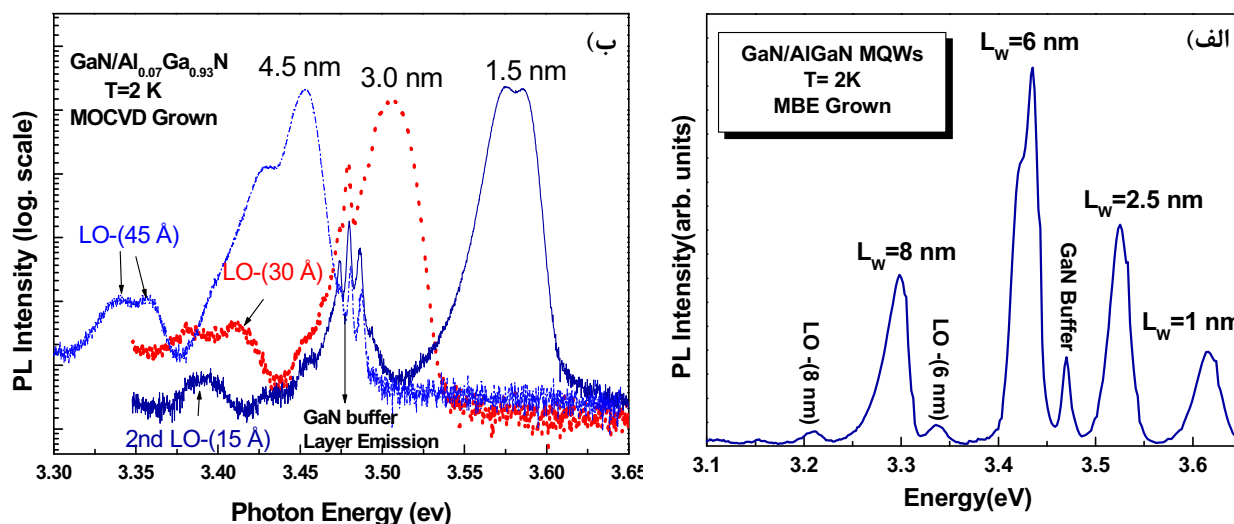
$$E_b = L_w (P_w - P_b) / (L_w + L_b) \varepsilon \varepsilon_0, \quad (4)$$

به دست می‌آید که در روابط فوق  $L_w$  ( $L_b$ ) ضخامت چاه (سد) چاه کوانتومی است.

بحثی که به صورت نظری در فوق آمده رفتار مشاهده شده در شکل ۱ را توضیح می‌دهد. مقایسه روابط ۲ و ۳ بیانگر این است که میدان الکتریکی در یک چاه کوانتومی یگانه (شکل ۱- الف) از میدان الکتریکی در چاه کوانتومی چندگانه با سدهای باریکتر (شکل ۱- ج) به مراتب بیشتر است. همچنین رابطه ۳ نشان می‌دهد که در چاههای کوانتومی چندگانه افزایش پهنای سد مترادف با افزایش میدان در چاه می‌باشد و میدان قویتر نیز منجر به اثر کوانتومی استارک مؤثرتر یعنی افزایش شیفیت قرمز خواهد شد (شکلای ۱- ب و ج).

هنگام باز ترکیب نوری اکسیتونها یا حاملهای آزاد در صورت جایگزیدگی آنها طبق قانون بقای اندازه حرکت خطی نیاز به حضور یک فونون است و محتملترین فونون در باز ترکیب نوری فونون اپتیکی طولی (LO- فونون) است و ردپای این فونون در GaN در حدود ۹۲ meV پایینتر از پیک

۱. Quantum Confined Franz-Keldysh Effect



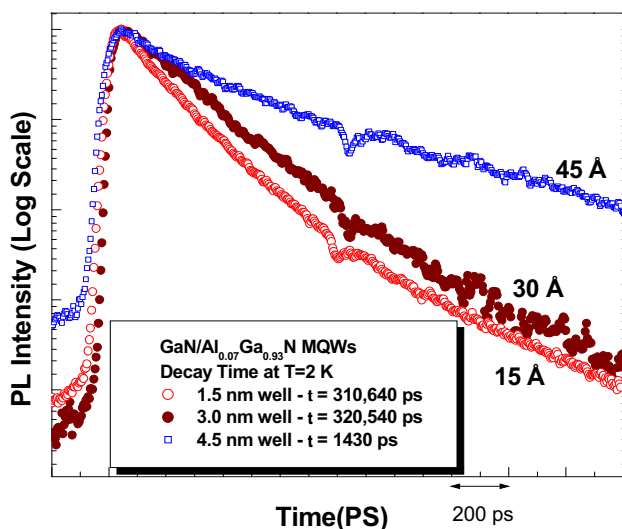
شکل ۲. وابستگی انرژی گسیلی چاههای کوانتومی به پهنای چاهها و مشاهده قله‌های LO- فونونی در طیف PL مربوط به الف) چاه کوانتومی چندگانه  $\text{GaN/Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$  که شامل چاههای با پهنای ۱، ۱/۵، ۲/۵، ۴، ۶، ۸ و سدهای ۱۰ nm است. ب) سه نمونه چاه کوانتومی چندگانه  $\text{GaN/Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$  با پهنای چاه ۱/۴، ۳/۵، ۵/۵ نانومتر که توسط سدهای ۷ nm از هم جدا شده‌اند (اندازه‌گیری در دمای ۲K).

اطلاعات با ارزشی را در مورد شناخت فرآیندهای بازترکیب به ما می‌دهد. در این تکنیک، نمونه توسط یک لیزر پالسی تحریک می‌شود و فرصت واهلش به فرآیند فتولومینسانس نمونه داده می‌شود و به این ترتیب تغییرات زمانی فرآیند فتولومینسانس به صورت یک نمودار سه بعدی ثبت می‌گردد. در این نمودار سه بعدی تغییرات شدت نور گسیلی از نمونه بر حسب طول موج یا انرژی در زمانهای مختلف و یا تغییرات زمانی شدت نور گسیلی در طول موجهای مختلف ثبت می‌گردد که منحنی شکل ۴ نمونه‌ای از آن است و زمان واهلش برای نمونه‌های دسته دوم، را در دمای ۲K نشان می‌دهد. به کمک این نمودار می‌توان تأثیر ضخامت چاه کوانتومی در زمان واهلش بازترکیب نوری آنها را مورد مطالعه قرار داد. مقایسه زمان واهلش این نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش پهنای چاه کوانتومی زمان واهلش به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد به نحوی که زمان واهلش برای نمونه با پهنای چاه ۴/۵ نانومتر تقریباً ۲/۵ برابر طولانی‌تر از نمونه با پهنای چاه ۳ نانومتر است. علت مشاهده چنین رفتاری وجود میدانهای الکتریکی داخلی می‌باشد که باعث رانده شدن الکترونها و حفره‌ها به دو فصل مشترک متقابل در داخل چاه می‌شود و جدایی بین توابع موج الکترون و

محدود شده استارک بر اثر محدودیت غلبه می‌کند و موجب می‌شود انرژی قله لومینسانس حاصل از این چاهها پایینتر از انرژی GaN کپه‌ای واقع شود [۱۸].

با به کارگیری نظریه اغتشاش و حل معادله شرودینگر برای یک چاه پتانسیل مربعی کم عمق که توسط میدان الکتریکی اغتشاش یافته است (و به چاه مثلثی متناهی تغییر شکل یافته است)، می‌توان ترازهای انرژی مربوط به الکترونها و حفره‌ها را در چاههای با پهنای مختلف به دست آورد و با در نظر گرفتن انرژی بستگی اکسیتونها انرژی گسیلی به صورت نظری محاسبه می‌گردد. برای محاسبه انرژی گسیلی در نمونه‌های رشد یافته به روش MOCVD از حل معادله شرودینگر در چاه پتانسیل کم عمق که توسط Singh انجام گرفته، استفاده شده است [۱۹]. شکل ۳ توافق خوبی بین مقادیر انرژی محاسبه شده و مقادیر اندازه گیری شده به روش فتولومینسانس را نشان می‌دهد و همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است انرژی بیک طیف فتولومینسانس با افزایش پهنای چاه، به دلیل وجود میدان الکتریکی قوی کاهش می‌یابد (جابه‌جایی قرمز).

بررسی دینامیک فرآیندهای بازترکیب (تغییرات زمانی طیف فتولومینسانس) که به کمک تکنیک TRPL صورت می‌پذیرد

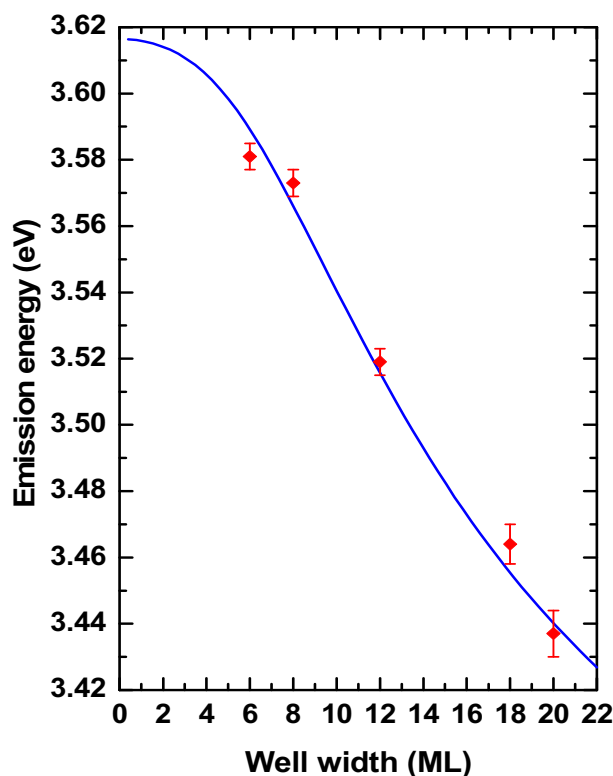


شکل ۴. تغییرات زمان واهلش پیک فتولومینسانس حاصل از چاههای کوانتومی چندگانه GaN/AlGaN با پهنایهای مختلف در دمای ۲K. جدایی بیشتر توابع موج الکترون وحفره در اثر وجود میدان الکتریکی باعث طولانی‌تر شدن زمان واهلش در چاه پهن‌تر می‌شود.

شده است با افزایش شدت نور لیزر به اندازه دو مرتبه بزرگی قله فتولومینسانس چاه کوانتومی به پهنای ۳ نانومتر به اندازه  $3/5 \text{ meV}$  به سمت انرژیهای بیشتر (جابه‌جایی به آبی) انتقال پیدا می‌کند در حالی که هیچ گونه انتقالی در قله فتولومینسانس چاه کوانتومی با پهنای  $1/5$  نانومتر مشاهده نمی‌شود. این موضوع به دلیل پوشش مؤثرتر میدانهای الکتریکی داخلی در چاه پهن‌تر توسط حاملهای نوری (زوجهای الکترون-حفره ایجاد شده توسط نور لیزر تحریکی) می‌باشد که ناشی از طولانی‌تر بودن زمان واهلش حاملها در چاه کوانتومی پهن‌تر است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

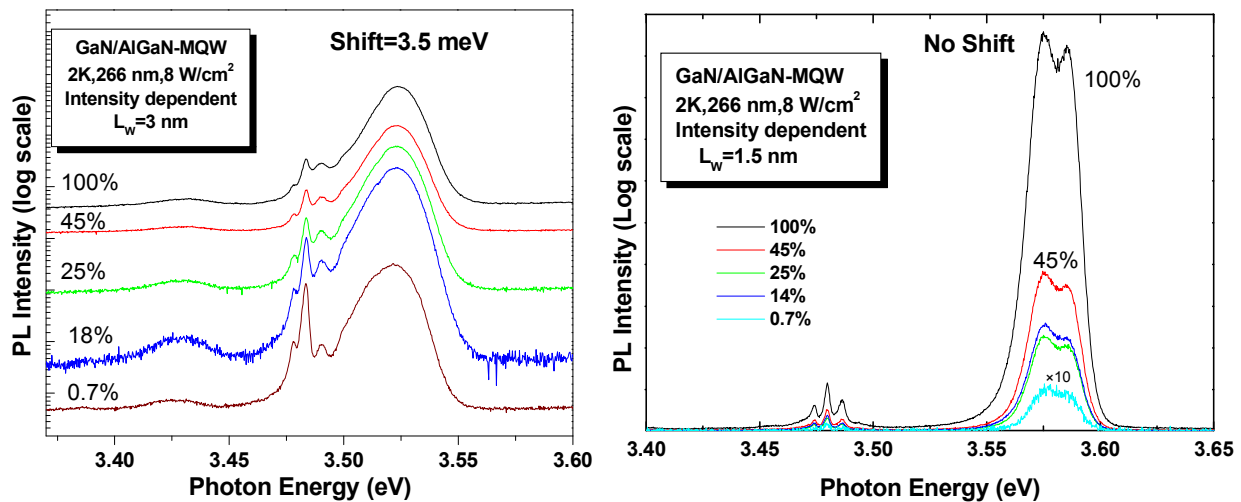
ما خصوصیات نوری دو دسته از چاههای کوانتومی یگانه و چندگانه GaN/AlGaN که یک دسته دارای پهنای سد مختلف و دسته دوم دارای پهنای چاه مختلف می‌باشند را به روش فتولومینسانس بررسی کردیم و مشاهده نمودیم که با کاهش پهنای سد AlGaN قله انرژی گسیلی حاصل از چاههای GaN به علت وابستگی میدانهای پلاریزاسیون داخلی به پهنای سد به



شکل ۳. مقایسه بین نتایج نظری (خط) و نتایج تجربی (دایره‌های توپر) تغییرات انرژی گسیلی بر حسب پهنای چاه در چاههای کوانتومی چندگانه GaN/Al<sub>0.07</sub>Ga<sub>0.93</sub>N.

حفره را افزایش می‌دهد که این موضوع موجب کند شدن آهنگ بازترکیب حاملها در چاههای پهن‌تر می‌شود. در حقیقت دلیل اصلی استفاده از ساختارهای کوانتومی و ارجحیت آنها به ساختارهای کپه‌ای در همین موضوع نهفته است. زیرا با ایجاد محدودیت برای توابع موج الکترون و حفره در یک چاه یا نقطه کوانتومی همپوشانی آنها و در نتیجه احتمال بازترکیب آنها افزایش یافته و زمان بازترکیب کاهش می‌یابد که این به معنای افزایش بازده نوری می‌باشد که به ویژه در ساختار دیودهای نوری و لیزری نقش کلیدی را دارد.

اگر وابستگی طیف فتولومینسانس به شدت نور لیزر برانگیختگی در این نمونه‌ها را مورد بررسی قرار دهیم (شکل ۵) مشاهده می‌کنیم که انرژی قله طیف فتولومینسانس حاصل از چاههای پهن‌تر نسبت به تغییرات شدت نور تحریکی حساستر می‌باشد، در حالی که در چاههای باریکتر انتقال انرژی مشاهده نمی‌شود. همان گونه که در شکل ۵ نشان داده



شکل ۵. نمودارهای وابستگی به شدت طیف فتولومینسانس چاههای کوانتومی GaN/Al<sub>0.۰۷</sub>Ga<sub>0.۹۳</sub>N با ضخامت‌های ۱/۵ و ۳ نانومتر.

تغییری نمی‌کند در حالی که برای نمونه با پهنای چاه ۳ نانومتر پیک انرژی گسیلی شیفته با اندازه ۳/۵meV از خود نشان می‌دهد که این شیفت به طولانی بودن زمان واهلش در چاههای بهتر نسبت داده می‌شود.

### قدردانی

نویسندگان از آقای پروفیسور هیروشی آمانو و همکارانشان در دانشگاه میجو ژاپن برای فراهم کردن نمونه‌ها و همچنین پروفیسور بو مونمار و دکتر پلامان پاسکوف انستیتوی فیزیک و تکنولوژی سنجش دانشگاه لیشوینگ سوئد به خاطر شرکت در بحث‌های علمی و راهنمایی‌های ارزنده صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنند.

سمت انرژیهای بالاتر انتقال می‌یابد (جابه‌جایی آبی). نتایج آزمایشات و محاسبات نظری ما نشان می‌دهد که با افزایش پهنای چاه کوانتومی GaN انرژی گذار اپتیکی به علت وجود میدانهای قطبشی داخلی کاهش (جابه‌جایی قرمز) می‌یابد و نتایج نظری و تجربی به خوبی با هم همخوانی دارند. همچنین نشان دادیم که با افزایش پهنای چاههای کوانتومی زمان واهلش بازترکیب حاملها به دلیل وجود میدانهای الکتریکی داخلی و جدایی بیشتر توابع موج الکترون وحفره، به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. این موضوع توسط وابستگی انرژی قله طیف فتولومینسانس چاههای کوانتومی چندگانه GaN/Al<sub>0.۰۷</sub>Ga<sub>0.۹۳</sub>N به شدت نور لیزر برانگیختگی نیز تأیید شده است. به طوری که پیک طیف فتولومینسانس حاصل از چاه کوانتومی ۱/۵ نانومتری در مقابل تغییر شدت نور لیزر به اندازه دو مرتبه بزرگی هیچ

### مراجع

1. M Iwaya, S Terao, T Sano, T Ukai, R Nakamura, S Kamiama, H Amano and I Akasaki, *J. Crystal Growth* **237-239** (2002) 951.
2. S Nakamura and G Fasol, *The Blue Laser Diode*, Springer-Verlag, Berlin (1997).
3. V Fiorentini, F Bernardini, F Della Sala, A Di Carlo and P Lugli, *Phys. Rev. B* **60** (1999) 8849.
4. B Monemar, H Haratizadeh, P P Paskov, G P Pozina, P O Holtz, J P Bergman, S Kamiyama, M Iwaya, H Amano and I Akasaki, *Phys. Stat. Sol.(b)* **237** (2003) 353-364.
5. F Bernardini, V Fiorentini and D Vanderbilt, *Phys. Rev. B* **56** (1997) R10024.
6. O Ambacher, J Majewski, C Miskys, A Link, M Hermann, M Eickhoff, M Stutzmann, F Bernardini, V Fiorentini, V Tilak, B Schaff and L F Eastman, *J. Phys.: Condens. Matter* **14** (2002) 3399.
7. F Bernardini and V Fiorentini, *Phys. Rev. B* **64**, (2001) 085207.
8. P Lefebvre, J Allegre, B Gil, H. Mathieu, P

14. F Bernardini, V Fiorentini and D Vanderbilt, *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997) 3958.
15. X B Zhang and B Gil, in: *Low Dimensional Nitride Semiconductors*, edited by B Gil, Oxford Science Publications, Oxford (2002) 257.
16. P P Paskov, P O Holtz, B Monemar, S Kamiyama, M. Iwaya, H Amano and I Akasaki, in: *Proc. Int. Workshop Nitride Semicond. (IWN2002)*, Aachen, Germany, July 20-25, 2002, *Phys. Stat. Sol. (b)* **234** (2002) 755.
17. D A Miller, D S Chemla and S Schmitt-Rink, *Phys. Rev. B* **33** (1986) 6976.
18. M Esmaeili, H Haratizadeh, B Monemar, S Kamiyama, *Proc. of the 11th Annual IASBS meeting on condensed matter physics*, Zanjan, Iran, May **26-27** (2005) 9.
19. J Singh, *Appl. Phys. Lett.* **64** (1994) 2694.
- Bigenwald, N Grandjean, M Leroux and J Massies, *Phys. Rev. B* **59** (1999) 15 363.
9. B Monemar and G Pozina, *Prog. Quantum Electron.* **24** (2000) 239.
10. O Ambacher, B Foutz, J Smart, J R Shealy, N G Weimann, K Chu, M Murphy, A J Sierakowski, W J Shaff and L F Eastman, *J. Appl. Phys.* **87** (2000) 334.
11. A S Pabla, J L Sanchez-Rojas, J Woodhead, R Grey, J P R David, G J Rees, G Hill, M A Pate, P N Robson, R A Hogg, T A Fisher, A R K Willcox, D M Whittaker, M S Skolnick and D J Mowbray, *Appl. Phys. Lett.* **63** (1993) 752.
12. J L Sanchez-Rojas, A Sacedon, F Calle, E Calleja and E Munoz, *Appl. Phys. Lett.* **65** (1994) 2214.
13. H Haratizadeh, B Monemar, P P Paskov, P O Holtz, G Pozina, S Kamiyama, M Iwaya, H Amano and I Akasaki, *Phys. Stat. Soli. b* **241** (2004) 1124.