

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

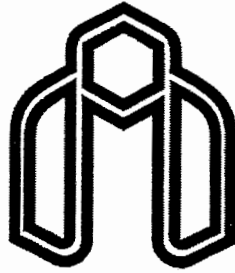
تقدیر به عزیزترین عزیزانم

به خودشیدهایی که تاییدند تا بیالم

و به ابرهایی که باریدند تا بشکفم

به دیشه هایم که قوت خویش را به من دادند

تا به بار بنشینم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

فیزیک حالت جامد

اثر افت و خیز پهنای چاه پتانسیل بر روی

فتولومینسانس چاههای کوانتومی

GaN/AlGaN

نگارنده:

فروغ السادات طبسی

استاد راهنما:

دکتر حمید هراتی زاده

تیر ۱۳۸۴

هر آنچه هستم یا امیدوارم که باشم

همه را به پدر و مادر نازنینم مدیونم

که سمبل عشق و ایثار هستند.

باسپاس و تشکر از استاد بزرگوار و ارجمنده

جناب آقای دکتر حمید هراتی زاده

که با راهنماییها و حمایتهایشان راه را برای پیشبرد

اهداف من هموار نمودند.

تقدیم به

پدر بزرگ و مادر بزرگ مهربانم

**که با محبت‌های خود مرا در تمام مراحل زندگی
یاری کردند.**

تقدیم به

سید امیرمسین و رامله السادات عزیزه

**که در مراحل اجرای تحقیق با بردباری همواره یار
و مددکارم بودند.**

و

تقدیم به

نفیسه السادات و دکتر مجتبی مسین پور

که همواره مشوق من بودند.

چکیده

هدف ما در این پایان نامه مطالعه اپتیکی افت و خیز پهنای چاههای کوانتومی برای نانو ساختارهای نیمه هادی GaN/AlGaN به روش فتولومینسانس و میکروفتولومینسانس است. نمونه ها بدون آرایش بوده و به روش MOCVD به صورت زیر رشد داده شده اند. ابتدا بر روی زیر لایه اکسید آلومینیم یک لایه AlN با ضخامت حدود ۲ نانومتر و سپس یک لایه GaN نسبتاً ضخیم با ضخامتی حدود ۶ میکرومتر رشد داده شده است. بدنبال آن ناحیه فعال شامل ۵ لایه متناوب از چاه و سد می باشند. پهنای چاهها ۱/۵nm، ۳nm و ۴/۵nm که بوسیله سدهایی با ضخامت ۷nm از هم مجزا شده اند. طیف فتولومینسانس نمونه ها در دمای پایین یک ساختار دو قله ای را نشان می دهد که معرف وجود دو ناحیه با پهنای متفاوت برای جایگزیدگی اکسیتونها است. این ساختار دو قله ای به خاطر افت و خیز در فصل مشترک GaN و AlGaN می باشد و نشان دهنده وجود دو ناحیه با اختلاف ضخامت ۲ML (معادل با بردار C شبکه ورتسایتس GaN) است که اکسیتونها قبل از بازترکیب نوری در این نواحی جایگزیده می شوند. پهنای طیف (FWHM) برای هریک از ناحیه هایی که اکسیتونها جایگزیده شده اند برای دو نمونه ۱/۵nm و ۴/۵nm به ترتیب، ۱۰meV تا ۲۵meV است. به کمک نتایج اندازه گیریهای اپتیکی و همچنین محاسبات حاصل از حل معادله شرودینگر برای یک چاه پتانسیل مربعی کم عمق اغتشاش یافته توسط میدان الکتریکی توافق خوبی بین انرژی گسیلی محاسبه شده برای نمونه ها و داده های آزمایشگاهی بدست می آید. از طرفی با روش میکروفتولومینسانس که می توان با آن نور لیزر فرودی را روی ناحیه کوچکی (در حدود یک میکرومتر) متمرکز کرد، گستردگی عرضی افت و خیزهای موجود کوچکتر از یک میکرومتر مربع ارزیابی می شود. نتایج حاصل از روبش عرض نمونه ها توسط باریکه نور لیزر در اندازه گیریهای فتولومینسانس معرف تغییرات موضعی میدان های قطبشی داخلی ناشی از غیر یکنواختی توزیع Al در لایه سد (AlGaN) می باشد. که تصاویر TEM نیز این موضوع را تأیید می کند.

نیمه هادی های نیتروژن دار به دلیل ویژگیهای منحصر به فرد از جمله داشتن گاف انرژی مستقیم و پهن ($0.7-6/2\text{eV}$) که گستره وسیعی از ناحیه IR تا UV را در بر می گیرد، کاندیدای مناسبی برای ساخت قطعات اپتوالکترونیکی از جمله دیودهای نوری (LEDs)، دیودهای لیزری (LDs) و آشکارسازها می باشند. نیمه هادی های نیتروژن دار علاوه بر کاربردهای اپتوالکترونیکی در ساخت قطعات الکترونیکی نیز به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند، بویژه این مواد در ناحیه دماهای بالا، فرکانسهای بالا و همچنین در ساخت قطعات توان به کار گرفته می شوند. نمونه های مورد مطالعه در این پروژه برای ساخت دیودهای نوری و دیودهای لیزری طراحی شده اند. در چنین مواردی ساختارهای کوانتومی نسبت به ساختارهای کپه ای ارجحیت دارند و این موضوع ناشی از اثر محدودیت کوانتومی برای توابع موج الکترون و حفره می باشد که موجب می شود این توابع موج نسبت به حالت کپه ای افزایش همپوشانی قابل ملاحظه ای داشته باشند، این موضوع منجر به افزایش بازده نوری قطعه می گردد.

در این پروژه سه نمونه چاه کوانتومی GaN/AlGaN با پهنای چاه متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه های ما توسط پروفیسور آمانو و گروه ایشان در دانشگاه میجو در ناگویای ژاپن به روش MOCVD ساخته شده است و اندازه گیریهای اپتیکی به روش فتولومینسانس و میکروفوتولومینسانس از دمای هلیم مایع (۲K) تا دمای اتاق و در شرایط مختلف که در جای خود توضیح داده خواهد شد در دانشگاه لینشوپینگ سوئد توسط استاد راهنما انجام شده است. داده های تجربی حاصل از اندازه گیریهای اپتیکی در دانشگاه صنعتی شاهرود به کمک نرم افزارهای Origin و Peak Fit مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج فیزیکی بدست آمده از تحلیل داده ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

یکی از پارامترهای مهم در ساخت نانو ساختارهای کوانتومی، کیفیت ونحوه رشد لایه های نانومتری می باشد و عامل شناسایی این کیفیت میزان ناهمواری در سطوح مشترک نواحی

مختلف می باشد که این ناهمواریها را می توان به روشهای مختلف مورد مطالعه و اندازه گیری قرار داد. در این پروژه این کار با دقت بسیار خوبی با روش فتولومینسانس انجام گرفته است. از روشهای موجود دیگر می توان به روش XRD و TEM اشاره نمود. در اینجا از این دو روش نیز کمک گرفته شده است ولی نتایج کار، کیفیت بالا و دقت مناسب را در روش فتولومینسانس نشان می دهد. از جمله مسائل دیگری که باید به آن اشاره نمود تأثیر حضور این ناهمواریها در فرآیند باز ترکیب نوری نمونه می باشد که این مسئله نیز در جای خود بررسی و نتایج فیزیکی حاصله مورد بحث قرار می گیرد.

این پایان نامه شامل دو بخش اصلی می باشد که بخش اول مشتمل بر شش فصل است. فصل اول بیشتر مربوط به نیمه هادیها و بخصوص نیمه هادیهای نیتروژن دار، ساختار بلوری و کاربردهای آن است. فصل دوم به ساختارهای کوانتومی نیمه هادیها و خواص اپتیکی آنها مربوط می شود. در فصل سوم به فرآیندهای باز ترکیب نوری و تعریف اکسیتون می پردازیم که در اپتوالکترونیک کاربرد فراوانی دارد. فصل چهارم در مورد تکنیکهای مطالعه اپتیکی است که در آن از دو سیستم مطالعه اپتیکی فتولومینسانس و میکروفتولومینسانس و همچنین اجزای تشکیل دهنده آنها صحبت شده است. در فصل پنجم به حل معادله شرودینگر در چاههای پتانسیل مثلثی با استفاده از دو روش Singh و Bastard اشاره شده است زیرا با توجه به حضور میدانهای قطبشی داخلی در چاههای کوانتومی GaN/AlGaN ناشی از مؤلفه های قطبشی پیزوالکتریک و خودبخودی، این چاهها از حالت مربعی خارج شده و شکل مثلثی به خود می گیرند. نتیجه حل معادله شرودینگر انرژی گسیلی حاصل از باز ترکیب الکترونها تراز پایه با حفره های سنگین را به ما می دهد. در فصل ششم که در واقع فصل اصلی این پایان نامه است، نمونه های مورد مطالعه معرفی شده است، سپس نتایج داده های تجربی مورد بحث فیزیکی قرار گرفته و به طور مفصل در مورد مسایلی از قبیل میزان افت و خیز پهنای چاه، محاسبه انرژی گسیلی از این چاهها و مقایسه آن با نتایج تجربی و نکات مختلف دیگر بحث می شود. ضمناً در انتهای بخش اول یک پیوست قرار گرفته که در آن به اختصار به دو روش

رشد ساختارهای کوانتومی مواد نیمه رسانا یعنی روشهای MBE و MOCVD اشاره شده است.

بخش دوم پایان نامه شامل مقالاتی است که به کنفرانسهای بین المللی در رابطه با موضوع پایان نامه ارائه شده است و مشتمل بر سه مقاله می باشد که مقاله اول آن در یازدهمین گردهمایی فیزیک ماده چگال مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان ارائه شده است. مقاله دوم در کنفرانس زیر پذیرفته شده است:

6th Internatinal Conference on Nitride Semiconductors (ICNS6), Bremen, Germany
August 28 - September 2, 2005

و سومین مقاله در ششمین کنفرانس سالانه فیزیک ایران (شهریور ۸۴) در دانشگاه لرستان ارائه شده است.

سپاس یزدان یکتا را؛

اکنون که به یاری یزدان پاک این پایان نامه را به پایان رساندم بر خود لازم می دانم که از خانواده عزیزم که محبت‌های بی شائبه خود را از من دریغ ننمودند و همچنین از کلیه عزیزان و دوستانی که مرا در انجام این پایان نامه یاری نمودند، تشکر کنم.

از پروفیسور بو مونمار، بخاطر استفاده از نتایج آزمایش هایی که با هدایت ایشان در دانشگاه لینشوپینگ، در کشور سوئد انجام شده است و همچنین از پروفیسور هیروشی آمانو و همکارانش که نمونه ها را در دانشگاه میجو کشور ژاپن تهیه کردند، سپاسگزارم.

از هیئت محترم داوران به خاطر قبول داوری پایان نامه و نقد و بررسی آن و همچنین از دوستان و همکارانی که با محبت‌ها و راهنمایی‌هایشان مرا در امر این پایان نامه صمیمانه یاری نمودند، خصوصاً خانمها مریم اصغری، مینا افشار، وحدانه محمودی، مریم هداوند، مریم انصاری، مریم غلامی، سمیه پاروئی، زهرا حسینی و آقایان محمود صابونی، مهدی پور محمدی و مرتضی اسمعیلی کمال تشکر و قدردانی را دارم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
الف.....	چکیده.....
ب.....	مقدمه.....
ه.....	تشکر و قدردانی.....
و.....	فهرست مطالب.....
ی.....	فهرست شکل ها.....
م.....	فهرست جدول ها.....

بخش اول

فصل اول: نیمه هادیها و خصوصیات آنها

۲.....	۱-۱- مقدمه.....
۳.....	۲-۱- ساختار نواری نیمه هادیها.....
۴.....	۳-۱- دسته بندی نیمه هادیها.....
۴.....	۱-۳-۱- دسته بندی بر حسب گروههای جدول تناوبی.....
۵.....	۲-۳-۱- دسته بندی نیمه هادیها بر حسب میزان گاف انرژی.....
۹.....	۳-۳-۱- دسته بندی نیمه هادیها بر حسب ساختار شبکه کریستالی.....
۱۱.....	۴-۱- نیمه هادیهای نیتروژن دار.....
۱۲.....	۱-۴-۱- ساختار بلوری نیمه هادیهای نیتروژن دار.....
۱۴.....	۲-۴-۱- GaN.....
۱۶.....	۳-۴-۱- AlN.....
۱۷.....	۴-۴-۱- InN.....
۱۷.....	۵-۴-۱- AlGaN.....
۱۸.....	۶-۴-۱- کاربرد نیمه هادیهای نیتروژن دار.....

فصل دوم: ساختارهای کوانتومی نیمه هادیها

۲۱-۱-۲	مقدمه.....	۲۱
۲۱-۲-۲	ساختارهای ناهمگون.....	۲۱
۲۵-۳-۲	ساختارهای کوانتومی.....	۲۵
۲۹-۴-۲	خواص اپتیکی ساختارهای کوانتومی.....	۲۹

فصل سوم: فرآیند باز ترکیب نوری مواد نیمه هادی

۳۲-۱-۳	مقدمه.....	۳۲
۳۲-۲-۳	اکسیتون.....	۳۲
۳۴-۱-۲-۳	اکسیتون آزاد.....	۳۴
۳۴-۲-۲-۳	اکسیتون مقید.....	۳۴
۳۶-۳-۲-۳	اکسیتون جایگزیده.....	۳۶
۳۷-۳-۳	فرآیندهای باز ترکیبی.....	۳۷

فصل چهارم: تکنیکهای مطالعه اپتیکی

۴۱-۱-۴	مقدمه.....	۴۱
۴۳-۲-۴	قسمتهای مختلف یک سیستم مطالعه اپتیکی.....	۴۳
۴۴-۱-۲-۴	منابع برانگیختگی.....	۴۴
۴۴-۲-۲-۴	کریوستات.....	۴۴
۴۶-۳-۲-۴	تک رنگ کننده.....	۴۶
۴۷-۴-۲-۴	آشکارساز CCD.....	۴۷
۴۸-۵-۲-۴	کامپیوتر.....	۴۸
۴۸-۳-۴	سیستم اندازه گیری فتولومینسانس ^I (PL).....	۴۸
۵۰-۴-۴	سیستم اندازه گیری میکروفوتولومینسانس ^{II} (μPL).....	۵۰

^I Photoluminescence^{II} Micro-Photoluminescence

فصل پنجم: حل معادله شرودینگر در چاههای پتانسیل مثلثی

۵-۱- مقدمه.....	۵۴
۵-۲- روش Singh.....	۵۴
۵-۳- روش Bastard.....	۵۶
۵-۴- محاسبه انرژی جایگزیدگی.....	۵۷
۵-۵- اثر محدودیت کوانتومی استارک ^۱ (QCSE).....	۵۸
۵-۶- محاسبه آفست باند انرژی ^{۱۱}	۵۹

فصل ششم: تحلیل نتایج بدست آمده و بحث پیرامون نتایج فیزیکی

۶-۱- مقدمه.....	۶۲
۶-۲- معرفی نمونه ها.....	۶۳
۶-۳- تأثیر ناهمواریهای سطح مشترک دو نیمه هادی در طیف فتولومینسانس.....	۶۴
۶-۴- تأیید تجربی بر حضور ناهمواریهای فصل مشترک GaN و AlGaIn با گستردگی بیش از شعاع بوهر اکسیتون.....	۶۷
۶-۵- تأیید تجربی جایگزیدگی اکسیتونها به کمک LO - فونونها.....	۷۰
۶-۶- مقایسه انرژی گسیلی محاسبه شده برای چاههای با پهنای مختلف.....	۷۱
۶-۷- تأیید تجربی جایگزیدگی اکسیتونها با استفاده از تغییرات شدت لیزر فرودی.....	۷۲
۶-۸- تأیید تجربی جایگزیدگی اکسیتونها با استفاده از تغییرات دمایی.....	۷۵
۶-۹- تغییرات موضعی میدانهای قطبشی داخلی.....	۷۷
۶-۱۰- یک ارزیابی تقریبی از گستردگی ناهمواریها به روش میکروفوتولومینسانس.....	۸۰
۶-۱۱- تأیید تئوری تغییرات پهنای چاه به میزان ۲ML.....	۸۲
پیوست.....	۸۴
مرجع ها.....	۹۲

^۱ Quantum Confined Stark Effect^{۱۱} Band Offset

بخش دوم : مقالات ارائه شده در کنفرانسهای بین المللی

- مقاله (۱) : مطالعه افت و خیز آماری پهنای نانو ساختار گالیم نیتراید به روش اپتیکی.....۹۶
- مقاله (۲) : Dynamical Study of the Radiative Recombination in GaN/AlGaN QWs. :۱۰۱
- مقاله (۳) : تأثیر محل آرایش سیلیکونی در خواص نوری چاههای کوانتومی نیتروژن دار.....۱۰۳

فهرست شکلها

صفحه	شکل	
۴	(۱-۱)	نوارهای انرژی الف) یک اتم، ب) دو اتم
۶	(۲-۱)	نیمه هادی الف) با گاف انرژی مستقیم، ب) با گاف انرژی غیر مستقیم
۱۲	(۳-۱)	گاف انرژی برحسب ثابت شبکه (اخیراً انرژی گاف برای InN حدود ۰/۷eV محاسبه شده است)
۱۳	(۴-۱)	نحوه قرار گرفتن اتمها در ساختار، الف) ورتسایتس و ب) زینک بلند
۲۳	(۱-۲)	نحوه تشکیل گاز الکترونی دوبعدی در چاه پتانسیل
۲۵	(۲-۲)	الف) تصویر یک چاه کوانتومی، ب) سطوح انرژی در چاه کوانتومی
۲۶	(۳-۲)	تصویری از یک چاه کوانتومی چندگانه
۲۷	(۴-۲)	چاه کوانتومی نوع I $In_{0/53}Ga_{0/47}As/InP$ و $In_{0/52}Ga_{0/48}As/In_{0/53}Ga_{0/47}As$ و $GaSb/AlSb$ ، چاه کوانتومی نوع II $InP/In_{0/52}Al_{0/48}As$ و $AlSb/InAs$ ، چاه کوانتومی نوع III $(InAs/GaSb)$
۲۸	(۵-۲)	یک ابر شبکه به همراه ساختار نوارهای کوچک
۲۹	(۶-۲)	نمایش طرحواره ای از ماده کپه ای، چاه پتانسیل، سیم کوانتومی و نقطه کوانتومی
۳۳	(۱-۳)	تصویر یک اکسیتون (a ثابت شبکه)
۳۶	(۲-۳)	فرآیندهای باز ترکیب نوری؛ ۱) برانگیختگی، ۲) گذار باند به باند، ۳) اکسیتون آزاد، ۴) اکسیتون باند شده به پذیرنده، ۵) اکسیتون باند شده به دهنده، ۶) الکترون آزاد با حفره باند شده به پذیرنده، ۷) حفره آزاد با الکترون باند شده به دهنده و ۸) گسیل از جفت شدگی دهنده-پذیرنده
۳۷	(۳-۳)	مدلی از اکسیتونهای جایگزیده به خاطر افت و خیز پتانسیلی
۴۳	(۱-۴)	سه روش متفاوت اندازه گیری فتولومینسانس
۴۵	(۲-۴)	اجزای تشکیل دهنده یک کریوستات
۴۷	(۳-۴)	الف) روش Fastie-Ebert و ب) روش Czerny-Turner
۵۰	(۴-۴)	طرحواره ای از سیستم اندازه گیری فتولومینسانس
۵۰	(۵-۴)	طرحواره ای از سیستم اندازه گیری میکروفوتولومینسانس

۵۲	(۶-۴) تصویری از نقطه کانونی لیزر با طول موج ۶۳۳ nm روی سطح نمونه و سطح مقطع شدت متناسب با آن
۵۵	(۱-۵) چاه پتانسیل مربعی محدود الف) بدون اعمال میدان، ب) با اعمال میدان
۵۶	(۲-۵) تصویری از نوار رسانش چاه کوانتومی پله ای
۵۸	(۳-۵) نمودار تغییر موقعیت قله های فتولومینسانس بر حسب دما
۵۹	(۴-۵) اثر کوانتومی استارک در چاه پتانسیل الف) بدون میدانهای قطبشی، ب) با میدانهای قطبشی
۶۰	(۵-۵) نمایش آفستهای باند انرژی در یک چاه کوانتومی GaN/AlGa _N
۶۴	(۱-۶) طرح کلی از یک نمونه
۶۵	(۲-۶) طریقه لایه نشانی در روش MBE
۶۶	(۳-۶) فرآیند رشد بدون وقفه
۶۷	(۴-۶) فرآیند رشد با وقفه
۶۷	(۵-۶) فرآیند رشد در دو وضعیت بدون توقف زمانی و با توقف زمانی
۶۹	(۶-۶) طیف فتولومینسانس حاصل از سه نمونه چاه کوانتومی چندگانه GaN/Al _{0.07} Ga _{0.93} N در دمای ۲K
۷۰	(۷-۶) حضور قله های LO- فونونی در طیف فتولومینسانس در مقیاس لگاریتمی برای سه نمونه چاه کوانتومی چندگانه GaN/Al _{0.07} Ga _{0.93} N در دمای ۲K
۷۱	(۸-۶) تغییرات انرژی گسیلی بر حسب پهنای چاه (مقایسه بین تئوری و تجربه
۷۳	(۹-۶) نمودار تغییرات شدت بر حسب انرژی برای دو نمونه الف) ۱۵Å، ب) ۴۵Å
۷۴	(۱۰-۶) نمودار تغییرات شدت نرمال شده برای دو نمونه الف) ۱۵Å، ب) ۴۵Å
۷۶	(۱۱-۶) تغییرات دمایی طیف فتولومینسانس برای الف) ۱۵Å، و ب) ۴۵Å
۷۸	(۱۲-۶) جابجایی قله های فتولومینسانس در چاههای ۱۵Å، ۳Å و ۴۵Å هنگامیکه باریکه نور لیزر فرودی در عرض نمونه ها جابجا می شود
۷۹	(۱۳-۶) تغییرات ۱۰۰ میکرونی از جابجایی قله های فتولومینسانس در سرتاسر سه نمونه ۱۵Å، ۳Å و ۴۵Å

صفحه	شکل
۸۰	(۱۴-۶) تصویر TEM از نمونه
۸۱	(۱۵-۶) مقایسه فتولومینسانس با میکروفتولومینسانس برای دو نمونه الف) $1/5\text{nm}$ و ب) $4/5\text{nm}$ (مجموع میکروفتولومینسانس ها در میانه شکل رسم شده است)
۸۶	(الف-۱) طرحواره ای از دستگاه MBE
۸۷	(الف-۲) شکل محفظه ها در دستگاه MBE
۸۹	(الف-۳) طرحواره ای از دستگاه MOCVD

فهرست جدول ها

صفحه	جدول
۵	(۱-۱) برخی از ترکیبات عناصر نیمه هادی
۶	(۲-۱) گاف انرژی نیمه هادیها
۱۰	(۳-۱) ساختار شبکه نیمه هادیها
۱۴	(۴-۱) برخی از خصوصیات GaN, AlN و InN برای دو نوع ساختار WZ و ZB
۶۳	(۱-۶) پهنای چاه و سد و مقدار Al در نمونه های مورد مطالعه در این پایان نامه

بخش اول

فصل اول

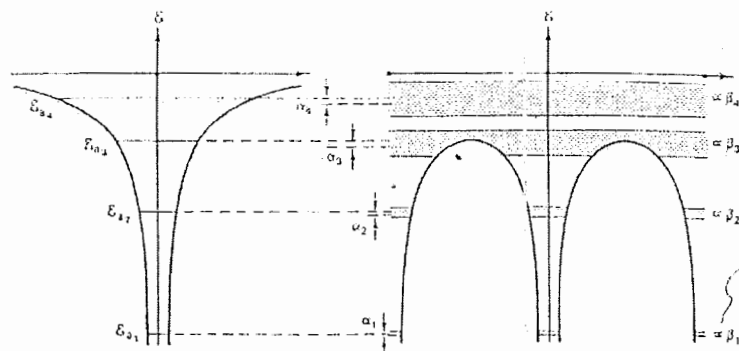
نیمه هادیها و خصوصیات آنها

Semiconductors and Properties

نیمه هادیها گروهی از مواد هستند که رسانایی الکتریکی آنها بین فلزات و عایق ها قرار دارد. ویژگی مهم این مواد این است که رسانایی آنها با تغییر دما، برانگیختگی نوری و میزان ناخالصی به نحو قابل ملاحظه ای تغییر می کند. این قابلیت تغییر خواص الکتریکی، مواد نیمه هادی را انتخاب مناسبی برای تحقیق در زمینه قطعات الکترونیکی ساخته است. کاربردهای اپتو الکترونیکی از دیگر ویژگیهای بسیار مهم نیمه هادیها است. موضوع اصلی مباحث الکترونیک نوری، باز ترکیب نوری الکترون - حفره، انواع مختلف این باز ترکیبها و تأثیر عوامل مختلف بر آنها می باشد. قطعاتی که در آنها چنین فعل و انفعالاتی می تواند صورت پذیرد به قطعات نوری معروفند. از مهمترین مواد نیمه هادی که شناخته شده، Si و Ge را می توان نام برد که در پیشرفت میکرو الکترونیک بسیار مفید بوده است. گاف انرژی آنها غیر مستقیم است که باعث می شود گسیل نور در آنها ضعیف باشد، همچنین دارای ضریب جذب کوچکی هستند. اما نیمه هادیهای مرکب که از عناصر ستونهای مختلف جدول تناوبی بدست می آیند (شامل ترکیبات III-V، II-VI، IV-VI و IV-IV) دارای خواص مطلوبی هستند.

یکی از مهمترین مشخصات نیمه هادیها که آنها را از فلزات و عایق ها متمایز می کند گاف انرژی است. این ویژگی تعیین کننده طول موجهایی از نور است که توسط نیمه هادی جذب یا گسیل می شود. به دلیل تنوع گسترده گاف انرژی نیمه هادیها، دیودهای منتشر کننده نور و لیزرها را می توان با طول موجهایی در بازه مادون قرمز¹ (IR) تا

¹ Infra-Red



شکل ۱-۱: نوارهای انرژی الف) یک اتم، ب) دو اتم^۱

هرچه اتمها به یکدیگر نزدیک تر شوند پتانسیل برهمکنشی قوی تر و در نتیجه شکافتگی ترازها در هر تراز دوتایی بزرگتر خواهد بود و چون ترازهای داخلی به هسته اتم وابسته تر هستند، شکافتگی ترازهایشان نسبت به شکافتگی ترازهای خارجی کمتر است. وقتی که تعداد اتمها به N برسد هر تراز انرژی اتمی به N زیر تراز جداگانه تقسیم می شود. در یک سانتی متر مکعب یک بلور عدد N تقریباً به 10^{23} می رسد. بنابراین فاصله انرژی بین زیر ترازهای ایجاد شده خیلی کوچک بوده و در حدود 10^{-23} تا 10^{-22} الکترون ولت خواهد بود. مجموعه این زیر ترازها را می توان به صورت یک نوار انرژی در نظر گرفت. مناطق انرژی بین نوارها گاف های انرژی هستند که هیچ تراز انرژی مجاز در آنها وجود ندارد.^۲

۱-۳-۳- دسته بندی نیمه هادیها

۱-۳-۱- دسته بندی بر حسب گروههای جدول تناوبی

علاوه بر مواد تک عنصری ستون چهارم، ترکیب اتمهای ستون سوم و پنجم و نیز ترکیبهای خاصی از عناصر ستون دوم و ششم، نیمه هادیهای مرکب به صورت ترکیبات دوتایی^۱، سه تایی^۲ و یا چهارتایی^۳ را بوجود می آورند (جدول ۱-۱).

^۱ Double

^۲ Ternary

^۳ Quaternary

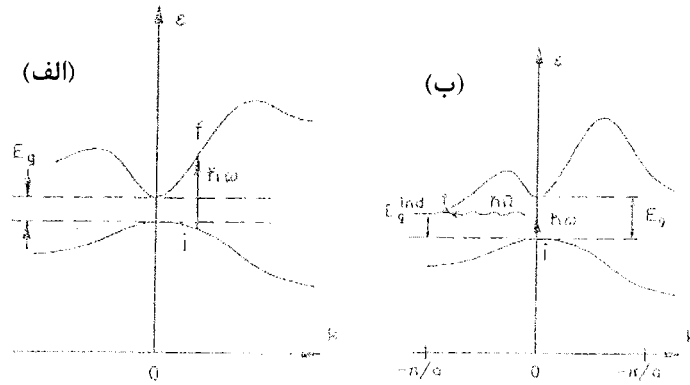
جدول ۲-۱: گاف انرژی نیمه هادیها^۲

عنصر	Si	Ga	SiC*
گاف انرژی (eV) (۳۰۰K)	۱/۱۱	۰/۶۷	۲/۸-۳/۵
	غیر مستقیم	غیر مستقیم	

SiC* یکی از نیمه هادیهای بسیار صنعتی است و در سنسورهای گرمایی و ترانزیستورهایی که در دماهای بالا کار می کنند استفاده می شود.

ترکیب	GaN	AlN	InN ^۵	AlAs	GaP	GaAs	ترکیبهای III-V
گاف انرژی (eV) (۳۰۰K)	۳/۴	۶/۲	۰/۷-۱/۹	۲/۱۶	۲/۲۶	۱/۴۳	
	مستقیم	مستقیم	مستقیم	غیر مستقیم	غیر مستقیم	مستقیم	

ترکیب	ZnS	ZnSe	ZnTe	CdS	ترکیبهای II-VI
گاف انرژی (eV) (۳۰۰K)	۳/۶	۲/۷	۲/۲۵	۲/۴۲	
	مستقیم	مستقیم	مستقیم	مستقیم	



شکل ۲-۱: نیمه هادی (الف) با گاف انرژی مستقیم، (ب) با گاف انرژی غیر مستقیم^۲

گاف انرژی در نیمه هادیها با فشار و دما تغییر می کند که باعث تغییر خواص نوری مواد می شود. ترازهای انرژی در بلور توابعی از فواصل بین اتمی هستند در نتیجه وقتی که دما و یا فشار تغییر کند، فواصل بین اتمی ترازهای انرژی و E_g نیز تغییر می کند.

$$E_g = E_g^0 + \left(\frac{\partial E_g}{\partial P}\right)_T \Delta P + \left(\frac{\partial E_g}{\partial T}\right)_P \Delta T \quad (1-1)$$

با افزایش دما گاف انرژی کوچک شده و با افزایش فشار پهن تر می شود.^۲ با تغییر دما در یک نیمه هادی اثرات متعددی در شبکه بوجود می آید. شبکه منبسط یا منقبض می شود و نوسانات اتمها پیرامون مکان میانگینشان افزایش یا کاهش خواهد یافت. واکنش الکترون با شبکه نیز با حرارت تغییر می کند. پتانسیل ناخالصیهای بخشنده و پذیرنده کم عمق نیز از دما تأثیر می پذیرد، هرچند که انرژی یونیزاسیون ناخالصیها، نسبتاً ثابت می ماند. مشاهدات تجربی همچنین نشان دهنده تغییر گاف انرژی با دما می باشد. این وابستگی در محدوده های دمایی متفاوت تغییر می کند و تقریباً از رابطه تجربی زیر که برای اولین بار توسط ورشنی ارائه شد، پیروی می نماید:

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T^2 / (\beta + T) \quad (2-1)$$

که در آن $E_g(T)$ گاف انرژی در دمای T ، $E(0)$ گاف انرژی در دمای صفر کلوین است و α و β ثوابتی هستند که از فیت کردن مقادیر تجربی گاف انرژی در دماهای مختلف با رابطه بالا بدست می آیند.

در آلیاژهای سه تایی و چهارتایی III-V، با تغییر درصد ترکیبات تشکیل دهنده آلیاژ ممکن است که ساختار نواری آلیاژ تغییر اساسی نماید. به عنوان مثال، ساختار GaAs یک ماده با گاف انرژی مستقیم با شکاف نوار 1.43 eV در دمای اتاق است و AlAs دارای گاف غیر مستقیم با شکاف نواری 2.16 eV است. در آلیاژ سه تایی $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ که از ترکیب دو آلیاژ قبلی بدست می آید، برحسب تغییر مولی Al گاف انرژی مستقیم یا غیر مستقیم می شود. مثلاً برای ترکیبات بالای حدود ۳۵ درصد Al آلیاژ سه تایی $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ به یک

نیمه هادی با گاف انرژی غیر مستقیم و برای ترکیبات کمتر از ۳۵ درصد Al به یک نیمه هادی با گاف انرژی مستقیم تبدیل می شود.

گسیل نور در مواد با گاف انرژی مستقیم دارای بیشترین بازدهی است. همچنین افزودن ناخالصی برای افزایش باز ترکیب تابشی در مواد با گاف غیر مستقیم بسیار مفید است.^۳

گاف انرژی تعیین کننده طول موجهایی از نور است که توسط نیمه هادی جذب یا گسیل می شود. به عنوان مثال گاف انرژی GaAs حدود 1.43eV است که مربوط به طول موجهای نوری نزدیک به مادون قرمز (IR) است و GaP دارای شکاف انرژی تقریبی 2.3eV است که طول موجهای قسمت سبز طیف را می پوشاند. به دلیل تنوع گسترده شکاف انرژی نیمه هادی ها، دیودهای منتشر کننده نور (LEDs) و لیزرها (LDs) را می توان با طول موجهایی در محدوده گسترده ای از مادون قرمز تا بخشهای مرئی طیف بوجود آورد.

نیمه هادی ایندیم - آنتیموان (InSb) اولین ترکیب گروه III-V از نیمه هادیها بود که در سال ۱۹۵۰ میلادی کشف شد. ویژگی های خاص این نیمه هادی شامل سهولت در ترکیب، قابلیت تحرک زیاد الکترون و ذرات یونی در نوارهای رسانش و ظرفیت این بلور می باشد. گاف انرژی کوچکی دارد ($E_g = 0.17\text{eV}$) و برای توسعه فن آوری آشکارسازهای مادون قرمز اهمیت زیادی یافته است. از ترکیبات دیگر این گروه می توان GaN ($E_g = 3.4\text{eV}$) GaAs ($E_g = 1.43\text{eV}$) و InP ($E_g = 1.35\text{eV}$) و GaP ($E_g = 2.1\text{eV}$) را نام برد. GaN در ناحیه فرابنفش (UV) به کار می رود و اهمیت فوق العاده ای در ساخت قطعات اپتوالکترونیکی پیدا کرده است. GaP در قسمت مرئی طیف نوری کاربرد داشته و برای توسعه دیودهای نوری LED بکار می رود. (با اینکه گاف انرژی آن غیر مستقیم است اما با استفاده از فن آوری خاص افزودن ناخالصی امکان بهبود گسیل در آن وجود دارد.) نیمه هادیهای GaAs، GaN و InP در مقایسه با Si و Ge دارای قابلیت تحرک و سرعت بالاتری هستند. گاف انرژی مستقیم و بازدهی گسیل بالا، آنها را به موادی مهم برای الکترونیک نوری تبدیل کرده است.^۴

با ساخت آلیاژها امکان تغییر مداوم و یکنواخت گاف انرژی وجود دارد و به همراه آن ساختار نواری، خواص الکترونیکی و نوری نیز تغییر خواهد کرد. به عنوان مثال گاف انرژی در ترکیبات سه تایی $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 1$) به درصد مقدار Al در ترکیب بستگی دارد و این درصد گاف انرژی را به طور پیوسته از $3/48\text{eV}$ ($x=0$) GaN به $6/28\text{eV}$ ($x=1$) AlN تغییر می دهد.

نیمه هادیهای مرکب کاربرد وسیعی در قطعات خیلی سریع و قطعاتی که نیاز به نشر یا جذب نور دارند پیدا کرده اند. ترکیبهای دوتایی III-V مانند GaN، GaAs و GaP معمولاً در دیودهای منتشر کننده نور (LED) به کار می روند. برای افزایش انعطاف در انتخاب خواص مواد می توان ترکیبات سه تایی (GaNAs) و چهار تایی (InGaNAs) را رشد داد. نیمه هادیهای مرکب از عناصر گروه III با N (از گروه V) به نیمه هادیهای نیتروژن دار موسومند، که به دلیل ویژگیهای جالب توجه گاف انرژی مستقیم و پهن (از $0/7\text{eV}$ در InN^۵ تا $6/28\text{eV}$ در AlN) کاربرد بسیار گسترده و گاهی منحصر به فرد در ساخت قطعات اپتوالکترونیکی، قطعات توان، آشکار سازهای UV و ترانزیستورهای فرکانس بالا یافته اند.^۳

۱-۳-۳- دسته بندی نیمه هادیها برحسب ساختار شبکه کریستالی

آرایش متناوب اتمی در یک بلور شبکه نامیده می شود در هر حالتی شبکه دارای حجمی موسوم به سلول یکه است که نماینده تمام شبکه بوده و به طور منظم درون بلور تکرار می شود. ساده ترین شبکه سه بعدی، یک حجم مکعبی است. ساختار مکعبی ساده (SC)^I دارای یک اتم در هر گوشه از سلول یکه است. شبکه مکعبی مرکز حجمی (bcc)^{II} دارای یک اتم اضافه در مرکز مکعب است، همچنین شبکه مکعبی رخ مرکزدار (fcc)^{III} دارای اتمهایی در هشت گوشه و مرکز شش وجه مکعب است. ساختار شبکه پایه برای اغلب نیمه هادیهای

^I Simple Cubic

^{II} Body Centered Cubic

^{III} Face Centered Cubic

مهم، شبکه الماسی است که مشخصه Si و Ge است. اتمها در بسیاری از نیمه هادیهای مرکب آرایش الماسی دارند ولی به صورت یک درمیان متفاوت هستند. به این شبکه سولفید روی (زینک بلند)¹ (ZB) گفته می شود که نمونه ترکیبهای III-V است ساختار برخی از ترکیبات در جدول (۳-۱) مشخص شده است^{۷،۶}.

جدول ۳-۱: ساختار شبکه نیمه هادیها^۲

عنصر گروه	عنصر	Si	Ga	SiC
IV	ساختار شبکه	الماسی	الماسی	ورتسایتس

ترکیبهای III-V	ترکیب ساختار شبکه	GaN	AlN	InN	AlP	AlAs	AlSb	GaP	GaAs
		ورتسایتس زینک بلند	ورتسایتس زینک بلند	ورتسایتس زینک بلند	زینک بلند	زینک بلند	زینک بلند	زینک بلند	زینک بلند

ترکیبهای II-VI	ترکیب ساختار شبکه	ZnS	ZnSe	ZnTe	CdS	CdSe
		زینک بلند	ورتسایتس زینک بلند	زینک بلند	زینک بلند	ورتسایتس زینک بلند

ثابت شبکه برخی از ترکیبات (در ساختار ZB) مثل GaN ($4/52\text{\AA}$) و AlN ($4/38\text{\AA}$) که در یک گروه قرار می گیرند تقریباً مشابه اند، یعنی همه ترکیبات بلورین $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ را می توان با تطبیق ثابت شبکه بر روی زیرلایه GaN با هر ضخامتی بدون نگرانی از پدیدار شدن اثرات کشش و یا نقص شبکه را رشد داد^۴.

بسیاری از مؤلفه های فیزیکی ترکیبات سه تایی را می توان به وسیله پارامترهای ترکیبات دو عنصری تشکیل دهنده آنها بدست آورد. این مؤلفه ها تقریباً به طور خطی با ترکیب مربوطه تغییر می کنند، برای مثال ثابت شبکه مربوط به $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ با استفاده از قانون وگارد به صورت زیر بدست می آید:^۴

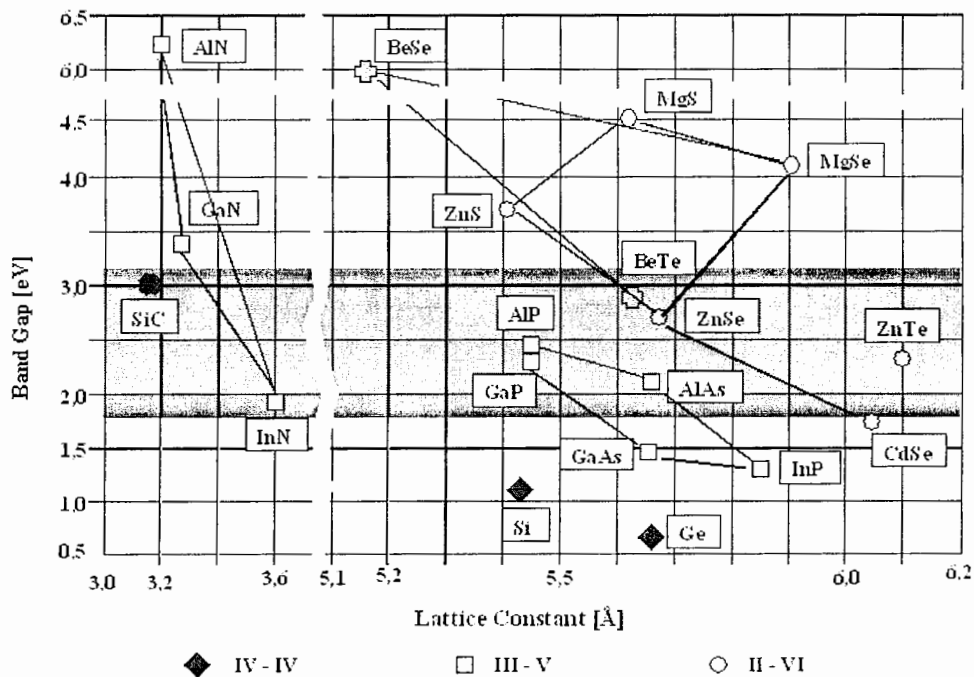
¹ Zinblende

$$a(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x a(\text{AlN}) + (1-x) a(\text{GaN}) \quad (3-1)$$

۴-۱- نیمه هادیهای نیتروژن دار

الکترونکاتیوی بالا و شعاع کم نیتروژن در مقایسه با دیگر عناصر گروه پنجم، همچنین پیوند قوی با عناصر گروه سوم باعث ایجاد خواص جالبی در ترکیب نیتروژن با عناصر گروه سوم شده است، همانگونه که قبلاً اشاره شد، ترکیب عناصر گروه سوم با نیتروژن، گروه ویژه ای از نیمه هادیها را تحت عنوان III-N نیترایدها (III-N) بوجود آورده است. در چندین سال اخیر مطالعه زیادی روی پهنای گاف انرژی نیمه هادیهای III-N انجام شده است. نیمه هادیهای نیتروژن دار دارای گاف انرژی مستقیم و پهن هستند (شکل ۳-۱)، از بین آنها GaN، InN و AlN و آلیاژهایشان توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. این مواد به عنوان مواد الکترونیک نوری و خصوصاً برای طراحی گسیلنده های نور آبی، بنفش و ماورای بنفش اعتبار فوق العاده ای کسب نموده اند.

نیمه هادیهای نیتریدی با پایه GaN ویژگیهای خاصی نسبت به نیمه هادیهای دیگر که گاف انرژی اشان پهن است (مثل SiC و الماس) دارند برای مثال امکان آرایش با هر دو ناخالصی n و p و همچنین داشتن گاف انرژی مستقیم که در کاربردهای نوری از اهمیت ویژه ای برخوردار است، را دارند. این نیمه هادیها امروزه در قطعات اپتو الکترونیکی (هم به عنوان گسیلنده و هم آشکار ساز) و قطعات الکترونیکی که در دماهای بالا و با قدرت بالا کار می کنند و همچنین در محیطهای شیمیایی فعال، استفاده می شوند. این مواد و آلیاژهای سه تایی و چهار تایی اشان گاف انرژی بین ۰/۷-۶/۲eV را پوشش می دهند^{۹،۸}.



شکل ۱-۳: گاف انرژی برحسب ثابت شبکه (اخیراً انرژی گاف برای InN

حدود 0.7 eV محاسبه شده است.^۵*)

۱-۴-۱- ساختار بلوری نیمه هادیهای نیتروژن دار

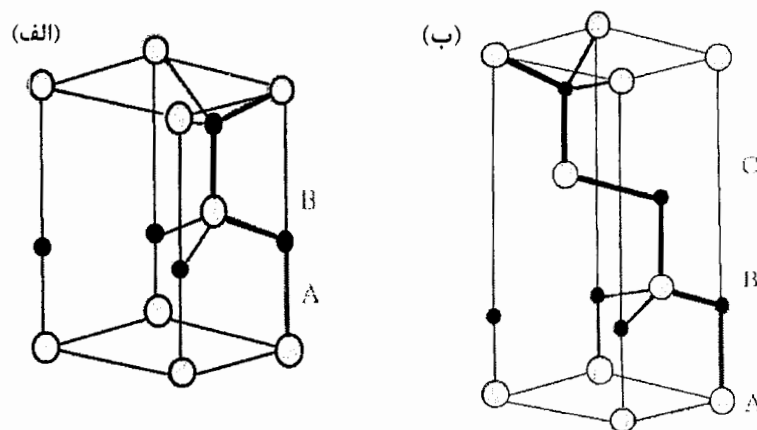
ساختارهای کریستالی متداول برای گروه III- نیترایدها شامل ساختارهای ورتسایتس^۱ (Wz) و زینک بلند (ZB) و سنگ نمک^{II} است. ساختار Wz یک ساختار پایدار برای GaN، AlN و InN کپه ای است درحالیکه ساختار ZB از نظر ترمودینامیکی چندان پایدار نیست. ساختار ZB برای GaN و InN با رشد رونشستی لایه های نازک روی صفحات بلوری در راستای [۰۰۱] بر روی زیر لایه های مکعبی مثل Si، MgO و GaAs بدست آمده است. GaN، AlN و InN وقتی که در فشارهای زیاد قرار بگیرند به صورت ساختار سنگ نمک متبلور می شوند^{۸،۱۱}. برخی از خصوصیات ترکیبات GaN، AlN و InN در جدول (۱-۴) برای دو نوع ساختار Wz و ZB آورده شده است.

* http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi_en/kap_5/backbone/r5_1_4.html

^I Wurtzites

^{II} Rocksolt

ساختار Wz دارای یک سلول واحد هگزاگونال^I با دو ثابت شبکه است و شامل شش اتم از هر نوع در سلول واحد است. این ساختار از دو شبکه^{II} hcp که هر کدام به اندازه (3c/8) در هم فرو رفته اند، ساخته شده است. ساختار ZB همانند ساختار الماسی از دو شبکه^{III} fcc که به اندازه (1/4) قطر اصلی در هم فرو رفته اند، تشکیل شده است. در ساختار ZB هر شبکه fcc از یک اتم نوع تشکیل شده است بطوریکه به نظر می آید هر اتم در مرکز یک چهار وجهی قرار گرفته است. شکل (۴-۱) نحوه قرار گرفتن اتمها را در دو ساختار Wz و ZB نشان می دهد^{۶،۷}.



شکل ۴-۱: نحوه قرار گرفتن اتمها در ساختار، الف) ورتسایتس و ب) زینک بلند^{۱۳}

بسته به اینکه چه زیر لایه ای برای رشد ترکیبات نیتروژن دار بکار گرفته شود بلور آنها ساختار Wz و یا ساختار ZB به خود می گیرد. ساختار Wz در صورت رشد روی SiC و یا اکسید آلومینیم بدست می آید، در صورتیکه اگر رشد بر روی GaAs باشد ساختار ZB می شود. ساختارهای Wz و ZB تا حدودی مثل هم هستند در هر دو ساختار اتمهای گروه III با چهار اتم N احاطه می شود، یا بر عکس هر اتم N با چهار اتم از گروه III احاطه می شود. تفاوت بین دو ساختار در نحوه در هم فرورفتگی صفحات اتمی است که برای ساختار Wz

^I hexagonal

^{II} hexagonal close-packed

^{III} Face center cubic

صفحه (۰۰۰۱) ABAB... در جهت <۰۰۰۱> است و برای ساختار ZB صفحه (۱۱۱) ABCABC... در جهت <۱۱۱> است. ساختار بلورین بیشتر نیمه هادیهای ترکیبی گروه III-V ساختار زینک بلند (ZB) است.^{۱۰۸}

جدول ۱-۴: برخی از خصوصیات GaN, AlN و InN برای دو نوع ساختار WZ و ZB^{۱۰۸}

	GaN	AlN	InN
ساختار			
ورتسایتس (WZ)			
گاف انرژی	$E_g(4K) = 3/50.5 \text{ eV}$ $E_g(300K) = 3/4 \text{ eV}$	$E_g(5K) = 6/28 \text{ eV}$ $E_g(300K) = 6/2 \text{ eV}$	$E_g = 0/7-1/9 \text{ eV}$
ثابت شبکه (300K)	$a = 3/189 \text{ \AA}$ $c = 5/185 \text{ \AA}$	$a = 3/112 \text{ \AA}$ $c = 4/982 \text{ \AA}$	$a = 3/548 \text{ \AA}$ $c = 5/790 \text{ \AA}$
ثابت دی الکتریک	$\epsilon_r = 10$ $\epsilon_\infty = 5/35$	$\epsilon_r = 8/5 \pm 0/2$ $\epsilon_\infty = 4/68$ $\epsilon_\infty = 4/84$	$\epsilon_r = 15/3$ $\epsilon_\infty = 8/4$
ساختار زینک			
بلند (ZB)			
گاف انرژی (300K)	$E_g = 3/2-3/3 \text{ eV}$	$E_g = 5/11 \text{ eV}$	$E_g = 2/2 \text{ eV}$
تابندهای شبکه	$a = 4/52 \text{ \AA}$	$a = 4/38 \text{ \AA}$	$a = 4/98 \text{ \AA}$

GaN - ۲-۴-۱

اولین بار GaN در سال ۱۹۳۲ توسط Johnson^{۱۴} سنتز شد. این ترکیب به طور گسترده تری نسبت به سایر اعضای گروه III-N بررسی شده و آسانتر از سایر این مواد رشد داده می شوند. علی رغم پیشرفت تکنولوژی رشد بلور، GaN رشد یافته دارای نواقص شبکه نسبتاً فراوان و غلظت ذاتی الکترونی به میزان بیش از 10^{16} cm^{-3} در دمای اتاق می باشد. در حال حاضر تلاشهای فراوانی برای رشد GaN با کیفیت خوب توسط تکنیک های ارزانتر در حال انجام

است. گاف انرژی بزرگ GaN ($3/4\text{eV}$) آنرا به یک ماده مناسب برای ساخت قطعات در دماهای بالا تبدیل کرده است. وزن مولکولی ساختار ورتسایتس GaN در حدود $83/728\text{ g/mol}$ است. Juza و Hahn¹⁵ اولین گزارش را برای ساختار ورتسایتس GaN با ثابتهای شبکه $a=3/18\text{\AA}$ و $c=5/16\text{\AA}$ ارائه کردند. در دمای اتاق ثابتهای شبکه این نیمه هادی $a_0=3/1892\pm 0/0009\text{\AA}$ و $c_0=5/1850\pm 0/0005\text{\AA}$ است. ثابت شبکه بر پایه فاصله Ga-N اندازه گرفته می شود و تابعی از شرایط رشد و چگالی ناخالصی است.¹⁶

GaN یک ترکیب پایدار است. Maruska و Tietjen¹⁶ گاف انرژی GaN را $3/39\text{eV}$ اندازه گرفتند. بعد از آنها Pankove و همکارانش¹⁷ طیف فتولومینسانس GaN را در دمای پایین ($1/6\text{K}$) گزارش کردند، قوی ترین گسیل از گاف انرژی در $3/477\text{eV}$ و ضعیف ترین قله در $3/37\text{eV}$ مشاهده شد. چندین گروه وابستگی دمایی گاف انرژی GaN را اندازه گیری کردند. Pankove و همکارانش ضریب دمایی گاف انرژی را در دمای بالای 180°C حدود $dE_g/(dT) = -6\times 10^{-6}\text{ eV/K}$ تخمین زدند. Camphausen و Connell¹⁸ وابستگی دما و فشار را از لبه جذب GaN مطالعه کردند. آنها تحت یک فشار هیدرواستاتیک تا 10 Kbar ، انتقال گاف انرژی GaN را به اندازه $dE_g/(dp)=4/2\pm 0/4\text{ meV/bar}$ در دمای اتاق و وابستگی دمایی را حدود $dE_g/(dT) = -6/7\times 10^{-6}\text{ eV/K}$ اندازه گیری کردند. در دمای اتاق رسانندگی گرمایی برای GaN حدود $\kappa=1/3\text{ W/cmK}$ ¹⁹ است که از مقدار پیش بینی شده، کوچکتر است ($\kappa=1/7\text{ W/cmK}$)¹⁹. Manchon و همکارانش²⁰ با استفاده از طیف رامان به چهار مد فونونی در GaN با آلایش بالای نوع n دست یافتند. A_1 [نور انتقالی (TO)] و $E_1(\text{TO})$ مدهایی بودند که در 523 cm^{-1} و 559 cm^{-1} مشاهده شدند. همچنین فرکانسهای $A_1(\text{LO})$ و $E_1(\text{LO})$ از داده های IR انعکاسی در $770\pm 70\text{ cm}^{-1}$ و $800\pm 70\text{ cm}^{-1}$ تخمین زده شدند. Cingolani و همکارانش²¹ مدهای $A_1(\text{LO})$ و $E_1(\text{LO})$ را از طیف رامان در 710 cm^{-1} و 741 cm^{-1} مشاهده کردند.

چندین گروه دیگر^{۲۴,۲۳,۲۲} قله های اثر فونونی^۱ را در مطالعه لومینسانسی مشاهده کردند. چندین اندازه گیری هم روی ثابت های نوری GaN انجام شد. ^{۲۵}Ejzder برای ضریب شکست GaN با استفاده از اندازه گیریهای جذب و گسیل مقادیر $n(۳/۳۸eV) = ۲/۶۷$ و $n(۱/۰eV) = ۳/۳۳$ بدست آورد. Matsubara و ^{۲۶}Takagi انعکاسهای نوری را مطالعه کردند و مقدار $\epsilon_0 = ۸/۹$ را اندازه گرفتند. Barker و ^{۲۷}Ilegems با اندازه گیریهای IR انعکاسی $\epsilon_0 = ۹/۵$ را بدست آوردند.

AIN - ۳-۴-۱

این نیمه هادی دارای کوچکترین ثابت شبکه است. خصوصیات مکانیکی و الکترونیکی زیادی از خود نشان می دهد، برای مثال سختی، رسانندگی و مقاومت گرمایی بالا را می توان نام برد. گاف نواری پهن باعث شده که AIN همانند یک عایق عمل کند. Yim و همکارانش^{۲۸} برای گاف انرژی مستقیم AIN در دمای اتاق مقدار $۶/۲eV$ را بدست آوردند. همچنین یک پهن شدگی در طیف گسیلی از $۲-۳eV$ با یک قله در $۲/۸eV$ بدست آوردند. Perry و ^{۲۹}Rutz گاف انرژی را در دمای $۵K$ اندازه گرفتند و مقدار $۶/۲۸eV$ را بدست آوردند که قابل مقایسه با مقدار آن در دمای اتاق است. ضریب شکست AIN به وسیله چندین گروه^{۳۰,۳۱,۳۲} در بازه $۱/۹۹$ تا $۲/۲۵$ بدست آمد. همچنین ثابت دی الکتریک این ماده در بازه $۸/۳-۱۱/۵$ اندازه گیری شد^{۳۳,۳۴,۳۵,۳۶}. ترکیب این نیمه هادی در حالت بخار با GaN آلیاژ AlGa_xN را بوجود می آورد که در ساخت قطعات الکترونیکی و نوری با پایه AlGa_xN/GaN در گستره طول موجی سبز تا فرابنفش کاربرد دارد. بررسی خصوصیات AIN نسبت به سایر مواد III-N سخت تر است چون با اکسیژن به سرعت واکنش می دهد. وزن مولکولی ساختار ورتسایتس کریستال AIN در حدود $۲۰/۴۹۵ g/mol$ و نسبت $\frac{c}{a}$ در این نمونه $1/۶۳۳ = (\frac{۸}{۳})^{1/۲}$ است. بازه برای پارامتر a از $۳/۱۱۰\text{\AA}$ تا $۳/۱۱۳\text{\AA}$ و برای پارامتر c از $۴/۹۷۸\text{\AA}$ تا $۴/۹۸۲\text{\AA}$ گزارش شده است، همچنین تغییرات نسبت $\frac{c}{a}$ از $۱/۰۰۰$ تا $۱/۶۰۲$ است. ^{۳۷}Ott در سال ۱۹۲۴ اولین گزارش را از ساختار کریستالی

^۱ Phonon replica

ورتسایتس AlN با ثابتهای شبکه $a=3/11\text{\AA}$ و $c=4/98\text{\AA}$ ارائه کرد. AlN یک ماده سرامیکی سخت با نقطه ذوب بالا در حدود 2000°C است^{۴۰،۳۹،۳۸}. رسانندگی گرمایی آن در دمای اتاق تقریباً $3/2\text{ W/cmK}$ پیشگویی شده بود، اما اندازه گیریها در 300K مقادیر $2/5\text{ W/cmK}$ و $2/85\text{ W/cmK}$ را نشان دادند^۱.

InN - ۴-۴-۱

اطلاعات در مورد InN در مقایسه با GaN و AlN به خاطر ناپایداری در دماهای بالاتر از 5000°C ، بسیار کمتر است. InN خالص همانند GaN و AlN بدست نمی آید و این مربوط به مشکلات رشد با کیفیت بالای نمونه کریستال InN است. InN به صورت ساختار Wz و گاهی هم به صورت ساختار ZB متبلور می شود. متوسط مقدار $\frac{c_0}{a_0}$ در حدود $1/615 \pm 0/008$ است. حجم سلول InN در ساختار مکعبی ZB، $30/9\text{\AA}^3$ و برای ساختار هگزاگونال Wz، $31/2 \pm 0/2\text{\AA}^3$ است. چگالی آزمایشی InN در 25°C ، $6/89\text{ g/cm}^3$ است این قابل مقایسه است با $6/81\text{ g/cm}^3$ که از داده های حاصل از پرتو X برآورد می شود. مقادیر گاف انرژی مستقیم InN در دمای اتاق در بازه $0/7-6/2\text{eV}$ گزارش شده است^{۱۲،۱۰،۵}.

AlGaIn - ۵-۴-۱

خصوصیات نوری آلیاژ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ در دهه های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ اندازه گیری شد. گروههای زیادی درباره ساخت $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ با $x=0/45$ و اندازه گیری درصد Al و Ga را بوسیله پرتو X مطالعه کردند^{۴۴،۴۳،۴۲،۴۱}. همه نمونه ها یک رسانندگی از نوع n را نشان دادند که در آنها چگالی حاملها و کاهش تحرک آنها تابعی از درصد مولی Al بود. کاملترین مطالعه در مورد خصوصیات AlGaIn توسط yashida و همکارانش انجام شد^{۴۵} در این کار آنها تغییرات الکترونی، تحرک پذیری، مقاومت، ثابت شبکه و گاف انرژی را گزارش کردند که تابع چگالی آلیاژها بود. آنها مشاهده کردند که ثابت شبکه از مقدار بدست آمده در قانون وگارد بزرگتر

است. مقاومت از $\rho = 10^{-4} \Omega \text{cm}$ تا $\rho = 10^6 \Omega \text{cm}$ به اندازه ده مرتبه بزرگی افزایش می یابد، چگالی حاملها از $n = 2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ به $n = 2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ کاهش و توزیع Al از مقدار صفر تا $x = 0.40$ افزایش می یابد. Khan و همکارانش^{۴۶} مقدار لبه گسیلی برای $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ را با $x \leq 0.24$ اندازه گرفتند و یک نوار با پارامتر انحناء $b = 0.98 \text{ eV}$ که در توافق با مقدار $b = 1.0 \text{ eV}$ (به وسیله Itoh^{۴۳} گزارش شده) بود، را گزارش کردند. Khan نمونه $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ را گزارش کرد که تحرک پذیری آن برای چگالی حاملهای $n = 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ حدود $\mu_n = 35 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ است.

آلیاژ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ از ترکیب AlN و GaN بوجود آمده است و خصوصیت این آلیاژ به گاف انرژی، جرم مؤثر الکترون و حفره و ثابت دی الکتریک ترکیباتش وابسته است. گاف انرژی آن با استفاده از قانون وگارد به صورت زیر بدست می آید:

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x E_g(\text{AlN}) + (1-x) E_g(\text{GaN}) - bx(1-x) \quad (۴-۱)$$

که در دمای اتاق $E_g(\text{GaN}) = 3/4 \text{ eV}$ و $E_g(\text{AlN}) = 6/2 \text{ eV}$ است. گاف انرژی این آلیاژ تابعی از نسبت مولی Al، یعنی مقدار x ، است. b پارامتر انحناء است که از مقدار منفی برای گاف انرژی بزرگ با افزایش کسر Al تا مقدار مثبت تغییر می کند. Akasaki و Amano^{۴۷} گاف انرژی لایه $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ را با استفاده از روش فتولومینسانس^۱ (PL) تعیین کردند و پارامتر انحناء (b) برای این ترکیب به ازای درصدهای مختلف Al بین صفر تا ۲۵ درصد حدود ۰/۲۵ بدست آوردند.

۱-۴-۶- کاربرد نیمه هادیهای نیتروژن دار

ترکیبات نیتروژن دار به دلیل داشتن گاف انرژی پهن از 0.7 eV تا $6/2 \text{ eV}$ به شکل گسترده ای در قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی به کار گرفته می شوند. ناحیه فعال در دیودهای نوری UV، مرئی و IR (بویژه در طول موجهای ۱/۵ تا ۱/۳ میکرون) و آشکار سازهای مربوط به ناحیه IR از مواد فوق ساخته شده اند. این مواد همچنین در ترانزیستورهای فرکانس بالا استفاده می شوند. کاربرد وسیع دیودهای لیزری و نوری بویژه در ناحیه آبی،

^۱ Photoluminescence

بنفش و ماورای بنفش در تکنولوژی کامپیوتر و ارتباطات، ساخت صفحات نمایشی^۱ بزرگ و همچنین ساخت لامپهای روشنایی جدید و دهها کاربرد دیگر ضرورت تحقیق و درک فیزیکی صحیح از فرآیندهای باز ترکیب و عوامل مؤثر در آنها جهت اصلاح ساختار و افزایش کارایی بهتر در قطعات اپتوالکترونیکی را اجتناب ناپذیر نموده است.

^۱ Display

فصل دوه

ساختارهای کوانتومی نیمه هادیها

Semiconductor Quantum Structures

برخی از امکانات جالب توجه کاربرد نیمه هادیها برای استفاده در پروژه های نوری و الکترونیکی بر این حقیقت استوار است که رشد این مواد به گونه ای باشد که مجموعه ای از مواد تازه با ابعاد بسیار کوچک (ساختارهای نانو) و خواص قابل پیش بینی بدست آید. پیشرفتهای اخیر در روشهای رشد بلور باعث شده است که ساختار کوانتومی با ابعاد نانومتری تحقق یابد. ساختارهایی که خواص نوری و الکترونیکی آنها در مقایسه با حالت بلوری کپه ای^I (حجمی) بسیار متفاوت است. در این ساختارهای نانومتری توابع موج الکترونها و حفره ها در داخل ماده محبوس بوده و موجب پدیدار شدن اثرهایی به عنوان اثر محدودیت کوانتومی^{II} می شوند. علاوه بر آن در اثر بدام افتادن توابع موج الکترون و حفره، همپوشانی آنها نسبت به حالت کپه ای افزایش قابل ملاحظه ای می یابد که موجب تسریع در باز ترکیب الکترون و حفره و در نتیجه افزایش چشمگیر راندمان نوری در قطعات اپتوالکترونیکی می گردد.

۲-۲- ساختارهای ناهمگون^{III}

وقتی که یک نیمه هادی با دو نوع آرایش n و p را به هم متصل کنیم ساختاری که بوجود می آید به ساختار همگون^{IV} معروف است. در این ساختار تنها نوع آرایش در محل پیوند

^I Bulk

^{II} Quantum Confinement Effect

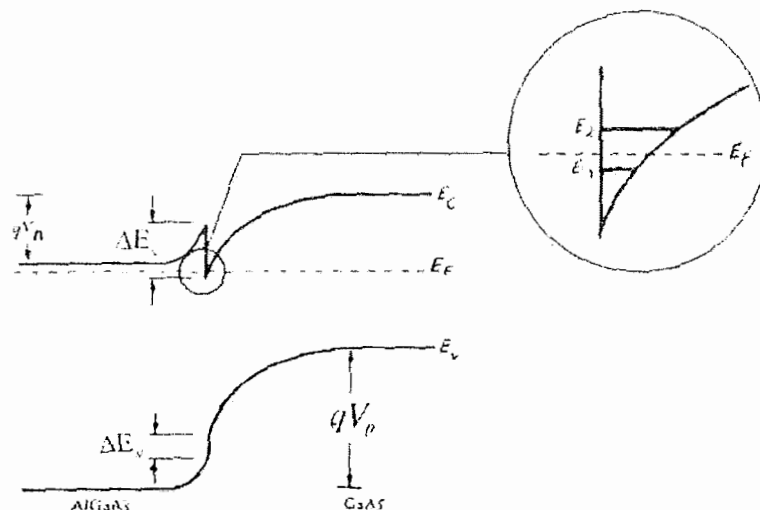
^{III} heterostructures

^{IV} homostructures

تغییر می کند و هیچ گونه تغییر عمده ای در ساختار شبکه ایجاد نمی شود. اما وقتی که از دو نیمه هادی با گاف انرژی متفاوت استفاده کنیم ساختار ناهمگون داریم. مرز مشترک این نیمه هادی می تواند عاری از نقایص بلوری باشد. دسترسی به پیوند های ناهمگون¹ و ساختارهای چند لایه در نیمه هادیهای مرکب افق وسیعی از امکان گسترش قطعات الکترونیک را در پیش رو قرار داده است. از این نوع پیوندها برای ساخت ترانزیستورهای دوقطبی، ترانزیستورهای اثر میدانی و لیزرهای نیمه هادی استفاده می کنند. وقتی که نیمه هادی های با اندازه گاف انرژی و وابستگی الکترونی متفاوت برای تشکیل پیوند کنار هم آورده شوند ناپیوستگی در نوار ظرفیت و رسانش داریم که باعث خم شدگی نوار انرژی در محل پیوند در دو طرف پیوند ناهمگون از یک سو به سوی دیگر به خاطر عدم برابری سطح فرمی می شود. ناپیوستگی در نوار رسانش باعث می شود که الکترونها از ناحیه ای که آرایش زیاد دارد به ناحیه ای که آرایش کم دارد، بریزند. در نتیجه الکترونها در دو طرف ناحیه کم آرایش از پیوند ناهمگون جمع شده و تراز فرمی را به بالای نوار هدایت و در نزدیکی مرز مشترک انتقال می دهند. این الکترونها در یک چاه پتانسیل باریک در نوار هدایت نمونه کم آرایش محدود می شوند. الکترونها در چنین چاه پتانسیلی یک گاز الکترونی دو بعدی^{II} (2DEG)، تشکیل می دهند. رسانش الکترونی در چنین چاه پتانسیلی می تواند باعث تحرک بسیار زیاد الکترونها شود. این تحرک زیاد در اثر این واقعیت است که الکترونها در این چاه از نمونه با آرایش زیاد می آیند نه از نمونه با آرایش کم، در نتیجه پراکندگی کمی در نمونه کم آرایش وجود داشته و تحرک الکترونها تقریباً به طور کامل توسط پراکندگی شبکه ای (فونونها) کنترل می شود. در دمای پایین که پراکندگی فونونی کم است، تحرک در این ناحیه می تواند بسیار زیاد باشد. اگر خمش نوار هدایت در نمونه با آرایش کم به اندازه کافی زیاد باشد، چاه پتانسیل بسیار باریک شده بطوریکه حالت های گسسته مانند E_1 و E_2 همانند شکل (۱-۲) ایجاد می شود.^۳

^I heterojunction

^{II} Two Dimensional Electron Gas



شکل ۱-۲: نحوه تشکیل گاز الکترونی دوبعدی در چاه پتانسیل^۳

برای محاسبه جریان در حضور میدانهای الکتریکی یا مغناطیسی دانستن تراکم حاملها در یک جامد ضروری است. علاوه بر مقادیر n و p باید بتوانیم برخوردهای حاملها با شبکه و نیز با ناخالصیها را منظور کنیم. این فرآیند ها روی حرکت الکترونها و حفره ها در درون یک بلور، تحرک^۱، آنها اثر می گذارد. فرآیند های برخورد^{II} و پراکندگی^{III} به دما، که روی حرکت گرمایی اتمهای شبکه و سرعت حاملها اثر می گذارد، وابسته است.

توانایی تحرک حاملها معمولاً با سیستم اندازه گیری هال که در آن حرکت حاملها در طول نمونه مورد آزمایش بوسیله نیروی لورنتس حاصله از میدان مغناطیسی دچار تغییر می شود، تعیین می گردد. این عمل باعث بوجود آمدن ولتاژ هال در نمونه می گردد. وقتی جریان در جهت x از یک نمونه با آلایش p عبور کند میدان مغناطیسی به طور عمودی (جهت z) بر حفره ها وارد می شود و حفره ها از مسیر خود منحرف می شوند. نیروی لورنتس در جهت y به صورت زیر است:

$$F_y = q(E_y - v_x B_z) \quad (1-2)$$

^I Mobility
^{II} Collision
^{III} Scattering

برای داشتن یک شار پیوسته از حفره در طول میله باید $F_y=0$ باشد ($E_y=v_x B_z$) این میدان زمانی ایجاد می شود که میدان مغناطیسی توزیع حفره را اندکی در جهت y تغییر دهد تا به اندازه $v_x B_z$ برسد. ایجاد میدان الکتریکی E_y به نام اثر هال شناخته می شود و ولتاژ حاصله $V_{AB}=E_y W$ نیز ولتاژ هال نامیده می شود.

پیوند دیگری که در نیمه هادیها در ساختارهای ناهمگون وجود دارد پیوند فلز - نیمه هادی است که در ساخت ترانزیستورهای اثر میدانی^I (MESFET) استفاده می شود. چون این با استفاده از ترکیب III-V سازگار است می توان از ویژگیهای مهندسی گاف انرژی موجود در ساختارهای ناهمگون ساخته شده از این مواد استفاده کرد و به منظور حفظ هدایت انتقالی بالا، رسانایی باید تا حد امکان زیاد باشد که آنرا می توان با افزایش آلایش توسط ناخالصی (تراکم حاملها) افزایش داد. افزایش ناخالصی موجب افزایش پراکندگی توسط ناخالصیهای یونیزه شده، می شود که به نوبه خود تحرک حاملها را کاهش می دهد. پس ضروری است که با روشی غیر از افزودن ناخالصی، تراکم حاملها را افزایش دهیم. برای این منظور از یک چاه نازک بدون آلایش (GaAs) که توسط سد دارای ناخالصی و با شکاف نوار پهن تر (AlGaAs) احاطه شده باشد استفاده می کنیم، این آرایش به نام مدوله سازی ناخالصی^{II} معروف است. در اثر سقوط الکترونها از سدهای ناخالص شده AlGaAs به داخل چاه و محبوس شدن آنها، یک GaAs رسانا را پدید می آورد. چون دهنده ها در AlGaAs هستند پراکندگی ناخالصی در چاه برای الکترونها وجود ندارد، این اثر بویژه در دماهای پایین که پراکندگی شبکه (فونونها) نیز کم است، قابل توجه می باشد. قطعه ای که به این صورت ساخته می شود ترانزیستور اثر میدانی با ناخالصی مدوله شده^{III} (MODFET) است که همچنین یک ترانزیستور با تحرک الکترونی زیاد^{IV} (HEMT) نیز نامیده می شود.^۲

^I Metal Semiconductor Field Effect Transistors

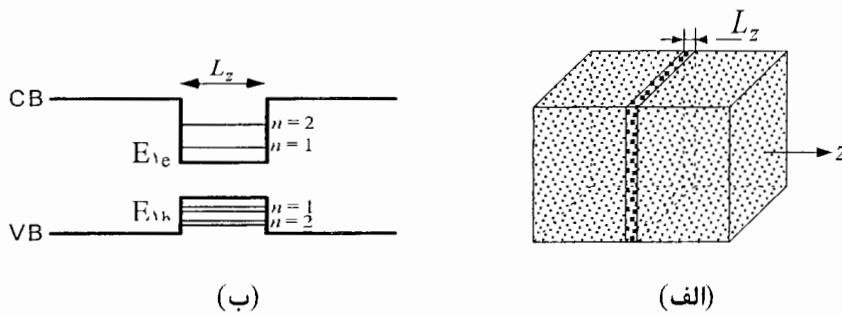
^{II} Modulation doping

^{III} Modulation Doped Field Effect Transistors

^{IV} High Electron Mobility Transistor

۳-۲- ساختارهای کوانتومی

یک از مهمترین کاربردهای رشد نیمه هادیهای مرکب به وسیله MBE^I و یا MOCVD^{II} این است که امکان ساخت لایه های فوق نازک با کیفیت عالی را بوجود آورده است و یک تک بلور پیوسته را می توان در مجاورت لایه های با شکاف نوار متفاوت رشد داد، به طور مثال ناپیوستگی های نوار انرژی برای لایه های نازکی از ماده ای با گاف انرژی کمتر که بین دو لایه با گاف انرژی بزرگتر قرار دارد در شکل (۲-۲- الف) مشاهده می شود. در این حالت ناحیه با گاف انرژی کمتر آنقدر نازک است که حالت های کوانتومی در نوارهای ظرفیت و هدایت بوجود می آیند. الکترونها در نوار هدایت در حالت های E_c قرار می گیرند، حفره ها هم در چاه کوانتومی حالت های گسسته یکسانی مانند E_{lh}^{III} و E_{lh}^{IV} را اشغال می کنند (شکل ۲-۲- ب).



شکل ۲-۲: الف) تصویر یک چاه کوانتومی، ب) سطوح انرژی در چاه کوانتومی^{II}

چاه کوانتومی تکی (SQW)^V شامل یک لایه خیلی نازک از یک نیمه هادی که بین دو لایه نازک از نیمه هادی دیگر با گاف انرژی پهن تر و با ثابت شبکه تقریباً مشابه قرار دارد (شکل ۲-۲- الف). مثل لایه نازکی از GaN که بین لایه هایی از آلایژ سه تایی $Al_xGa_{1-x}N$ قرار دارد. وقتی که فرآیند رشد را تکرار کنیم به طوریکه ساختار متناوبی از $GaN/Al_xGa_{1-x}N$

^I Molecular Beam Epitaxy

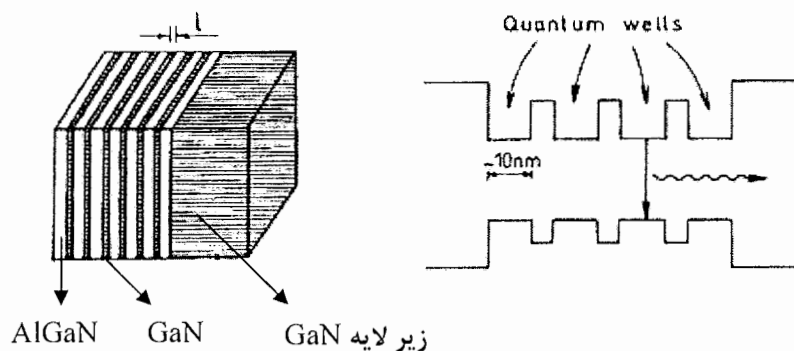
^{II} Metal Organic Chemical Vapour Deposition

^{III} Light Hole

^{IV} Heavy Hole

^V Single Quantum Well

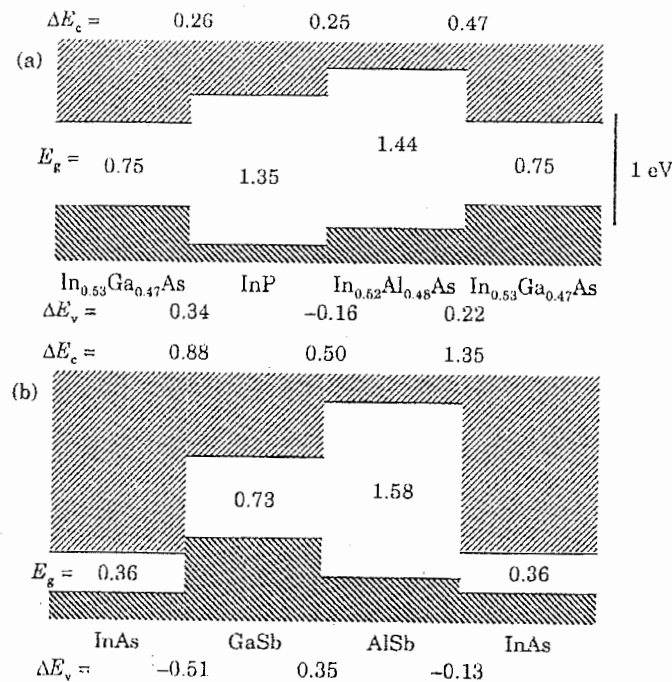
داشته باشیم تشکیل یک ساختار چاه پتانسیلی متناوب^۱ (MQW) یا چاه کوانتومی چندگانه را می دهند (شکل ۲-۳). در ساختارهای ترکیبی تنظیم نوارهای انرژی در فصل مشترک امری مهم است. همانطور که در شکل (۲-۴) مشاهده می شود چندین امکان برای یک اختلاف گاف انرژی $(\Delta E_g = E_g^A - E_g^B)$ بین موادی که به ترتیب لایه های چاه و لایه های سد را تشکیل می دهند، وجود دارد. ساختارهای چاه کوانتومی می توانند حالت های مختلفی داشته باشند، چاه های کوانتومی نوع I، II و III، که به طور مختصر راجع به آنها توضیح داده می شود. چاه کوانتومی نوع I، که در آن نوارهای رسانش و ظرفیت در مقابل هم هستند (گاف انرژی مستقیم است) در این نوع چاه کوانتومی الکترون و حفره هر دو از یک ماده هستند. در چاه کوانتومی II، که دارای گاف انرژی غیر مستقیم است و الکترونها با گرفتن انرژی فوتون از نوار ظرفیت یک ماده به نوار رسانش ماده دیگر منتقل می شوند. در چاه کوانتومی نوع III، هیچ همپوشانی بین گاف های انرژی وجود ندارد. در این حالت نوار رسانش از یک ماده با نوار ظرفیت از ماده دیگر با هم همپوشانی دارند^{۴۸}.



شکل ۲-۳: تصویری از یک چاه کوانتومی چندگانه*

(*<http://photonix.net/stnpe.html>)

¹¹ Multiple Quantum Well



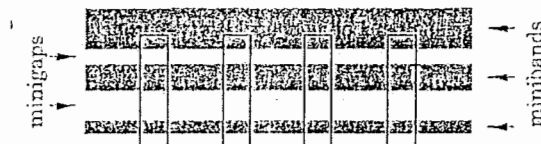
شکل ۲-۴: چاه کوانتومی نوع I ($\text{InP}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ و $\text{InP}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ و $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ و GaSb/AlSb).

چاه کوانتومی نوع II ($\text{InP}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ و AlSb/InAs), چاه کوانتومی نوع III (InAs/GaSb)^{۴۸}

یکی دیگر از ساختارهای مهم کوانتومی ابر شبکه ها^۱ هستند که در آنها هر دو لایه GaN و $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (لایه های سد و چاه) بی نهایت نازک ساخته می شوند. در ابر شبکه ها توابع موج الکترونی در چاههای پتانسیلی مجاور روی هم افتادگی پیدا می کنند که به این علت، خواص این ساختار با ساختار چاههای کوانتومی چندتایی تفاوت دارد. سد پتانسیل نازک اجازه تونل زدن ذرات از یک چاه به درون چاه مجاور را می دهد. روی هم افتادگی توابع موج بین چاههای پتانسیل، تبهگنی را از بین می برد. اگر تعداد N چاه پتانسیل داشته باشیم هر تراز به N تراز شکافته می شود وقتی تبهگنی اسپینی هم در نظر گرفته شود 2N تراز انرژی تشکیل می شود، این ترازهای انرژی پیوسته تشکیل نوار انرژی می دهند. به نوارهای

^۱ Superlattices

انرژی ابر شبکه که به این صورت تشکیل می شوند، نوارهای کوچک^I گفته می شود (شکل ۲-۵). وقتی پهنای سد کاهش پیدا می کند پهنای نوارها افزایش می یابد^{۴۸،۴}.

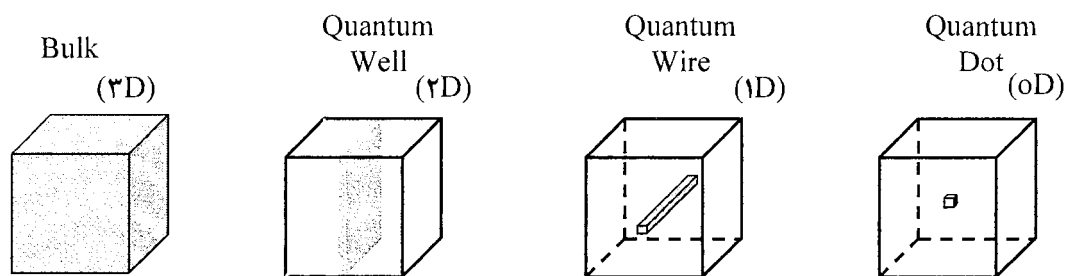


شکل ۲-۵: یک ابر شبکه به همراه ساختار نوارهای کوچک^{۴۸}

اثرهایی که در چاه پتانسیل مشاهده شده باعث شد که علاقه محققان به نیمه هادیهای با ابعاد نانومتری و با خواص محدودیت کوانتومی بیشتر جلب شود، ساختارهایی همانند چاههای کوانتومی، سیمها و نقاط کوانتومی (شکل ۲-۶). سیمهای کوانتومی (QWire)^{II} ساختارهایی هستند که در آنها حرکت زوج الکترون - حفره^{III} (EHP) در دو بعد فضایی محدود شده و فقط در یک بعد آزادی حرکت دارند. در نتیجه سیمهای کوانتومی مواد شبه یک بعدی را نشان می دهند. برای تولید سیمهای کوانتومی می توان نوارهای نازک مواد چاه کوانتومی را مورد حکاکی قرار داد یا حرکت حاملها را با استفاده از روشهای غیر مستقیم در یک بعد محدود کرد.

به نقاط کوانتومی^{IV} (QD) که در آنها حرکت زوج الکترون - حفره ایجاد شده توسط تحریک لیزری در هر سه بعد محدود می باشند ساختارهای شبه صفر بعدی می گویند. روشهای مختلفی برای ساخت ساختار نقاط کوانتومی توسط گروههای تحقیقاتی مختلف ابداع شده است. برای مثال ساختار Si/Ge و یا نقاط کوانتومی InAs در زمینه GaAs که به روش MBE رشد داده می شوند^۲.

^I Minibands
^{II} Quantum Wire
^{III} Electron Hole Pairs
^{IV} Quantum Dots



شکل ۲-۶: نمایش طرحواره ای از ماده کپه ای، چاه پنانسیل، سیم کوانتومی و نقطه کوانتومی

۲-۲- خواص اپتیکی ساختارهای کوانتومی

در هنگام تولید زوجهای الکترون - حفره در یک نیمه هادی یا هنگامیکه الکترونهاى برانگیخته شده به ترازهای بالاتر به حالت تعادل خود برمی گردند، امکان تابش نور از ماده وجود دارد. بسیاری از نیمه هادیها بویژه نیمه هادیهای مرکب با شکاف نوار مستقیم برای گسیل نور مناسبند. گسیل از یک نیمه هادی لومینسانس^I نامیده می شود. این بحث را می توان بر حسب چگونگی برانگیختگی به زیر شاخه هایی تقسیم کرد: اگر حاملها بر اثر تحریک نیمه هادی توسط نور لیزر برانگیخته شوند، تابش ناشی از باز ترکیب حاملهای برانگیخته شده فتولومینسانس (PL) نامیده می شود. اگر حاملهای برانگیخته بر اثر بمباران ماده با الکترونهاى پر انرژی بوجود آیند، فرآیند را کاتدلومینسانس^{II} (CTL) می نامند و چنانچه برانگیختگی بر اثر عبور جریان از نمونه رخ دهد لومینسانس حاصل الکترو لومینسانس^{III} (EL) و اگر بر اثر گرما باشد لومینسانس گرمایی^{IV} (TL) نامیده می شوند^{۴۹}.

در فرآیند برانگیختگی پایدار سرعت باز ترکیب و تولید زوج الکترون - حفره ها یکسان بوده و در مقابل جذب هر فوتون یک فوتون منتشر می شود. باز ترکیب مستقیم یک فرآیند سریع بوده و طول عمر میانگین زوج الکترون - حفره ها بر حسب نوع ماده می تواند از چند

^I Luminescence

^{II} CathodLuminescence

^{III} ElectroLuminescence

^{IV} ThermalLuminescence

پیکو ثانیه تا حدود چند میکرو ثانیه باشد. چنین فرآیندهای لومینسانسی سریع را فلوئورسانس^I یا لومینسانس زودگذر می نامند. در عین حال در برخی از مواد گسیل نور برای چندین ثانیه یا دقیقه بعد از پایان برانگیزش ادامه می یابد. این فرآیندهای کند را لومینسانس دیر گذر و به چنین موادی شب تاب^{II} می گویند^۳.

^I Fluorescence
^{II} Phosphors

فصل سوم

فرآیند بازترکیب نوری مواد نیمه هادی

Radiative Recombination Processes of Semiconductor Materials

۳-۱- مقدمه

اساس کار اکثر وسایل اپتوالکترونیکی بر پایه تولید زوج الکترون - حفره و از بین رفتن آنها بنا شده است. هر ذره ای که بر نیمه هادی فرود می آید و حداقل انرژی برابر با گاف به الکترون باند ظرفیت منتقل نماید، باعث بوجود آمدن زوج الکترون - حفره می گردد، این فرآیند جذب نامیده می شود. فرآیند معکوس که همان بازترکیب زوج الکترون - حفره است ممکن است به صورت تابشی^I یا غیر تابشی^{II} باشد. اگر در حین فرآیند بازترکیب انرژی اضافی به شکل فوتون باشد (بر حسب نوع فرآیند بازترکیب انرژی فوتون گسیل شده معادل با انرژی گاف یا کوچکتر از گاف انرژی) بازترکیب تابشی و اگر فوتون تولید شود بازترکیب غیر تابشی نامیده می شود. در این فصل ما به فرآیند های گسیل نور ناشی از بازترکیب زوج الکترون - حفره می پردازیم. زوج الکترون - حفره در اثر جذب نور در نیمه هادی تولید می گردد. مکانیزمهای متفاوتی برای بازترکیب الکترون و حفره می تواند وجود داشته باشد.

۳-۲- اکسیتون^{III}

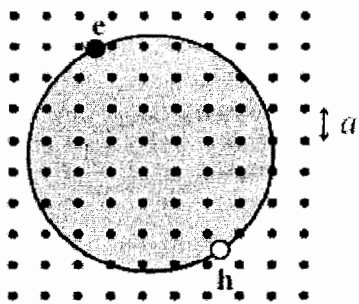
تشکیل یک زوج الکترون و حفره مقید اکسیتون نامیده می شود (شکل ۳-۱). اکسیتونها مشابه اتمهای پوزیترونیم هستند که در آنها یک الکترون توسط برهمکنش کولنی به یک پوزیترون پیوند خورده است. در اکسیتونها الکترون به حفره پیوند خورده و شبه ذره حاصل

^I Radiative Recombination

^{II} Non Radiative Recombination

^{III} Exciton

از لحاظ الکتریکی خنثی است. بنابراین یک اکسیتون مشابه یک ذره آزاد است که در سرتاسر بلور حرکت می کند. اکسیتونها باعث وجود خطوط جذبی شدید نور در گستره ای پایین تر از گاف انرژی هستند. برای ایجاد گذار اکسیتونی فوتونی با انرژی کمتر از انرژی گاف لازم می باشد. زیرا مقداری از انرژی سیستم به خاطر پیوند الکترون - حفره کاسته می شود که معرف انرژی پیوستگی اکسیتون می باشد.



شکل ۳-۱: تصویر یک اکسیتون
(a ثابت شبکه)

فرآیند جذب فوتون متناظر با ایجاد مستقیم یک اکسیتون در بلور است. انرژی پیوند اکسیتون به طور معکوس متناسب با شعاع بوهر اکسیتون (a_B) است. هر چه انرژی پیوندی بیشتر باشد شعاع بوهر اکسیتون کوچکتر می شود.

$$\text{CdS} \rightarrow E_B = 27 \text{ meV} \quad , \quad a_B = 28 \text{ \AA}$$

$$\text{GaAs} \rightarrow E_B = 4/2 \text{ meV} \quad , \quad a_B = 140 \text{ \AA}$$

انرژی پیوندی اکسیتون به طور معکوس با مربع ثابت دی الکتریک محیط نیز متناسب است. در نیمه هادیهای با گاف انرژی پهن تر چون کلرور مس (CuCl) با $E_g \cong 3 \text{ eV}$ ثابت دی الکتریک محیط کوچک و در نتیجه انرژی پیوندی بیشتر است.^۲

اکسیتون در فرآیندهای اپتیکی (در قطعات اپتوالکترونیکی) نقش مهمی را ایفا می کند و در برخی مواد نیمه رسانا بویژه ترکیبات GaN و آلیاژهای آن اثر فرآیندهای باز ترکیب تابشی منشاء اکسیتونی دارد. برخلاف فرآیندهای اپتیکی در فرآیندهای الکترونیکی و ترابری

حاملها (بویژه در قطعات الکترونیکی) اکسیتونها بدلیل خنثی بودن از نظر بار الکتریکی نقش مؤثری را ایفا نمی کنند.

۳-۲-۱- اکسیتون آزاد^I (FE)

اکسیتونهای در حال تجزیه ذرات متحرک آزاد قابل انتشار در سراسر بلور هستند و اکسیتونها را می توان به صورت گازی از ذرات مستقل بدون هیچ اندرکنش متقابلی در نظر گرفت (شکل ۳-۲-۳). چون لومینسانس اکسیتون فرآیند معکوس جذب است قواعد بقای یکسانی به کار برده می شود.

$$\hbar\omega_c = \varepsilon_n(K_c) \quad \text{و} \quad \hbar q = \hbar K_c \quad \text{بقای اندازه حرکت}$$

$\hbar\omega_c$ و $\hbar q$ به ترتیب انرژی و اندازه حرکت فوتون است و K_c بردار موج اکسیتون در حال تجزیه (واپاشی) است. انرژی یک اکسیتون آزاد به صورت زیر است:

$$E_n = \frac{\mu^*}{m_0 \varepsilon_r^2} \frac{R_H}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3-3)$$

R_H ثابت ریذبرگ هیدروژن، μ^* جرم مؤثر کاهش یافته از اکسیتون و ε_r ثابت دی الکتریک است^{۱،۳،۲}.

۳-۲-۲- اکسیتونهای مقید^{II} (BE)

یک بلور واقعی هیچ وقت بی نقص نیست. نقایصی مانند تهیگاههای یونی، اتمهای خودی یا اتمهای جانشین که می توانند اکسیتونهایی را که در جایگاههای ناکاملی جای گرفته اند، جذب کرده و تبدیل به اکسیتونهای مقید می کنند. انرژی پیوندی اکسیتون مقید در حدود چند meV است و فقط در دماهای خیلی پایین قابل مشاهده است. اکسیتونها ممکن است که به یک اتم دهنده (یک جایگزین با تعداد الکترونهای ظرفیتی بیشتر در مقایسه با اتمهای

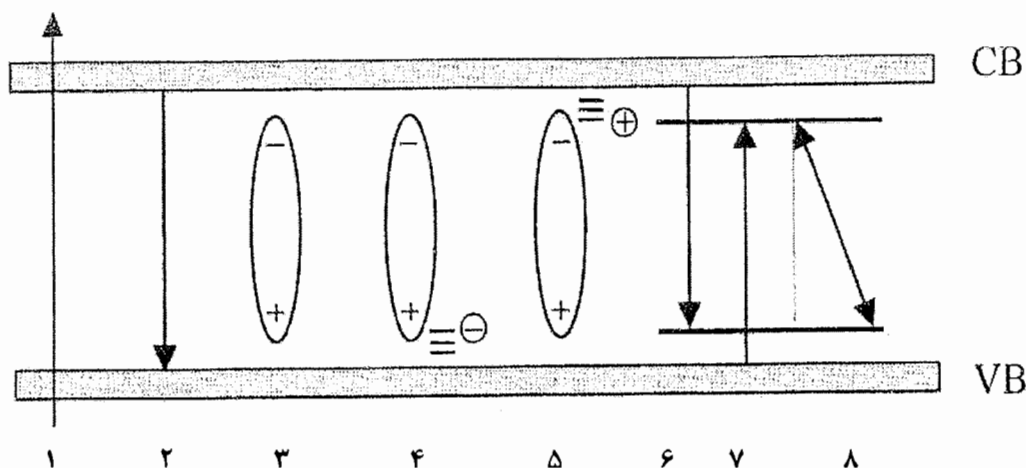
^I Free Exciton

^{II} Bound Excitons

میزبان) و یا به یک اتم پذیرنده (یک اتم جایگزین با تعداد الکترونهاى ظرفیتی کمتر) متصل شوند. وقتی که یک اتم دهنده الکترون ظرفیت اضافی خود را از دست می دهد به طور مثبت باردار می شود و به آن یک دهنده یونیده می گویند، همچنین وقتی که یک اتم پذیرنده یک الکترون را گیر می اندازد دارای بار منفی است و به آن پذیرنده یونیده می گویند. اکسیتونها هم می توانند با دهنده ها و هم با پذیرنده های یونیده و خنثی پیوند خورده و اکسیتونهاى مقید را بوجود آورند (شکل ۳-۲-۴) و (۵). انرژی اکسیتون مقید از انرژی اکسیتون آزاد به اندازه انرژی پیوند به ناخالصی (ϵ_D) کمتر است.

$$\epsilon_{bx} = E_g - E_B - \epsilon_D \quad (4-3)$$

اکسیتونهاى مقید نمی توانند بدون حضور فونونها تجزیه شوند. لومینسانس اکسیتونهاى مقید را می توان از تیزی خطوط طیفی که در پایین تر از اکسیتون آزاد قرار می گیرند، شناخت. چون اکسیتونهاى مقید در اطراف ناخالصیها جایگزین شده اند همانند اکسیتونهاى آزاد پهن شدگی حرارتی مربوط به افزایش پهنای توزیع انرژی در آنها مشاهده نمی شود. تا زمانیکه انرژی پیوندی اکسیتون به ناخالصی از انرژی پیوندی خود اکسیتون کوچکتر است. خطوط اکسیتون مقید قبل از خطوط اکسیتون آزاد با افزایش درجه حرارت محو می شوند چون انرژی حرارتی ابتدا اکسیتونهاى مقید را از یکدیگر رها می سازد^{۱۱،۸،۲}.

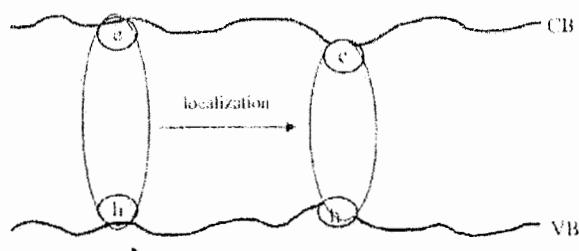


شکل ۳-۲: فرآیندهای باز ترکیب نوری؛ (۱) برانگیختگی، (۲) گذار باند به باند، (۳) اکسیتون آزاد، (۴) اکسیتون باند شده به پذیرنده، (۵) اکسیتون باند شده به دهنده، (۶) الکترون آزاد با حفره باند شده به پذیرنده، (۷) حفره آزاد با الکترون باند شده به دهنده و (۸) گسیل از جفت شدگی دهنده - پذیرنده^۱

۳-۲-۳- اکسیتون جایگزیده^۱

اکسیتونها می توانند در حالت‌های ناشی از افت و خیزهای پتانسیل و یا ناهمواریها بویژه در سطوح مشترک به دام بیفتند که به آنها اکسیتون جایگزیده گفته می شود (شکل ۳-۳).^{۵۰} بی نظمی های پتانسیلی در ساختارهای III-V نیتراید فراوانند. این بی نظمی ها ناشی از حضور نواقص شبکه، توزیع غیر یکنواخت عناصر تشکیل دهنده یک لایه، تغییرات موضعی میدانهای قطبشی، افت و خیز های سطح مشترک و غیره می باشد. شعاع بوهر اکسیتون در مواد III-V نیتراید کوچکتر از بقیه نیمه هادیها است. انرژی جایگزیدگی اکسیتونها را می توان از روی وابستگی دمایی طیف لومینسانس نمونه مطالعه کرد. با افزایش دما نسبت اکسیتونهای جایگزیده نسبت به اکسیتونهای آزاد کاهش می یابد و سیگنال فتولومینسانس توسط باز ترکیب اکسیتونهای آزاد تعیین می شود.^{۱۱}

^۱ Localized Exciton



شکل ۳-۳: مدلی از اکسیتونهای جایگزیده به خاطر افت و خیز پتانسیلی^{۱۱}

۳-۳- فرآیندهای باز ترکیبی

گفتیم که الکترونهای نوار هدایت در یک نیمه هادی می توانند به طور مستقیم یا غیر مستقیم با حفره های نوار ظرفیت باز ترکیب شوند. انرژی از دست داده شده توسط الکترون در هنگام گذار به صورت یک فوتون آزاد می شود. باز ترکیب مستقیم به طور خود بخودی^۱ اتفاق می افتد یعنی احتمال باز ترکیب یک الکترون با یک حفره در طول زمان ثابت است. در نیمه هادیهای ستون IV و در برخی ترکیبات خاص احتمال باز ترکیب مستقیم الکترون - حفره بسیار کم است در مواد دارای گاف انرژی غیر مستقیم بیشتر باز ترکیب ها از طریق ترازهای درون گاف انرژی صورت می گیرد و اتلاف انرژی حاصل از الکترونهای باز ترکیب شونده معمولاً به جای گسیل فوتونها به صورت گرما به شبکه داده می شود. هر نوع نقص یا ناخالصی در شبکه بلوری می تواند به صورت مرکز باز ترکیب عمل کند.

فرآیند باز ترکیب تابشی شامل گسیل یک فوتون با انرژی نزدیک به انرژی گاف توسط حاملهای یا اکسیتونهاست. یک نمونه آن گذار باند به باند^{۱۱} است (شکل ۳-۲- (۲)) که یک الکترون آزادانه از باند رسانش با یک حفره از باند ظرفیت با یکدیگر باز ترکیب می کنند و در آن یک فوتون با انرژی معادل با انرژی گاف گسیل می شود. در نیمه هادیهای با گاف

^۱ spontaneously

^{۱۱} band-to-band

غیر مستقیم این فرآیند همراه با تولید یا جذب یک یا چند فوتون می باشد. در چنین حالتی فرآیند را باز ترکیب غیر تابشی می نامند^{۴۹}.

گذارهای اکسیتون مقید شامل باز ترکیب تابشی اکسیتونی است که یک حامل آن آزاد است و یک حامل آن به یک ناخالصی باند شده و به دو صورت مختلف رخ می دهند: دهنده به نوار ظرفیت و نوار رسانش به پذیرنده. (شکل ۳-۲-۴) و (۵) این گسیل در انرژیهای کمتر از گاف انرژی رخ می دهد. اکسیتونها ممکن است به ناخالصی ها (هم دهنده و هم پذیرنده) باند شوند.

گسیل دیگری که ممکن است رخ دهد می تواند ناشی از باز ترکیب یک الکترون آزاد با یک حفره مقید به پذیرنده (شکل ۳-۲-۶) و یا گسیل ناشی از باز ترکیب یک الکترون مقید به دهنده، با یک حفره آزاد در باند ظرفیت باشد (شکل ۳-۲-۷). در این دو مورد انرژی فوتون گسیل شده به میزان انرژی بستگی برای اتمهای پذیرنده یا دهنده از انرژی گاف کوچکتر می باشد. بر حسب نوع اتمهای دهنده یا پذیرنده میزان انرژی بستگی متفاوت می باشد. احتمال دیگر برای انجام فرآیند باز ترکیب گسیل ناشی از باز ترکیب یک الکترون مقید به اتم دهنده و یک حفره مقید به اتم پذیرنده می باشد که گسیل از جفت شدگی دهنده - پذیرنده نامیده می شود، و انرژی گسیلی به میزان مجموع انرژی های بستگی اتمهای پذیرنده و دهنده از گاف انرژی کمتر می باشد (شکل ۳-۲-۸). در این حالت انرژی گسیلی به فاصله اتمهای پذیرنده و دهنده نیز بستگی دارد (رابطه ۳-۵). دهنده ها و پذیرنده ها به طور غیر ارادی یا ارادی به طور همزمان حضور دارند و با توجه به دما و حالتیهای اشغال سطوح ناخالصی ممکن است الکترونی از نوار یک پذیرنده با حفره ای از نوار دهنده باز ترکیب کند که انرژی فوتون گسیلی در این حالت از رابطه زیر بدست می آید:

$$\hbar\omega = E_g - E_D - E_A + \frac{q^2}{\epsilon_0 \epsilon_r r} \quad (5-3)$$

جمله آخر مربوط به واکنش کولنی بین الکترونهای دهنده و حفره های پذیرنده بعد از فرآیند باز ترکیب است (قبل از باز ترکیب دهنده ها و پذیرنده ها هر دو خنثی هستند اما بعد از باز ترکیب دهنده دارای بار مثبت و پذیرنده دارای بار منفی می شود)^{۱۱،۸۴}.

فصل چهارم

تکنیکهای مطالعه اپتیکی

Optical Study Techniques

اولین تجربه سنتز ساختارهای کوانتومی در آغاز دهه ۱۹۷۰ به انجام رسید. ساختارها شامل یک لایه فوق العاده باریک از یک نیمه هادی که بین دو لایه ضخیم از یک نیمه هادی دیگر با یک گاف انرژی پهن تر بودند، قرار داشتند. تولد ساختارهای چاههای کوانتومی (QW) تحول بزرگی را در اصلاح قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی رقم زدند. برای نمونه، لیزرهای QW در اواخر دهه ۱۹۷۰ با جریان آستانه پایین تر و وابستگی دمایی کمتر در مقایسه با لیزرهای کپه ای اولیه، بوجود آمدند.

بوسیله مطالعه طیف انرژی حاصل از نور خارج شده توسط نیمه هادیها، وقتی که نمونه در برابر نور لیزر قرار داده می شود، اطلاعات مفید در مورد سطوح انرژی حاملها بدست می آید، این روش مطالعه اپتیکی فتولومینسانس گفته می شود، که استفاده وسیعی در بدست آوردن اطلاعات در مورد جزئیات نیمه هادیها دارد. طیف فتولومینسانس یک تکنیک با کاربرد وسیع برای توصیف نیمه هادیها است و بازده اطلاعاتی آن درباره خصوصیات نوری و الکتریکی زیاد است. نور حاصل از یک منبع نور با طول موج متغیر یا تک رنگ بر نمونه فرود می آید. این نور به طور جزئی جذب گردیده و موجب تحریک الکترونها و انتقال آنها از نوار ظرفیت به نوار رسانش می گردد و در نوار ظرفیت جای خالی آنها یا حفره ها برجای می ماند سپس زوج الکترون - حفره باز ترکیب می نماید و انرژی اضافی خود را به صورت یک فوتون آزاد می کند. نور گسیلی یا همان لومینسانس را می توان توسط یک آشکارساز نوری اندازه گیری نمود. از روی طیف آشکارسازی شده می توان حالتهای انرژی حاملها در نمونه، گاف انرژی،

حالت‌های برانگیخته، مقدار ناخالصی، انرژی محدود شده و غیره را بدست آورد. از طرفی افت و خیزهای موجود در سطح مشترک نیمه هادیها باعث تغییر رفتار طیف فتولومینسانس، به عنوان مثال شکافتگی یا پهن شدگی قله طیف می شود.

تکنیکهای دیگر مطالعه مواد نیمه هادی علاوه بر روش فتولومینسانس که یک تکنیک گسیل اپتیکی است عبارتند از XRD^I، RHEED^{II}، TEM^{III}، SEM^{IV}، FTIR^V، DLTS^{VI}، TRPL^{VII}، IR-Ellipsometry. اثر هال و طیف سنجی جذب اپتیکی. هر یک از این تکنیکهای فوق اطلاعات سودمندی را در موارد مختلف به دست می دهند. ما در پروژه حاضر عمده مطالعات خود را به روش اپتیکی فتولومینسانس انجام داده ایم ولی برای تکمیل داده های خود و یا در مواردی تأیید نتایج حاصل از تکنیکهای دیگر از جمله XRD، TEM، IR-Ellipsometry و TRPL کمک گرفته ایم.

سه روش متفاوت از اندازه گیری فتولومینسانس وجود دارد: فتولومینسانس معمولی (PL)، فتولومینسانس انتخاب شده^{VIII} (SPL) و فتولومینسانس برانگیخته^{IX} (PLE). در فتولومینسانس معمولی از یک نور لیزر که معمولاً طول موج آن ثابت است به عنوان انرژی لازم برای برانگیختگی الکترونها استفاده می شود که باید این انرژی بیش از انرژی گاف باشد. در اثر این برانگیختگی تعداد زیادی زوج الکترون - حفره آزاد تولید می شود که نور گسیلی حاصل از باز ترکیب آنها (لومینسانس) توسط یک تک فام ساز (تک رنگ کننده) روبش می شود و در طول موجهای مختلف شدت لومینسانس گسیلی به صورت یک طیف بدست می آید.

^I X-Ray Diffraction

^{II} Reflection High Energy Electron Diffraction

^{III} Transmission Electron Microscopy

^{IV} Scanning Electron Microscopy

^V Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy

^{VI} Deep Level Transient Spectroscopy

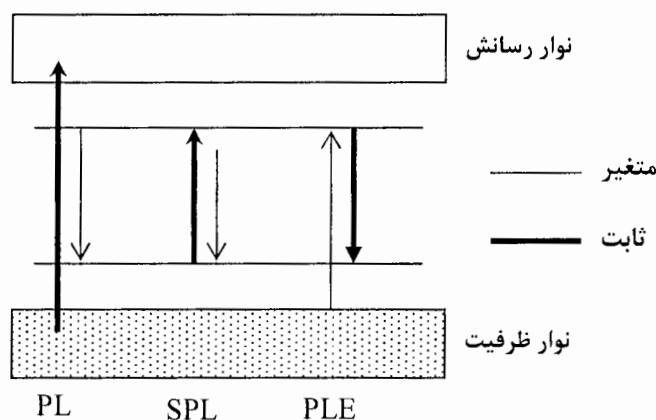
^{VII} Time resolve Photoluminescence

^{VIII} Selective PhotoLuminescence

^{IX} PhotoLuminescence Excitation

در تکنیک SPL برای افزایش سیگنال لومینسانس اندازه گیری شده از تشدید تحریکی استفاده می کنیم و روال انجام کار مشابه PL معمولی است، با این تفاوت که انرژی تحریکی به میزان گاف انرژی تعیین می گردد در حالیکه آشکار ساز در انرژیهای کمتر از گاف انرژی طیف را ثبت می نماید.

در تکنیک PLE که یک تکنیک بر اساس طیف جذبی است آشکار ساز در یک طول موج معین و به صورت ثابت، لومینسانس را اندازه گیری می کند در حالیکه نور فرودی در یک گستره طول موجی وسیع تغییر داده می شود تا به ازای طول موجهای معینی، آشکار ساز در خروجی ماکزیمم سیگنال را ثبت نماید^{۵۱} (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱: سه روش متفاوت اندازه گیری فتولومینسانس

۴-۲- قسمت‌های مختلف یک سیستم اندازه گیری

یک سیستم اندازه گیری فتولومینسانس معمولی شامل یک لیزر به عنوان منبع نور تحریکی، کریوستات^I با دمای قابل تغییر به همراه یک نگه دارنده ماده تحت بررسی، تک رنگ کننده^{II} با دقت زیاد، آشکار ساز^{III} و یک کامپیوتر برای ذخیره داده ها است.

^I cryostat
^{II} monochromator
^{III} detector

۴-۲-۱- منابع برانگیختگی

بسته به نوع ماده مورد مطالعه و گاف انرژی آن می توان از لیزرهای مختلف که دارای طول موج در نواحی UV، مرئی یا IR است استفاده نمود. همانگونه که قبلاً اشاره شد، در PL معمولی تحریک باید در انرژیهای بیش از گاف انرژی انجام شود. علاوه بر طول موج لیزر پارامتر مهم دیگر در انتخاب لیزر تحریک کننده توان تابشی آن است که باید مناسب انتخاب شود. لیزرهای مختلفی چون لیزر هلیم - کادمیم (HeCd)، Nd-Vanadate، هلیم نئون (HeNe)، لیزر آرگون (Ar^+) و Ti-Sapphire معمولاً برای این منظور بکار گرفته می شوند. لیزر HeNe و Ar^+ برای اندازه گیری فتولومینسانس متداول به خاطر طول موج گسیلی ثابت به ترتیب ۳۶۶ nm و ۵۱۴ nm مناسب است. برانگیختگی ارتعاشی، SPL و PLE، می توانند با لیزر Ti-Sapphire بدست بیایند که طول موج قابل تنظیمی بین ۷۰۰ nm تا ۱ μm تنظیم می شوند^{۵۱}.

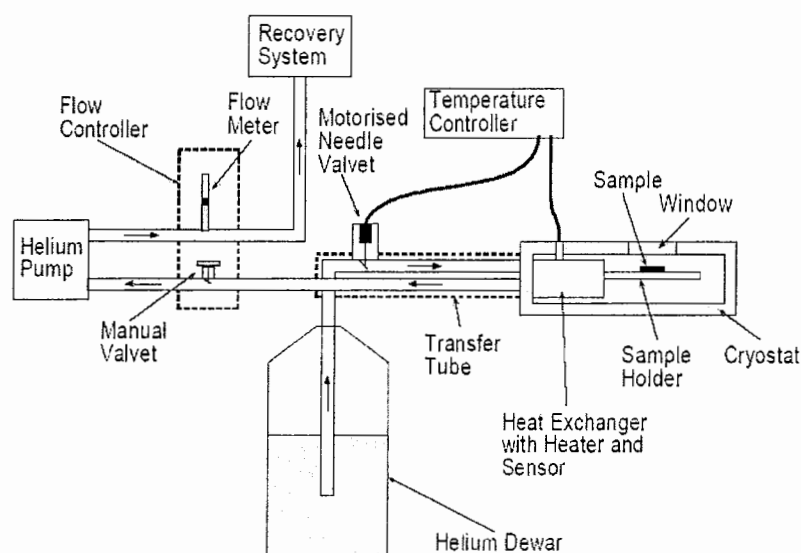
۴-۲-۲- کریوستات

کریوستات دستگاهی است که نمونه داخل آن قرار داده می شود تا دمای آن برای اندازه گیری به میزان مورد نظر کاسته شود. بر حسب نوع کریوستات، دما از کمتر از ۱K تا دمای بالاتر از دمای اتاق حتی ۳۰۰K می تواند تغییر داده شود. برخی از کریوستات ها با نیتروژن مایع (برای ۷۷ K) و برخی با هلیم مایع (کمتر از ۲K) و برخی نیز با جریان گاز هلیم و بصورت سیستم بسته (بالاتر از ۴K) کار می کنند. بطور معمول کریوستات دارای بخشهای مختلفی برای نگهداری نمونه^۱، مخزن هلیم یا نیتروژن مایع^{۱۱} و غیره می باشد، که توسط یک ناحیه خلاء از بخش بیرونی آن عایق بندی حرارتی می شود. در اینجا طرز کار یک نمونه از کریوستات با جریان هلیم (بصورت گاز) که در سیستم اندازه گیری میکروفنولومینسانس (μ -PL) بکار گرفته شده است را به شکل مختصر تشریح می کنیم. یک

^۱ Sample Space

^{۱۱} Helium Space

شار پیوسته از کریوستات برای خنک کردن نمونه استفاده می شود. کریوستات طراحی شده دارای یک پنجره است که نمونه نزدیک آن گذاشته می شود. کریوستات روی موقعیت XYZ از ریز سنج نصب می شود که نمونه می تواند نسبت به میکروسکوپ قابل مشاهده با موقعیت ریز سنج حرکت کند. نمونه در مکانش که به یک تبادل گرمایی متصل می شود، نگه داشته شده و سرد می شود. یک پمپ منتشر کننده یا پمپ توربینی مولکولی، با یک پمپ چرخنده برای رسیدن به فشار بین 10^{-4} و 10^{-5} میلی بار در اتاقک باید استفاده شود. جریان هلیوم از طریق یک تانک هلیوم و از میان یک لوله انتقال دهنده، بدخل پمپ می شود. گاز بعد از مبادله گرمایی بر می گردد. شار هلیوم و از این رو خنک ساز، بوسیله یک دریچه سوزنی^۱ روی لوله انتقالی کنترل می شود. یک دستگاه تولید گرما و مبادله کننده گرمایی به همراه یک سنسور حرارتی، کنترل دمای سیستم را به عهده دارد (شکل ۴-۲). کنترل کننده دما در ارتباط با دریچه سوزنی شار هلیوم و در نتیجه دمای سیستم را تنظیم می نماید^{۵۱}.

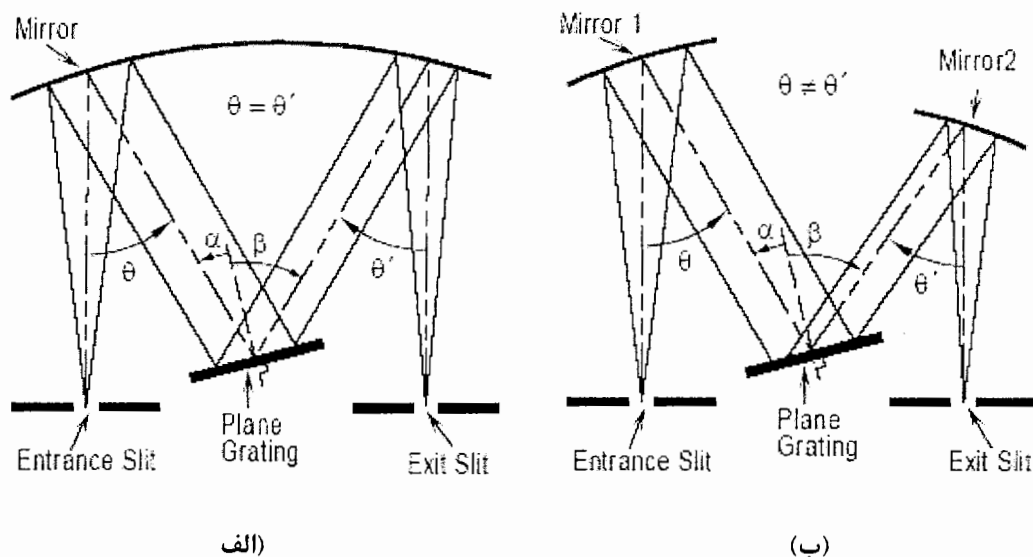


شکل ۴-۲: اجزای تشکیل دهنده یک کریوستات^{۵۱}

^۱ Needle Valve

۴-۲-۳- تک رنگ کننده (تکفام ساز)

تک رنگ کننده وسیله ای است که یک بازه از طول موجهای محدود (کم پهنای) را از طیف تابشی در ورودی سیستم جدا می کند و در واقع مشابه یک فیلتر برای عبور پرتو نور عمل می کند. یک آشکار ساز در خروجی سیستم شدت فوتونها را اندازه گیری می کند. سیستم تک رنگ کننده با کمک یک سیستم کنترلی و نرم افزار مربوطه با روبش طول موجهای نور فرودی بر حسب شدت، تصویری از طیف فتولومینسانس بر روی صفحه نمایشگر کامپیوتر بوجود می آورد. دو کمیت مهم یک تک رنگ کننده تفکیک پذیر عبارتند از: توانایی تشخیص دو قله نزدیک به هم در طیف و میزان جمع کنندگی نور. بهینه سازی این کمیتها در اندازه گیری فتولومینسانس و همچنین میکروفتولومینسانس بسیار مهم است. بهره سیگنال ضعیف، قله های خیلی باریک طیفی را بوجود می آورد که باید تشخیص داده شوند. جزء مرکزی در یک تک رنگ کننده عنصر پراکنده کننده یا توری پراش است که سبب پراشیده شدن نور فرودی و تفکیک طول موجهای آن از یکدیگر می شود، آشکار ساز که در خروجی دستگاه قرار داده شده است به آسانی قادر به تفکیک طول موجها و سنجش شدت آنها باشد. دو روش برای تک رنگ کنندگی وجود دارد (شکل ۴-۳)، روش Fastie-Ebert که تصویر روی شکاف ورودی متمرکز شده و بوسیله یک آینه کروی بزرگ موازی می شود، دوباره بوسیله شبکه پراکنده شده و روی شکاف خروجی بوسیله یک آینه مشابه متمرکز می شود. در روش Czerny-Turner از ترتیب جداگانه ای از آینه های کروی استفاده می شود^{۵۱}.



شکل ۴-۳: الف) روش Fastie-Ebert (ب) روش Czerny-Turner^۱

۴-۲-۴- آشکار ساز CCD

آشکار ساز یک دستگاه جمع کننده بار^۱ (CCD) است که عبارت است از یک ماتریس دو بعدی ۲۰۰۰×۸۰۰ پیکسلی و هر پیکسل آن از یک دیود سیلیکونی تشکیل شده است. شکل پیکسلها مربعی با طول ۱۵ میکرومتر و مجموع سطح حساس حدود ۳۶۰ mm^2 است. فوتونهای ورودی دارای انرژی به اندازه کافی بالا هستند (همانند اثر فتوالکتریک) که سبب تولید سیگنال شدند. بارهای آزاد شده بوسیله نزدیکترین پیکسل گرفته می شوند. بارها از پیکسلهای مجاور جدا شده و بوسیله الکترودهای ورودی به طرف آشکار ساز مقابل می روند. یک دیافراگم در مقابل تک رنگ کننده نمایش آشکار ساز را تعیین می کند. بعد از اینکه بارها نمایش داده می شوند، بوسیله ولتاژ بکار برده شده از الکترودهای ورودی، به داخل یک بازخوان منتقل شده و ثبت می شود. سیگنال ضعیف از بازخوان تقویت می شود و به صورت دیجیتالی (رقمی) در سطح مشترک یک دستگاه آشکار ساز در می آید و مجدد در حافظه کامپیوتر قرار می گیرد.

^۱ Charge Coupled Device

پیکسل‌های نزدیک به هم می‌توانند دوتایی با هم جمع شده و تغییر شکل پیدا کنند که پیکسل‌های برتر^I گفته می‌شود. بارهای هر دو پیکسل با هم ترکیب می‌شوند، از این رو سطح سیگنال مستقیماً متناسب با تعداد پیکسل‌های دوتایی افزایش پیدا می‌کند. دمای آشکار ساز بوسیله نیتروژن مایع پایین می‌آید. دما بوسیله ترموستات کنترل می‌شود و در دمای ۱۲۰ کلوین نگه داشته می‌شود^{۵۱}.

۴-۲-۵- کامپیوتر

سیگنال خروجی از آشکار ساز بوسیله یک کامپیوتر گرفته می‌شود و یک طیف لومینسانسی (شدت بر حسب طول موج) رسم می‌شود. بوسیله کامپیوتر داده‌های گرفته شده توسط آشکار ساز ذخیره می‌شود همچنین تک رنگ کننده و طول موج لیزر برای برانگیختگی هم کنترل می‌شود.

۴-۳- سیستم اندازه گیری فتولومینسانس (PL)

در سال‌های اخیر بدلیل توانایی بالا و کیفیت مناسب اندازه گیری اپتیکی به روش فتولومینسانس و نیز تفکیک پذیری خوب این تکنیک در مطالعه نانوساختارهای کوانتومی نیمه هادیها، از این روش بیش از پیش استفاده شده است، بویژه از زوش میکروفتولومینسانس که امکان مطالعه و مشاهده نقاط کوانتومی بصورت تکی^{II} وجود دارد. این ویژگیها به همراه محاسن دیگر فتولومینسانس از جمله سادگی کار با آن، عدم نیاز به آماده سازی های خاص برای نمونه ها، عدم تخریب نمونه ها و غیره باعث شده است که این تکنیک ساده بطور گسترده در مطالعات اپتیکی مورد استفاده قرار گیرد. روشهای مختلفی برای افزایش قدرت تفکیک پذیری فتولومینسانس وجود دارد که از آن جمله می‌توان به

^I Super pixels

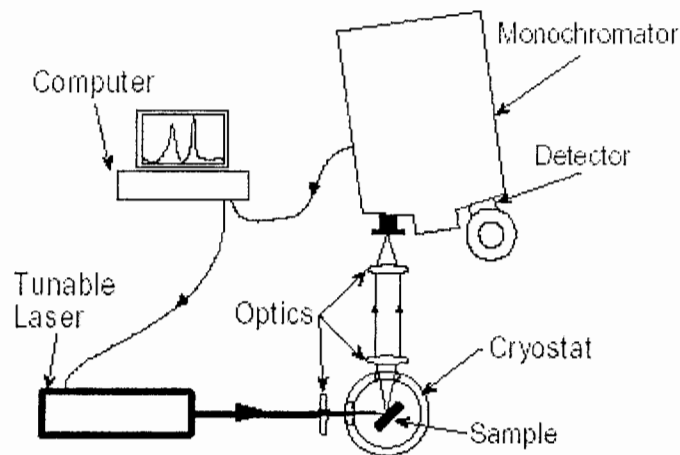
^{II} Single Quantum Dot

فتولومینسانس میکروسکوپی^I (μPL) و NFSM^{II} اشاره نمود. در روش میکرو لومینسانس که کمی با فتولومینسانس متفاوت است، نور لیزر بوسیله یک میکروسکوپ بر روی نمونه متمرکز می شود. با این وسیله می توانیم طیف حاصل از نور نشأت گرفته از یک مساحت خیلی کوچک از نمونه را بدست آوریم. مجموع لومینسانس، از تمام سطح نمونه است. تفکیک پذیری μPL حدود یک میکرومتر است. در حالیکه روش NFSM تفکیک پذیری در حدود 0.2 میکرومتر است. از این رو روش NFSM از روش μPL بهتر است، اما NFSM در دمای هلیم مایع با اتلاف سیگنال بالایی مواجه شده و دچار مشکل می شود.

در یک سیستم فتولومینسانس از یک منبع نور لیزر برای برانگیختن الکترونهاى نوار ظرفیت در یک نیمه هادی استفاده می شود. نمونه در داخل یک کریوستات قرار دارد، که اندازه گیریها را در دمای پایین آسان پذیر می کند. نمونه با نیتروژن مایع (در دمای 77K) یا هلیم مایع خنک می شود که به وسیله آن دمای کمتر از $1/5$ کلوین می تواند بدست آید. دمای بالا باعث اختلال و پهن شدگی طیف شده و باز ترکیبهای غیر نوری را نسبت به باز ترکیبهای نوری افزایش می دهد. اندازه گیریهای فتولومینسانس نیازمند دسترسی نوری به نمونه است و این بوسیله یک دریچه شیشه ای روی کریوستات یا بواسطه یک تار نوری بدست می آید. شکل (۴-۴) یک دستگاه اندازه گیری فتولومینسانس را نشان می دهد. یک لنز بعد از کریوستات، فتولومینسانس گسیل شده را جمع می کند و لنز دیگر آنرا روی ورودی یک طیف سنج یا یک طیف نگار که اندازه طیف را می گیرد، متمرکز می کند. کامپیوتر طیف را ثبت می کند و طول موج لیزر را هم کنترل می کند^{۵۱،۵۲}.

^I Micro-photoluminescence

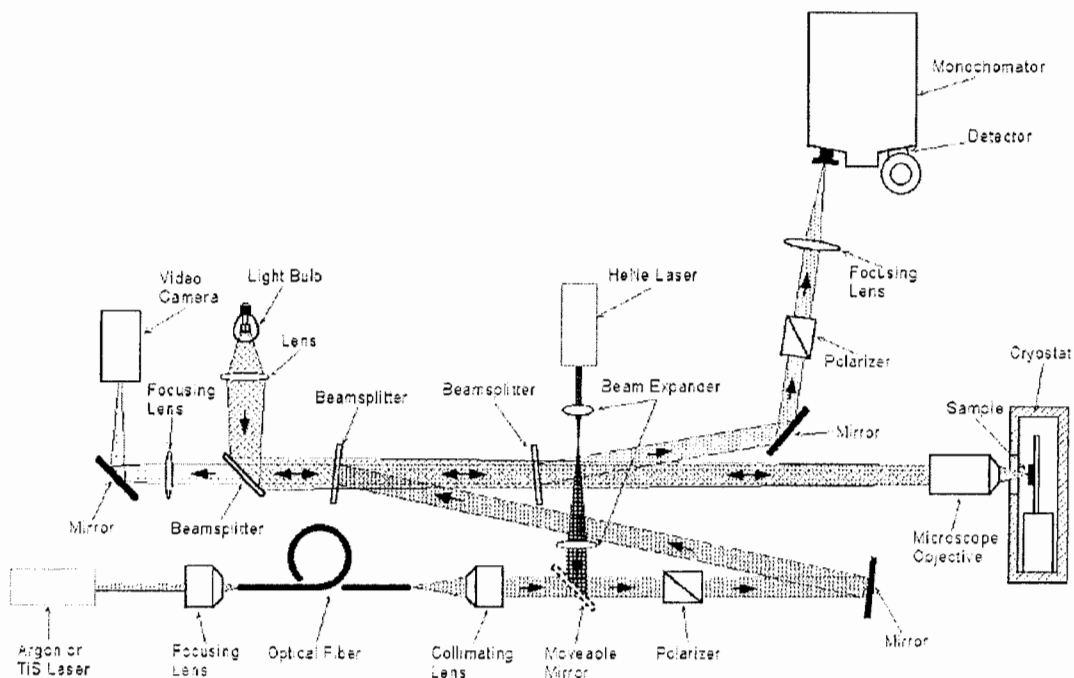
^{II} near-field scanning microscopy



شکل ۴-۴: طرحواره ای از سیستم اندازه گیری فتولومینسانس^{۱۱}

۴-۴- سیستم اندازه گیری میکرو فتولومینسانس (μPL)

در شکل (۴-۵) طرح کلی از سیستم اندازه گیری μPL نشان داده شده است.

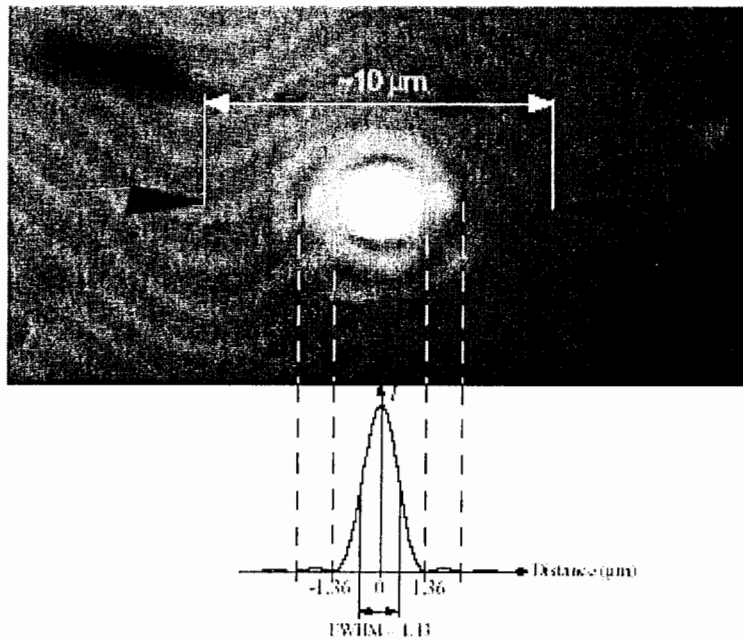


شکل ۴-۵: طرحواره ای از سیستم اندازه گیری میکروفتولومینسانس^{۵۱}

نور خروجی از لیزر با یک سیستم اپتیکی که شامل یک میکروسکوپ چشمی نیز می باشد و گاهی اوقات ممکن است شامل رشته ای از فیبر نوری نیز باشد از لیزر به روی نمونه هدایت می شود. نور روی دهانه تار بوسیله یک لنز میکروسکوپ با فاصله کانونی $18/2\text{mm}$ کانونی می شود، یک لنز مشابه با فاصله کانونی 40mm نور خارج شده از تار را به پرتوها را با پهنای 9mm موازی می کند. بعد از اینکه پرتو نور لیزر وارد سیستم شد از یک منشور با قطبش خطی کامل عبور می کند. زاویه قطبشی می تواند به طور اختیاری انتخاب شود. پرتو بوسیله یک آینه فلزی منعکس می شود. بعد از اینکه پرتو شکافته شد، بخشی از آن روی میکروسکوپ چشمی منعکس می گردد.

تصویری از نمونه روی چیپ CCD از یک دوربین ویدئویی نشان داده شده و روی یک پرده ویدئویی، سطح نمونه و محل لیزر قابل رؤیت است. بزرگ کردن تصویر روی مانیتور بوسیله لنز در مقابل دوربین ویدئو تعیین می شود. یک لنز با فاصله کانونی 40mm یک بزرگ نمایی در حدود 110 مرتبه می دهد که به موجب آن تصویر روی مانیتور مطابق با $50 \times 40\text{mm}^2$ از نمونه است.

شعاع نقطه در حدود $1/4\text{ }\mu\text{m}$ بر روی دوربین ویدئو در طول موج 633 nm تخمین زده می شود که دو برابر مقدار تئوری است. شکل (۴-۶) یک تصویر از نقطه کانونی لیزر را روی نمونه نشان می دهد.^{۵۱}



شکل ۴-۶: تصویری از نقطه کانونی لیزر با طول موج 633 nm روی سطح نمونه و سطح مقطع شدت متناسب با آن^{۵۱}

فصل پنجم

حل معادله شرودینگر در چاههای پتانسیل مثلثی

*The Solution of Schrödinger Equation in Triangular
Quantum Wells*

۵-۱- مقدمه

چاههای کوانتومی GaN/AlGaAs در مقایسه با GaAs/AlGaAs به دلیل وجود میدانهای قطبشی داخلی که بخشی از آن بخاطر تقارن کم ساختار ورتسایتس است، رفتارهای کاملاً متفاوتی را نشان می دهد. به عنوان مثال انحناء پتانسیل مربعی در چاههای کوانتومی GaN/AlGaAs که ناشی از اثر کوانتومی استارک است. پس تقریب چاه کوانتومی مربعی کم عمق برای نمونه های ما باید توسط اغتشاش حاصل از میدانهای قطبشی داخلی اصلاح شود و آنها می توانند بوسیله چاه کوانتومی مثلثی در یک تقریب خیلی خوب بررسی شوند. دو روش حل معادله شرودینگر برای چاههای مثلثی توسط Singh و Bastard ارائه شده است. در اینجا این دو روش به اختصار مورد بررسی قرار می گیرند و نتایج حاصل از این محاسبات که منجر به محاسبه انرژی گسیلی از نمونه های ما می شود، با مقادیر تجربی اندازه گیری شده مقایسه می گردند.

۵-۲- روش Singh

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

$$U_G = \frac{1}{a} \int_0^a U(x) e^{-iGx} dx \quad (1-5)$$

$$\psi(x) = \sum_G C_{K-G} e^{i(K-G)x} \quad (2-5)$$

(G) پتانسیل تناوبی شبکه وارون است. $G = \frac{2n\pi}{a}$ ترازهای انرژی در داخل چاه را بدست آورد.

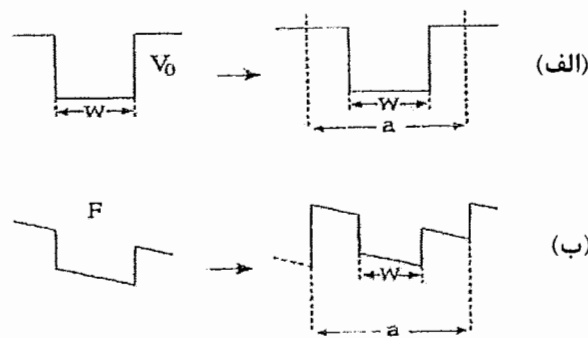
$$E_1 = E_0 - \frac{1}{2} E_1^0 \left(\sqrt{1 + \frac{8U_1^2}{E_1^{0^2}}} - 1 \right) \quad (3-5)$$

Singh اولین تراز انرژی برای یک چاه مربعی محدود به صورت شکل (5-1) بدون اعمال میدان الکتریکی به صورت زیر محاسبه نمود:^{۵۳}

$$E_1 = \frac{\Delta E}{2} - \frac{\pi^2 \hbar^2}{4m^* W^2} \left[\left(1 + \frac{32 \Delta E^2 W^4 m^{*2}}{\pi^6 \hbar^4} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (4-5)$$

(W پهنای چاه پتانسیل، ΔE آفست باند انرژی، m^* جرم مؤثر) و سپس با در نظر گرفتن اغتشاش ناشی از میدان الکتریکی اولین تراز انرژی چاه مربعی منتهای تحت تأثیر میدان (E_w) را به صورت زیر بدست آورد.

$$E_1 = \frac{\Delta E}{2} - \frac{\pi^2 \hbar^2}{4m^* W^2} \left[\left\{ 1 + 32 \left[\left(\frac{\Delta E}{\pi} \right)^2 + \left(\frac{e E_w W}{\pi} \right)^2 \right] \frac{W^4 m^{*2}}{\pi^4 \hbar^4} \right\}^{1/2} - 1 \right] \quad (5-5)$$



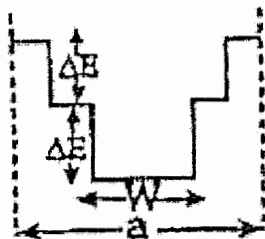
شکل ۵-۱: چاه پتانسیل مربعی محدود (الف) بدون اعمال میدان، (ب) با اعمال میدان^{۵۳}

او همچنین از چاههای پله مانند (شکل 5-۲) استفاده کرد که اولین تراز انرژی برای چاه کوانتومی مربعی محدود بدون اعمال میدان به صورت زیر است:

$$E_1 = \frac{3\Delta E}{4} - \frac{\pi^2 \hbar^2}{4m^* W^2} \left[\left(1 + \frac{80 \Delta E^2 W^4 m^{*2}}{\pi^6 \hbar^4} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (6-5)$$

و اولین تراز انرژی تحت میدان اعمالی با تشابه از (5-5) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$E_1 = \frac{3\Delta E}{4} - \frac{\pi^2 \hbar^2}{4m^* W^2} \left[\left\{ 1 + 32 \left[\frac{5\Delta E^2}{2\pi^2} + \left(\frac{eE_w W}{\pi} \right)^2 \right] \frac{W^4 m^{*2}}{\pi^4 \hbar^4} \right\}^{1/2} - 1 \right] \quad (7-5)$$



شکل ۵-۲: تصویری از نوار رسانش چاه کوانتومی پله ای^{۵۳}

۵-۳- Bastard روش

Bastard معادله شرودینگر را برای چاههای کوانتومی محدود و نامحدود تحت تأثیر اعمال میدان الکتریکی (E_w) با استفاده از روش وردشی حل نمود. در این روش H_0 هامیلتونین بدون اعمال میدان الکتریکی می باشد و انرژی برای چاه مربعی نامتناهی بدون اعمال میدان الکتریکی به صورت زیر است:^{۵۴}

$$H = H_0 + |e|E_w Z \quad (8-5)$$

$$E_n^{(0)} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* W^2} n^2 \quad n = 1, 2, \dots \quad (9-5)$$

برای چاههای نامتناهی تحت تأثیر میدانهای قوی (با شرط $\varphi = \frac{|e|E_w W}{E_1^{(0)}} >> 1$) یعنی

چاههای مثلثی نامتناهی، Bastard رابطه بین ترازهای انرژی را به صورت زیر بدست آورد:

$$\Delta E_1 = -\frac{|e|E_w W}{2} + \left(\frac{3}{2}\right)^{5/3} \left[\frac{e^2 E_w^2 \hbar^2}{m^*} \right]^{1/3} \quad (10-5)$$

و رابطه بالا در تقریب نیمه کلاسیکی به صورت ذیل اصلاح می گردد:

$$E_{sc} = -\frac{|e|E_w W}{2} + \left(\frac{\pi^2}{12}\right)^{1/3} \left(\frac{3}{2}\right)^{5/3} \left[\frac{e^2 E_w^2 \hbar^2}{m^*} \right]^{1/3} \quad (11-5)$$

که در آن E_w میدان الکتریکی داخلی چاه کوانتومی و m^* جرم موثر است و در میدانهای ضعیف با شرط $\varphi \ll 1$ و $\beta_{\min} = \varphi(\frac{\pi^2}{6} - 1)$ رابطه بین تراز انرژی حالت پایه به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$\Delta E_1 = E(\beta_{\min}) - E_1^{(0)} = -C_{\text{var}} \frac{m^* e^2 E_w^2 W^4}{\hbar^2} \quad (145)$$

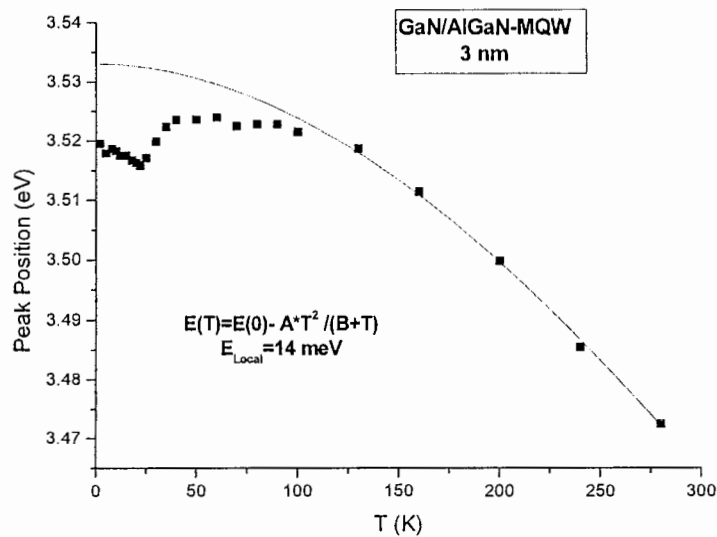
۴-۵- محاسبه انرژی جایگزیدگی

برای اینکه بتوانیم انرژی فتولومینسانس را بدست آوریم نیاز به انرژی حالت پایه الکترون و حفره سنگین، انرژی گاف، انرژی بستگی اکسیتون و انرژی جایگزیدگی اکسیتونها داریم:

$$E_{PL} = E_g + E_{1e} + E_{1hh} - E_b - E_{local} \quad (13-5)$$

برای بدست آوردن انرژی جایگزیدگی اکسیتونها می توان از مقادیر تجربی تغییرات دمایی قله فتولومینسانس استفاده نمود که این مقادیر در اندازه گیریهای فتولومینسانس از دمای هلیم مایع تا دمای اتاق قابل استخراج است، در شکل (۳-۵) این تغییرات دمایی قله های فتولومینسانسی رسم شده است. مقادیر حاصل از این اندازه گیریها به کمک برنامه Origin به صورت منحنی زیر ترسیم می گردد که با فیت کردن نقاط مربوط به دماهای بالا با منحنی ورشنی* مربوط به GaN کپه ای می توان انرژی جایگزیدگی اکسیتون را بدست آورد، که انرژی فوق عبارت است از اختلاف بین انرژی قله فتولومینسانس در دمای ۲ K و محل تلاقی منحنی فیت شده با محور قائم (در دمای ۲ K).

* Varshni



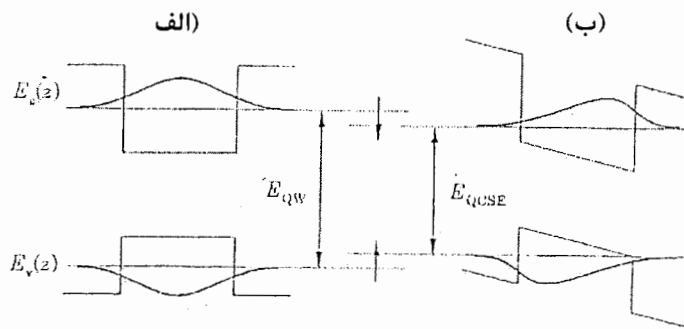
شکل ۳-۵: نمودار تغییر موقعیت قله های فتولومینسانس بر حسب دما

۵-۵- اثر محدودیت کوانتومی استارک (QCSE)

در ساختار ورتسایتس GaN به دلیل تقارن کم مرکز بارهای مثبت و منفی بر هم منطبق نمی شوند که این موجب پیدایش میدان قطبشی خودبخودی در این ساختار می گردد. از طرفی بدلیل تفاوت ثابت شبکه در لایه های چاه (GaN) و سد (AlGaIn) ایجاد میدان قطبشی و پیزوالکتریک در ساختار می شود. بخش دیگری از میدان پیزوالکتریک نیز ناشی از تفاوت ضریب انبساط گرمایی لایه های مختلف ساختار چاه کوانتومی است که در مرحله رشد و سرد سازی نمونه ها باعث پیدایش میدان قطبشی پیزوالکتریک حرارتی می گردد. مجموع این میدانهای قطبشی یک میدان قطبشی داخلی را در داخل ساختار بوجود می آورد که از طرفی باعث رانده شدن توابع موج الکترون و حفره به دیواره های مقابل چاه می گردد (شکل ۴-۵) و از طرف دیگر باعث کاهش فاصله ترازهای انرژی و در نتیجه شیفت به قرمز برای انرژی گسیلی می گردد، که آنرا اثر کوانتومی استارک گویند. در عمل و در اندازه گیریهای

طیف فتولومینسانس بوضوح شیفت قرمز^۱ ناشی از اثر استارک قابل مشاهده می باشد و در فصل ششم به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

رانده شدن توابع موج الکترون و حفره به طرفین چاه موجب کاهش همپوشانی توابع موج آنها و در نتیجه کاهش راندمان تابشی ساختار بدلیل طولانی شدن زمان بازترکیب الکترون و حفره می گردد. یکی از راههای پیشگیری از این موضوع استتار میدان قطبشی داخلی توسط حاملهای خارجی ناشی از آرایش می باشد، که به عنوان مثال آرایش سیلیکونی می تواند در این زمینه مؤثر باشد^{۴۸،۴۹}.

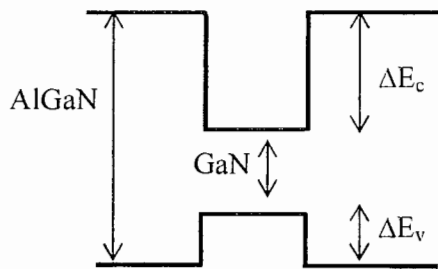


شکل ۵-۴: اثر کوانتومی استارک در چاه پتانسیل (الف) بدون میدانهای قطبشی، (ب) با میدانهای قطبشی^{۴۸}

۵-۶- محاسبه آفست های باند انرژی

وقتی که دو لایه چاه و سد روی هم رشد داده شوند دارای اختلاف انرژی در نوار رسانش و ظرفیت هستند و در واقع گاف انرژییشان با هم فرق می کند. اختلاف بین دو گاف انرژی چاه و سد به آفست های باند انرژی شناخته می شود (شکل ۵-۵) که مقداری از آن مربوط به نوار رسانش و مقداری مربوط به نوار ظرفیت است. این دو مقدار در نمونه های مختلف متفاوت است و توسط گروههای مختلفی محاسبه و اندازه گیری شده است. بهترین مقداری که برای چاه GaN و سد AlGaN با مقدار ۷% آلومینیم بدست آمده متناسب با نسبت نوار رسانش به نوار ظرفیت برابر با ۶۵:۳۵ است^{۵۵}.

^۱ Red shifting



شکل ۵-۵: نمایش آفستهای باند انرژی در یک چاه کوانتومی GaN/AlGaN

برای بدست آوردن آفست های باند انرژی در نمونه $\text{GaN}/\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$ ابتدا گاف انرژی $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$ را در دمای ۲ K با استفاده از قانون وگارد بدست می آوریم (با استفاده از پارامتر انحناء در حدود $b = 0.25$)^{۵۶}. از اختلاف انرژی گاف بین این دو مقدار آفست باند انرژی بدست می آید و از روی نسبت نوار رسانش به نوار ظرفیت مقدار آفست باند انرژی را برای نوار رسانش و ظرفیت بدست می آوریم.

$$\begin{aligned} E_g(\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}) &= xE_g(\text{AlN}) + (1-x)E_g(\text{GaN}) - bx(1-x) \\ &= 0.07 \times 6.28 + 0.93 \times 3.505 - 0.25 \times 0.07 \times 0.93 \\ &= 0.439 + 3.259 - 0.016 \\ &= 3.682 \text{ eV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_g(\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}) - E_g(\text{GaN}) &= \Delta E_c + \Delta E_v \\ &= 3.682 - 3.505 \\ &= 177 \text{ meV} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \Delta E_c + \Delta E_v = 177 \text{ meV} \\ \Delta E_c = \left(\frac{65}{35}\right)\Delta E_v \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \Delta E_c \approx 115 \text{ meV} \\ \Delta E_v \approx 62 \text{ meV} \end{cases}$$

فصل ششم

تحلیل نتایج بدست آمده و بحث پیرامون نتایج فیزیکی

Results and Discussion

ما در این پایان نامه به دنبال مطالعه اپتیکی میزان ناهمواریهای سطح مشترک دو لایه چاه و سد و بررسی افت و خیزهای آماری در پهنای چاه در نانو ساختار چاههای کوانتومی GaN/AlGaN هستیم. از آنجایی که سطح مشترک دو نیمه هادی در حین فرآیند رشد کاملاً صاف و یکنواخت نیست و این ناهمواریها باعث بوجود آمدن یکسری افت و خیزهای پتانسیلی می شود که تأثیر بسزایی در جایگزیدگی اکسیتونها یا حاملهای آزاد و در نتیجه در فرآیندهای باز ترکیبی آنها دارند. مطالعه این ناهمواریها و افت و خیز پهنای چاهها دارای اهمیت فیزیکی می باشد و در درک صحیح از مکانیزم های باز ترکیبی کمک فراوانی به ما می نماید. همچنین این مطالعه یک ابزار قوی برای تعیین کیفیت نمونه ها و ارزیابی نحوه رشد آنها در اختیار ما قرار می دهد. در این پایان نامه سعی ما در آشکارسازی این ناهمواریها و نقش آنها در فرآیندهای باز ترکیبی و همچنین تعیین ابعاد آنها با استفاده از روش اپتیکی فتولومینسانس و میکروفتولومینسانس می باشد.

در ابتدای این فصل به معرفی نمونه های مورد مطالعه می پردازیم و به دنبال آن تأثیر این ناهمواریها را در لومینسانس حاصل از این نمونه ها که توسط Bajaj^{۵۷} (در مورد ساختارهای GaAs/AlGaAs تهیه شده توسط روش MBE) مورد بررسی قرار گرفته است، یاد آور می شویم. به دنبال آن سنجشهای انجام شده به روی نمونه های خودمان را بررسی و نتایج حاصله را به طور مشخص مورد بحث قرار می دهیم.

۲-۶- معرفی نمونه ها

نمونه های مورد مطالعه در این پروژه، چاههای کوانتومی چندگانه GaN/AlGaN بدون آرایش می باشند، که تمام خصوصیات ساختاری و شرایط رشد آنها مشابه بوده و تنها تفاوت آنها در پهنای چاه می باشد. این نمونه ها در راستای [۰۰۰۱] روی زیر لایه اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) به روش رسوب بخار شیمیایی (MOCVD) رشد داده شده اند. روی زیر لایه فوق یک لایه AlN به ضخامت ۲۰ nm در دمای پایین و یک لایه نسبتاً ضخیم از GaN کپه ای بدون آرایش به ضخامت تقریبی ۲ میکرون رشد داده شده است. به روی لایه GaN ناحیه فعال متشکل از پنج لایه متناوب از چاه و سد رشد داده شده است.

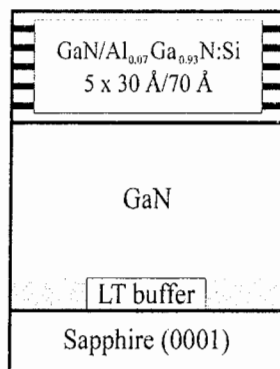
چاهها از ماده GaN با پهنای متفاوت ۱/۵ nm، ۳ nm و ۴/۵ nm در نمونه های مختلف هستند و سدها از ماده AlGaN با ۷ درصد Al و ۹۳ درصد Ga، دارای ضخامت تقریبی ۷ nm چاهها را از هم جدا می کنند (شکل ۱-۶). ضخامت لایه ها در ساختار نمونه ها به وسیله اندازه گیری پراش پرتو ایکس (XRD) تعیین شده است. مشخصات نمونه ها در جدول (۱-۶) آمده است.

جدول ۱-۶: پهنای چاه و سد و مقدار Al در نمونه های مورد مطالعه در این پایان نامه^{۱۱}

پهنای سد (nm)	مقدار Al	پهنای چاه (nm)	چگالی حاملها (cm^{-3})
۷/۲	۰/۰۷	۱/۵	بدون آرایش
۷/۲	۰/۰۷	۳	بدون آرایش
۷/۲	۰/۰۷	۴/۵	بدون آرایش

مطالعه اپتیکی نمونه ها به روش فتولومینسانس و از دمای هلیوم مایع (۲K) تا دمای اتاق (RT) انجام شده است. در این اندازه گیریها یک لیزر (Nd-Vanadate) پیوسته با طول موج ۲۶۶ nm به عنوان منبع نوری تحریک کننده در سیستم فتولومینسانس بکار گرفته شده است. سیگنال فتولومینسانس به وسیله یک تکفام ساز پراشیده شده و به وسیله یک آشکارساز UV در دماهای مختلف آشکارسازی شده است. آشکارساز مورد استفاده با

نیتروژن مایع خنک می‌گردد تا سیگنالهای نویز به حداقل ممکن برسد. اندازه گیریهای میکرو فتولومینسانس در دمای ۲K صورت گرفته و از یک عدسی چشمی برای تمرکز لیزر تحریکی روی ناحیه ای به قطر یک میکرومتر استفاده شده است، که پس از جداسازی طول موج ها توسط تکفام ساز، آشکارساز CCD در دمای نیتروژن مایع سیگنال را آشکارسازی می نماید^{۵۸}.

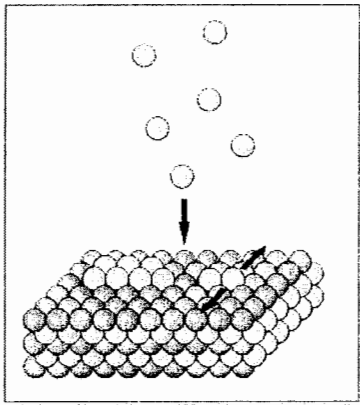


شکل ۶-۱: طرح کلی از یک نمونه

۶-۳- تأثیر ناهمواریهای سطح مشترک دو نیمه هادی در طیف فتولومینسانس سطح مشترک دو نیمه هادی در ساختارهایی مثل چاههای کوانتومی کاملاً صاف و یکنواخت نیست بلکه از نظر میکروسکوپی دارای افت و خیزهایی می باشد در اوایل دهه ۱۹۸۰ تلاش برای بهتر کردن سطوح صاف از رشد مواد آغاز شد. نمونه ای که بررسی شد GaAs/AlGaAs بود که به روش MBE رشد داده شده بود. می دانیم که در روش MBE کنترل دقیقتری بر فرآیند رشد اعمال می گردد، اما علی رغم این دقت ناهمواریهایی در فصل مشترک دو ماده (در اینجا GaAs و AlGaAs) به وجود می آید. در عمل می توان با کنترل پارامترهایی از قبیل دما و زمان رشد و همچنین ایجاد توقف فرآیند رشد در مدت زمان بسیار کوتاه بر میزان ناهمواریهای سطوح مشترک تأثیر گذاشت.

می توانیم فرآیند رشد را به این ترتیب بررسی کنیم: در داخل محفظه MBE شاری از اتمهای Ga و مولکولهای As_۲ یا As_۴ با هم برخورد کرده و تشکیل پیوند می دهند. پیوندها روی زیر لایه قرار گرفته و تشکیل لایه می دهند (شکل ۶-۲). از آنجایی که شار از هر دو

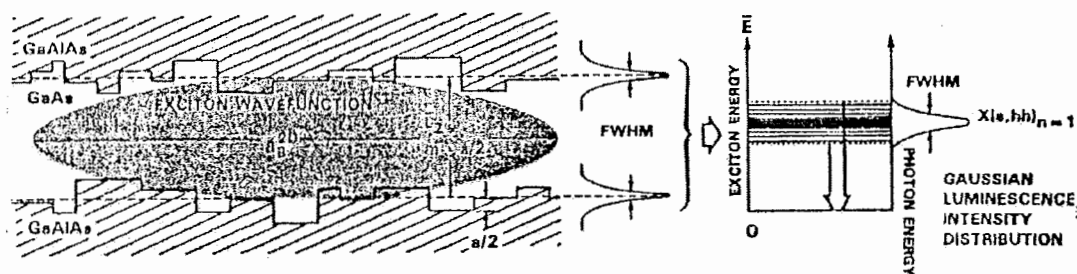
محفظه (یکی برای اتمهای Ga و دیگری برای مولکولهای As) با هم خارج می شود ممکن است قبل از اینکه پیوندها یک لایه را کاملاً پر کنند لایه دوم شروع به رشد می کند به این ترتیب بی نظمیهایی در حین فرآیند رشد در لایه ها بوجود می آید، این بی نظمیهای شکلهای جزیره مانند دارند بطوریکه هنوز جزیره قبلی ساخته نشده جزیره بعدی در روی آن قرار می گیرد. مقدار این افت و خیزها در نمونه GaAs حدود ۱ ML است در نتیجه پهنای چاه GaAs بین مقدار $a(\frac{m-1}{2})$ ، $(\frac{a}{2})$ و $a(\frac{m+1}{2})$ متغیر است که در آن a ثابت شبکه کریستالی GaAs و m مقدار اسمی پهنای چاه می باشد.^{۵۷}



شکل ۶-۲: طریقه لایه نشانی در روش MBE

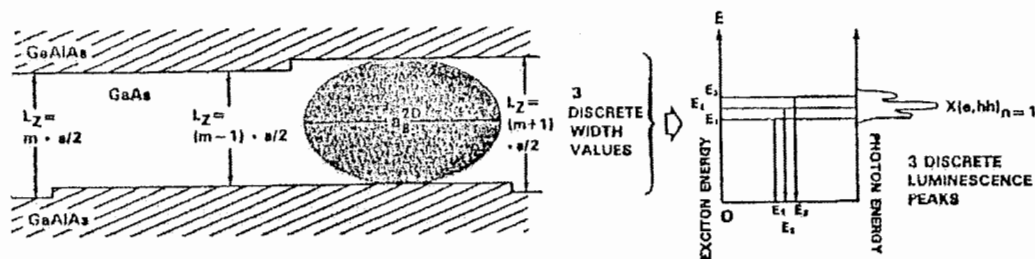
در اینجا سه روش متفاوت ساختاری برای رشد با یکدیگر مقایسه شده اند. در ساختار اول فرآیند رشد دو لایه بر روی هم بدون توقف زمانی می باشد در حالیکه در ساختار دوم فرآیند رشد دو لایه با یک توقف زمانی کوتاه همراه بوده و در ساختار سوم فرآیند رشد در دو وضعیت مختلف بدون توقف زمانی و با توقف زمانی اتفاق افتاده است. طیف لومینسانسی هر ساختار در مقابل آن آمده است. بررسی طیفها نشان می دهد که در حالت اول طیف فتولومینسانس دارای یک پیک پهن می باشد که این موضوع نشانگر آن است که اولاً اکسیتونها موفق نشده اند که در افت و خیزهای ناشی از ناهمواریها جایگزیده گردند، زیرا افت و خیزهایی که در سطح مشترک دو لایه بوجود آمده است نزدیک به هم و کوچکتر از

شعاع بوهر اکسیتون بوده (که برای نمونه GaAs حدود 100 \AA) و در نتیجه اکسیتونها نمی توانستند در این پتانسیلها جایگزیده شوند ولی چون تابع موج اکسیتونی افت و خیزهای زیادی را تحت پوشش قرار می دهد، طیف لومینسانس حاصله دارای پهن شدگی قله به خاطر متوسط گسیل از افت و خیزهای پتانسیلی چاهها است (شکل ۳-۶).



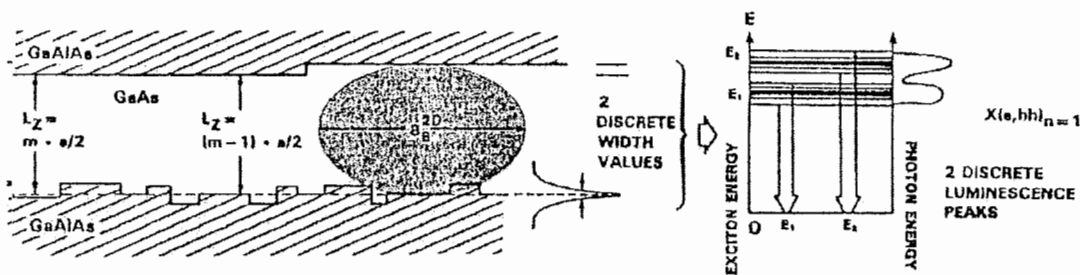
شکل ۳-۶: فرآیند رشد بدون وقفه ΔV

در ساختار دوم فرآیند رشد را برای مدت زمان کوتاهی متوقف ساخته ایم. در نتیجه ناهمواریهای فصل مشترک دارای گستردگی عرضی بیشتری شده اند به نحوی که اکسیتونها موفق به جایگزیدگی در این ناهمواریها می گردند (شکل ۴-۶). به این ترتیب بدلیل حضور چاههایی با پهنای مختلف در طیف فتولومینسانس حاصله ایجاد شکاف می گردد که این شکافها در نور گسیلی به علت میزان متفاوت محدودیت کوانتومی حاملهای آزاد یا اکسیتونها قبل از فرآیند باز ترکیب نوری در چاههایی با پهنای مختلف می باشد. در بررسی طیف فتولومینسانس ما سه قله را مشاهده می کنیم. قله ای که دارای انرژی بالاتر است، ناشی از چاههای باریکتر و قله هایی که دارای انرژی کمتری هستند مربوط به چاههای پهن تر می باشند. خطوط انرژی در این روش شارپ تر هستند.



شکل ۴-۶: فرآیند رشد با وقفه^{۵۷}

در ساختار سوم لایه GaAs را روی AlGaAs بدون وقفه زمانی رشد می دهند در حالیکه برای رشد لایه AlGaAs به روی GaAs به مدت حدود ۱۰۰ s در فرآیند رشد ایجاد وقفه می گردد. بررسی طیف فتولومینسانس دو قله را مشخص می کند و چون لایه پایینی دارای افت و خیز بیشتری نسبت به لایه بالایی است با در نظر گرفتن متوسط گسیل مقداری پهن شدگی در هر قله مشاهده می شود. (شکل ۶-۵)



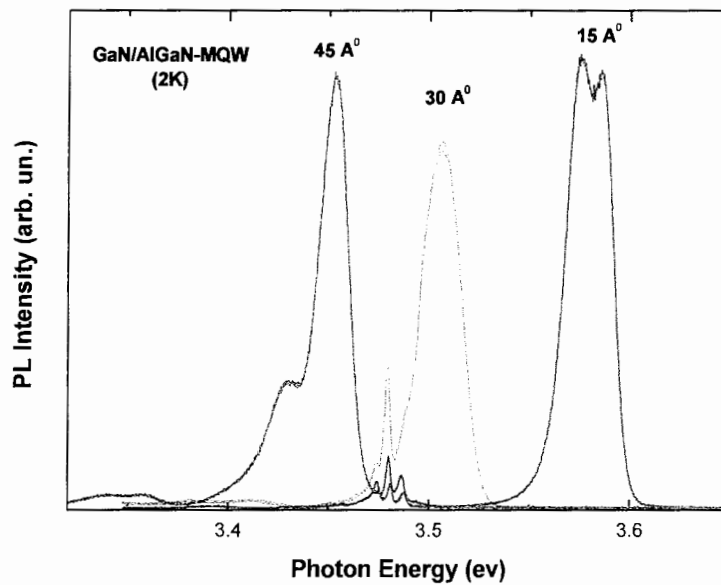
شکل ۵-۶: فرآیند رشد در دو وضعیت بدون توقف زمانی و با توقف زمانی^{۵۷}

۴-۶- تأیید تجربی بر حضور ناهمواریهای فصل مشترک GaN و AlGaN با گستردگی بیش از شعاع بوهر اکسیتون

در طیف فتولومینسانس نمونه های مورد مطالعه در این پایان نامه برای دو نمونه ۱/۵ nm و ۴/۵ nm به وضوح دو پیک مجزا از هم قابل تشخیص می باشند، در حالیکه در نمونه ۳ nm به نظر می رسد که یک پیک با پهنای بیشتر وجود دارد (شکل ۶-۶). حضور دو پیک در طیف فتولومینسانس نمونه های ۱/۵ nm و ۴/۵ nm نشانگر آن است که در این نمونه ها دو چاه با

پهنای مختلف و گستردگی بیش از شعاع بوهر اکسیتون وجود دارد، بطوریکه اکسیتونها در این چاهها جایگزیده شده اند (شعاع بوهر اکسیتون در GaN در حدود 28 \AA می باشد). لازم به ذکر است که نمونه های ما به روش MOCVD رشد یافته اند و فرآیند رشد آنها بدون وقفه بوده است، ولی به دلیل مکانیزم کاملاً متفاوت در روشهای رشد MBE و MOCVD میزان و گستردگی ناهمواریها در فصل مشترک دو لایه تابع عوامل متعددی است.

همانگونه که در شکل (۶-۶) مشاهده می گردد که انرژی طیف گسیلی از چاههای کوانتومی مربوط به نمونه های $1/5 \text{ nm}$ و 3 nm نسبت به قله مربوط به GaN کپه ای ($3/48 \text{ meV}$) به دلیل اثر محدودیت کوانتومی به طرف انرژیهای بالاتر شیفت پیدا کرده است. درحالیکه انرژی گسیلی از چاه $4/5 \text{ nm}$ دارای لومینسانس گسیلی با انرژی کمتر از GaN کپه ای است. که این به دلیل اثر کوانتومی استارک ناشی از میدانهای داخلی پیزوالکتریک و خودبخودی است. دو عامل اثر محدودیت کوانتومی و اثر کوانتومی استارک در رقابت با یکدیگر طیف لومینسانس این نمونه ها را جابجا می کند به گونه ای که ضخامت بحرانی برای چاههای GaN حدود 40 \AA می باشد، به این معنا که برای چاههای باریکتر از 40 \AA اثر محدودیت کوانتومی غالب بوده و طیف لومینسانس گسیلی نسبت به GaN کپه ای شیفت به سمت انرژیهای بالاتر دارد در صورتیکه برای چاههای با پهنای بیش از 40 \AA طیف لومینسانس گسیلی در انرژیهای کمتر از GaN کپه ای رخ می دهد.



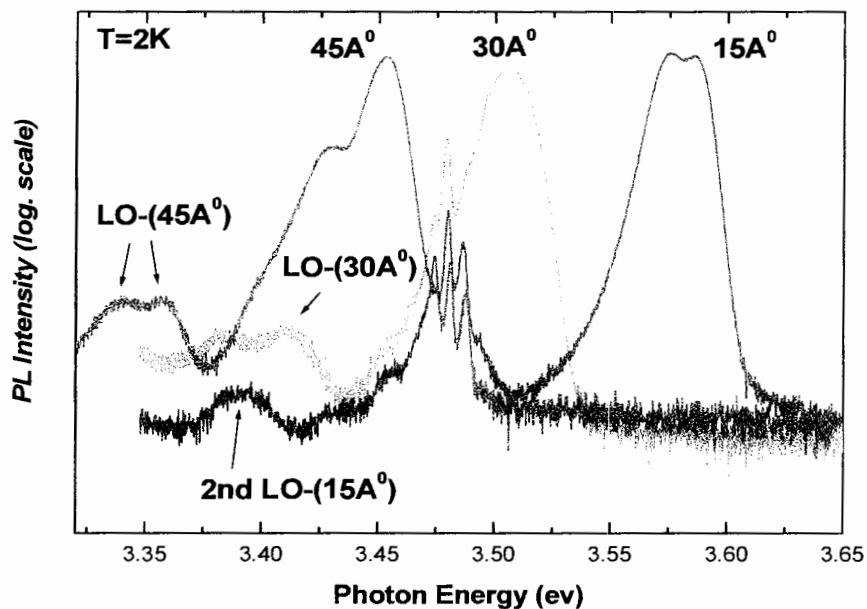
شکل ۶-۶: طیف فتولومینسانس حاصل از سه نمونه

چاه کوانتومی چندگانه $\text{GaN}/\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ در دمای 2K ^{۵۹}

نکته دیگری که به وضوح در شکل (۶-۶) قابل مشاهده است آن است که طیف لومینسانس گسیلی مربوط به چاههای $1/5\text{ nm}$ و $4/5\text{ nm}$ به صورت دو قله ای است که معرف وجود تغییر ضخامت چاه و جایگزیدگی اکسیتونها در دو چاه با پهناهای متفاوت در هر یک از این نمونه ها است. در نمونه $1/5\text{ nm}$ پهنای طیف (FWHM) برای هریک از ناحیه هایی که اکسیتونها جایگزیده شده اند کمتر از 20 meV و برای چاه $4/5\text{ nm}$ پهنای طیف بیش از 20 meV می باشد. از طرفی اختلاف انرژی بین دو شکافتگی برای نمونه $1/5\text{ nm}$ حدود 10 meV و برای نمونه $4/5\text{ nm}$ حدود 25 meV است. اما طیف گسیلی از چاه 3 nm تک قله ای بوده ولی کمی پهن تر (حدود 30 meV) از طیف مربوط به طیف چاههای قبلی است که این موضوع مؤید آن است که ناهمواریهای سطح مشترک در نمونه 3 nm دارای گستردگی عرضی کافی برای جایگزیدگی اکسیتونها نمی باشد.^{۵۹،۶۰}

۵-۶- تایید تجربی جایگزیدگی اکسیتونها به کمک LO - فونونها

هنگام باز ترکیب نوری اکسیتونها یا حاملهای آزاد در صورت جایگزیدگی آنها، طبق قانون بقای ممتوم نیاز به حضور یک فونون می باشد. محتمل ترین فونون در فرآیند باز ترکیب نوری معمولاً فونون اپتیکی طولی یا LO- فونون می باشد. وجود رد پای^۱ LO- فونون که در طیف لومینسانس گسیلی از GaN در حدود ۹۲ meV پایین تر از پیک اصلی مشاهده می گردد تأییدی بر جایگزیدگی اکسیتونها یا حاملهای آزاد می باشد.



شکل ۶-۷: حضور قله های LO- فونونی در طیف فتولومینسانس در مقیاس لگاریتمی برای سه نمونه چاه کوانتومی چندگانه GaN/Al_{0.7}Ga_{0.3}N در دمای ۲K.^{۶۰}

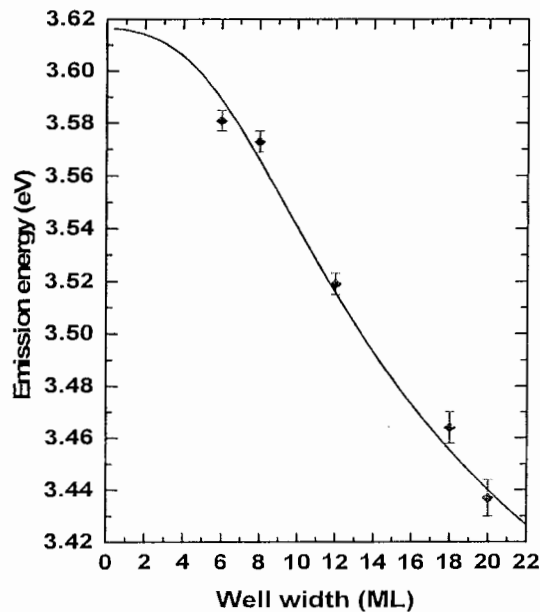
با بررسی نمودار منحنی لگاریتمی طیف فتولومینسانس نمونه ها در شکل (۶-۷) اثر فونونهای اپتیکی طولی به راحتی قابل مشاهده است و همانگونه که این منحنی نشان می دهد برای نمونه های ۱/۵ nm و ۴/۵ nm به وضوح دو پیک مربوط به اثر LO- فونونها قابل

^۱ Phonon Replica

مشاهده است، که این به معنای دو محل مختلف برای جایگزیدگی اکسیتونها است، در حالیکه نمونه ۳nm دارای یک پیک LO-فونونی است.

۶-۶- مقایسه انرژی گسیلی محاسبه شده برای چاههای با پهنای مختلف

محاسبه انرژی گسیلی بر حسب پهنای چاه و مقایسه آن با نتایج تجربی شکل (۶-۸) و همچنین اطلاعات موجود از ساختار کریستالی GaN نشان می دهد که افت و خیز پهنای چاه در این نمونه ها به اندازه یک بردار C شبکه ورتسایتس GaN و در حدود ۲ML (۵/۲Å) می باشد. برای چاه با پهنای ۱/۵ nm قله با انرژی بالاتر (۳/۵۸۱ meV) مربوط به چاه با ضخامت حدود ۶ML (۱۵/۵Å) و قله با انرژی پایین تر مربوط به چاه با پهنای ۸ML (۲۰/۷Å) می باشد. برای چاه ۴/۵ nm قله با انرژی بیشتر (۳/۴۶۴ eV) مطابق با ضخامتی حدود ۱۸ML (۴۶/۶Å) و قله با انرژی کمتر (۳/۴۳۷eV) مربوط به چاه با ضخامت ۲۰ML (۵۱/۸Å) می باشد. اثرات طیفی مشابه از افت و خیزهای پهنای چاههای کوانتومی GaN/AlGaN که به روش MBE رشد داده شده اند توسط Gallart^{۱۱} و همکارانش نیز مشاهده شدند.



شکل ۶-۸: تغییرات انرژی گسیلی بر حسب پهنای چاه (مقایسه بین تئوری و تجربه)

ممکن است این تصور بوجود آید که چون پنج لایه متناوب چاه و سد داریم احتمال دارد که یک قله از طیف فتولومینسانس مربوط به یک چاه و قله دیگر مربوط به چاه دیگر باشد، یا اینکه میدانهای قطبشی موجود در داخل نمونه (پیزوالکتریک و خود به خودی) باعث جدایی قله طیف فتولومینسانس شوند. در پاسخ باید گفت که از آنجاییکه اختلاف پهنای چاهها در ناحیه فعال حدود 1 \AA است، نمی تواند باعث چنین شکافتگی بین قله فتولومینسانس شوند. همچنین میدانهای قطبشی داخلی فقط می توانند مکان قله ها را جابجا کنند ولی باعث دو قله ای شدن طیف فتولومینسانس نمی شوند، که این مسئله در بررسی تصویر فتولومینسانس¹ که از عرض نمونه گرفته می شود شرح داده خواهد شد.

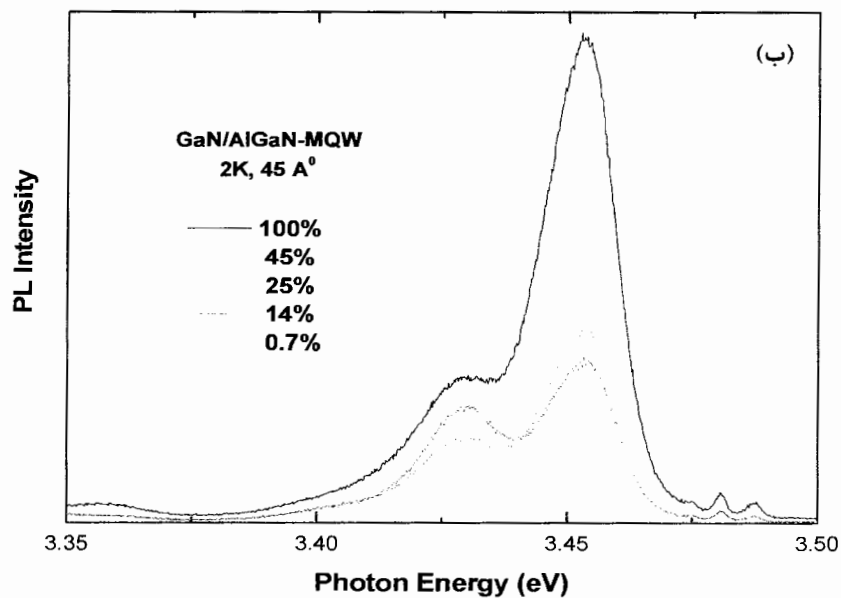
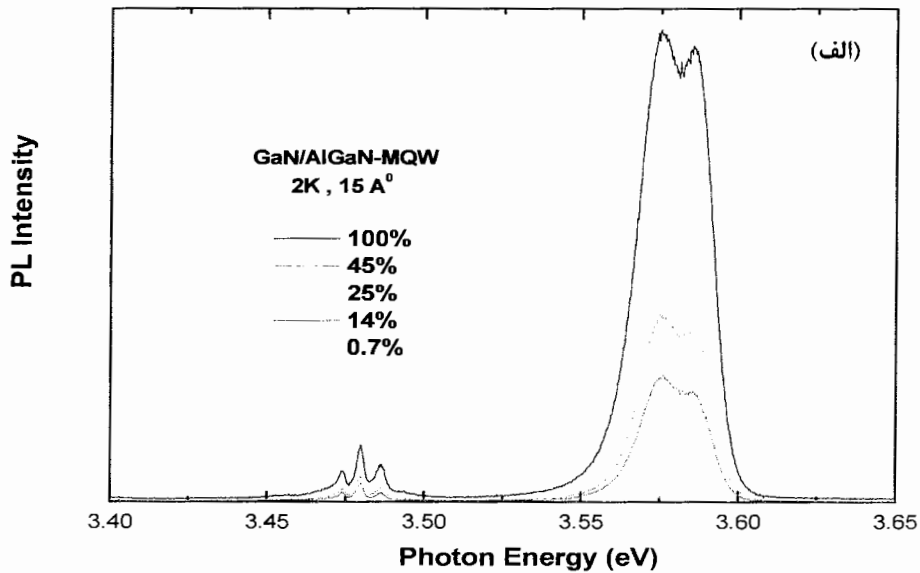
۶-۷- تأیید تجربی جایگزیدگی اکسیتونها با استفاده از تغییرات شدت لیزر فرودی

منحنی تغییرات فتولومینسانس بر حسب شدت لیزر فرودی یکی از روشهایی است که دو قله ای بودن طیف فتولومینسانس نمونه ها را به دلیل وجود افت و خیز در پهنای چاه به اثبات می رساند و نشان می دهد که شکافتگی پیک فتولومینسانس در نمونه های $1/5 \text{ nm}$ و $4/5 \text{ nm}$ به دلیل افت و خیز سطح مشترک GaN و AlGaN می باشد. با بررسی طیف فتولومینسانس اندازه گیری شده برای نمونه های $1/5 \text{ nm}$ و $4/5 \text{ nm}$ در شدتهای مختلف از آنجاییکه اکسیتونها ابتدا وارد چاههای با انرژی کمتر شده (دارای پهنای بیشتر) و بعد وارد چاههای با انرژی بیشتر (دارای پهنای کمتر) می شوند (چون اکسیتونها تمایل دارند ابتدا در محلهایی که دارای انرژی کمتر است جایگزیده شوند)، بنابراین در اثر تحریک نمونه توسط لیزر ابتدا حاملهای نوری تولید شده چاه با پهنای بیشتر را پر می کنند و پس از رسیدن به حالت اشباع وارد چاههای باریکتر می شوند. با افزایش شدت چون چاه پهن به حالت اشباع رسیده، حاملها وارد چاه باریکتر می شوند و در نتیجه قله طیف فتولومینسانس حاصل از چاه

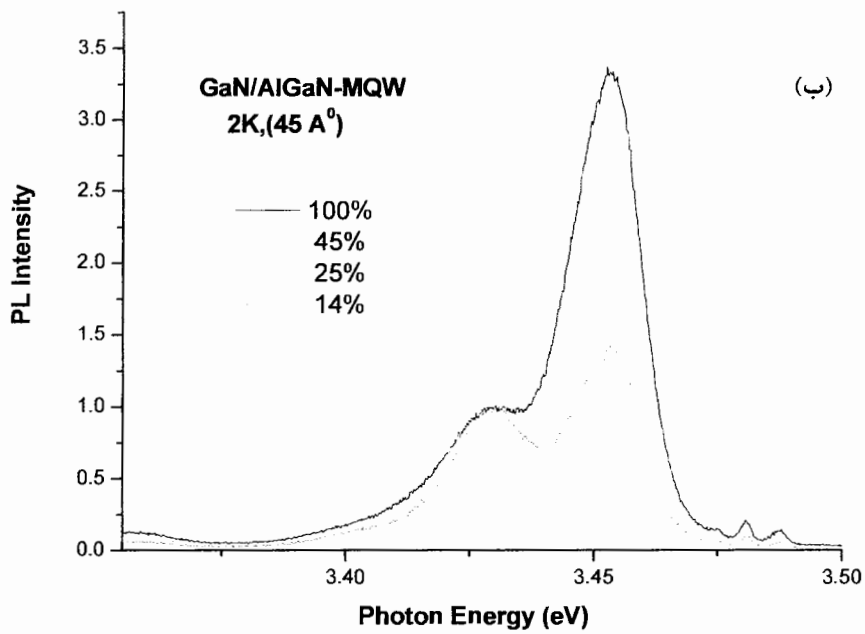
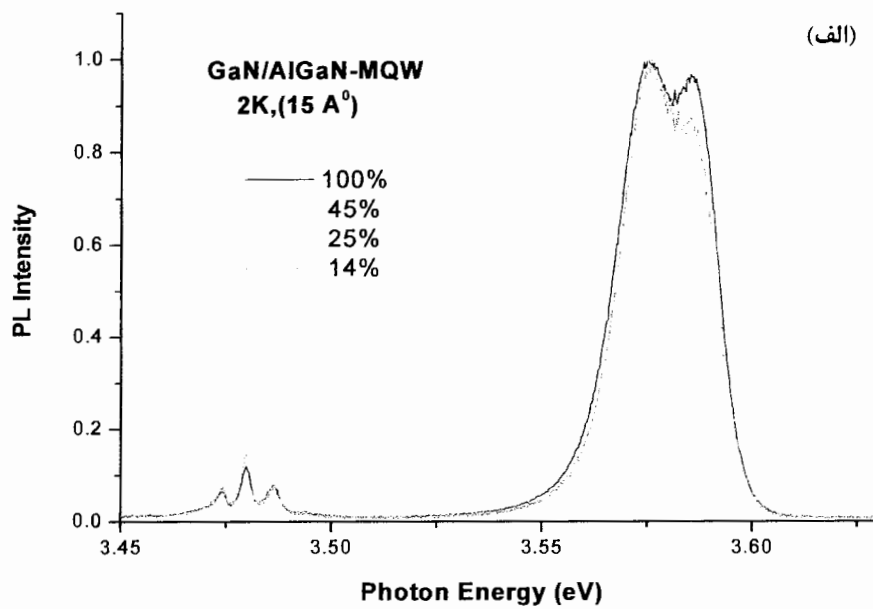
¹ PL-mapping

پهن تر در شدتهای بالاتر نسبت به قله طیف فتولومینسانس مربوط به چاه باریکتر کمتر رشد می کند (شکل ۹-۶- الف) و (ب)).

این تغییرات زمانی که ما طیف را نسبت به یکی از قله نرمال می کنیم، به خوبی قابل بررسی است این تغییرات در شکل (۹-۶- الف) و (ب) نشان داده شده اند^{۶۰،۵۹}.



شکل ۹-۶: نمودار تغییرات شدت برحسب انرژی برای دو نمونه الف) 15\AA ، ب) 45\AA



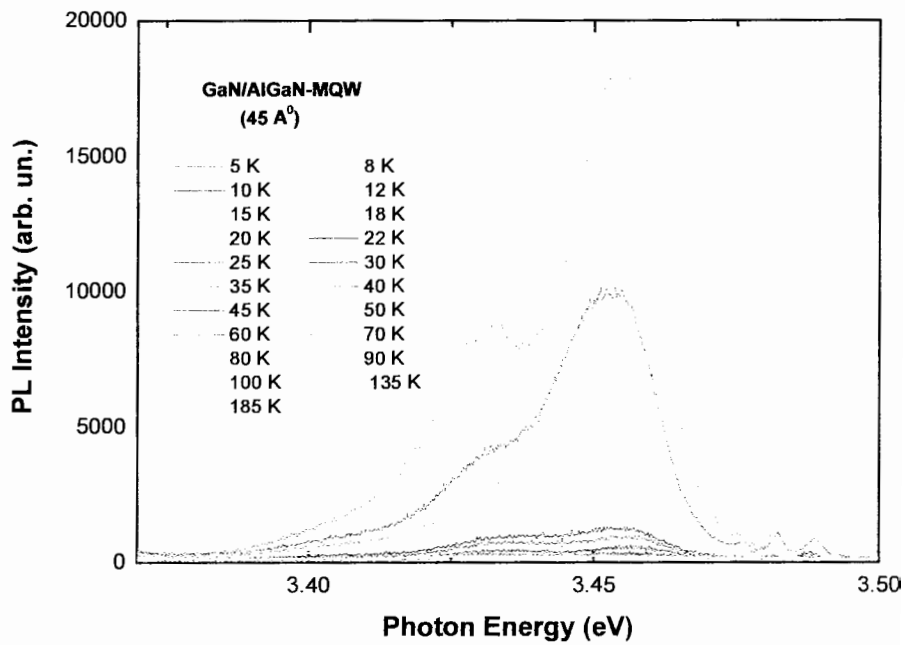
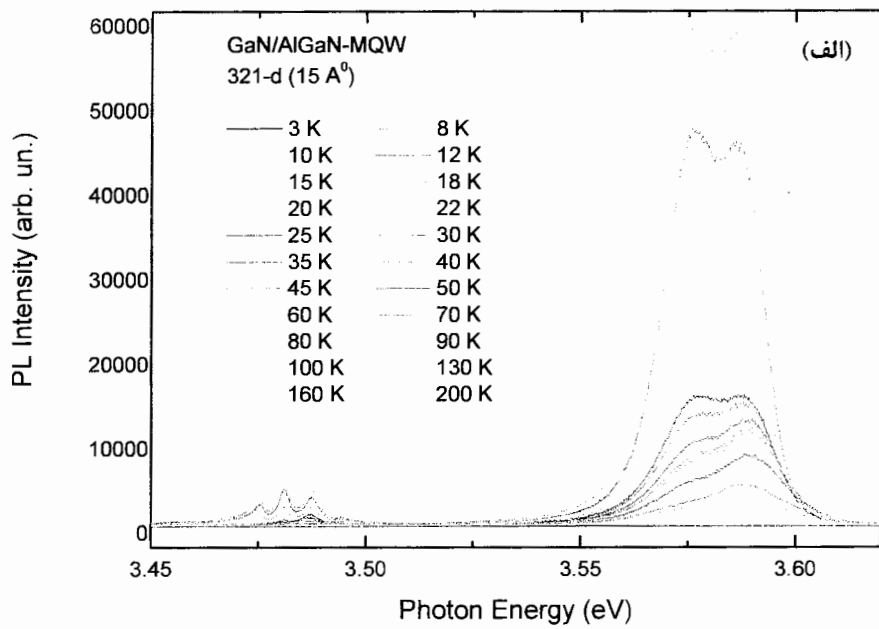
شکل ۶-۱۰: نمودار تغییرات شدت نورال شده برای دو نمونه الف (15 Å)، ب (45 Å)

۶-۸- تأیید تجربی جایگزیدگی اکسیتونها با استفاده از تغییرات دمایی

روش دیگری که می تواند جایگزیدگی اکسیتونها را در دو چاه با پهناهای متفاوت تأیید نماید. تغییرات دمایی طیف فتولومینسانس نمونه ها از دمای هلیم مایع تا دمای اتاق است. در دمای پایین طیف فتولومینسانس گسیل دوقله ای را برای نمونه های $1/5 \text{ nm}$ و $4/5 \text{ nm}$ نشان می دهد.

وقتی دما را افزایش می دهیم، اکسیتونها که در مکانهای خود فریز شده بودند به دلیل تحریک حرارتی وارد مکانهایی که دارای انرژی کمتری هستند، می شوند (مینیمم انرژیها، همان ناهمواریهای کف چاه) در نتیجه باعث رانش ترازهای الکترونی به سمت پایین (نزدیک شدن به لبه چاه) و به دنبال آن کاهش فاصله ترازهای الکترون و حفره و در نتیجه یک انتقال به سمت قرمز در طیف فتولومینسانس گسیلی مشاهده می شود. با افزایش بیشتر دما اکسیتونها با کسب انرژی از داخل این افت و خیزهای پتانسیلی خارج شده، که باعث یک انتقال به سمت آبی در طیف فتولومینسانسی می شوند، تا جاییکه اکسیتونها از چاه پهن تر (با انرژی کمتر) خارج شده و به چاه باریکتر (در انرژیهای بالاتر) می روند در نتیجه قله مربوط به چاه پهن تر، کم کم از بین می رود به طوریکه دیگر اکسیتونی در داخل چاه پهن تر باقی نمی ماند تا باز ترکیب انجام دهد و فقط لومینسانس چاههای باریکتر در دمای بالا قابل مشاهده است. در دمای حدود 130 K برای چاه $1/5 \text{ nm}$ یک انتقال به سمت قرمز در طیف لومینسانسی مشاهده می شود که ناشی از تأثیر گرما بر گاف انرژی است.

با بررسی قله های طیف فتولومینسانس یک رفتار به شکل S در وابستگی دمایی مشاهده می شود (شکل ۳-۵) که ناشی از باز ترکیب حالت های جایگزیده است و انرژی جایگزیدگی را با مقایسه میزان جابجایی پیکها به راحتی می توان تعیین نمود (شکل ۶-۱۱- الف) و (ب) ^{۵۹۶۰}.

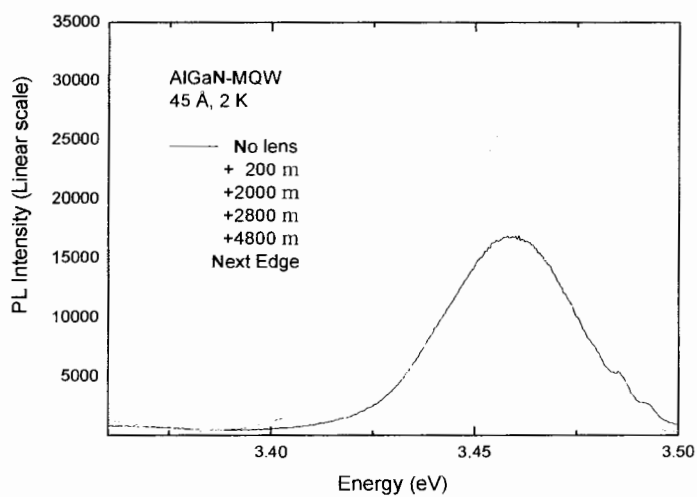
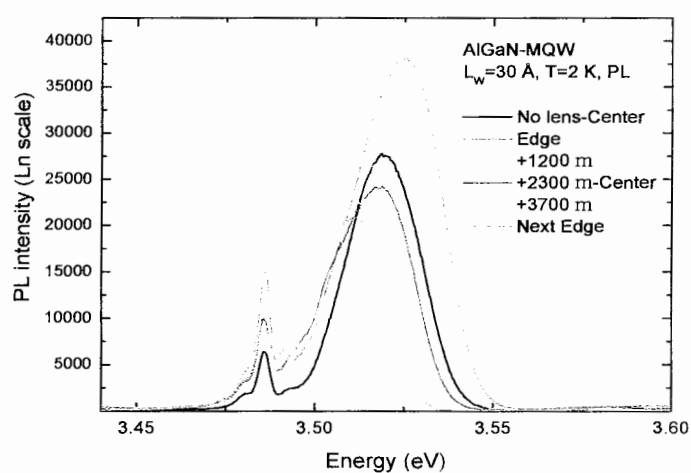
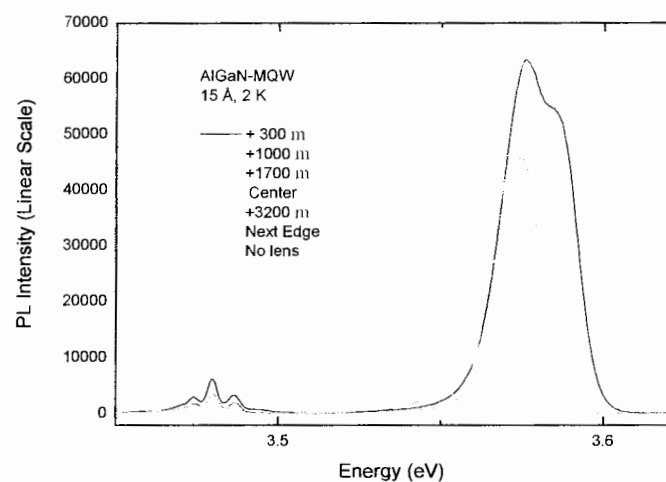


شکل ۶-۱۱: تغییرات دمایی طیف فتولومینسانس برای دو نمونه الف) ۱۵ Å، ب) ۴۵ Å

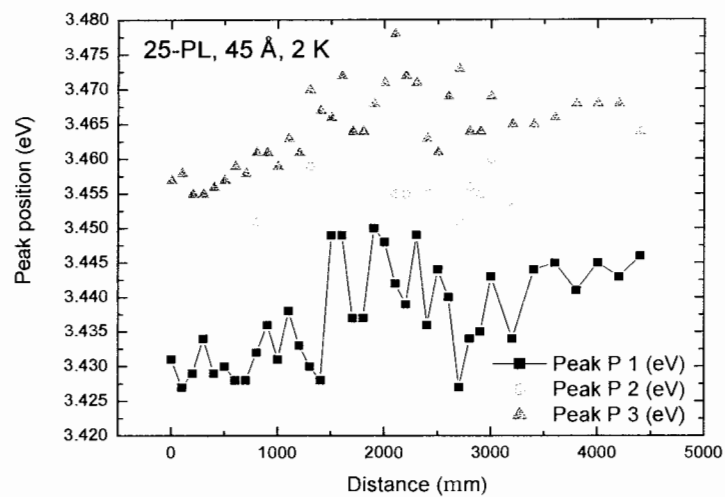
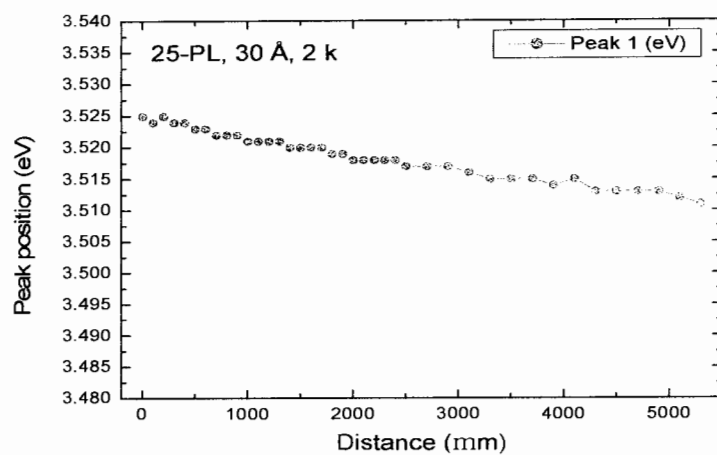
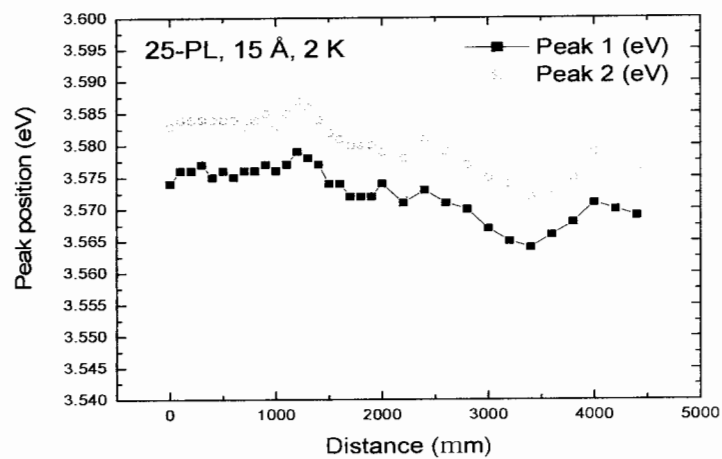
۹-۶- تغییرات موضعی میدانهای قطبشی داخلی

اندازه گیری فتولومینسانس در نقاط مختلف در عرض نمونه افت و خیزهایی را در موقعیت قله های فتولومینسانس نشان می دهد که این افت و خیزها مربوط به تغییر میدان قطبشی پیزوالکتریک محلی در نقاط مختلف در سر تا سر نمونه است (شکل ۱۴۶). تغییرات میدانهای قطبشی محلی در میزان شیفت انرژی به دلیل اثر کوانتومی استتارک بر روی جابجایی قله مربوط به چاههای کوانتومی، مؤثر است. همچنین تراکم غیر یکنواخت Al در سدها نیز می تواند در این افت و خیزها مؤثر باشد به همین دلیل میزان جابجایی قله های طیف فتولومینسانس در نمونه $4/5 \text{ nm}$ دارای الگوی منظمی مانند نمونه $1/5 \text{ nm}$ نمی باشد (شکل ۱۳-۶). اگرچه که رفتار آماری افت و خیز پیک ها برای نمونه $4/5 \text{ nm}$ مشابه نمونه $1/5 \text{ nm}$ بوده و معرف جدایی انرژی معادل با 2 MML می باشد.

شکل (۱۳-۶) نشان دهنده محل پیک مربوط به طیف فتولومینسانس برای هر یک از نمونه ها است، در صورتیکه نور لیزر فرودی عرض نمونه ها را با فاصله 100 میکرون جاروب می کند.^{۶۱} فاصله بین دو قله در نمونه $1/5 \text{ nm}$ (10 meV) در سرتاسر نمونه تقریباً ثابت است ولی دارای افت و خیزهای آماری برای مجموع دو قله می باشد. برای چاه 3 nm یک قله گسیلی فتولومینسانس برای نقاط مختلف در عرض نمونه مشاهده می شود، که ثابت می کند میدانهای داخلی در سر تا سر نمونه تغییر می کنند. فاصله قله ها در نمونه $4/5 \text{ nm}$ (25 meV) دارای تغییرات شدیدتر و مجموعه آنها دارای افت و خیز آماری بیشتری می باشد. همانگونه که در بالا اشاره شد، این افت و خیزها به همراه جابجاییهای قله های لومینسانسی ناشی از تغییرات محلی میدان الکتریکی داخلی به دلیل وجود تنشهای موضعی در مرحله رشد نمونه و نیز غیر یکنواختی توزیع Al در سد AlGaIn می باشد که باعث تغییر میدانهای موضعی می گردد. موضوع غیر یکنواختی در توزیع Al در لایه AlGaIn توسط تصاویر TEM^{۶۲} نیز تأیید شده است (شکل ۱۴-۶).

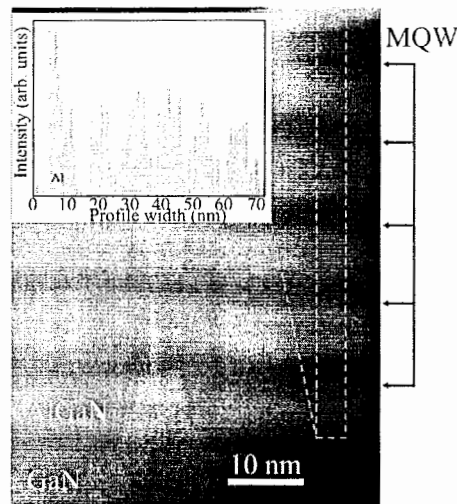


شکل ۶-۱۲: جابجایی قله های فتولومینسانس در چاههای $1/5\text{nm}$ ، 3nm و $4/5\text{nm}$ هنگامیکه باریکه نور لیزر فرودی در عرض نمونه ها جابجا می شود



شکل ۶-۱۳: تغییرات ۱۰۰ میکرونی از جابجایی قله های فتولومینسانس

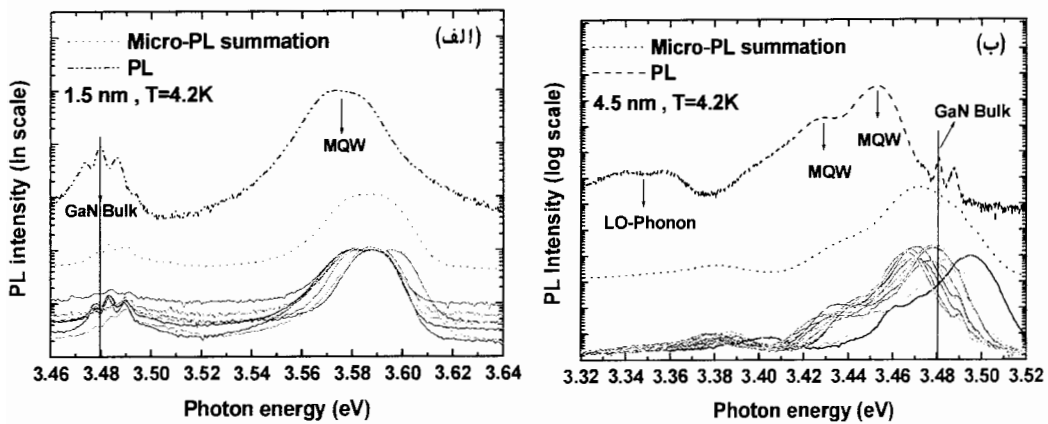
در سرتاسر سه نمونه 15 \AA و 30 \AA و 45 \AA



شکل ۶-۱۴: تصویر TEM از نمونه

۶-۱۰- یک ارزیابی تقریبی از گستردگی ناهمواریها به روش میکروفوتولومینسانس ما به کمک تکنیک میکروفوتولومینسانس می توانیم یک ارزیابی دقیق از گستردگی ناهمواریهای موجود در فصل مشترک لایه های GaN و AlGaIn بدست می آوریم. از آنجاییکه قطر لیزر مورد استفاده در میکروفوتولومینسانس صد برابر کمتر از فتولومینسانس است در نتیجه ناحیه با ابعاد کمتری را تحریک می کند و انتظار داریم که فقط یک قله را مشاهده کنیم. اما وقتی که در طیف اندازه گیری شده میکرو فتولومینسانس دو قله مشاهده می شود، به این نتیجه می رسیم که ناحیه تحریک شده توسط لکه لیزر بیشتر از ابعاد افت و خیزهای موجود آمده در فصل مشترک است و چون شعاع بوهر اکسیتون در این نمونه ها حدود 28 \AA است، که کمتر از پهنای این افت و خیزها می باشد، می توان نتیجه گرفت که گستردگی این ناهمواریها بیش از حدود 9 nm^2 و کمتر از 1 \mu m^2 می باشد و همانطور که قبلاً بحث شد، عمق این ناهمواریها نیز به اندازه ۲ML (حدود $5/2 \text{ \AA}$) می باشد. گفتیم که قطر نور لیزر مورد استفاده در میکرو فتولومینسانس صد برابر کمتر از فتولومینسانس است به همین دلیل شدت انرژی در حدود ۱۰۰۰۰ بار در آزمایش میکرو فتولومینسانس بیش از فتولومینسانس معمولی است که باعث افزایش تعداد حاملهای نوری در قطعه و در نتیجه استتار میدان قطبشی (میدان

خودبخودی و پیزوالکتریک) موجود در نمونه و انتقال انرژی به سمت انرژیهای بیشتر در آزمایش میکروفوتولومینسانس می شود. در شکلهای (۶-۱۵-الف) و (ب) مقایسه تغییرات شدت میکروفوتولومینسانس و فتولومینسانس را در دو نمونه $1/5 \text{ nm}$ و $4/5 \text{ nm}$ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۵: مقایسه فتولومینسانس با میکروفوتولومینسانس برای دو نمونه الف) $1/5 \text{ nm}$ و ب) $4/5 \text{ nm}$ (مجموع میکروفوتولومینسانس ها در میانه شکل رسم شده است)^{۱۱}

دسته منحنی که در قسمت پایین شکل دیده می شود ناشی از نتایج حاصل از آزمایش میکروفوتولومینسانس در دمای $4/2 \text{ K}$ است. منحنی خط چین در وسط در واقع برآیند نمونه های میکروفوتولومینسانس است که به صورت کاملاً آماری انتخاب شده اند و با طیف فتولومینسانس (منحنی بالایی) هماهنگی خوبی را نشان می دهند. در نمونه $4/5 \text{ nm}$ فاصله ترازهای انرژی به دلیل پهن بودن چاه، کمتر است، به طوری که در این نمونه بخاطر غلبه اثر کوانتومی استارک به اثر محدودیت کوانتومی طیف فتولومینسانس گسیلی به پایین تر از پیک مربوط به GaN که ای انتقال یافته است، ولی در منحنی مربوط به میکروفوتولومینسانس بخاطر جابجایی پیک به سمت انرژی های بیشتر (انتقال آبی) ناشی از اثر استتار میدانهای قطبشی داخلی توسط حاملهای نوری، پیک های GaN که ای در زیر منحنی های مربوط به چاههای چندگانه کوانتومی پنهان شده است. اما مجموع تمام میکروفوتولومینسانس ها نسبت

به منحنی فتولومینسانس فقط یک جابجایی به سمت انرژی های بیشتر (آبی) را نشان می دهد. همچنین در این نمونه پیک های مربوط به LO- فونونها نیز حدود انرژی $3/34 \text{ eV}$ تا $3/36 \text{ eV}$ برای منحنی فتولومینسانس و با یک جابجایی در حدود 30 meV برای منحنی میکروفتولومینسانس دیده می شود.

۷-۱۱- تأیید تئوری تغییرات پهنای چاه به میزان ۲ML

یکی از روشهایی که به وسیله آن می توان تطبیق خوبی بین تئوری و نتایج آزمایشگاهی بدست آورد، حل معادله شرودینگر و بدست آوردن ترازهای انرژی در چاه مربعی کم عمق تحت اعمال میدان است. $^{52} \text{ Singh}$ و $^{54} \text{ Bastar}$ به ترتیب ترازهای انرژی را با حل معادله شرودینگر با استفاده از سری فوریه و روش وردشی برای چاههای مربعی کم عمق که تحت اعمال یک میدان ضعیف از حالت مربعی خارج شده و شکل مثلثی به خود می گیرند، را بدست آوردند. میدانهای قطبشی داخلی در چاههای کوانتومی GaN/AlGaN ناشی از مؤلفه های قطبش خودبخودی و پیزوالکتریک است که به پهنای چاه بستگی دارد و با تغییرات آن تغییر می کند. بعد از بدست آوردن تراز انرژی می توانیم تغییرات انرژی را بر حسب پهنای چاه رسم کنیم (شکل ۶-۸). که در آن انرژی بر حسب eV و پهنای چاه بر حسب ML است. در ترسیم این نمودار از روش Singh کمک گرفته شده است، با این توضیح که محاسبه انجام شده توسط ایشان برای نمونه های موجود، تعمیم یافته است. برای محاسبه انرژی گسیلی ابتدا با یک برنامه ساده در Matlab رابطه بین میدانهای قطبشی داخلی بر حسب تابعی از پهنای چاه بر اساس رابطه های زیر نوشته شده است.^{۶۳}

$$E_w = (P_b - P_w)L_b / (L_w + L_b) \epsilon_0 \epsilon \quad (1-6)$$

$$E_b = (P_w - P_b)L_w / (L_w + L_b) \epsilon_0 \epsilon \quad (2-6)$$

سپس با محاسبه آفست های نوار انرژی برای الکترون ها و حفره ها که در نمونه های ما به ترتیب 116 meV و 62 meV می باشد و نیز جرم مؤثر الکترونها و حفره ها که در GaN به

ترتیب عبارتند از $m_e = 0.22 m_0$ و $m_{lh} = 1/76 m_0$ (m_0 جرم سکون الکترون می باشد)، ترازهای انرژی الکترون و حفره در چاه کوانتومی مربعی کم عمق اغتشاش یافته بر اثر میدان های قطبشی داخلی بر حسب تابعی از پهنای چاه بر اساس رابطه (۵-۷) با یک برنامه ساده دیگر Matlab محاسبه می گردد. نتیجه محاسبه پس از جمع شدن با انرژی گاف GaN در دمای پایین ($E_g = 3/50.5 \text{ eV}$) و تأثیر انرژی بستگی اکسیتونها (حدود ۲۸ meV برای چاه GaN) و همچنین انرژی جایگزیدگی در نهایت به عنوان انرژی گسیلی (رابطه ۵-۱۳) از چاههای کوانتومی GaN/Al_{0.7}Ga_{0.3}N بر حسب تابعی از پهنای چاه در شکل (۶-۸) ترسیم شده است.

همانطور که در شکل (۶-۸) مشاهده می گردد، منحنی تئوری انرژی گسیلی بر حسب پهنای چاه با مقادیر تجربی حاصل از اندازه گیریهای فتولومینسانس مقایسه گردیده است و بر اساس داده های تجربی از نتایج XRD و عکسهای TEM (شکل ۶-۱۴) توافق بسیار خوبی در پهنای ۶ML و ۸ML برای نمونه ۱/۵ nm و ۱۸ML و ۲۰ML برای نمونه ۴/۵ nm بین مقادیر محاسباتی و مقادیر تجربی به چشم می خورد که این یک تأیید تئوری بر نتایج تجربی ارائه شده در بخشهای قبلی همین فصل می باشد و نشانگر افت و خیز پهنای چاههای کوانتومی لایه GaN به میزان ۲ML یا (۵/۲Å) می باشد.

لازم به ذکر است که با توجه به تعداد بسیار زیاد نقاط اندازه گیری شده در هر نمونه شکل (۶-۱۳) که نشان دهنده روبش عرضی نمونه ها با نور لیزر فرودی و با گامهای ۱۰۰ μm است) محل انرژی گسیلی پیک طیف فتولومینسانس بر حسب میانگین آماری، مقادیر بدست آمده برای نقاط مختلف محاسبه گردیده است و میزان انحراف از میانگین نیز در نقاط تجربی موجود در منحنی (۶-۸) مشخص شده است. همانگونه که به کمک محور قائم منحنی (۶-۸) می توان براحتی دریافت، اختلاف انرژی به ازای افزایش ضخامت چاه به میزان ۲ML برای چاه ۱/۵nm حدود ۱۰meV و برای چاه ۴/۵nm حدود ۲۵meV می باشد.

پیوست

Junction

رشد بلور

از هنگام اختراع ترانزیستور در سال ۱۹۴۸ پیشرفت تکنولوژی قطعات حالت جامد نه تنها به توسعه مفاهیم قطعات الکترونیکی بلکه به بهبود مواد نیز وابسته بوده است. برای مثال توانایی کنونی در ساخت مدارهای مجتمع حاصل پیشرفتهای علمی قابل ملاحظه در زمینه رشد بلور Si در آغاز و میانه دهه ۱۹۵۰ بوده است. شرایط رشد بلورهای نیمه رسانا که برای ساخت قطعات الکترونیک استفاده می شود بسیار دقیق تر و مشکل تر از شرایط سایر مواد است. علاوه بر اینکه نیمه رساناها باید به صورت تک بلورهای بزرگ در دسترس باشند، باید خلوص آنها نیز در محدوده بسیار ظریفی کنترل شود، چنین درجاتی از خلوص مستلزم دقت بسیار در استفاده و بکارگیری مواد در هر مرحله فرآیند ساخت است.

یک تفاوت عمده بین رشد تک عنصری و رشد نیمه هادیهای مرکب، کنترل نسبت ها یعنی نسبت صحیح عناصر تشکیل دهنده ترکیب می باشد. این مواد معمولاً دارای یک جزء فرارند که در دماهای زیاد به آسانی از دست می رود. مثلاً در GaAs و InP عناصر گروه V، یعنی As و P فرارتر از Ga و In بوده و بنابراین به هنگام گرم کردن ترکیب، عناصر گروه V به آسانی تبخیر گشته و ماده ای که جمعیت بیشتر آن از گروه III می باشد باقی می گذارند. چنین پدیده ای به تبخیر نامتجانس معروف است و می تواند در فرآیند رشد مشکلاتی را به وجود آورد.

یکی از مهمترین روشهای رشد بلور که در ساخت قطعات کاربرد دارد، رشد یک لایه نازک بلور روی پولکی از یک بلور همسان است. بلور بستر^۱ می تواند پولکی از همان ماده لایه رشد داده شده و یا ماده دیگری با ساختمان شبکه ای مشابه باشد. در این فرآیند بستر

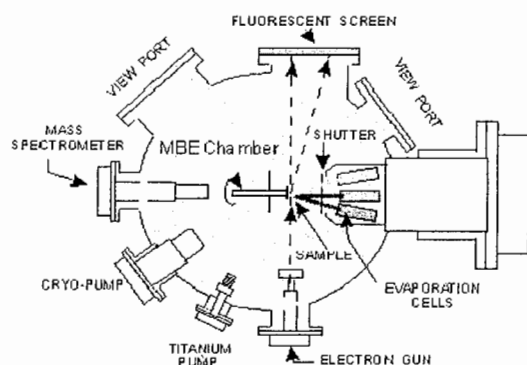
^۱ substrate

همچون یک دانه بلور است که روی آن ماده بلوری جدید رشد می یابد. نشان دادن لایه تک بلوری جهت دار روی پولک بستر، رشد برآراستی یا اپی تکسی^۱ نامیده می شود. رشد برآراستی را می توان در دماهای خیلی پایین تر از نقطه ذوب بلور بستر انجام داد. فن آوری رشد برآراستی اغلب جایگزین فن آوریهای مانند نفوذ و کشت در ساخت ساختارهای قطعات می گردد. انواع مختلف برآراستی وجود دارد که متداولترین آنها برآراستی با پرتو مولکولی و برآراستی فاز بخار است^{۳ و ۴ و ۶}.

الف - ۱: رشد برآراستی به وسیله باریکه مولکولی یا MBE

یکی از پرکاربردترین روشهای رشد لایه های رونشستی، رونشینی پرتو مولکولی است

(شکل الف-۱)



شکل الف-۱: طرحواره ای از

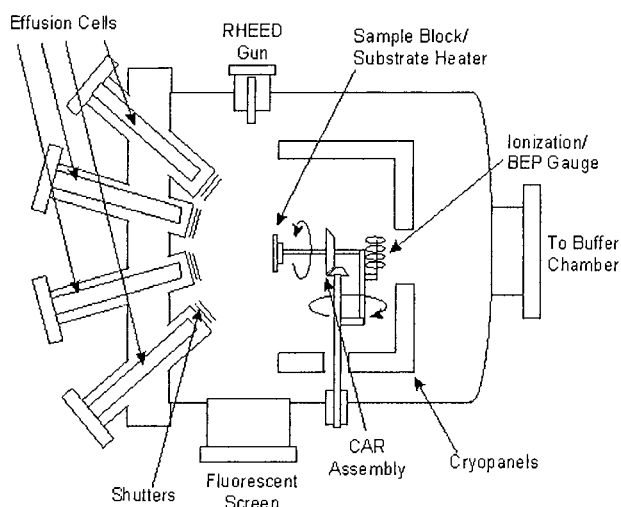
* دستگاه MBE

^۱ http://people.deas.harvard.edu/~jones/ap216/images/bandgap_engineering/bandgap_engineering.html

در این روش بستر تحت یک فرآیند تبخیر کنترل شده حرارتی در شرایط خلاء فوق العاده بالا می باشد. فشار آن در حدود 10^{-8} torr تا 10^{-10} torr می باشد و محدوده حرارتی آن ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد است. زیر لایه که روی آن ساختارهای چندگانه رشد داده می شود، روی یک گیره حرارتی در محفظه تبخیر کننده گذاشته می شود. عناصری که ترکیبات ساختارهای چندگانه اند (مثل Al، As و Ga) در محفظه هایی با دهانه هایی که مستقیماً به

^۱ epitaxy

طرف زیر لایه اند گرم شده و تبخیر می شوند. در جلوی هر محفظه دریچه ای به عنوان حفاظ وجود دارد (شکل الف-۲). محفظه ها به نحوی طراحی شده اند که شار افقی برای رشد بلور بر روی زیر لایه امکان پذیر می شود. وقتی دریچه باز می شود رشد آغاز شده و شار کنترل شده بوسیله دما از هر سلول خارج می شود. سرعت رشد در محدوده $0.1 \mu\text{m}/\text{min}$ تا $3 \mu\text{m}/\text{min}$ می باشد. امکان کنترل دریچه ها برای ایجاد تغییرات ترکیبی در مقیاس ثابت شبکه وجود دارد. در مورد ناخالصی هایی که اضافه می کنند، چون فسفر بسیار سریعتر از آنچه مطلوب ما است تبخیر می شود، بسیاری از استفاده کنندگان این روش از ناخالصی هایی مثل Ga و Sb و Al استفاده می کنند.



شکل الف-۲: شکل محفظه ها
در دستگاه MBE*

* http://people.deas.harvard.edu/~jones/ap216/images/bandgap_engineering/bandgap_engineering.html

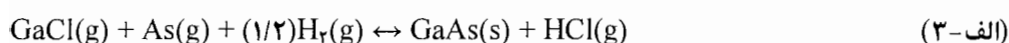
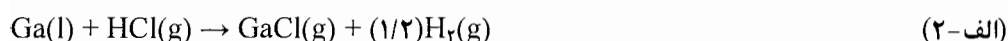
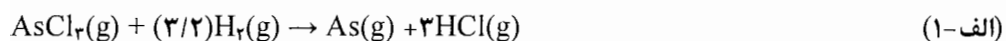
یک نمونه جدید تسهیلات رشد MBE دارای محفظه رشد UHV¹ است که در آن زیرلایه از طریق یک یا دو محفظه بارگذاری اولیه داخل سیستم گذاشته می شود. فشار محفظه رشد معمولاً 10^{-11} torr و فشار سایر محفظه ها 10^{-6} torr می باشد. متداولترین امکانات موجود در محفظه رشد سیستم چهارگانه طیف نگار (یا سیستم تحلیل گازهای ته نشستی) است که

¹ Ultrahigh Vacuum

اطلاعات مهمی درباره محفظه رشد در هر زمان ارائه می کند و نیز سیستم RHEED است که اطلاعات مربوط به مکانیزم رشد و باز ساخت سطحی را به ما می دهد^{۴۸۴}.

الف - ۲: روش رسوب بخار شیمیایی یا MOCVD

در روش رشد برآراستی فاز بخار، نشست لایه بلورین نیمه هادی از یک محیط گازی بر اثر فعل و انفعالات شیمیایی و یا تجزیه صورت می پذیرد. برآراستی فاز بخار^۱ (VPE) که به نشست بخار شیمیایی (CVD) نیز معروف است یکی از پر کاربردترین روشها در رشد بلور است. سه روش مختلف CVD برای رشد ترکیبات III-V و سایر نیمه هادیهای مرکب به کار گرفته می شوند. این روشها عبارتند از فرآیند هالید، هیدراید و نشست بخار شیمیایی MOCVD. در یک فرآیند هالید یا کلرید برای رشد GaAs، به عنوان نمونه، مواد چشمه را عنصر Ga و محلول $AsCl_3$ که هر دوی آنها را می توان با خلوص بالا بدست آورد، تشکیل می دهند. محلول $AsCl_3$ در محفظه جوشانی که هیدروژن از میان آن می گذرد، قرار داده می شود. گاز حاصله از روی چشمه Ga و سپس به سطح زیر لایه می رسد. دمای لوله واکنش در محدوده چشمه تا حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد گرم شده و در محدوده زیرلایه حدود ۸۵۰-۸۰۰ درجه سانتیگراد خواهد بود. هنگامی که هیدروژن اشباع شده با $AsCl_3$ از روی چشمه عبور می کنند، فعل و انفعالات زیر صورت می گیرد:



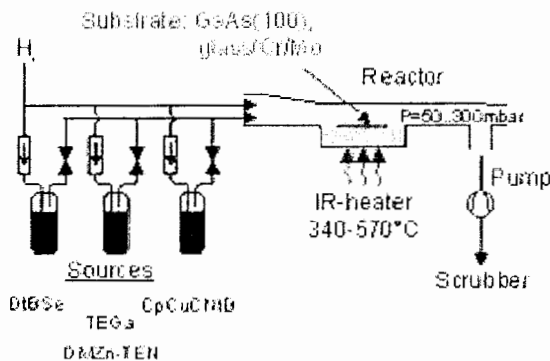
برای آرایش نوع p از عنصر Zn و برای آرایش نوع n از S و Se به صورت H_2S و H_2Se استفاده می شود. در فرآیند هیدراید، گازهای AsH_3 و PH_3 به عنوان چشمه های عناصر

^۱ Vapor Phase Epitaxy

گروه V مورد استفاده قرار می گیرند. هیدرایدها در محدوده دمای زیاد کوره بر مبنای رابطه زیر تجزیه می شوند:



واکنش HCl با چشمه فلزی گروه III طبق رابطه (الف-۲) تولید کلراید می کند و در نهایت با ته نشین شدن در محدوده زیرلایه، رشد برآراستی با توجه به رابطه (الف-۳) انجام می پذیرد. فرآیند هیدراید اجازه کنترل نسبت گونه های گروه III به فاز بخار گروه V را می دهد. این یک روش متداول در ساخت دیودهای نوری و آشکارسازها می باشد. روش مناسب دیگر برای رشد نیمه هادیهای ترکیبی، رشد به روش MOCVD می باشد (شکل الف-۳). این روش گاهی MOVPE نیز نامیده می شود.



شکل الف-۳: طرحواره ای از دستگاه MOCVD*

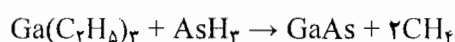
در این روش هیدراتهای گروه سوم جدول تناوبی با ترکیبات فلزات آلی به روی یک بلور پایه که در دمای حدود 700°C قرار دارد وکنش انجام می دهد. این روش در ساخت قطعاتی نظیر سلولهای خورشیدی و لیزرها نیز مورد استفاده قرار گرفته است. MOCVD در فشار ۰/۱ تا ۰/۵ اتمسفر انجام می شود. از این رو تغییر مخلوط گازها به سادگی انجام یافته و رشد چند

لایه نازک را به روی یکدیگر امکان پذیر می سازد. مزیت های این روش که در فشار پایین انجام می شود و به همین دلیل ¹Lp-MOCVD نیز نامیده می شود، به صورت زیر است:

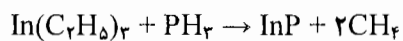
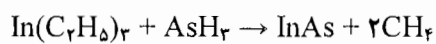
رشد مانند روش MBE بدون هیچ تعادل ترمودینامیکی بوجود می آید و مراحل رشد به جای آنکه توسط واکنشهای سطحی بین حالت های گاز و جامد که وابسته به حرارت است، مشخص گردد به وسیله میزان ورود مواد در سطح رشد تعیین می گردد. در این روش از ترکیبات مختلفی به عنوان مواد شروع کننده می توان استفاده کرد. همچنین برای رشد لایه های کوچکتر از میکرومتر با ترکیبات و ضخامت یکنواخت، مناسب می باشد. عموماً عمل رشد به وسیله مقادیر مشخصی از الکیل های گروه سوم جدول مثل تری متیل گالیوم $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ و تری متیل ایندیم $\text{In}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ و هیدرات های گروه پنجم مثل AsH_3 و PH_3 در داخل لوله واکنشی از جنس کوارتز انجام می شود. در داخل این لوله بلور پایه روی یک نگهدارنده کربنی قرار داده می شود. گرمای نگهدارنده به وسیله RF تأمین می گردد.

فرآیند رشد به صورت زیر است:

۱. مولکول های گاز از داخل لایه مرزی راکد به سطح بلور پایه نفوذ می کنند.
 ۲. در سطح مجاور ویفر که دمای آن حدود ۷۰۰ درجه می باشد، آلکیل ها و هیدراتها تجزیه شده و بنابراین تولید انواع مختلفی از عناصر گروه سوم و پنجم می کند که به آنها عناصر پایه ای گفته می شود.
 ۳. این عناصر پایه ای در سطح داغ حرکت کرده تا در مکان مناسبی در بلور قرار گیرند و در این زمان رشد صورت گرفته است.
- هریک از مراحل بالا می تواند میزان رشد را محدود کند پس میزان رشد به سادگی بوسیله مقدار ورود مواد قابل کنترل می باشد. در یک سیستم آلیاژی چهار تایی GaAsInP در ناحیه ای که گازها با هم مخلوط می شوند واکنشهایی به صورت زیر انجام می شود:



¹ Low pressure - Metal Organic Chemical Vapor Deposition



اگر جریان PH_3 را قطع و به جای تری اتیل ایندیم $(\text{In}(\text{C}_2\text{H}_5)_3)$ ، تری اتیل آلومینیم $(\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3)$ را وارد کنیم نیمه هادی AlGaAs که در الکترونیک نوری کاربرد وسیع دارد رشد داده خواهد شد.

فن آوری رشد MOCVD به عنوان یک تکنولوژی مهم در تولید تک لایه ها، پیوندهای غیر همگن و ساختارهای چاه کوانتومی با کنترل عالی ضخامت لایه و آلایش مطرح گردیده است ^{۶۴و۶۸}.

مرجع ها

References

-
- ¹ C.M. Wolf, N. Hholonyak, Jr., and G.E. Stillman, Physical Properties of Semiconductors, Prentice-Hall, International Editions (1989)
- ² مقدمه ای بر نورشناخت نیمه رساناها، ناصر پیغمبریان، استفان کوچ، آندره میزیروویچ، ترجمه دکتر حمید رضا مهاجری مقدم، دکتر حبیب تجلی، چاپ اول، انتشارات آستان قدس رضوی، (۱۳۸۰)
- ³ B.G. Streetman, Solid State Electronic Devices, Third Edition, Prentice-Hall (1990)
- ⁴ قطعات نیمه هادی الکترونیک نوری، ب. پالاب، ترجمه شهرام محمد نژاد، چاپ اول، مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه امام حسین، (۱۳۸۱)
- ⁵ J. Wu, W. Walukiewicz, K.M. Yu, J.W. Ager III, E.E. Haller, Hai Lu, and William J. Schaff, Phys. Stat. Sol. (b) **240** 41۴ (2003)
- ⁶ N.W. Ashcroft, and N.D. Mermin, Solid State Physics, Philadelphia, W. B. Saunders, (1976)
- ⁷ C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 6th ed., New York: Wiley, (1986)
- ⁸ B. Gil, Group III-Nitride Semiconductor Compounds, Physics and Applications, oxford university press, (1998)
- ⁹ S. Nakamura, T. Makai, and M. Senoh. Appl. Phys. Lett. ,**64**, 1687 (1994)
- ¹⁰ H. Morkoc, Nitride Semiconductors and Devices, ed. By R. Hull, R.M. Osgood, Jr., H. Sakaki, and A. Zunger, Springer-Verlage, (1999)
- ¹¹ H. Haratizadeh, Optical Characterization of GaN/AlGa_N Quantum Well Structures, (Thesis), Linkoping studies in science and Technology, Linkoping (2004)
- ¹² B. Gil, Low-Dimensional Nitrides Semiconductors, oxford university press, (2002)
- ¹³ S. Strite, and H. Morkoc, GaN, AlN, and InN: A review, J.Vac. Sci. Technol. ,**B10**, 1237 (1992)
- ¹⁴ W.C. Johnson, J.B. Parson, and M.C. Crew, J. Phys. Chem. **36**, 2561 (1932)
- ¹⁵ R. Juza, and H. Hahn, Zeitschr. Anorgan. Allgem. Chem. **239** 28۴ (1938)
- ¹⁶ H.P. Maruska, and J.J. Tietjen, Appl. Phys. Lett. **15**, 32۴ (1962)
- ¹⁷ J.I. Pankove, J.E. Berkeyheiser, H.P. Maruska, and J. Wittke, Solid State Commun. **8**, 1051 (1970)
- ¹⁸ D.L. Camphausen, and G.A.N. Connell, J. Appl. Phys. **42**, 4438 (1971)
- ¹⁹ E.K. Sichel, and J.I. Pankove, J. Phys. Chem. Solids, **38**, 33۴ (1977)
- ²⁰ D.D. Manchen, Jr., A.S. Barker, Jr., P.J. Deen, and R.b. Zetterstorm, Solid State Commun. **8**, 1227 (1970)

- ²¹ R. Cingolani, M. Ferrara, M. Lugara, and G. Scamarcio, *Solid State Commun.* **58**, 823 (1986)
- ²² H.G. Grimmeiss, and B. Monemar, *J. Appl. Phys.* **41**, 4054 (1970)
- ²³ R. Dingle, and M. Ilegems, *Solid State Commun.* **9**, 175 (1971)
- ²⁴ R.D.D. Sell, S.E. Stokowski, and M. Ilegems, *Phys. Rev. B*, **4**, 1211 (1971)
- ²⁵ E. Ejder, *Phys. Status Solidi A*, **6**, 445 (1971)
- ²⁶ K. Matsubara, and T. Takagi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **22**, 515 (1982)
- ²⁷ A.S. Barker and M. Ilegems, *Phys. Rev.* **B7**, 745 (1973)
- ²⁸ W.M. Yim, E. J. Stofko, P.J. Zanzucchi, J.I. Pankove, and S. Gilbert, *J. Appl. Phys.* **44**, 295 (1973)
- ²⁹ P.B. Perry, and R.F. Rutz, *Appl. Phys. Lett.* **33**, 319 (1978)
- ³⁰ K. Kawabe, R.H. Tredgold, and Y. Inuishi, *Elect. Eng. Jpn.* **87**, 62 (1967)
- ³¹ G. A. Cox, D.O. Cunmins, K.Kawabe, and R.H. Tredgold, *J. Phys. Chem. Solids*, **28**, 543 (1967)
- ³² J.Pastrnak and L. Roskocava, *Phys. Status Solidi*, **14**, K5 (1966)
- ³³ J. Duchene, *Thin Solid Films*, **8**, 69 (1971)
- ³⁴ I. Akasaki and H. HHashimoto, *Solid State Commun.* **5**, 155 (1967)
- ³⁵ E.A. Irene, V.J. Silvestri, and G.R. Woolhouse, *J. Electron. Mater.* **4**, 409 (1975)
- ³⁶ J. Bauer, L. Biste, and D. Bolze, *Phys. Statuse Solidi*, **A39**, 175 (1977)
- ³⁷ H. Ott, *Zeitschr. Physik*, **22**, 205 (1924)
- ³⁸ G.A. Slack, and T. E. Menelly, *J. Cryst. Growth.* **34**, 265 (1976)
- ³⁹ C.F. Cline and J. Kahn, *J. Electro. Chem. Soc.* **110** 775 (1963)
- ⁴⁰ T. Davies and P.Evans, *Nature*, **207** 254 (1965)
- ⁴¹ G. Jungk, H. Neumann, and H. Raidt, *Phys. Statuse Solidi A*, **49**, 629 (1978)
- ⁴² M. Matloubian and M. Gershenzon, *J. Electron. Mater.* **14**, 635 (1985)
- ⁴³ K. Itoh, H. Amano, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, 1604 (1991)
- ⁴⁴ K. Hayashi, K. Itoh, N. Sawaki, and I. Akasaki, *Solid State Commun.* **77**, 115 (1991)
- ⁴⁵ S. Yoshida, S. Misawa, and S. Gonda, *J. Appl. Phys.* **53**, 6844 (1982)
- ⁴⁶ M.R Khan, Y.Koide, H. Itoh, N. Sawaki, and I. Akasaki, *Solid State Commun.* **60**, 509 (1986)
- ⁴⁷ I. Akasaki, and H. Amano, *Inst. Phys. Conf. Ser.* **142** 7 (1996)
- ⁴⁸ J.H. Davies, *The Physics of Low-Dimensional Semiconductors, An Introduction*, Cabridge University Press (1998)

- ⁴⁹ G.D. Gilliland, *Materials Science and Engineering*, **R18**, 99-400 (1997)
- ⁵⁰ S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sata, and S. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 4188 (1996)
- ⁵¹ F. Karlsson, *Single Quantum Dot Spectroscopy by Means of Micro-Photoluminescence with Resonant Excitation*, (Thesis), Linkoping studies in science and Technology, Linkoping (1999)
- ⁵² J. Dalfords, *Photoluminescence Studids of the electronid Structures in some III-V Quantum Structures*, (Thesis), Linkoping studies in science and Technology, Linkoping (1999)
- ⁵³ J. Singh, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 2694 (1994)
- ⁵⁴ G. Bastard, E.E. Mendez, L.L. Chang, and L. Esaki, *Phys. Rev. B* **48**, 4687 (1993)
- ⁵⁵ S.C. Jain, M. Willaner, j. Narayan, R. Van Overstraeten, *J. Appl. Phys.* **87**, 965 1006 (2000)
- ⁵⁶ H. Amano, T. Takeuchi, S. Sata, H. Sakai, I. Akasaki, *Mater. Res. Soc. Proc.* **449** 1143 (1997)
- ⁵⁷ K.k. Bajaj, *Materials Science and Engineering* **R34**, 59-120 (2001)
- ⁵⁸ B. Monemar, H.Haratizadeh, P.P.Poskov, G.Pozina, P.O.Holtz, J.P.Bergman, S. Kamiyama, M. Iwaya, H. Amano, and I.Akasaki, *Phys. Stat. Sol. (b)* **237**, 353 364 (2003)
- ⁵⁹ H. Haratizadeh, B. Monemar, P.P. Poskov, P.O.Holtz, E. Valcheva, P. Persson, M.Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, and I.Akasaki, submitted to *Journal Applied Physics* (2004)
- ⁶⁰ M. Gallart, P. Lefebvre, M. Morel, T. Taliercid, B. Gil, J. Allegre, H. Mathieu, B. Damilano, N. Grandjean, and J. Massies, *Phys. Stat.Sol. (a)*, **183** 61 (2001)
- ⁶¹ N. Grandjean, J. Massies, and M. Leroux, *Appl. Phys. Lett.* **74**, No.16 (1999)
- ⁶² B. Monemar, H. Haratizadeh, P.P. Paskove, J.P. Bergman, E. Valcheva, B.Arnaudov, A. Kasic, P.O. Holtz, G. Pozina, S. Kamiyama, M. Iwaya, H. Amano, and I. Akasaki, *Phys. Stat. Sol. (c)*, 10 (2004)
- ⁶³ V. Fiorentini, F. Bernardini, F. Della sala, A. Dicarlo, and P. Lugli, *Phys. Rev. B* **60**, 8849 (1999)
- ⁶⁴ P. BigenWald, P.Lefebvre, T. Bretagnon, and B. Gil, *Phys. Stat. Sol. (b)*, **216371** (1999)

⁶⁵ فیزیک الکترونیک و تکنولوژی نیمه هادیها، دکترادیبی، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیر کبیر (۱۳۷۵)

بخش دوه

مقالات ارائه شده در کنفرانسهای بین المللی

مقاله اول

مطالعه افت و خیز آماری پهنای نانو ساختار گالیم نیتراید به روش اپتیکی

طیسی، فروغ السادات؛ هراتی زاده، حمید؛ مومنا، بو؛ آمانو، هیروشی

منتشر شده در مقاله نامه یازدهمین گردهمایی فیزیک ماده چگال،

مرکز تحصیلات تکمیلی در علوم پایه - زنجان (۷۰-۷۳)،

۵ و ۶ خرداد ماه ۱۳۸۴

مقاله اول

مطالعه افت و خیز آماری پهنای نانو ساختار گالیم نیترااید به روش اپتیکی

طبسی، فروغ السادات؛ هراتی زاده، حمید؛ موممار، بو؛ آمانو، هیروشی

منتشر شده در مقاله نامه یازدهمین گردهمایی فیزیک ماده چگال،

مرکز تحصیلات تکمیلی در علوم پایه - زنجان (۷۰-۷۳)،

۵ و ۶ خرداد ماه ۱۳۸۴

مطالعه افت و خیز آماری پهنای نانو ساختار گالیم نیتراید به روش اپتیکی

طیسی^۱، فروغ السادات؛ هراتی زاده^۱، حمید؛ مومار^۲، بو؛ آمانو^۳، هیروشی

^۱ گروه فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ انستیتیوی فیزیک و تکنولوژی سنجش دانشگاه لیشوپینگ، لیشوپینگ، سوئد

^۳ انستیتیوی مهندسی برق و الکترونیک دانشگاه میجو، ناگویا، ژاپن

چکیده

ما مطالعه طیف اپتیکی سه نمونه از نانو ساختار چاههای کوانتومی چندگانه $GaN/Al_xGa_{1-x}N$ ($x=7\%$) که با روش MOCVD رشد داده شده اند را بررسی می کنیم. بیک فتولومینسانس نمونه ها دارای یک شکافتگی می باشد. بررسی اختلاف انرژی شکاف طیف فتولومینسانس نمونه ها و مطالعه تغییر رفتار آنها بر اثر تغییر شدت نور تحریکی موید آن است که این شکافتگی به خاطر افت و خیز در فصل مشترک GaN و $AlGaN$ می باشد و نشان دهنده وجود دو ناحیه با اختلاف ضخامت $\sim 2ML$ (معادل با بردار C شبکه ورتسایس GaN) است که اکسیتونها قبل از بازترکیب نوری در این نواحی جایگزیده می شوند. این مطالعه نشان می دهد که فتولومینسانس به عنوان یک تکنیک بسیار توانمند در مطالعه ریز ساختارهای مواد نیمه رسانا می تواند به کار گرفته شود.

مقدمه

در سه دهه اخیر شواهد قابل ملاحظه ای از پیشرفت و توسعه تکنولوژی رشد برآراستی باریکه مولکولی (MBE) و رسوب بخار شیمیایی (MOCVD) مشاهده شده است که رشد نیمه هادیهای با کیفیت بالا را موجب شده و باعث تنوع جالب توجه نانو ساختارهایی از قبیل چاههای کوانتومی، سیمهای کوانتومی و نقاط کوانتومی شده است. کاربرد گسترده ساختارهایی که اساسشان بر چاههای کوانتومی است در قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی از جمله دیودهای نوری LEDs، دیودهای لیزری LDs و آشکارسازها تایید شده است. این ساختارها عموماً دارای سطوح مشترک بین دو نیمه هادی با گاف انرژی متفاوت هستند و کیفیت رشد این سطوح تاثیر بسزایی روی عملکرد قطعات بویژه خواص اپتیکی آنها دارد. تکنولوژی نوری فتولومینسانس ابزار قدرتمندی است که توصیف خوبی از کیفیت آلیاژها و سطوح مشترک در ساختارهای چندگانه با استفاده از گذارهای اکسیتونی را ارائه می دهد. در ساختارهایی مثل چاههای کوانتومی چندگانه، سطح مشترک چاهها و سدها صاف و یکنواخت نیست بلکه از نظر میکروسکوپی دارای افت و خیزهایی است که این افت و خیزها نقش مهمی را در جایگزیدگی اکسیتونها و در نتیجه فرآیند بازترکیب دارند و این فرآیندها بخوبی به وسیله تکنیک فتولومینسانس قابل بررسی هستند.

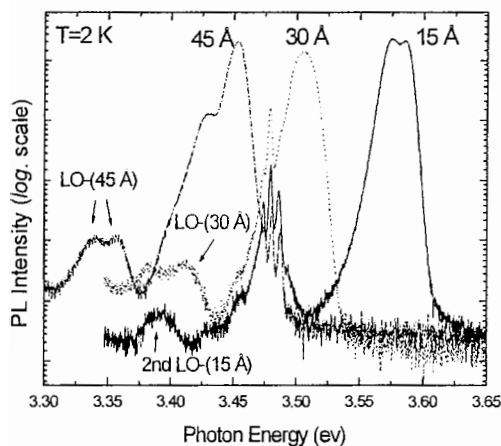
نمونه ها و روش آزمایش

سه نمونه از نانو ساختار چاههای کوانتومی چندگانه $GaN/Al_xGa_{1-x}N$ به روش رسوب بخار شیمیایی روی زیرلایه اکسید آلومینیم در راستای (۰۰۱) رشد داده شده است. این نمونه ها بدون آلیش می باشند و ناحیه فعال آنها متشکل از پنج لایه متناوب از $Al_xGa_{1-x}N$ ($x=7\%$) به ضخامت ۷ نانومتر (به عنوان سد) و GaN به عنوان چاه است که با ضخامتهای متفاوت $3nm-1.5nm$ و $4/5nm$ رشد یافته اند. مطالعه اپتیکی نمونه ها به روش فتولومینسانس و در دمای هلیوم مایع (۲K) انجام شده است. لیزر پیوسته با طول موج $266nm$ به عنوان منبع نوری تحریک کننده در

سیستم فتولومینسانس بکار گرفته شده است. سیگنال فتولومینسانس به وسیله یک تکفام ساز پراشیده شده و به وسیله یک آشکارساز UV در دماهای مختلف از دمای هلیوم مایع تا دمای اتاق آشکارسازی شده است. آشکارساز مورد استفاده با نیتروژن مایع خنک می گردد تا سیگنالهای نویز به حداقل ممکن برسد. [۱]

تحلیل نتایج و بحث

شکل (۱) طیف فتولومینسانس مربوط به نمونه ها را در دمای هلیوم مایع (۲K) نشان می دهد. آنچنان که ملاحظه می شود طیف گسیلی از چاههای کوانتومی مربوط به نمونه های ۱/۵nm و ۳nm نسبت به پیک مربوط به GaN کپه ای (۳/۴۸eV) به دلیل "اثر محدودیت کوانتومی" به طرف انرژیهای بالاتر شیفت یافته است. درحالیکه چاه ۴/۵ نانومتری دارای لومینسانس گسیلی با انرژی کمتر از GaN کپه ای است. که این به دلیل اثر کوانتومی استارک ناشی از میدانهای داخلی پیروالکترونیک و خودبخودی می باشد.



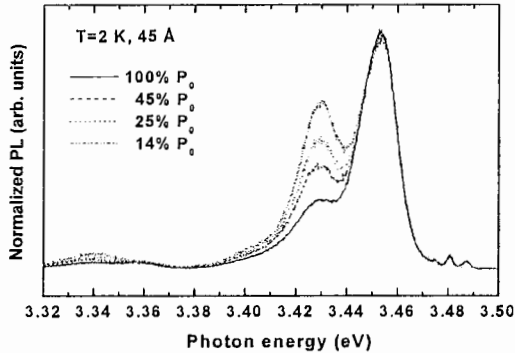
شکل ۱: طیف فتولومینسانس از چاههای کوانتومی چندگانه با ضخامتهای ۱/۵-۳ و ۴/۵ نانومتر در دمای ۲K

طیف مربوط به چاههای ۱/۵nm و ۴/۵nm به وضوح به دو قله شکافته است که این امر معرف وجود تغییر ضخامت چاه و جایگزیدگی اکسیتونها در دو ناحیه با پهنای متفاوت در هر یک از این نمونه ها می باشد. اختلاف انرژی بین دو شکافتگی برای نمونه ۱/۵nm حدود ۲۰meV و برای نمونه ۴/۵nm حدود ۲۰meV می باشد. مشاهده این شکافتگی در طیف فتولومینسانس معرف آن است که پهنای طیف در نمونه ۱/۵nm برای هر یک از ناحیه هایی که اکسیتونها جایگزیده شده اند، کمتر از ۲۰meV می باشد. که این قابل قیاس با بهترین نمونه هایی است که توسط روش برآستی باریکه مولکولی (MBE) رشد یافته اند [۲].

با استفاده از معادله شرودینگر وحل آن برای یک چاه پتانسیل مربعی کم عمق که توسط میدان الکتریکی اغتشاش یافته است، می توان ترازهای انرژی مربوط به الکترونها و حفره ها را در چاههای با پهنای مختلف بدست آورد و از روی آن انرژی گسیلی را محاسبه کرد که انرژی گسیلی باید با انرژی مربوط به قله طیف فتولومینسانس همخوانی داشته باشد. محاسبات توافق خوبی بین مقادیر انرژی بدست آمده و مقادیر اندازه گیری شده به روش فتولومینسانس را نشان می دهند [۳و۴].

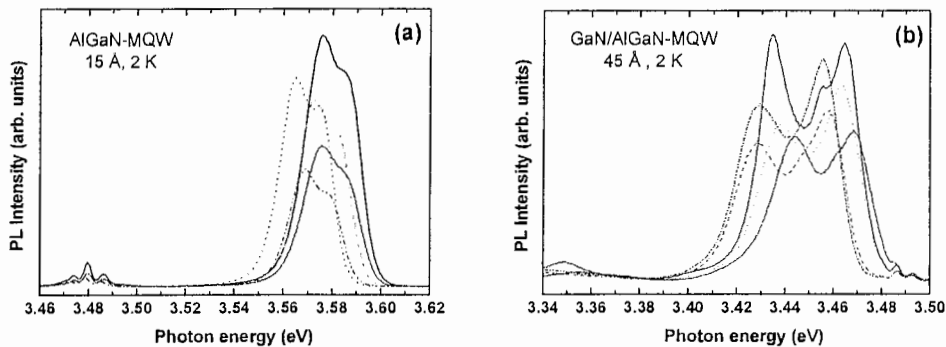
محاسبات و همچنین نتایج تجربی حاصل از اندازه گیریهای فتولومینسانس براساس تغییرات شدت نور فرودی نشان می دهد که شکافتگی پیک فتولومینسانس نمونه های ۱/۵nm و ۴/۵nm به دلیل افت و خیز سطح مشترک GaN و AlGaIn می باشد که این افت و خیزها نواحی ای با اختلاف ضخامت ۵/۲Å (۲ML) را موجب می شود به گونه ای که اکسیتونها در این نواحی جایگزیده شده و باز ترکیب نوری آنها فتونهایی با اختلاف انرژی ۱۰meV برای نمونه ۱/۵nm و ۲۰meV برای نمونه ۴/۵nm گسیل میدارند. این موضوع توسط شواهد تجربی دیگری از جمله بررسی تغییرات دمایی طیف فتولومینسانس نمونه ها از دمای هلیوم مایع تا دمای اتاق و همچنین بررسی تغییرات

شدت فتولومینسانس بر حسب تغییر شدت نور تحریکی لیزر فرودی قابل اثبات است. تغییرات دمایی طیف فتولومینسانس نمونه ها (شکل در اینجا نشان داده نشده است) به وضوح نشان می دهد که در اثر افزایش دما الکترونها با کسب انرژی گرمایی چاههای پهن تر (با انرژی گسیلی کمتر) را ترک گفته و به چاههای باریکتر (در انرژیهای بالاتر) می روند در نتیجه با افزایش دما پیک مربوط به انرژی کمتر به سرعت از بین رفته و فقط لومینسانس چاههای باریکتر در دمای بالا (حدود 130 K برای چاه $1/5\text{ nm}$) قابل مشاهده می باشد.



شکل ۲: تغییرات شدت فتولومینسانس برای چاه کوانتومی $1/5\text{ nm}$

نمونه $1/5\text{ nm}$ بر حسب تغییرات شدت نور لیزر فرودی می باشد، موبد این موضوع است. این سنجش برای نمونه $1/5\text{ nm}$ نیز انجام شده است و نتیجه مشابهی را نشان می دهد (شکل در اینجا نشان داده نشده است). یک تجربه دیگر که شامل اندازه گیری شدت فتولومینسانس در نقاط مختلف در عرض نمونه ها می باشد به ما کمک می کند که در مورد میدان پلاریزاسیون موضعی در داخل نمونه ها و همچنین وضعیت تغییرات پهنای چاه در نقاط مختلف به مطالعه بپردازیم. سنجش فوق جابجایی هایی را در موقعیت قله های فتولومینسانس نمونه ها مطابق با شکل (۳) نشان می دهد.

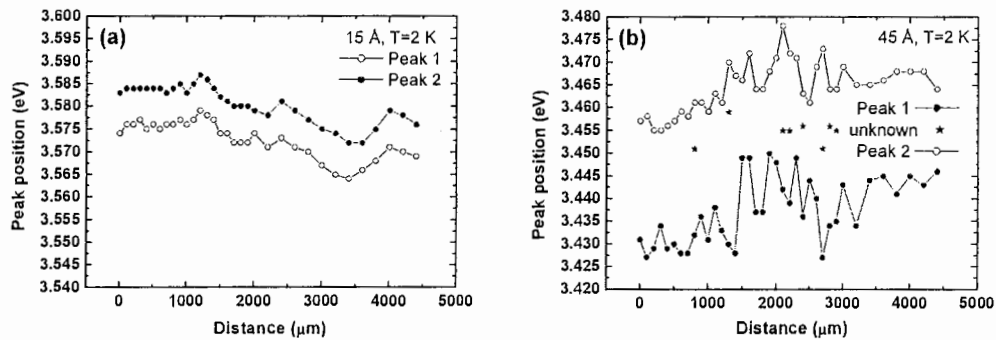


شکل ۳: جابجایی قله های فتولومینسانس در چاههای $1/5\text{ nm}$ و $1/5\text{ nm}$

هنگامیکه باریکه نور لیزر فرودی در عرض نمونه ها جابجا می شود

جابجاییهای فوق به خاطر تغییر میدان پیزوالکتریک در داخل نمونه ها از نقطه ای به نقطه دیگر است به گونه ای که تغییرات موضعی میدان الکتریکی داخلی باعث تغییر در میزان شیفت انرژی بدلیل اثر کوانتومی استارک می گردد. شکل (۴) اندازه گیری فتولومینسانس دو نمونه $1/5\text{ nm}$ و $1/5\text{ nm}$ برای نقاط نزدیک به هم و به فاصله $100\text{ }\mu\text{m}$ از یکدیگر را نشان می دهد که در آن تغییرات محل پیک فتولومینسانس بر حسب فاصله نقطه مورد مطالعه از لبه نمونه

رسم شده است. شکافتگی انرژی برای نمونه $1/5\text{nm}$ تقریباً در سرتاسر آن به میزان ثابت 10meV می باشد ولی در نمونه $4/5\text{nm}$ افت و خیز بیشتری مشاهده می گردد. این افت و خیزها به همراه جابجایی پیکهای لومینسانس ناشی از تغییرات محلی میدان الکتریکی داخلی به دلیل وجود تنشهای موضعی در مرحله رشد نمونه و نیز غیر یکنواختی توزیع Al در سد AlGaN می باشد که باعث تغییر میدان موضعی می گردد. این موضوع توسط تصاویر TEM تایید شده است (شکل در اینجا نشان داده نشده است) [۵ و ۳].



شکل ۴: تغییرات ۱۰۰ میکرونی از جابجایی قله های فتولومینسانس در سرتاسر دو نمونه $1/5\text{nm}$ و $4/5\text{nm}$

نتیجه گیری

مطالعه اپتیکی نمونه های موجود نشان دهنده افت و خیز پهنای چاه به اندازه یک بردار C شبکه ورتسایتس GaN (۲ML) می باشد. طیف فتولومینسانس نمونه ها در دمای پایین یک ساختار دو قله ای را نشان می دهد که معرف وجود دو ناحیه با پهنای متفاوت برای جایگزیدگی اکسیتونها است. از روی تغییرات شدت فتولومینسانس و همینطور با محاسبات حاصل از حل معادله شرودینگر برای یک چاه پتانسیل مربعی کم عمق اغتشاش یافته توسط میدان الکتریکی توافقی خوبی بین محاسبه پهنای چاه کوانتومی و داده های آزمایشگاهی بدست می آید.

مراجع

1. B. Monemar, H.Haratizadeh, P.P.Poskov, G.Pozina, P.O.Holtz, J.P.Bergman, S. Kamiyama, M.Iwaya, H. Amano, and I.Akasaki, *Phys. Stat. Sol. (b)* ۲۳۷, ۳۵۳-۳۶۴ (۲۰۰۳)
2. M. Leroux, N. Grandjean, M.Laugt, J. Massies, B. Gil, P. Lefebvle, and P. Bigenwald, *Phys. Rev. B*, ۵۸, R۱۳۳۷۱ (۱۹۹۸)
3. H. Haratizadeh, B. Monemar, P.P. Poskov, P.O.Holtz, E. Valcheva, P. Persson, M.Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, and I.Akasaki, *submitted to Journal Applied Physics* (۲۰۰۴)
4. J. Singh, *Appl. Phys. Lett.* ۶۴, ۲۶۹۴ (۱۹۹۴)
5. N. Grandjean, J.Massies, and M.Leroux, *Appl. phys.lett.* ۷۴, No. ۱۶ (۱۹۹۹)

" اثر محدودیت کوانتومی : Quantum Confinement Effect "

مقاله دوه

Dynamical study of the radiative recombination processes in GaN/AlGaN QWs

M. Sabooni, M. Esmaili, F. Tabasi, H. Haratizadeh, B. Monemar, H. Amano

Accepted in 6th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS6),

Bremen, Germany August 28 - September 2, 2005

مقاله دوه

Dynamical study of the radiative recombination processes in GaN/AlGaN QWs

M. Sabooni, M. Esmaili, F. Tabasi, H. Haratizadeh, B. Monemar, H. Amano

Accepted in 6th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS6),

Bremen, Germany August 28 - September 2, 2005

Dynamical study of the radiative recombination processes in GaN/AlGaN QWs

M. Sabooni¹, M. Esmacili¹, F. Tabasi¹, H. Haratizadeh^{1,2}, B. Monemar², H. Amano³

¹) *Department of Physics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran*

²) *Department of Physics and Measurements Technology, Linköping University,
S-581 83 Linköping, Sweden*

³) *Department of Electrical and Electronic Engineering, Meijo University, 1-501
Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya 468, Japan*

PACS 78.47.+p, 78.55.Cr, 78.67.De

The effects of the Si doping level on the recombination dynamics and carrier (exciton) localization in modulation-doped GaN/Al_{0.07}Ga_{0.93}N multiple-quantum well (MQW) structures were studied by means of photoluminescence (PL) and time-resolved PL measurements. All samples with different doping levels show a QW emission which is blue shifted with respect to the 3.48 eV PL peak from the GaN buffer layer. The decay time at the peak position remains nearly constant in the range of 320-420 ps at 2 K for all doping levels. For the undoped and lowdoped samples (3×10^{18} cm⁻³), which have less free electrons in the QWs, a non-exponential PL decay behaviour at 2 K is attributed to localized exciton recombination. The more highly doped samples (5×10^{18} cm⁻³ to 10^{20} cm⁻³) show almost exponential decay curves at 2 K, suggesting the recombination of free electrons and localized holes. The internal polarization-induced fields of the medium and highly-doped samples are partly screened by the electrons originating from the doping in the barriers. The emission peaks in time delayed PL spectra of these samples exhibit almost no shift as time evolves. Only the PL peak of the undoped and low-doped samples shows a redshift with time delay, related to the photogenerated carriers [1]. The decay time for the undoped sample shows non-exponential behaviour typical for localized excitons in III-N QWs. The same behaviour of decay time as a function of emission energy has been reported for InGaN QWs [2].

[1] H. Haratizadeh, B. Monemar, P. P. Paskov, P. O. Holtz, G. Pozina, S. Kamiyama, M. Iwaya, H. Amano, and I. Akasaki; *Phys. Status Solidi B* **241**, 1124 (2004).

[2] C. K. Choi, Y. H. Kwon, B. D. Little, G. H. Gainer, and J. J. Song, Y. C. Chang, S. Keller, U. K. Mishra, and S. P. DenBaars, *Phys. Rev. B* **64**, 245339 (2001).

مقاله سوه

تأثیر محل آرایش سیلیکونی در خواص نوری چاههای کوانتومی نیتروژن دار

هراتی زاده، حمید؛ طبسی، فروغ السادات؛ هولتز، پراولاف؛ کامی یاما

منتشر شده در ششمین مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران

۷ تا ۱۰ شهریور ۱۳۸۴، دانشگاه لرستان

مقاله سوه

تأثیر محل آرایش سیلیکونی در خواص نوری چاههای کوانتومی نیتروژن دار

هراتی زاده، حمید؛ طبسی، فروغ السادات؛ هولتز، پراولاف؛ کامی یاما

منتشر شده در ششمین مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران

۷ تا ۱۰ شهریور ۱۳۸۴، دانشگاه لرستان

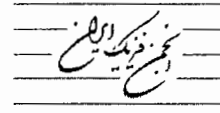


سال جهانی فیزیک - ایران ۱۴۸۴
WORLD YEAR OF PHYSICS - IRAN 2005



کنفرانس فیزیک ایران

۷ تا ۱۰ شهریور ۱۳۸۴
خرم آباد، دانشکده لرستان



دانشکده لرستان

تأثیر محل آرایش سیلیکونی در خواص نوری چاههای کوانتومی نیتروژن دار

هراتی زاده، حمید^{۱،۲}؛ طبسی، فروغ السادات^۱؛ هولتز، پراولاف^۲

^۱گروه فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، بلوار دانشگاه، شاهرود

^۲انستیتوی فیزیک و تکنولوژی سنجش دانشگاه لینشوپینگ، لینشوپینگ، سوئد

چکیده

ما در این مقاله نتایج مطالعه اپتیکی سه نمونه از چاههای چندگانه کوانتومی $GaN/Al_xGa_{1-x}N$ که توسط سیلیکون در نقاط مختلف آرایش یافته اند را گزارش می‌کنیم. این مطالعه به روش فتولومینسانس انجام گرفته است. نمونه اول در ناحیه سد، نمونه دوم هر دو ناحیه چاه و سد و نمونه سوم در ناحیه چاه توسط Si و با چگالی یکسان آرایش یافته اند. در نمونه اول و دوم گسیل از چاههای چندگانه کوانتومی بالاتر از گاف انرژی GaN است. اما در نمونه سوم که چاه آرایش یافته است یک شیفت قابل ملاحظه به سمت انرژی های کم (انتقال قرمز) مشاهده می‌شود. انتقال انرژی گسیلی در نمونه آرایش یافته در چاه به دلیل اندرکنش بین الکترون-الکترون در بین الکترونها می‌باشد که در افت و خیز پتانسیل ته چاه ناشی از حضور یونها مثبت Si ایجاد شده است.

Effect of Si-doping position on optical properties of nitride quantum well

H. Haratizadeh^{1,2}; F.S. Tabasi¹; P.O. Holtz²

¹Department of Physics, Shahrood University, Shahrood,

²Department of Physics and Measurement Technology, Linköping University, Linköping, Sweden

Abstract

The effects of Si doping on the emission energy in a set of GaN/AlGaN multiple quantum well (MQW) samples with different position of the dopant layer were studied by means of photoluminescence (PL) measurements. When the doping is in the barrier and in both barrier and well, the MQW emission appears above the GaN band gap, while the sample doped in the well shows a redshifted emission. The redshift is attributed to the self-energy shift of the electron states due to the correlated motion of the electrons exposed to the fluctuating potential of the donor ions.

PACS No. (78,73)

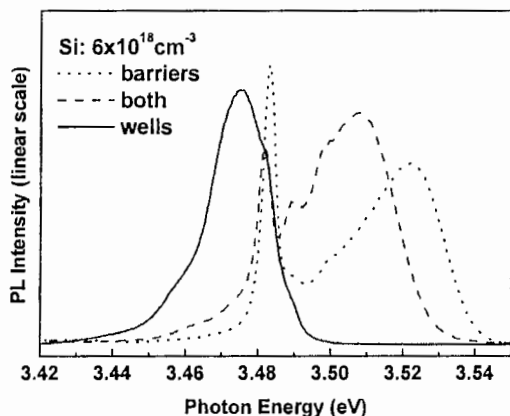
مقدمه

یکی از خصوصیات نیمه رساناهای نیتروژن دار حضور میدانهای قطبشی قوی در داخل این ساختارها است که ناشی از میدانهای پیروالکتتریک و خودبخودی می‌باشد. امروزه اکثر LEDها و LDها در ناحیه فعال خود از نانو ساختارهای کوانتومی نیتروژن دار استفاده می‌کنند. میدانهای قطبشی داخلی در چاه های کوانتومی تأثیر زیادی روی خصوصیات اپتیکی نمونه دارند و مکان طیفی قله فتولومینسانس و همچنین مکانیزم بازترکیب حاملها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این ساختارها سعی می‌گردد که میدانهای قطبشی داخلی توسط آرایش Si استتار گردد تا در نتیجه راندمان نوری قطعات اپتیکی افزایش یابد. تأثیر این آرایش از نظر میزان و محل آن باید به دقت مورد مطالعه قرار گیرد.

نمونه ها و روش آزمایش

نمونه های مورد مطالعه از چاههای کوانتومی $GaN/Al_xGa_{1-x}N$ با Si در نواحی مختلف (سد، چاه، سد و چاه) و با چگالی یکنواخت $6 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ آرایش یافته اند. ساختارهای چاه کوانتومی روی زیر لایه اکسید آلومینیم در راستای (0001) بوسیله روش MOCVD رشد داده شده اند. در بالای زیر لایه یک لایه بافر AlN به ضخامت 20nm در دمای کم و یک لایه میانی ضخیم بدون ناخالصی از GaN (حدود $2 \mu\text{m}$) رشد داده می‌شود. ساختار با یک تناوب پنج تایی از چاههای کوانتومی ادامه پیدا می‌کند. ضخامت چاه و سد برای نمونه هایی که آرایش سیلیکونی آنها در سد انجام شده به ترتیب 31\AA و 76\AA ، برای آرایش در چاه

خیزهای پتانسیل می شوند و حرکت الکترونها در این افت و خیزهای پتانسیل باعث می شود که ترازهای الکترونی به سمت پایین شیفیت پیدا کنند و به طور مشابه در سمت دیگر از چاه کوانتومی حفره ها در این افت و خیزها جایگزیده شده و ترازهای حفره به سمت بالا شیفیت پیدا می کنند که موجب انتقال انرژی گسیلی چاه به سمت انرژیهای کمتر (انتقال قرمز) می گردد. [۲]



شکل ۱: طیف فتولومینسانس حاصل از نمونه های با محل آرایش متفاوت در دمای 2K

با بررسی وابستگی دمایی مکان قله فتولومینسانس برای سه نمونه مشاهده می شود که در نمونه های اول و دوم فرآیند بازترکیب مکانیزم مشابهی دارد زیرا تفاوت بین انرژی قله های فتولومینسانس در دو نمونه فوق از دمای پایین تا دمای اتاق تقریباً یکسان است در حالیکه اختلاف انرژی پیک مربوط به نمونه سوم با نمونه دوم از مقدار 33meV در دمای 2K به 18meV در دمای اتاق کاهش پیدا می کند که نشانگر تفاوت مکانیزم بازترکیب در این نمونه می باشد و این تفاوت به دلیل حضور یونهای Si در داخل چاه در نمونه سوم است. با افزایش دمای نمونه از دمای پایین تا دمای اتاق الکترونها به دلیل تحریک حرارتی از داخل افت و خیزهای پتانسیل مربوط به حضور یونها در کف چاه خارج شده و اختلاف انرژی ناشی از بازترکیب آنها با نمونه دوم در دمای اتاق تا 18meV کاهش می یابد. در تمام نمونه ها بویژه نمونه سوم که چاه دارای آرایش دارد یک رفتار به شکل S در وابستگی دمایی مشاهده می شود که ناشی از بازترکیب حالتیهای جایگزیده است و انرژی جایگزیدگی را با مقایسه میزان جابجایی پیک ها به راحتی می توان تعیین نمود.

34Å و 87Å و برای آرایش در سد و چاه با هم 33Å و 79Å می باشد. ضخامت لایه ها در ساختار چاههای کوانتومی چندگانه با آزمایش پراش اشعه X بدست می آید) آزمایشات در گستره دمایی 2-300K انجام شده و برای برانگیختگی اپتیکی از یک باریکه لیزر با طول موج پیوسته $\lambda=266$ nm استفاده شده است. سیگنال PL بوسیله یک توری تک رنگ کننده پراشیده می شود و با یک دتکتور CCD که با هلیوم مایع خنک می شود آشکار سازی می شود.

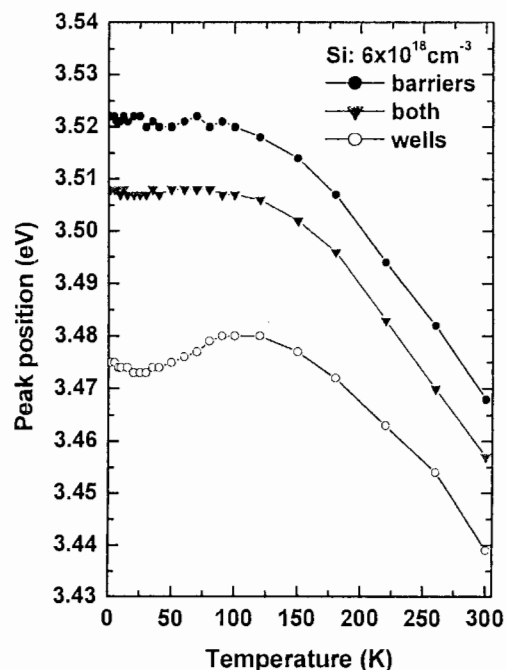
تحلیل نتایج و بحث

شکل (۱) طیف فتولومینسانس مربوط به سه نمونه با مکان آرایشهای مختلف را در دمای هلیوم مایع (2 K) نشان می دهد. در طیف مربوط به نمونه ای که سد آن آرایش یافته و نمونه ای که سد و چاه هر دو آرایش یافته اند یک شیفیت به سمت انرژی های بالاتر نسبت به GaN کپه ای (3/48eV) مشاهده می شود. وجود میدانهای داخلی در نمونه ها سبب اثر کوانتومی استارک و در نتیجه شیفیت انرژی گسیلی به سمت انرژیهای کمتر (انتقال قرمز) می گردد. اما در اثر استتار میدانهای داخلی توسط اتمهای Si اثر کوانتومی استارک کاهش یافته و انرژی گسیلی به طرف انرژیهای بالاتر انتقال می یابد. از طرفی در طیف حاصل از نمونه ای که چاه آرایش یافته دارد یک شیفیت قابل ملاحظه به سمت انرژیهای پایین تر از GaN کپه ای مشاهده می شود. این شیفیت را با توجه به عدم حضور حاملهای ذاتی در چاه و اختلاف جزئی عرض چاه (حدود 34Å) نمی توان توضیح داد زیرا عرض چاه در این نمونه 34Å است که از ضخامت بحرانی (برای ساختار چاههای چندگانه GaN/Al_xGa_{1-x}N حدود 40Å) کمتر است و در نتیجه اثر محدودیت کوانتومی باید موجب گسیل انرژی در انرژیهای بالاتر از GaN کپه ای گردد [۱]. ولی در عمل همانگونه که در شکل (۱) ملاحظه می گردد انرژی گسیلی از نمونه ای که چاه آرایش یافته است به شکل قابل ملاحظه ای دارای انرژی گسیلی کمتر از GaN کپه ای است که این انتقال قابل ملاحظه انرژی گسیلی به سمت انرژیهای پایین توسط یونهای مثبت Si در داخل چاه قابل توضیح است به شکلی که یونهای دهنده در چاه موجب ایجاد افت و

مرجع ها

[1] K. C. Zeng, J. Y. Lin, H. X. Jiang, A. Salavador, G. Popovici, H. Tang, W. Kim, and H. Morkoç, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 1368 (1997).

[2] H. Haratizadeh, B. Monemar, P. P. Paskov, J. P. Bergman, B.E.Sernelius and P. O. Holtz, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 5071-5073 (2004).



شکل ۲: وابستگی دمایی مکان قله فتولومینسانس برای سه نمونه

نتیجه گیری

ما خصوصیات نوری سه نمونه از چاههای چندگانه کوانتومی GaN/AlGaIn آرایش یافته توسط Si که مکان آرایش آنها به ترتیب در سد، سد و چاه و در چاه می باشد را بررسی کردیم. در نمونه ای که چاه آرایش یافته یک انتقال قابل ملاحظه به سمت انرژیهای کمتر در گسیل از چاه کوانتومی در مقایسه با دو نمونه دیگر مشاهده می شود. این انتقال انرژی گسیلی در نمونه ای که چاه آرایش یافته دارد به دلیل اندر کنش الکترون-الکترون می باشد. یونهای مثبت داخل چاه باعث ایجاد افت و خیزهای پتانسیل می گردند که حرکت الکترونها در این افت و خیزهای پتانسیل باعث رانش ترازهای الکترونی به سمت پایین و به دنبال آن کاهش فاصله ترازهای الکترون و حفره و در نتیجه انتقال قرمز طیف فتولومینسانس گسیلی می گردد. همچنین با استفاده از وابستگی دمایی موقعیت قله ها از دمای 2K تا دمای اتاق به تفاوت نوع فرآیند باز ترکیب در نمونه ها پی می بریم.

Abstract

This thesis is based on the optical studies of the interface roughness of MOCVD-grown undoped GaN/Al_{0.07}Ga_{0.93}N multiple quantum wells (MQWs) structures by means of photoluminescence (PL), micro-PL and TEM techniques. The discrete well width variations by one c-lattice parameter (5.2Å), i.e. two GaN monolayers (2ML) are observed via localized excitons in the photoluminescence (PL) spectra. A doublet peak is observed in low temperature and FWHM varying between 10meV and 25 meV for different well widths (1.5 nm to 4.5 nm). The temperature dependence of the PL intensity of two peaks also supports the observation of two localized exciton states corresponding to different well widths.

By mapping the micro-PL measurements across the samples with different excitation spot size, it is shown that the extension of areas with a constant well width is less than 1μm². TEM pictures obtained for the same samples give evidence of interface roughness. In addition we observe a long-range variation of the PL peak position across the sample, interpreted as a fluctuation in Al composition in the barriers.



*Department of Physics
Master of Science Thesis
Solid State Physics*

*Effect of the Well Width
Fluctuation on the PL of
GaN/AlGaN*

*By:
Foroogh Sadat Tabasi*

*Supervisors:
Dr. Hamid Haratizadeh*

Summer 2005