



دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش حالت جامد

بررسی پدیده آنتی-استوک فتولومینسانس در ترکیبات

نیمرسانای  $\text{GaInNP(As)}$

نگارش: مهدی جعفری

اساتید راهنما:

دکتر حمید هراتی زاده - دکتر مرتضی ایزدی فرد

اسفند ۱۳۸۶

### سپاسگزاری

این پایان نامه و مطالعات انجام شده درباره آن پس از عنایت الهی و حمایت های بی دریغ همسر و پدر و مادر که با ایجاد محیطی آرام ، شرایط را برای پیشبرد پروژه فراهم کردند ، حاصل هدایت های بی شایبه اساتید راهنمای عزیز ، جناب آقای دکتر مرتضی ایزدی فرد و جناب آقای دکتر حمید هراتی زاده می باشد.

## چکیده

ترکیبات نیمرسانای نیتروژن دار رقیق نظیر  $\text{GaInNP(As)}$  به دلیل خواص بسیار جالب و در عین حال غیر عادی آنها در مقایسه با ترکیبات بدون نیتروژن گروه III-V در سالهای اخیر همواره مورد توجه بوده است. کاربرد این ترکیبات نیمرسانا در صنایع اپتوالکترونیک و فوتونیک می باشد که از آنها در ساختن لیزرهای مادون قرمز، دیودهای نور گسیل (LEDs)، سلول های خورشیدی چند پیوند گاهی و نیز ترانزیستورهای دو قطبی ناهمگون (HBTs) استفاده می شود. در این راستا مشاهده پدیده آنتی-استوک فتولومینسانس یا فتولومینسانس وارونه در این ترکیبات که منجر به افزایش بازده انرژی (یا وارونی فرکانس) تا حدود  $700\text{meV}$  می گردد، حایز اهمیت است. از اینرو در این پایان نامه ابتدا به معرفی پدیده آنتی-استوک فتولومینسانس و بررسی مکانیزم های موثر در وارونی انرژی آن پرداخته ایم. سپس گزارش هایی از مشاهده این پدیده در ترکیبات نیمرسانا و کاربرد آن در صنعت نیمرسانا را بررسی کرده ایم. در نهایت بر اساس تحلیل داده های تجربی، نشان داده ایم که تاثیر آرایش نیتروژن روی ساختارهای نیمرسانای بی نظم  $\text{GaInP/GaAs}$  به یک فرایند آنتی-استوک فتولومینسانس قوی منجر می شود. اولین نتیجه بر اساس مطالعات انجام شده این بوده است که بازده فرایند آنتی-استوک فتولومینسانس به طور بحرانی به غلظت نیتروژن وابسته است. پیش بینی ما در توجیه این مساله تغییر نوع ردیف شدگی نواری در فصل مشترک نمونه های مورد مطالعه بدلیل حضور نیتروژن می باشد. علاوه بر آن نتایج حاصل از اندازه گیری ها نشان می دهد که شدت سیگنال آنتی-استوک فتولومینسانس تقریبا به طور خطی با چگالی توان تحریک تغییر می کند. همچنین اندازه گیری های فتولومینسانس وابسته به زمان رفتار غیر تک نمایی زمان واهلش را نشان می دهد. با توجه به

مشاهده سیگنال های آنتی-استوک فتولومینسانس با بازدهی بالا حتی در توان های تحریک بسیار پایین و اندازه گیری پارامترهای وابسته به توان تحریک، به نظر ما مکانیزم جذب دو فوتون دو مرحله ای برای توجیه وارونی انرژی در این فرایند از دیگر مکانیزم ها محتمل تر است.

کلمات کلیدی: فتولومینسانس، آنتی-استوک فتولومینسانس، فتولومینسانس وارونه، فتولومینسانس وابسته به زمان، فتولومینسانس تحریکی.

| صفحه | عنوان        |
|------|--------------|
| الف  | سپاسگزاری    |
| ب    | چکیده        |
| ج    | فهرست مطالب  |
| و    | فهرست شکل ها |
| ی    | فهرست جداول  |
| ۱    | مقدمه        |

## فصل اول: خواص عمومی نیمرساناها

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| ۵ | ۱-۱ ساختار بلوری نیمرسانا.....   |
| ۷ | ۲-۱ نیمرساناهای آلیاژی.....      |
| ۸ | ۳-۱ ساختار نواری نیمرساناها..... |

۱۱ .....MBE روش رشد ۴-۱

۱۳ .....MOVPE روش رشد ۵-۱

۱۵ ..... منابع

## فصل دوم: ترکیبات نیمرسانا و بررسی خواص اپتیکی

۱۸ .....۱-۲ معرفی ترکیبات نیمرسانا

۱۹ .....۲-۲ ساختارهای ناهمگون

۲۰ .....۳-۲ چاه کوانتومط، سطلم کوانتومط، نقطه کوانتومط

۲۱ .....۴-۲ فرایند باز ترکیب در نیمرساناها

۲۵ .....۵-۲ اکسیتون

۲۷ ..... منابع

## فصل سوم: روش های اندازه گیری

۳۰ .....۱-۳ فتولومینسانس (PL)

۳۴ .....۲-۳ فتولومینسانس عادی (NPL)

۳۴ .....۳-۳ فتولومینسانس تحریکی (PLE)

۳۴ .....۴-۳ فتولومینسانس انتخابی (SPL)

۳۵ .....۵-۳ فتولومینسانس وابسته به زمان (TRPL)

۳۸ ..... منابع

## فصل چهارم: آنتی-استوک فتولومینسانس

- ۴۱ ..... ۱-۴ معرفی پدیده آنتی-استوک فتولومینسانس
- ۴۳ ..... ۲-۴ مشاهده آنتی-استوک فتولومینسانس در ترکیبات نیمرسانا
- ۴۳ ..... ۱-۲-۴ بررسی پدیده ASPL در ساختارهای حجمی
- ۴۵ ..... ۲-۲-۴ بررسی پدیده ASPL در ساختارهای ناهمگون
- ۵۱ ..... ۳-۴ مکانیزم های آنتی-استوک فتولومینسانس
- ۵۱ ..... ۱-۳-۴ فرایند جذب دو فوتون یک مرحله ای (TPA)
- ۵۲ ..... ۲-۳-۴ فرایند جذب دو فوتون دو مرحله ای (TS-TPA)
- ۵۴ ..... ۳-۳-۴ فرایند اوژر سرد (Cold Auger)
- ۵۵ ..... ۴-۴ بستگی شدت سیگنال ASPL به توان تحریک
- ۵۶ ..... ۵-۴ مثالی از کاربرد آنتی-استوک فتولومینسانس
- ۶۰ ..... منابع

## فصل پنجم: نتایج حاصل از آنالیز داده ها

- ۶۴ ..... ۱-۵ معرفت نمونه ها و شرح آزماطشات
- ۶۵ ..... ۲-۵ نتایج و آنالیز داده ها
- ۸۴ ..... منابع

مقاله: تاثیر آرایش نیتروژن روی انتی-استوک فتولومینسانس مشاهده شده در

۸۶

نیمرسانای GaInP

## فهرست شکل ها

| شکل   | صفحه |
|---|------|
| (۱-۱) الف) ماده آمورف ب) ماده بلور .  | ۵    |
| (۲-۱) سه یاخته واحد بلور مکعبی، الف) مکعبی ساده ب) مکعبی مرکز حجمی                      | ۶    |
| ج) مکعبی مرکز سطحی.   |      |
| (۳-۱) الف) شبکه الماسی ب) شبکه زینک بلند.   | ۷    |
| (۴-۱) تشکیل نوارهای انرژی وقتی که بلور شبکه الماسی با نزدیک کردن اتم                    | ۱۰   |
| های مجزای سیلیسیوم تشکیل می شود.  |      |
| (۵-۱) طرحواره ای از یک سیستم رشد بلور MBE.  | ۱۲   |
| (۶-۱) نمایی از پیکر بندی MOVPE  | ۱۴   |
| (۱-۲) طرحواره ای از الف) ساختار ناهمگون نوع-I ب) ساختار ناهمگون نوع-                    | ۲۰   |
| II ج) ساختار ناهمگون نوع-III  |      |
| (۲-۲) مثالهایی از ساختارهای ناهمگون GaAs/AlGaAs الف) چاه کوانتومی                       | ۲۱   |
| ب) ابر شبکه. نمودار انرژی ساختارهای فوق نیز نشان داده شده است.                          |      |
| (۳-۲) طرحواره ای از مراکز باز ترکیب تابشی و غیر تابشی.                                  | ۲۳   |
| (۴-۲) باز ترکیب در نیم رساناها. ۱) گذار باند به باند، ۲) گذار مقید به آزاد، ۳) دهنده به | ۲۴   |
| پذیرنده، ۴) گذار آزاد به مقید، ۵) اکسیتون آزاد، ۶) اکسیتون مقید به دهنده                |      |
| خنثی، ۷) اکسیتون مقید به پذیرنده خنثی، ۸) باز ترکیب های غیر نوری.                       |      |
| (۵-۲) چگونگی انجام باز ترکیب الف) مرحله برانگیختگی ب) مرحله باز ترکیب نوری              | ۲۵   |



- ۳۲ (۱-۳) پیکربندی نوعی آزمایش فتولومینسانس.
- ۳۳ (۲-۳) طرحواره ای از سرماسنج به همراه یک نمونه واقعی که با He کار می کند.
- ۳۶ (۳-۳) مقایسه طرحواره از زمان برانگیختگی و زمان رها سازی در لیزر پالسی مورد استفاده.
- ۳۷ (۴-۳) پیکر بندی نوعی آزمایش فتولومینسانس وابسته به زمان.
- ۴۱ (۱-۴) طرحواره ای از پدیده آنتی-استوک فتولومینسانس، انرژی فوتون فرو  
دی  $h\nu$  از گاف نواری کوچکتر است ( $h\nu < E_g$ ).
- ۴۲ (۲-۴) طرحواره ای از وارونی انرژی برای الف) ساختار ناهمگون نوع-I  
ب) ساختار ناهمگون نوع-II .
- ۴۴ (۳-۴) نمودار آنتی-استوک فتولومینسانس (a) و فتولومینسانس (b) مربوط  
به نمونه GaAs.
- ۴۶ (۴-۴) نمونه های مختلفی از ساختارهای ناهمگون  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .
- ۴۸ (۵-۴) طیف لومینسانس نمونه ها بر حسب انرژی تحریک. سیگنال آنتی-استوک  
فتولومینسانس برای همه نمونه ها حدود  $1/75\text{eV}$  است. برای نمونه C طیف  
ASPLE نیز نشان داده شده است.
- ۵۰ (۶-۴) طرحواره ای از اندازه گیری های فتولومینسانس وابسته به زمان مربوط به نمونه D  
نقاط مثلثی PL مربوط به GaAs می باشد و نقاط دایره های باز PL مربوط به  
 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  می باشد و نقاط دایره های بسته مربوط به آنتی — استوک  
فتولومینسانس می باشد.
- ۵۲ (۷-۴) طرحواره ای از فرایند جذب دو فوتون یک مرحله ای.
- ۵۳ (۸-۴) طرحواره ای از فرایند جذب دو فوتون دو مرحله ای در ساختار ناهمگون نوع-II.
- ۵۳ (۹-۴) طرحواره ای از فرایند جذب دو فوتون دو مرحله ای در ساختار ناهمگون نوع-I

- ۵۴ (۱۰-۴) طرحواره ای از فرایند اوژه (a) انرژی و تکانه حاصل از باز ترکیب به یک الکترون داده می شود. (b) انرژی و تکانه حاصل از باز ترکیب به یک حفره داده می شود.
- ۵۵ (۱۱-۴) طرحواره ای از فرایند اوژه سرد.
- ۵۷ (۱۲-۴) طرحواره نوار انرژی دیود شوکتی با یک چاه کوانتومی آرایش یافته از نوع-p تصویر (a) حالت بدون بایاس و تصویر (b) حالت بایاس مستقیم میباشد.
- ۵۸ (۱۳-۴) طیف لومینسانس نور حاصل از ولتاژ ۱- ولت (بایاس مستقیم) و ۱+ ولت (بایاس معکوس).
- ۵۸ (۱۴-۴) بستگی شدت لومینسانس به توان تحریک برای حالت بایاس مستقیم و معکوس.
- ۶۴ (۱-۵) طیفهای ASPL و NPL نمونه های مورد مطالعه اندازه گیری شده در دمای ۵ کلوین اندازه گیری شده اند. به منظور واضح دیدن تفاوت بین خطوط طیفی، آنها را در راستای قائم جابه جا کرده ایم.
- ۶۶ (۲-۵) تصویر ۲-۵: طیفهای نرمالیزه ASPL نمونه های مورد مطالعه اندازه گیری شده در دمای ۵ کلوین.
- ۶۷ (۳-۵) موقعیت انرژی طیف های ASPL نمونه های مورد مطالعه بر حسب تغییر غلظت نیتروژن.
- ۶۹ (۴-۵) نمودار بازده آنتی-استوک فتولومینسانس بر حسب تغییر غلظت نیتروژن.
- ۷۰ (۵-۵) نمودار پتانسیل جایگزیده بر حسب تغییر غلظت نیتروژن برای آنتی-استوک فتولومینسانس و فتولومینسانس عادی.
- ۷۱ (۶-۵) نمودار مربوط به شدت طیف ASPL بر حسب توان تحریک برای یک نمونه نوعی نیتروژن دار  $[N]=1\%$ .

- ۷۲ (۷-۵) نمودار شدت طیف ASPL بر حسب توان تحریک برای نمونه شامل ۱٪ نیتروژن.
- ۷۳ (۸-۵) نمودار مربوط به موقعیت قله انرژی طیف ASPL بر حسب توان تحریک برای یک نمونه نوعی نیتروژن دار با  $[N]=1\%$ .
- ۷۴ (۹-۵): شکل (a) (۹-۵) بستگی دمایی طیف نوعی ASPL مربوطه که به عنوان مثال برای نمونه با 1% نیتروژن نشان داده شده است. انرژی فوتون تحریکی در تمام این اندازه گیری ها  $1/59\text{eV}$  و توان تحریک روی نمونه ها حدود ۲۰ میلی وات بوده است. شکل (b) بستگی قله طیف ASPL به دما برای نمونه با 1% نیتروژن و شکل (c) بستگی شدت ASPL مجتمع به دما برای نمونه با 1% نیتروژن را نشان می دهد.
- ۷۶ (۱۰-۵) طیف ASPLE برای نمونه های نیتروژندار ثبت شده در دمای پایین.
- ۷۷ (۱۱-۵) نمودار مربوط به نتایج حاصل از اندازه گیری های TRPL مربوط به یک نمونه نوعی با  $[N]=0/5\%$  در یک مقیاس نیمه لگاریتمی. طیف مربوط به ASPL با رنگ قرمز و طیف مربوط به NPL با رنگ آبی نشان داده شده است. در این اندازه گیری ها انرژی آشکارسازی طیف در هر دو وضعیت NPL و ASPL در نزدیکی قله انرژی خط طیفی آنها (حدود  $1/82\text{eV}$ ) تنظیم شده بود. تمام اندازه گیری های TRPL در دمای ۲ کلوین انجام شده اند.
- ۷۹ (۱۲-۵) نتایج اندازه گیری های TRPL مربوط به نمونه با  $N=1\%$ ، منحنی مربوط به ASPL با رنگ قرمز و منحنی مربوط به NPL با رنگ آبی نشان داده شده است. در این اندازه گیری ها انرژی آشکارسازی نزدیک به قله خطوط طیفی هر یک از دو وضعیت ASPL و NPL تنظیم شده بود. تمام اندازه گیری های TRPL در دمای ۲ کلوین انجام شده اند.
- ۸۰ (۱۳-۵) طرحواره ای از همردیفی نواری نوع II در GaInNP/GaAs برای  $[N]>0/5\%$ .
- ۸۳ (۱۴-۵) طرحواره ای از فرایند جذب دو فوتون دو مرحله ای برای یک نمونه نوعی.

## فهرست جداول

| صفحه | جدول                                  |
|------|---------------------------------------|
| ۱۸   | (۱-۲) جدول تناوبی مربوط به نیمرساناها |
| ۱۹   | (۲-۲) نیمرساناهای عنصری و مرکب        |

## مقدمه:

از سال ۱۹۹۰ تاکنون، تحقیقات وسیعی بر روی نیمرساناهای حاوی نیتروژن به عمل آمده است که از جمله آنها نیمرساناهای نیتروژندار III-V با در صد نیتروژن بسیار کم است که اصطلاحاً آلیاژهای نیتروژندار رقیق گفته می شوند. بدلیل خصوصیات جالب و مورد توجه اینگونه آلیاژها مانند GaInNP کاربردهای زیادی از این ساختارها در صنعت اپتوالکترونیک، از جمله در ساخت دیودهای لیزری و دیودهای گسیل کننده نور و مناسب در ارتباطات مخابراتی با استفاده از فیبرهای نوری و سلول های خورشیدی را می توان نام برد. با حضور نیتروژن و ایجاد افت و خیزهای پتانسیل و مراکز تله، اکسیتون ها جایگزیده می شوند که در این حالت از یک طرف بدلیل همپوشانی تابع موج الکترون و حفره و کاهش زمان بازترکیب مفید واقع می شود و اما از طرف دیگر با ایجاد مراکز بازترکیب غیر نوری بازده اپتیکی را کاهش می دهد. یکی از روش های مطالعه اپتیکی آلیاژهای نیتروژندار رقیق، فرایند آنتی-استوک فتولومینسانس است که سابقه تحقیق روی این پدیده در خصوص ترکیبات نیتروژندار رقیق، در دنیا، چند سالی بیشتر نمی باشد. در پدیده آنتی-استوک فتولومینسانس انرژی فوتون های فرودی برای تحریک نمونه از انرژی فوتون های گسیلی توسط نمونه کمتر می باشد. افزایش انرژی تابشی نسبت به انرژی تحریکی تا حدود  $700\text{ meV}$  در سیستم GaAs/ordered-(Al)GaInP کاربرد این ترکیبات جدید را در ابزارهای اپتوالکترونیکی نظیر تبدیل فرکانسی میسر می سازد. بازده این فرایند توسط مکا نیزم هایی که مسوول تحریک و انتقال حامل ها به منطقه نیمرسانای با گاف نواری بزرگتر هستند تعیین می شود.

این پایان نامه بر اساس پژوهش در زمینه های فوق انجام شده است و نتیجه این مطالعات به صورت پایان نامه موجود منتشر می گردد. پایان نامه مشتمل بر ۵ فصل می باشد. فصل اول مقدمه ای بر مواد نیمرسانا و معرفی خواص عمومی آنهاست. فصل دوم اطلاعاتی راجع به ترکیبات نیمرسانا و بررسی خواص اپتیکی آنها را در بر دارد. فصل سوم به بررسی روش های اندازه گیری و مطالعات اپتیکی مواد نیمرسانا می پردازد. در فصل چهارم پدیده آنتی-استوک فتولومینسانس معرفی و سپس مکانیزم های موثر در وارونی انرژی بررسی می شود. در انتها در فصل پنجم به معرفی نمونه ها و تحلیل نتایج بدست آمده از داده های خام اولیه پرداخته می شود. بخش پایانی پایان نامه نیز شامل مقاله ای است که در کنفرانس سالانه فیزیک ایران در یاسوج (شهریور ۱۳۸۶) پذیرفته شده است. کلیه اندازه گیری ها در آزمایشگاه فتولومینسانس پروفیسور ومین

چن واقع در دانشکده فیزیک و سنجش اندازه گیری دانشگاه لینشوپینگ<sup>۱</sup> در کشور سوئد توسط استاد راهنما جناب آقای دکتر ایزدی فرد انجام شده است و داده های بدست آمده برای تفسیر نتایج در دانشگاه صنعتی شاهرود تحت عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد مورد مطالعه قرار گرفته است.

---

<sup>۱</sup> Linkoping University

# فصل ۱

## خواص عمومی نیمرساناها

- ✓ ساختار بلوری نیمرسانا
- ✓ نیمرساناهای آلیاژی
- ✓ ساختار نواری نیمرساناها
- ✓ روش رشد MBE
- ✓ روش رشد MOVPE

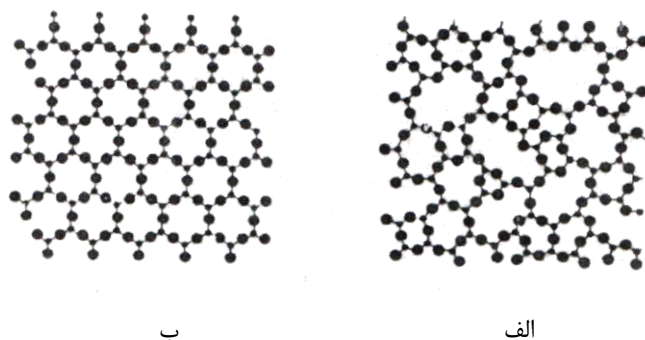
## مقدمه:

به طور کلی مواد جامد در سه گروه متفاوت نارسانا (عایق)، نیمرسانا (نیمه هادی) و رسانا(هادی) دسته بندی می گردند. نیمرساناها از جالب ترین و مفید ترین گروه جامدات هستند. این مواد طیف وسیعی از پدیده ها (از خواص فلزی تا خواص عایق ها) را نشان می دهند و کاربرد های فراوانی دارند. مطالعه مواد نیمرسانا از اوایل قرن نوزدهم شروع شده است و در طول سالها نیمرساناهای فراوانی مورد بررسی قرار گرفته اند. اما بعد از اواخر دهه ۱۹۴۰ که ترانزیستور اختراع شد ، نیمرساناها جایگاه واقعی خود را یافتند. به دلیل این اختراع و نیز به دلیل تکامل و توسعه قطعات مرتبط با آنها، نیمرساناها از جالب ترین موضوع ها در فیزیک حالت جامد در آمدند. در این راستا پژوهش های بسیاری درباره خواص بنیادی این جامدات و چگونگی استفاده از آنها برای ساخت قطعات جدید تر و با کارایی بیشتر ارایه شد. در این قسمت مختصری از خواص عمومی نیمرساناها را بررسی می کنیم.



## ۱-۱- ساختار بلوری نیمرسانا :

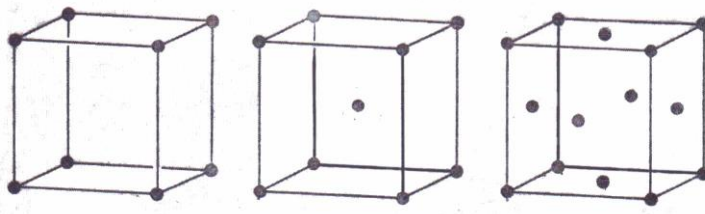
مواد جامد را میتوان به دو دسته بلور و آمورف نیز تقسیم کرد. در مواد آمورف بین اتمهای جسم جامد هیچگونه نظم بلند برد وجود ندارد. در حالیکه در بلورها نظم مولکولی به شکلهای مختلف برقرار است. بلورها را میتوان به دو دسته تک بلور و بلور چندگانه تقسیم کرد. تک بلور آرایش منظمی از اتمهاست. حال آنکه بلورهای چندگانه را میتوان به صورت تک بلورهای مختلفی در نظر گرفت که راستای بلوری در این تک بلورها بر هم منطبق نیست بلکه این نواحی کریستالی تشکیل دانه هایی را میدهند که در مرز آنها نظم کریستالی تغییر میکند.



شکل ۱-۱- الف) ماده آمورف ب) ماده بلور [۲].

بلورهای نیمرسانا از اتم هایی تشکیل شده اند که به صورت تناوبی آرایش یافته اند. برای یک نیمرسانای معین یک یاخته واحد وجود دارد که نماینده تمام شبکه است و با تکرار یاخته واحد در سرتاسر بلور می توان تمام شبکه را ایجاد نمود. در شکل (۱-۲) بعضی یاخته های واحد بلور-مکعبی مشخص شده است. قسمت الف بلور مکعبی ساده ای را نشان میدهد و هر گوشه شبکه مکعبی با یک اتم اشغال میشود لذا دارای ۶ اتم مجاور به نام نزدیکترین همسایه با فواصل برابر میباشد. شکل (۱-۲) ب) بلور مکعبی مرکز حجمی است که در آن علاوه بر هشت اتم گوشه یک اتم هم در مرکز آن واقع شده است. در یک شبکه مکعبی مرکز حجمی تعداد نزدیکترین اتم های همسایه هر اتم هشت میباشد. شکل (۱-۲) ج) یک بلور مکعبی مرکز سطحی است

که علاوه بر هشت اتم در گوشه ها در هر یک از شش رخ مکعب نیز یک اتم وجود دارد. در چنین شبکه ای تعداد نزدیکترین اتم های همسایه هر اتم برابر دوازده است.



الف

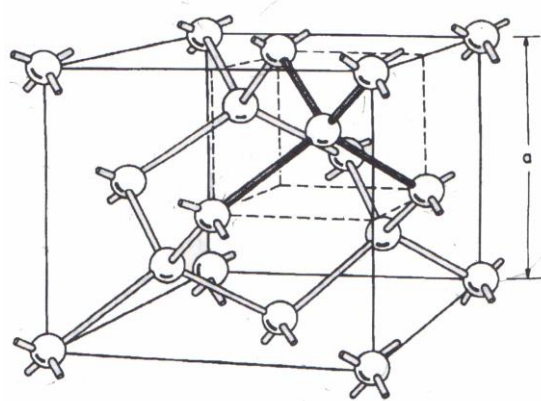
ب

ج

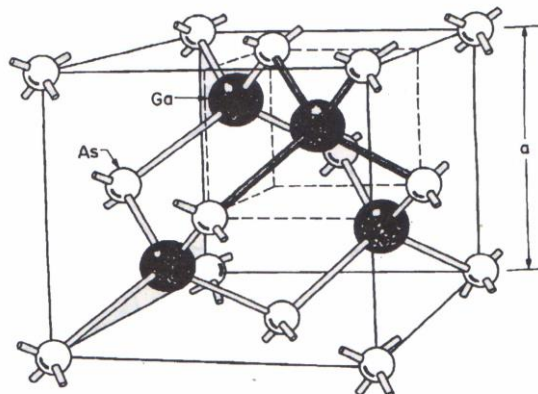
شکل ۱-۲- سه یاخته واحد بلور مکعبی، الف) مکعبی ساده ب) مکعبی مرکز حجمی ج) مکعبی مرکز سطحی [۲].

نیمرساناهی عنصری C, Si, Ge دارای یک ساختار شبکه الماسی<sup>۲</sup> نظیر آنچه در شکل ۱-۳ الف نشان داده شده است میباشند. این ساختار به صورت دو زیر شبکه مکعبی مرکز سطحی است که در یکدیگر نفوذ کرده اند. بدین طریق که یک زیر شبکه به اندازه یک چهارم فاصله در راستای قطر مکعب نسبت به زیر شبکه دیگر جابه جا شده است. تمام اتم ها در شبکه الماسی با چهار نزدیکترین همسایه که با فاصله مساوی در گوشه های یک چهاروجهی قرار دارند احاطه شده اند. بیشتر نیمرساناهای مرکب III-V دارای شبکه زینک بلند<sup>۳</sup> هستند. این ساختار نیز مانند شبکه الماسی است بجز این که یک زیر شبکه مکعبی مرکز سطحی دارای اتم های ستون III و دیگری دارای اتم های ستون V میباشد. در حقیقت در ساختار الماسی دو عنصر مشابه و در ساختار زینک بلند دو عنصر متفاوت در یکدیگر نفوذ کرده اند.

<sup>۲</sup> Diamond  
<sup>۳</sup> Zince Blend



(الف)



(ب)

شکل ۳-۱ (الف) شبکه الماسی (ب) شبکه زینک بلند. [۴]

## ۲-۱ نیمرسانای آلیاژی :

آلیاژ کردن، نیمرساناها را برای ایجاد ساختارهای محدود شده کوانتومی و ساختارهای ناهمگون فراهم می کند. آلیاژها وابسته به تعداد عناصر تشکیل دهنده آنها، شامل سه گروه دوتایی، سه تایی و چهارتایی می باشند. برای نمونه آلیاژ  $A_xB_{1-x}$  یک نوع دوتایی شامل دو نوع اتم است که به عنوان مثالی از آن می توان  $Ga_xAs_{1-x}$  را نام برد. آلیاژ سه تایی  $A_xB_{1-x}C$  نیز مانند  $Ga_xN_{1-x}As$  شامل سه نوع اتم  $A, B, C$  می باشد. همچنین ساختار  $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$  بیان کننده یک آلیاژ با چهار عنصر مختلف بوده و نمونه آن  $Ga_xIn_{1-x}N_yP_{1-y}$  می باشد. پارامترهای مهم آلیاژها نیز به عناصر تشکیل دهنده آنها بستگی دارد. در آلیاژ دوتایی  $A_xB_{1-x}$  ثابت شبکه آلیاژ با استفاده از قانون و گارد با رابطه (۱-۱) معرفی و گاف انرژی آن نیز با رابطه (۲-۱) تعیین می گردد.

$$a_{alloy} = xa_A + (1-x)a_B \quad (1-1)$$

$$E_g^{alloy} = xE_g^A + (1-x)E_g^B \quad (2-1)$$

ثابت شبکه و گاف انرژی در آلیاژ سه تایی  $A_xB_{1-x}C$  به ترتیب با روابط (3-1) و (4-1) بیان می‌گردد:

$$a_{alloy} = xa_{AC} + (1-x)a_{BC} \quad (3-1)$$

$$E_g^{alloy} = xE_g^{AC} + (1-x)E_g^{BC} \quad (4-1)$$

گاهی نیز به علت ایجاد بی‌نظمی در حین ترکیب اتم‌ها در شبکه، خمیدگی در گاف نواری نیمرسانا به وجود می‌آید که به صورت جمله اضافی در تغییرات گاف نواری آلیاژ ایجاد می‌گردد و به صورت (5-1)  $\Delta E_g(x) = bx(1-x)$  می‌باشد که در این رابطه  $b$  پارامتر خمش<sup>۴</sup> نام دارد و در ترکیبات دو تایی III-V مانند GaAs مقدار آن کم و مستقل از ترکیب آلیاژ است.

### ۳-۱ ساختار نواری نیمرساناها:

شناخت ساختار نواری نیمرساناها در دستیابی به بسیاری از خواص اپتیکی و الکترونیکی آنها موثر و مورد توجه می‌باشد. تکنولوژی اپتوالکترونیک بر پایه تشکیل نیمرساناهای عنصری و مرکب است و همه مواد با توجه به نوع ساختار نواریشان دارای خواص مربوط به خود هستند. هنگامی که از یک اتم تنها بحث می‌کنیم مسئله وجود ترازهای انرژی مطرح می‌شود الکترون‌ها به ترتیبی کاملاً مشخص روی این ترازها قابل چینش هستند. اما وقتی دو اتم را در فضای حقیقی به یکدیگر نزدیک کنیم بطوریکه توابع موج الکترون‌های موجود روی ترازهای هر اتم همپوشانی داشته باشد، نوارهای انرژی پدیدار خواهد شد. حال اگر تعداد اتم‌ها افزایش یابد این مسئله تشدید می‌گردد. در حقیقت هر نوار انرژی شامل تعداد زیادی تراز انرژی است. الکترون‌های با فاصله بیشتر از هسته را معمولاً الکترون‌های نوار رسانش می‌گویند. الکترون‌های مقیدتر به هسته در نوار ظرفیت قرار دارند. نوار رسانش با انرژی  $E_c$  و نوار ظرفیت با انرژی  $E_v$  به فاصله  $E_g = E_c - E_v$  یعنی یک گاف انرژی از یکدیگر قرار گرفته‌اند. در حقیقت یکی از مهمترین مشخصات نیمرساناها که آنها را از فلزات و عایق‌ها متمایز میکند گاف انرژی آنهاست به طوریکه پهنای نوار انرژی با توجه به نوع اتم‌ها متفاوت است به گونه‌ای که یکسری از مواد، دارای گاف انرژی بسیار بزرگ هستند. بدلیل فاصله زیاد بین نوار

<sup>۴</sup> Bowing parameter

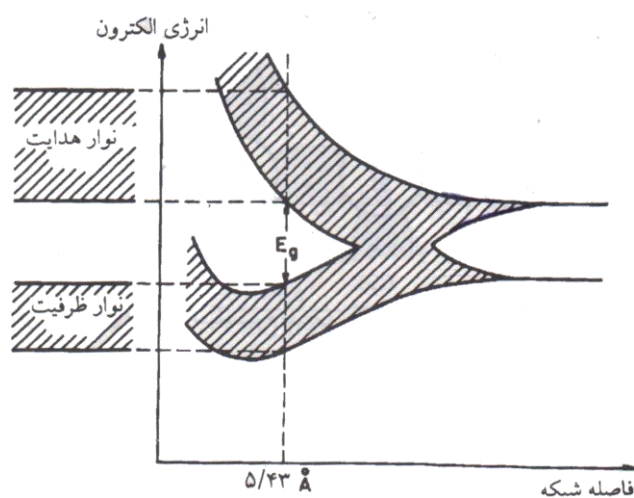
ظرفیت و رسانش، در دمای اتاق احتمال حضور الکترون در نوار رسانش بسیار ناچیز است که به این مواد عایق می گویند. با کمتر شدن گاف انرژی ماده به سمت رسانا نزدیک می شود. در مواد رسانا فاصله بین نوار رسانش و ظرفیت در دمای اتاق بسیار ناچیز و گاهی صفر است. در بین این دو دسته از مواد، گروه دیگری از مواد بنام نیم رساناها قرار دارند که گاف انرژی در آنها حتی در مواردی مثل AIN تا ۶/۲eV می رسد. گاف انرژی این مواد تعیین کننده طول موجهایی است که توسط نیمرسانا جذب یا گسیل میشود. به دلیل تنوع گسترده گاف انرژی نیمرساناها دیویدهای نوری و لیزرها را میتوان با طول موجهایی در محدوده گسترده ای از فرسرخ تا بخش های مرئی طیف یا حتی ناحیه فرکانس های بالا بوجود آورد. لازم به ذکر است که گاف انرژی در نیمرساناها با فشار و دما تغییر می کند. ترازهای انرژی در بلور نیمرسانا به وضوح توابعی از فواصل بین اتمی هستند، در نتیجه وقتی که دما یا فشار تغییر کند، فواصل بین ترازهای انرژی و گاف نواری نیز تغییر می کنند. انرژی گاف را می توان به صورت زیر نوشت: [۵]

$$E_g = E_g + \left[ \frac{\partial E_g}{\partial P} \right]_T \Delta P + \left[ \frac{\partial E_g}{\partial T} \right]_P \Delta T \quad (۶-۱)$$

در این رابطه  $E_g$  انرژی گاف در T=0 K و در غیاب هر گونه فشار خارجی است. معمولا وقتی دما افزایش پیدا می کند، گاف انرژی کوچک می شود. مع ذلک نیمرساناهایی مانند CuCl وجود دارند که گاف انرژی آنها با دما افزایش می یابد [5]. با تغییر دما در یک نیمرسانا اثرات متعددی در شبکه بوجود می آید. نوسانات اتم ها پیرامون مکان میانگینشان افزایش یا کاهش خواهد یافت. واکنش الکترون با شبکه نیز با دما تغییر می کند. پتانسیل ناخالصی های دهنده و پذیرنده کم عمق نیز از دما تاثیر می پذیرد، هر چند انرژی یونیزاسیون ناخالصی ها نسبتا ثابت می ماند. مشاهدات تجربی نشان دهنده تغییر گاف انرژی با دما می باشد. این وابستگی در محدوده های دمایی متفاوت تغییر می کند و تقریبا از رابطه تجربی زیر که برای اولین بار توسط ورشنی<sup>۵</sup> ارائه شد برای نیمرساناهای حجمی، پیروی می نماید.

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (۷-۱)$$

در رابطه فوق  $E_g^0$  انرژی گاف در دمای صفر کلون است و  $\alpha$  و  $\beta$  ثوابتی هستند که با تطبیق اطلاعات اندازه گیری شده بدست می آیند [۱۲].



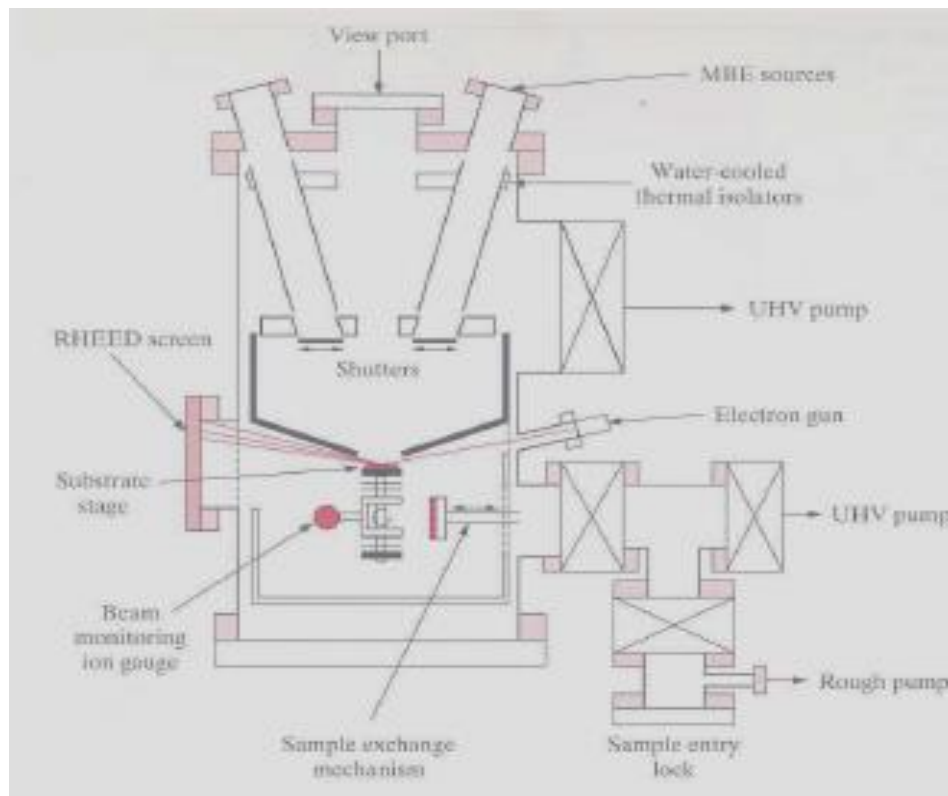
شکل (۱-۴): تشکیل نوارهای انرژی وقتی که بلور شبکه الماسی با نزدیک کردن اتمهای مجزای سیلیسیم تشکیل می‌شود. [۴].

برای محاسبه ساختار نواری مواد گوناگون روش‌های مختلفی وجود دارد اما معمولاً به حل معادله شرودینگر با یک پتانسیل دوره‌ای می‌پردازیم. آنگاه تنها چیزی که لازم است تابع موج مناسبی است که باید در این معادله جایگزین شود و با این کار نوارها و گاف‌های انرژی بدست می‌آیند. متأسفانه، انجام این کار به صورت رضایتبخش چندان هم ساده نیست و حدس جواب خوب به شهودی بیشتر از آنچه اکثر افراد دارند، نیازمند است. با وجود این، ایده کلی ساختار نواری چنان برای درک خواص جامدات حیاتی است که لازم است نوعی توجیه منطقی برای وجود آنها ارائه شود. لازم به ذکر است که نتایج محاسبات در مورد رابطه  $E$  و  $k$  (انرژی و تکانه) در نظریه نواری برای سیستمی حاوی یک تک‌الکترون ارائه می‌گردد ولی برای سیستم‌های واقعی تعداد زیادی الکترون در ماده مورد بحث وجود دارد. برای بررسی این سیستم‌ها بدین ترتیب عمل می‌شود که اولین الکترون، پایین‌ترین حالت انرژی تک‌الکترونی را اشغال می‌کند، دومین الکترون نیز حالت بعدی را و به همین منوال الی آخر. در بررسی‌های پیشرفته‌تر در مورد الکترون‌ها در فلزات باید تأثیر همه الکترون‌ها بر حالت‌های تک‌الکترونی در نظر گرفته شود، با این حال معلوم شده است که به استثنای فواصل کوتاه، ابرهای الکترونی به گونه‌ای عمل می‌کنند که هر الکترون از تأثیر سایر الکترون‌ها استتار می‌شود.

یکی از دلایلی که از نیمرساناها بشدت در صنایع الکترونیک استفاده می شود را می توان مهارت فوق العاده در تکنیک های رشد این مواد دانست، از طرفی کاربردهای صنعتی این مواد ما را جهت بهبود کیفیت رشد این مواد ترغیب می کند. روش های رشدی مانند MOVPE<sup>۷</sup>، MBE قابلیت لایه نشانی روی زیر لایه، تا یک تک لایه اتمی را با دقت خوبی دارند. این روش های رشد این امکان را به ما می دهد که به تهیه ساختارهایی مانند ابرشبهه ها و چاه های کوانتومی بپردازیم. از اینرو در اینجا به مطالعه مختصری راجع به این دو روش خواهیم پرداخت. تکنیک روشانی با استفاده از پرتو مـلـکـولی (MBE) یکی از مهمترین تکنیکهای رشد در فیزیک ساختارهای ناهمگون می باشد. تقریباً همه ی نیمرساناها می توانند با استفاده از این روش رشد داده شوند. در این روش به محفظه هایی با خلاء بسیار بالا ( $10^{-11}$  torr) نیاز است که در درون آن عناصر مختلفی به منظور رشد قرار داده می شوند. با گرم شدن محفظه اتمها و مولکولها تبخیر شده و در مسیرهای مستقیم به منظور قرار گرفتن بر روی زیر لایه گرم، حرکت می کنند. به وسیله کامپیوتر، دریچه هایی که از آنها گسیل اتمها به روی زیر لایه انجام می شود، کنترل می گردد. سرعت رشد نیز به طور نسبی حدود یک تک لایه در هر ثانیه می باشد و بدین منظور باید اتمها انرژی جنبشی کافی را برای قرار گرفتن بر روی زیر لایه داشته باشند تا بتوانند سطح صافی را روی آن ایجاد نمایند. دمای زیر لایه نیز آنقدر بالا در نظر گرفته می شود، تا بتواند شرایط خوبی برای اتمهای برخوردی به آن فراهم کند اما نباید تا حدی بالا برده شود که باعث ایجاد بی نظمی و ناهماهنگی در سطح گردد. از آنجا که در محفظه واکنش هیچگونه واکنش شیمیایی انجام نمی گیرد، بنابراین این تکنیک از جمله ساده ترین روشهای رشد و همچنین قابل کنترل می باشد. دیواره های محفظه رشد نیز توسط نیتروژن مایع برای دستیابی به خلاء بالا و نیز ممانعت از خروج اتمها یا مولکولها از دیواره سرد می گردد.

<sup>6</sup> Molecular Beam Epitaxy

<sup>7</sup> Metal Organic Vapour Phase Epitaxy



شکل (۱-۵): طرحواره ای از یک سیستم رشد بلور MBE. [۸].

با وجود همه‌ی این موارد این روش نمی‌تواند برای رشد همه‌ی نیمرساناها از جمله فسفايدها به علت خطری که در نتیجه تولید گازهای سمی در بررسی فسفرها وجود دارد مورد استفاده قرار گیرد. فشار پایین زمینه در این روش نیز باعث می‌شود که از پرتوهای مولکولی برای مشاهده و بازبینی بلور رشد یافته استفاده کنیم. بنابراین اندازه گیری نوسانات پراش الکترونیهای پر انرژی بازتاب یافته<sup>۸</sup> تکنیک اندازه‌گیری مفید دیگر است. پرتوهای الکترونی به یک سطح صاف برخورد می‌کند و سپس به صورت یک پرتو شدید بازتاب می‌کنند. هنگامی که اتمهای تابیده شده به ماده، بر روی آن قرار گرفتند و سپس در اثر روشنایی، جزایری روی سطح ایجاد گردید، بازتاب سطحی کاهش می‌یابد و همراه با بازتاب، پراشیده شدن الکترونها نیز رخ می‌دهد. با ادامه‌ی این فرآیند ماده‌ی جدید روی سطح را می‌پوشاند و جزایر ایجاد شده کم کم به همدیگر پیوسته و سطح صاف و جدیدی را روی زیر لایه اصلی به وجود می‌آورد. بنابراین با پر شدن قسمت‌های تهی، بازتاب بار دیگر افزایش یافته و پراشیدگی کم می‌شود و این فرآیند به همین صورت ادامه می‌یابد. الکترونها پراشیده

<sup>8</sup> Reflection High Energy Electron Diffraction



و بازتابیده از طریق برخورد به یک صفحه فسفر نور گسیل می‌کنند. بنابراین در این روش با استفاده از اندازه‌گیری تناوب بازتاب پرتوها، سرعت و ضخامت رشد ماده روشنایی شده را می‌توان تخمین زد. توسعه و پیشرفت MBE به عنوان یک روش رشد کند بوده است زیرا دمای رشد در این روش پایین است و آمونیوم منبع متداول نیتروژن، در دماهای پایین پایدار است. اخیراً مقالات زیادی در رابطه با روش های رشد MBE برای نیمرساناهای نیتروژندار و نیمرساناهای نیتروژندار رقیق منتشر شده است. انگیزه اصلی این کار بهینه کردن سرعت رشد و دمای رشد، تعیین تاثیر منابع مختلف نیتروژن و کیفیت و آهنگ رشد لایه های روشنی‌تری<sup>۹</sup> و تعیین نوع زیر لایه می باشد [۱۳].

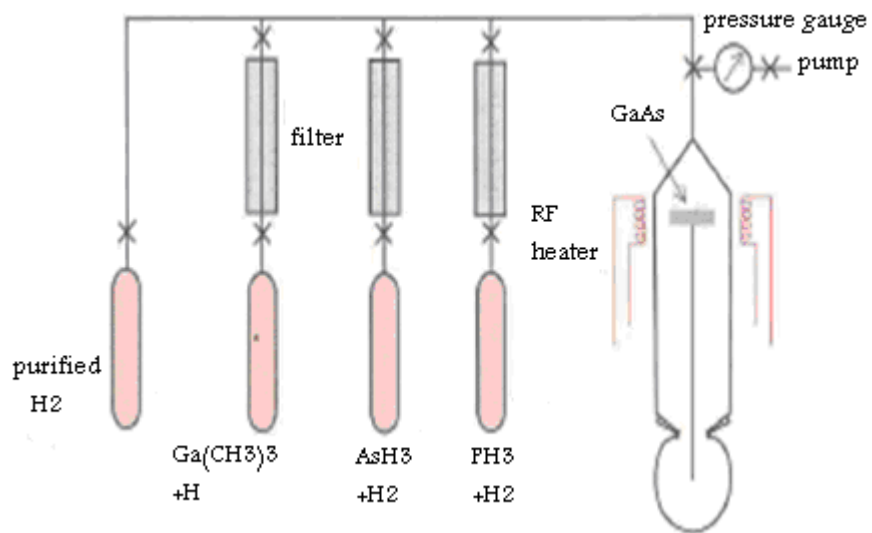
## ۱-۵ روش رشد MOVPE<sup>۱۰</sup>

از این روش در رشد نیمرساناها از جمله ترکیبات III-V استفاده می‌گردد. برای این منظور واکنشی میان آلکیل های گروه III و هیدرات های گروه V در درون یک لوله کوارتز انجام می‌شود که در درون این لوله نیز یک زیر لایه با یک گرم کننده وجود دارد. این گرما نیز باعث تحریک و واکنش بهتر ترکیبات گازی و انجام بهتر رشد می‌گردد. موارد مورد استفاده برای رشد معمولاً آرسین (ASH<sub>3</sub>) و فسفات (PH<sub>3</sub>) و غیره هستند که با هم واکنش انجام داده و سپس در درون لوله کوارتز، بر روی زیر لایه روشنایی انجام می‌دهند. از طریق این روش رشد می‌توان ساختارهای ناهمگون، چاه های کوانتومی چندگانه، ابرشبکه ها و همچنین قطعات همراه با ناخالصی را بوسیله تغییرات سریع ترکیب گازی در محفظه واکنش ایجاد نمود. قابل ذکر است در این روش بدلیل حضور مواد سمی و خطرناک احتیاج زیادی به رعایت مسایل ایمنی وجود دارد.

---

<sup>۹</sup> Epilayer

<sup>۱۰</sup> Metal Organic Vapour Phase Epitaxy



شکل (۶-۱): نمایی از پیکر بندی MOVPE. [۹].

- [۱] Introduction to Nitride Semiconductor Blue Laser and Light Emitting Diodes, Edited by S.Nakamura , S.F.chichibu , First published 2000, Taylor & Francis Group.
- [۲] [http:// www.mtmi.vu.lt/Pfk/funkc\\_dariniai/technology.htm](http://www.mtmi.vu.lt/Pfk/funkc_dariniai/technology.htm).
- [۳] H.M.Rosenberg ,The solid state, Third Edition, Chpter & ,Oxford University Press, 1998.
- [۴] Low-Dimensional Nitride Semiconductures, Edited by B.Gil, First published 2002, oxford , uni.press.
- [۵] مقدمه ای بر نور شناخت نیمرساناها ، ناصر پیغمبریان ، استفان کوچ ، آندره میزیروویچ ، ترجمه دکتر حمید رضا مهاجری مقدم ، دکتر حبیب تجلی ، چاپ اول ، انتشارات آستان قدس رضوی (۱۳۸۰).
- [۶] S.M.Sze, Semiconductor Devices, Physics and Technology (1985).
- [۷] W.C.Johnson, J.B.Parson, M.C.Crew, J.Phys.chem.36.2561(1932).
- [۸] H.P.Maruska, L.J.Anderson, D.A.Stevenson, J.Electrochem.Soc.121,1202(1979).
- [۹] M.A.Herman, Molecular Beam Epitaxy (1996).
- [۱۰] K.Onable, Mater.Res.Soc.Symp.Proc.449,23(1997).
- [۱۱] C.M.Wolf, N.H.Holonoyak, G.E.Still man, physical properties of semiconductors, Prentice-Hall, New Jersey, us (1989).
- [۱۲] M.Leroux, and et al, J, Appl, Phys.86,3721(1999).
- [۱۳] S.C.Jain and et al, J, Appl, Phys.67,N03,965(2000).

## فصل ۲

# ترکیبات نیمرسانا و بررسی خواص اپتیکی

- ✓ معرفی ترکیبات نیمرسانا
- ✓ ساختارهای ناهمگون
- ✓ فرآیند باز ترکیب در نیمرساناها
- ✓ اکسیتون

## مقدمه:

تنوع گسترده خواص مواد نیم رسانا به مهندسیین قطعات الکترونیکی انعطاف زیادی در طراحی مدارات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی بخشیده است. به طور کلی مواد نیمرسانا شامل دو دسته عنصری و مرکب می باشند. نیمرساناهای عنصری از اتم های منفرد، نظیر Ge, Si تشکیل می گردند. نیمرسانای تک عنصری ژرمانیم در اوایل توسعه نیمرساناها به شکل گسترده ای در ترانزیستورها و دیود ها استفاده شد. اما امروزه از سیلیسیم در اکثر یکسوسازها، ترانزیستورها و مدارات مجتمع استفاده می شود. زیرا قطعات سیلیسیوم اصلاح شده خیلی ارزان تر از مواد نیمرسانای دیگر هستند. سیلیسیوم به شکل سیلیکا و سیلیکاتها ۲۵ درصد پوسته زمین را تشکیل می دهد و بعد از اکسیژن از نظر فراوانی دومین ماده محسوب می شود. تکنولوژی این عنصر در میان تمام تکنولوژی های نیمرسانایی پیشرفته ترین می باشد. نیمرساناهای مرکب از دو یا تعداد بیشتری عنصر تشکیل می گردند و به عنوان نمونه می توان GaAs, InAs, GaN, GaInP, GaInNP و ... را نام برد. نیمرساناهای مرکب کاربرد وسیعی در قطعات خیلی سریع و قطعاتی که نیاز به نشر یا جذب نور دارند پیدا کرده اند. رسانندگی نیمرساناها میان رسانندگی نارساها و رساناها می باشد. رسانندگی یک نیمرسانا به طور کلی نسبت به دما، روشنایی، میدان مغناطیسی و مقدار دقیق ناخالصی اتم ها حساسیت دارد. این حساسیت در رسانندگی، نیمرسانا را به یکی از مهمترین مواد برای کاربردهای الکترونیکی تبدیل می کند.

## ۱-۲ معرفی ترکیبات نیم رسانا:

مواد نیم رسانا در ستون چهارم و ستون های مجاور آن از جدول تناوبی قرار دارند. سیلیسیم و ژرمانیم، نیم رساناهای گروه چهار، نیم رساناهای تک عنصری نامیده می شوند زیرا از اتم های هم جنس تشکیل شده اند. علاوه بر مواد تک عنصری، ترکیب اتم های گروه سوم و پنجم و نیز ترکیب های خاصی از عناصر گروه دوم و ششم، نیم رساناهای مرکب را به وجود می آورند. ترکیب های دو عنصری گروه های سه و پنج مانند GaP، معمولاً در دیودهای نوری<sup>۱۱</sup> به کار می روند. آشکارسازهای نوری معمولاً از جنس InSb، CdSe و یا ترکیب های دیگر مانند PbTe و HgCdTe می باشند. Si و Ge همچنین کاربرد گسترده ای در آشکارسازهای مادون قرمز و تشعشعات هسته ای دارند. برای افزایش انعطاف در انتخاب خواص مواد، حتی می توان ترکیبات سه عنصری مانند GaAsP و یا چهار عنصری مانند InGaAsP رشد داد. لیزرهای نیم رسانا با استفاده از GaAs و AlGaAs و سایر ترکیب های سه تایی و چهار تایی ساخته می شوند. قسمتی از جدول تناوبی مربوط به نیم رساناها در جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

---

<sup>۱۱</sup> LED

جدول ۱-۲ : جدول تناوبی مربوط به نیمرساناها:

| دوره | ستون II | III | IV | V  | VI |
|------|---------|-----|----|----|----|
| ۲    |         | B   | C  | N  |    |
| ۳    | Mg      | Al  | Si | P  | S  |
| ۴    | Zn      | Ga  | Ge | As | Se |
| ۵    | Cd      | In  | Sn | Sb | Te |
| ۶    | Hg      |     | Pb |    |    |

جدول مربوط به نیمرساناهای عنصری و مرکب نیز را در شکل زیر نشان داده‌ایم.

جدول ۲-۲ : نیمرساناهای عنصری و مرکب:

| عنصر     | ترکیب IV-IV | ترکیب III-V  | ترکیب II-VI                                | ترکیب IV-VI |
|----------|-------------|--|--|-------------|
| Si<br>Ge | SiC         | AlAs, AlSb<br>InN, InP<br>AlN, GaN<br>BN, GaAs<br>GaP, GaSb<br>InAs, InSb` | CdS<br>CdSe<br>CdTe<br>ZnS<br>ZnSe<br>ZnTe | PbS<br>PbTe |

۲-۲ ساختارهای ناهمگون: ۱۲

با استفاده از تکنیکهای رشد روآرآستی مختلف می توان نیمرساناهای متفاوتی را بر روی هم رشد داد. اگر گاف انرژی دو نیمرسانایی که بر روی یکدیگر رشد داده می شوند یکسان باشد ساختار ایجاد شده همگون و در غیر اینصورت ناهمگون است. به طور کلی سه نوع سیستم شامل ساختار ناهمگون وجود دارد :

الف) ساختار ناهمگون نوع - I :

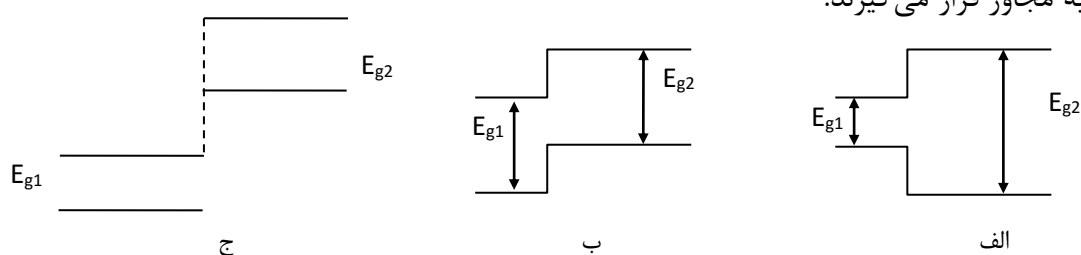
در این حالت مطابق شکل (۱-۲) الف نیمرسانای با گاف نواری باریکتر در کنار نیمرسانایی با گاف نواری عریض تر قرار می گیرد، به طوری که با توجه به اینکه افزایش انرژی الکترونها به سمت بالاست و در مقابل افزایش انرژی حفرهها به سمت پایین می باشد، الکترونها و حفرهها در این حالت در نوار رسانش و ظرفیت مربوط به یک نیمرسانا جای می گیرند.

ب) ساختار ناهمگون نوع - II :

در تشکیل این نوع ساختار نیمرساناهای با گاف انرژی متفاوت طوری در کنار همدیگر قرار می گیرند که الکترونها و حفرهها در دو لایه های مجاور جای داده شوند.

ج) ساختار ناهمگون نوع - III :

این نوع ساختار تا حدودی با دو حالت قبل تفاوت دارد به طوری که گاف نواری دو نیمرسانایی که در کنار هم قرار داده می شوند هیچگونه همپوشانی و یا روی هم افتادگی با یکدیگر ندارند و الکترونها و حفرهها نیز در دو لایه مجاور قرار می گیرند.



شکل ۱-۲: طرحواره ای از الف) ساختار ناهمگون نوع - I ب) ساختار ناهمگون نوع - II ج) ساختار ناهمگون نوع - III.



## ۲-۳ چاه کوانتومی<sup>۱۳</sup>، سیم کوانتومی<sup>۱۴</sup>، نقطه کوانتومی<sup>۱۵</sup>:

برخی از کاربردهای نیمرساناها برای استفاده در پروژه‌های نوری و الکترونیکی بر این حقیقت استوار است که رشد این مواد را می‌توان به گونه‌ای دست کاری کرد که مجموعه‌ای از مواد جدید با ابعاد بسیار کوچک و خواص قابل پیش بینی به دست آید. یعنی ساختارهایی با ابعاد نانومتری که خواص نوری و الکترونیکی آنها در مقایسه با حالت بلوری کپه‌ای بسیار متفاوت است، تحقق یابد.

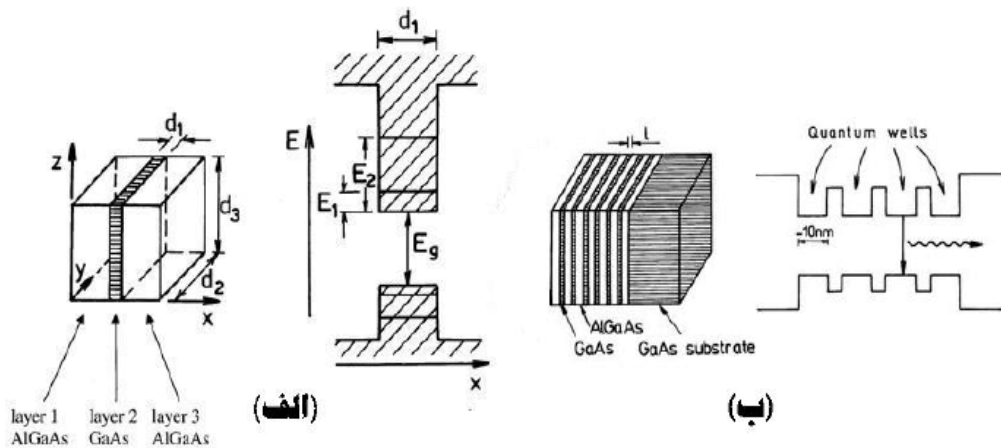
با ساندویچ کردن یک لایه نیم رسانای A بین دو لایه از نیم رسانای B با وجود این شرط که گاف انرژی A کمتر از B باشد می‌توان الکترون یا حفره را داخل لایه A محدود کرد. به این ترتیب یک چاه کوانتومی ساخته می‌شود. با تکرار این ساختار بصورت B/A/B/A/B/A/B به ساختار چاههای کوانتومی چندگانه دست می‌یابیم. جهت عمود بر لایه‌ها را بعنوان جهت z در نظر می‌گیریم. بدین ترتیب با توجه به شکل (۲-۲) وقتی الکترون‌ها در ناحیه GaAs (ماده با گاف انرژی کوچکتر) باشند برای خروج از این ناحیه باید به اندازه ارتفاع چاه، انرژی دریافت کنند. همین مسئله برای حفره‌ها نیز در نوار ظرفیت GaAs برقرار است. به این ترتیب حامل‌ها فقط در راستای عمود بر محور z آزادی حرکت دارند و ساختار چاه کوانتومی AlGaAs/GaAs ایجاد می‌گردد. با ایجاد محدودیت در راستای x و y نیز می‌توان به ساختارهای یک بعدی و صفر بعدی دست یافت که آنها را به ترتیب سیم کوانتومی و نقطه کوانتومی می‌نامند. در حال حاضر با پیشرفت روش‌های رشد و ساخت لیزرهایی که در آنها از ایده نقاط کوانتومی استفاده شده است می‌توان به قطعاتی با بازده بالا و جریان آستانه پایین دست یافت.

---

<sup>13</sup> Quantum Well

<sup>14</sup> Quantum Wire

<sup>15</sup> Quantum Dots



شکل (۲-۲): مثالهایی از ساختارهای ناهمگون GaAs/AlGaAs (الف) - چاه کوانتمی (ب) - ابر شبکه<sup>۱۶</sup>. نمودار انرژی ساختارهای فوق نیز نشان داده شده است.

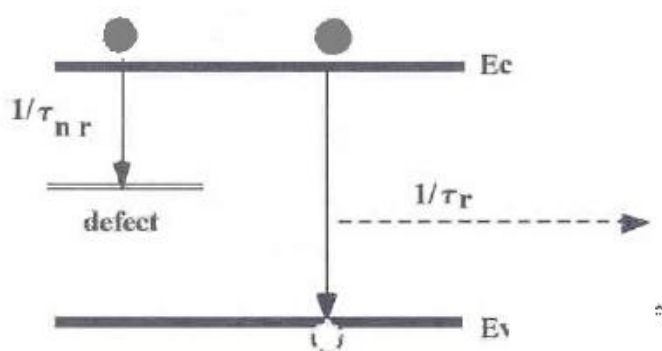
برای مطالعه نحوه کارکرد چاه های کوانتمی نیاز به دانستن پهنا و ارتفاع چاه داریم. ضخامت لایه رشد داده شده؛ تعیین کننده پهنای چاه است در حالیکه برای مشخص شدن ارتفاع چاه، نیاز به محاسبه اختلاف گاف انرژی موادی داریم که چاه و سد را تشکیل داده اند. قسمتی از این اختلاف مربوط به نوار رسانش و دیگری مربوط به نوار ظرفیت می باشد.

## ۲-۴ فرآیند باز ترکیب در نیمرساناها :

با مطالعه تابش یک پرتو الکترومغناطیس به یک نیمرسانا و مشاهده نتایج حاصل از واکنش این پرتو با عناصر تشکیل دهنده نیمرسانا، می توان به خصوصیات آن پی برد. پس از تحریک نمونه الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش منتقل شده و حفره ای در نوار ظرفیت به جا می گذارد. از آنجا که طبیعت، همیشه تمایل دارد که در سطح حداقل انرژی قرار داشته باشد، الکترون برانگیخته در نمونه تحریک شده نیز از این قاعده مستثنی نخواهد بود. بنابراین پس از مدت کوتاهی الکترون به نوار ظرفیت بازگشته و با نابودی زوج الکترون - حفره دوباره انرژی آزاد می شود. به فرآیند بازگشت الکترون به نوار ظرفیت باز ترکیب می گویند. در نتیجه این فرآیند باز ترکیب، در نیمرساناهای با گاف نواری مستقیم، فوتون و در نیمرساناهای با گاف نواری غیر مستقیم، به منظور حفظ بقای انرژی، علاوه بر فوتون، فونون نیز ایجاد می شود. در حالت کلی تبدیل

<sup>۱۶</sup> Superlattice

الکترون — حفره به فوتون را بازترکیب نوری می گویند. برای ایجاد الکترون و حفره جدا از هم از روشهای مختلفی استفاده می شود. انرژی لازم برای تولید زوج الکترون-حفره می تواند توسط نور، میدان الکتریکی، جریان الکترون ها و یا گرما تامین گردد. در هر صورت فرایندی را که در نهایت منجر به بازترکیب نوری الکترون و حفره و در نتیجه تولید امواج الکترومغناطیس شود را لومینسانس<sup>۱۷</sup> می گویند. (اصطلاح لومینسانس از واژه لاتین لومن به معنای نور گرفته شده است. این اصطلاح نخستین بار توسط فیزیکدانی بنام ویدمن<sup>۱۸</sup> برای توصیف تمام پدیده های نور که صرفا به علت افزایش دما بوجود نیامده اند معرفی شد). آزاد شدن انرژی الکترون و حفره به صورت های غیر تابشی مانند ایجاد ارتعاشات شبکه کریستالی (فونون ها) یا انتقال انرژی به الکترون های دیگر (الکترون اوژه<sup>۱۹</sup>)، بازترکیب از طریق مراکز تله در گاف انرژی و از طریق نواقص ساختاری و غیره را بازترکیب غیر نوری می گویند. شکل زیر طرح شماتیکی از بازترکیب نوری و غیر نوری را نشان می دهد.



شکل (۲-۳): طرحواره ای از مراکز گذارهای تابشی و غیر تابشی.

اگر تعداد الکترون و حفره های در دسترس، به ترتیب  $\Delta P, \Delta N$  باشد و  $\Delta P_0, \Delta N_0$  نیز معرف تعداد الکترون و حفره های اولیه باشند آنگاه تغییرات تعداد الکترون ها و حفره ها بصورت نمایی و با نیمه عمر  $\tau$  (که

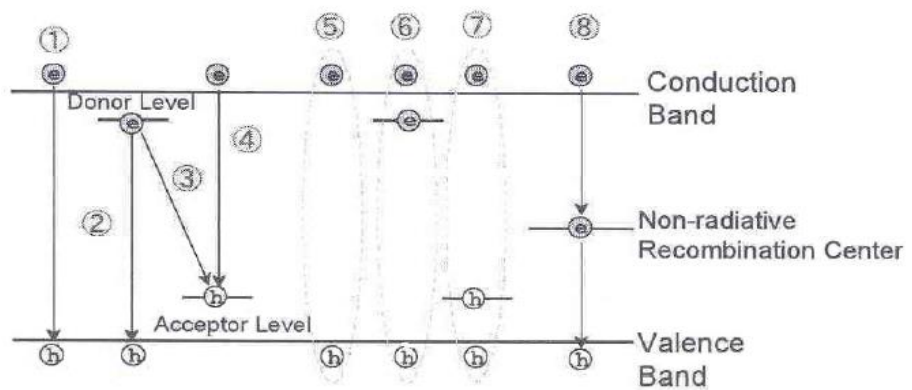
<sup>۱۷</sup> Luminescence  
<sup>۱۸</sup> Widemann  
<sup>۱۹</sup> Auger electron

بصورت پارامتر قابل اندازه گیری است)، با رابطه  $\Delta N = \Delta N_0 \exp(-t/\tau)$  تغییر می کند. کل زمان بازترکیب شامل زمان بازترکیب های تابشی و غیر تابشی با رابطه  $1/t = (1/t_r) + (1/t_{nr})$  بدست می آید.

میانگین بازترکیب ها بوسیله چگالی حامل های قابل دسترسی ( $\Delta n$ ) و نیمه عمر بازترکیب تعیین می گردد و در نتیجه بازده نوری که با نسبت باز ترکیب تابشی به کل بازترکیب ها مشخص می گردد را می توان بصورت زیر بدست آورد:

$$R_r = \frac{\Delta n}{t_r}, R_{nr} = \frac{\Delta n}{t_{nr}}, \eta_i = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}} \Rightarrow \eta_i = \frac{1}{\frac{t_r}{t_{nr}} + 1} \quad (1-2)$$

بدین ترتیب با کوچک نگاه داشتن نسبت  $t_r/t_{nr}$  می توان بازده نوری قطعه طراحی شده را افزایش داد. بنابراین شناخت نحوه بازترکیب های تابشی و غیر تابشی بعنوان نکته کلیدی در افزایش بازده نوری قطعه ساخته شده، محسوب می گردد. انواع فرآیندهای بازترکیب تابشی و غیر تابشی در شکل زیر نشان داده شده است.



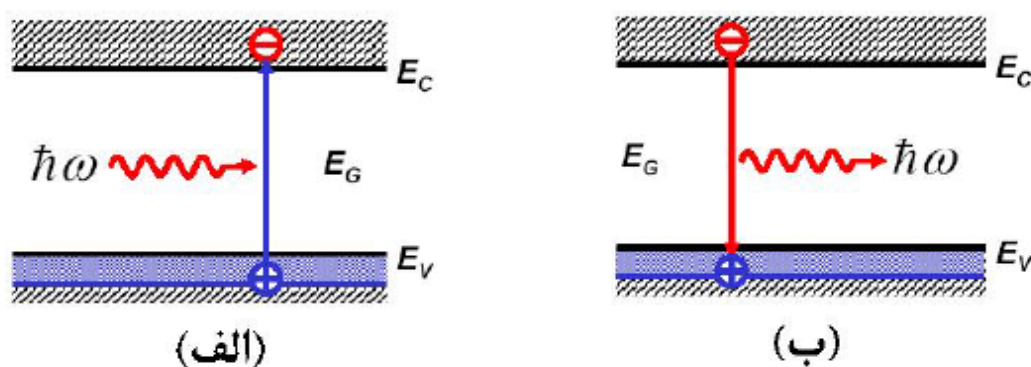
شکل (۲-۴): باز ترکیب در نیم رساناها. (۱) گذار نوار به نوار، (۲) گذار مقید به آزاد، (۳) دهنده <sup>۲۰</sup> به پذیرنده <sup>۲۱</sup>، (۴) گذار آزاد به مقید، (۵) اکسیژون آزاد، (۶) اکسیژون مقید به دهنده خنثی، (۷) اکسیژون مقید به پذیرنده خنثی، (۸) بازترکیب های غیر نوری.

در این جا ما به بررسی بازترکیب های نوری می پردازیم. شرط لازم برای داشتن بازترکیب های نوری، در دسترس بودن حامل های بار در نمونه مورد مطالعه است. این حامل های اضافی می تواند توسط یک عامل برانگیختگی ایجاد شود و یا توسط جریان الکتریکی به سیستم تحمیل گردد و یا از راههای دیگر با توجه به

<sup>20</sup> Donor

<sup>21</sup> Acceptor

کاربرد مورد نظر می تواند طراحی گردد. از طرفی برای کاهش تعداد فونون ها اقدام به کاهش دما می کنیم و نمونه را معمولاً در دما های پایین مورد مطالعه قرار می دهیم. گسیل انرژی معمولاً توسط الکترون و حفره های نزدیک گاف انرژی روی می دهد و مطابق یک قاعده کلی طیف گسیلی مشاهده شده، با طیف انرژی نمونه مورد مطالعه متناسب است.



شکل (۲-۵): چگونگی انجام بازترکیب (الف) - مرحله برانگیختگی. (ب) مرحله بازترکیب نوری.

مطابق شکل بالا در صورتیکه یک نیم رسانای نوع-p داشته باشیم آنگاه در طی مرحله بازترکیب با وجود تعداد زیاد حفره ها، حامل های اقلیت یعنی الکترون ها میزان سرعت بازترکیب را تعیین می کنند. اگر  $B_e$  را احتمال بازترکیب یک الکترون در طی واحد زمان در نظر بگیریم و  $n_e$  تعداد الکترون ها باشد آنگاه میانگین بازترکیب عبارتست از :

$$\frac{dn_e}{dt} = -B_e n_e \Rightarrow n_e = n_0 \exp(-B_e t) = n_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau_{rad}}\right) \quad (2-2)$$

بدین ترتیب میزان بازترکیب های نوری در طی زمان باید بصورت نمایی کاهش یابد.

اما همیشه الکترونی که در نوار رسانش است با حفره موجود در نوار ظرفیت بطور مستقیم گذار نوار به نوار<sup>۲۲</sup> انجام نمی دهد، اصولاً پیک هایی را در نمودار شدت گسیلی از نمونه مشاهده می شود که دارای انرژی کمتر

<sup>22</sup> Band to Band Recombination

از گاف انرژی هستند. بدین ترتیب می توان حدس زد که راه‌های دیگری نیز برای باز ترکیب الکترون و حفره وجود داشته باشد که از آن جمله می‌توان باز ترکیب اکسیتونی را نام برد.

## ۲-۵ اکسیتون: ۲۳

درست همان گونه که الکترون به پروتون مقید میشود الکترون و حفره نیز می‌توانند با برهمکنش الکتروستاتیکی جاذب خود به یکدیگر مقید شوند. الکترون-حفره مقید اکسیتون نامیده میشود. اکسیتون میتواند درون نمونه حرکت و انرژی برانگیختگی را منتقل کند اما از نظر الکتریکی خنثی است. اگر نیروی کولنی که باعث تشکیل موجودی به نام اکسیتون شده را انرژی بستگی بنامیم آنگاه در هنگام باز ترکیب مقداری از انرژی الکترون و حفره آزاد به جای اینکه صرف تولید فوتون با طول موج مشخص به اندازه گاف انرژی شود، صرف ایجاد اکسیتون شده و به صورت انرژی بستگی مصرف می‌شود و در نتیجه در طیف شدت گسیلی فقط انرژی باز ترکیب اکسیتون مشاهده می‌شود.

هنگامیکه یک الکترون از نوار رسانش با یک حفره از نوار ظرفیت با یکدیگر جفت شده و قابلیت حرکت به صورت کاملاً آزاد را در فضای حقیقی نمونه مورد مطالعه دارند میتوان گفت که اکسیتون آزاد تشکیل شده است. بخاطر خنثی بودن علامت اکسیتون آزاد هیچگاه در بررسی خواص رسانندگی مورد مطالعه قرار نمیگیرد اما معمولاً در مطالعات اپتیکی حائز اهمیت است. نیمرساناها معمولاً دارای ناخالصی‌هایی به صورت دهنده یا پذیرنده و مراکز نقص شبکه هستند. در صورتی که اکسیتون با نیروی کولنی به این مراکز مقید شود به آن اکسیتون مقید میگویند اکسیتون‌ها به صورت نظری قابلیت مقید شدن به همه دهنده‌ها و پذیرنده‌های خنثی و یونیزه شده را دارند. اما در عمل بعضی از این حالات پایدار نیستند. گرفتار شدن اکسیتون در آشفستگی‌های پتانسیل در فضای حقیقی به مفهوم اکسیتون جایگزیده میانجامد. حالت‌های جایگزیده هم برای الکترون و هم برای حفره و حتی برای هر دو به صورت همزمان روی میدهد. غالباً با افزایش دما اکسیتون از آشفستگی‌های پتانسیل خارج میشود و به صورت اکسیتون آزاد باز ترکیب می‌کند. با اندازه گیری مقدار انرژی گرمایی داده شده به ماده میتوان انرژی جایگزیدگی را محاسبه کرد. تعداد اکسیتون

<sup>23</sup> Exiton

های آزاد در چاه های کوانتومی نیمرسانا در مقایسه با نیرسانای حجمی از همان جنس، بیشتر می باشد و بنابراین در طیف اپتیکی مشاهده شده نقش غالب را دارند. این موضوع ناشی از افزایش انرژی بستگی اکسیتون بخاطر اثر محدودیت کوانتومی می باشد و این امکان را فراهم می کند تا باز ترکیب اکسیتون های آزاد را حتی در دمای اتاق مشاهده کنیم [۸].

#### فهرست منابع:

- [۱] T.L.Tansley,C.P.Foley,J.Phys.59,3241(1986).
- [۲] A.V.Sheleg,V.A.Savastenko,vestsi Akadi,Nauk Ussr Ser.Fiz.Met.Nauk 3,126(1976)
- [۳] R.Juza,H.Hahn and Z.Anorg , Allg.chem.234,282(1938).
- [۴] H.P.Marruska and et al ,Appl.Phys Lett.15,327(1969).
- [۵] H.Amano and et al Appl.Phys,part 2.29,205(1995).
- [۶] J.Singh,semiconductor optoelectronics,MC Grow-Hill.Inc(1995).
- [۷] S.Chichibu,and et al,Appl.Phys.Lett.69,4188(1996).
- [۸] D.A.B.Miller,and et al,Appl.Phys.Lett.41,679(1982).

## فصل ۳

# روش های اندازه گیری

- ✓ فتولومینسانس (PL)
- ✓ فتولومینسانس عادی (NPL)
- ✓ فتولومینسانس تحریکی (PLE)
- ✓ فتولومینسانس انتخابی (SPL)
- ✓ فتولومینسانس وابسته به زمان (TRPL)



## مقدمه :

ظهور لیزر در سال ۱۹۶۰، طیف‌نمایی اپتیکی را به عنوان یک ابزار مهم در مشخص کردن مواد گسترش داد. لیزر به عنوان منبع مهمی به صورت‌های تک‌رنگ، هم‌فاز، پالسی و یا امواج پیوسته می‌باشد، به طوریکه تکنیک‌های آشکار سازی طیف‌نمایی به وسیله لیزر به جلو می‌رود. یک نتیجه مهم از اختراع لیزر بکارگیری طیف‌نمایی به عنوان ابزار مفیدی در تعیین مواد و قطعات نیم‌رساناست. طیف‌نمایی فتولومینسانس<sup>۲۴</sup> نیز تکنیک موثری در مطالعه مواد و فرایندهای دینامیکی است که در مواد رخ می‌دهد و همچنین سال‌های زیاد ابزار مفیدی برای مشخص کردن کیفیت مواد نیم‌رسانا بوده است. اما مطالعات مشخص و دقیق بر روی نیم‌رساناها، نتایجی از پراش پرتو ایکس، اندازه‌گیری‌های فتولومینسانس عادی<sup>۲۵</sup> و وابسته به زمان<sup>۲۶</sup> و آنتی- استوک فتولومینسانس<sup>۲۷</sup> و فتولومینسانس تحریکی<sup>۲۸</sup> می‌باشد. هر یک از این تکنیک‌ها در تعیین جنبه‌های ویژه‌ای در ارتباط با ماده مفید است و هیچکدام به تنهایی قادر به مشخص کردن کامل همه خصوصیات آشکار نیم‌رسانا نمی‌باشد. در همه این موارد پس از برانگیختگی به منظور بازگشت سیستم به حالت تعادل بازترکیب انجام می‌شود که در نتیجه آن فوتون گسیل می‌گردد.

---

<sup>24</sup> Photoluminescence(PL)

<sup>25</sup> Normal Photoluminescence(NPL)

<sup>26</sup> Time-Resolved Photoluminescence(TRPL)

<sup>27</sup> Anti-Stokes Photoluminescence(ASPL)

<sup>28</sup> Photoluminescence Excitation(PLE)

### ۳-۱ فتولومینسانس (PL):

درفریند گسیل از یک نمونه نیمرسانا، یک الکترون و یا یک شبه ذره دیگر، حالت های با انرژی بالاتر را اشغال می کند، اما به منظور رسیدن به حالت پایداری، انتقال های مجزایی به حالت های با انرژی پایین تر ایجاد می گردد. در این انتقال اختلاف انرژی دو حالت در انتقال های تابشی، به صورت تابش الکترومغناطیسی مثلاً فوتون، گسیل می شود. اما در انتقال های غیر تابشی این اختلاف انرژی علاوه بر گسیل فوتون، همراه با تولید انرژی گرمایی مانند فونون می باشد. بنابراین بدین گونه باز ترکیب های تابشی که از انتقال یک الکترون برانگیخته به حالت پایه صورت می گیرد، لومینسانس گفته می شود. به علت بقای انرژی نیمرسانایی که به این طریق فوتون گسیل می کند در حالت تعادل قرار ندارد. بنابراین به منظور حفظ بقای انرژی، برای ایجاد برانگیختگی لازم است تا از طریق یک منبع تحریک خارجی، انرژی تزریق گردد که برای این منظور روش های متفاوتی وجود دارد. برانگیختگی از طریق ایجاد جریان الکتریکی، الکترو لومینسانس، با استفاده از باریکه الکترونی، کاتود لومینسانس، با ایجاد گرما، ترمولومینسانس، گسیل نور با استفاده از یک فرایند شیمیایی، لومینسانس شیمیایی می باشد. آنچه که در این بخش برای ما مهم و مورد توجه است، برانگیختگی با ایجاد منابع نوری است که فتولومینسانس گفته می شود. فتولومینسانس یکی از تواناترین و مفید ترین تکنیک های مطالعات اپتیکی است. در این روش نیازی به عملیات ویژه ای روی نمونه، قبل از آزمایش نداریم. از طرفی روشی با حساسیت قابل ملاحظه بشمار می رود. همچنین در این روش نمونه مورد تخریب قرار نمی گیرد. به دلایل فوق روش فتولومینسانس، در بررسی نیم رساناها مورد توجه قرار گرفته است. در یک آزمایش فتولومینسانس از یک منبع نوری که معمولاً لیزر است برای برانگیخته کردن نمونه استفاده می شود. لیزر باعث تولید زوج الکترون و حفره در نمونه می شود. یعنی انرژی حاصل از فوتونی که بوسیله لیزر به نمونه اعمال می شود باعث برانگیخته کردن الکترون نوار ظرفیت و فرستادن آن به نوار هدایت می گردد. بنابراین برای برانگیخته کردن الکترون باید از لیزری استفاده کنیم که دارای طول موج بزرگتری از گاف انرژی مورد استفاده باشد. الکترون های برانگیخته بخاطر خاصیت طبیعی خود تمایل دارند تا به حالت

حداقل انرژی بازگردند. این بازگشت که تحت عنوان بازترکیب معرفی شد باعث تابش فوتون از نمونه خواهد شد. با جمع آوری لومینسانس تولید شده و ذخیره آن بصورت تابعی از طول موج فوتون ساطع شده بر حسب شدت، یک طیف فتولومینسانس خواهیم داشت. انرژی فوتون ساطع شده بیانگر مشخصه فرآیند بازترکیب نوری الکترون خواهد بود و با تجزیه و تحلیل طیف فتولومینسانس، دانش ما درباره ساختار و رفتار نمونه در شرایط مختلف افزایش می‌یابد. این نکته قابل ذکر است در شرایط آزمایشگاهی، از لیزر برای تحریک الکترون های نمونه استفاده می‌کنیم در حالیکه در شرایط صنعتی معمولاً از منبع تحریکی الکتریکی استفاده می‌شود. یعنی در عمل فرآیند باز ترکیب نوری و ایجاد تابش بصورت الکتولومینسانس می‌باشد.

در مطالعه ساختارهای ناهمگون به روش فتولومینسانس، انرژی لیزر اعمالی را بیشتر از گاف انرژی مواد تشکیل دهنده در نظر می‌گیرند. بعضی مواقع انرژی لیزر هم از گاف انرژی سد و هم چاه بیشتر است ولی در پاره ای از اوقات این انرژی بین گاف انرژی سد و چاه انتخاب می‌گردد. انتخاب دقیق به چند عامل بستگی دارد :

- ۱) در دسترس بودن منبع برانگیختگی مثل لیزر یا لامپ، در طول موج مورد نظر.
  - ۲) کارایی طول موج مورد نظر برای تولید حامل های بار.
  - ۳) اغلب مایل هستیم برانگیختگی در زیر لایه روی ندهد، بنابراین مجبور خواهیم بود انتخاب های خاصی را حذف کنیم.
  - ۴) در بعضی مواقع مایل هستیم که حامل ها فقط از یک موضع خاص مثلاً فقط از چاه کوانتومی خارج شود. با انتخاب انرژی لیزر بین گاف انرژی سد و چاه به این منظور دست خواهیم یافت.
- الکترون برانگیخته شده از چندین راه قادر به انجام عمل باز ترکیب است، که بطور کامل در فصل دوم مورد بررسی قرار گرفت.

پیکربندی نوعی آزمایش فتولومینسانس نیز در شکل (۳-۱) نشان داده شده است.

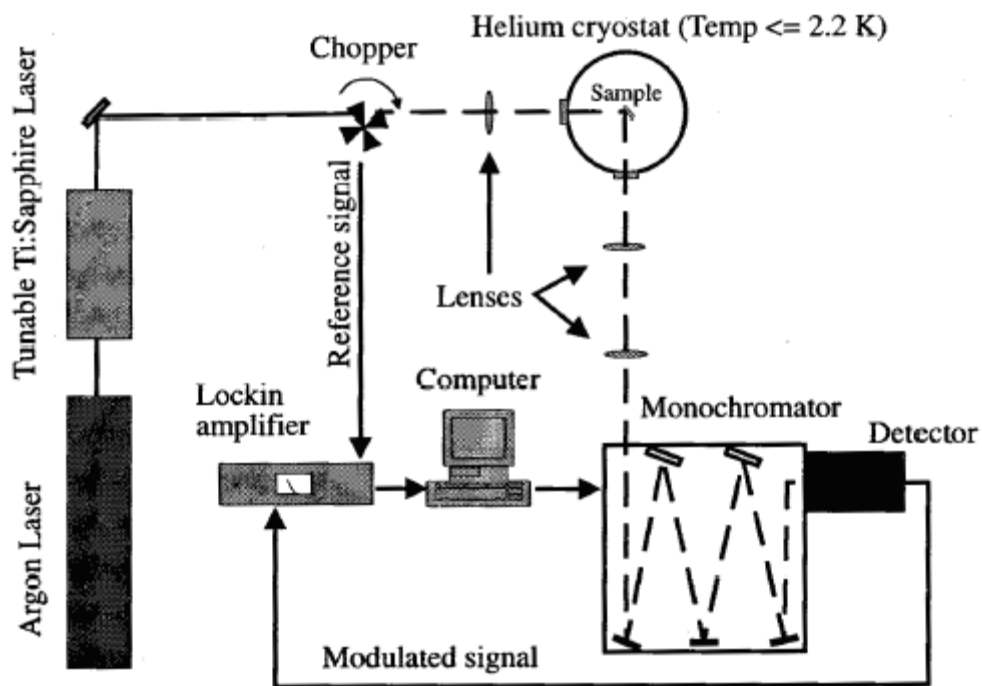
این پیکربندی شامل چهار قسمت عمده زیر می‌باشد :

منبع برانگیختگی، سرماسنج<sup>۲۹</sup>، تک رنگ کننده و آشکار ساز حساس به فوتون.

---

<sup>۲۹</sup> Cryostat

همانطور که توضیح داده شد، منبع برانگیختگی معمولاً یک لیزر پایدار و تک فرکانس انتخاب می‌شود. محفظه سرماسنج که نمونه داخل آن قرار می‌گیرد دمای نمونه را پایین نگاه می‌دارد. برای داشتن پیک فتولومینسانسی تیزتر و واضحتر باید دمای نمونه پایین باشد. طیف فتولومینسانس در دماهای بالاتر بخاطر برهمکنش های قوی بین الکترون و ارتعاشهای شبکه (گرما) پهن تر می شود از طرفی در دماهای بالاتر باز ترکیب های غیرنوری غلبه یافته و مطالعه باز ترکیب های نوری را با مشکل مواجه می‌کند.



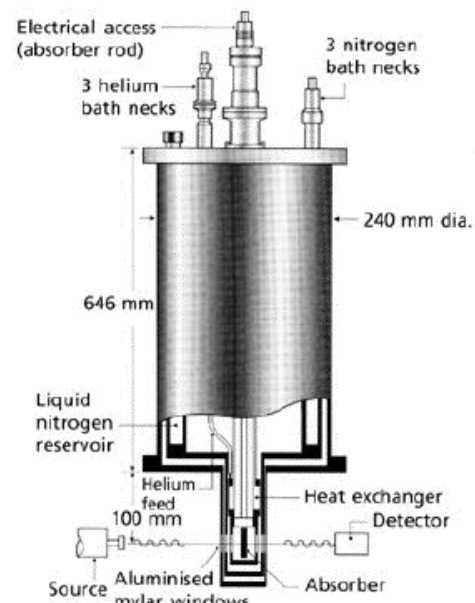
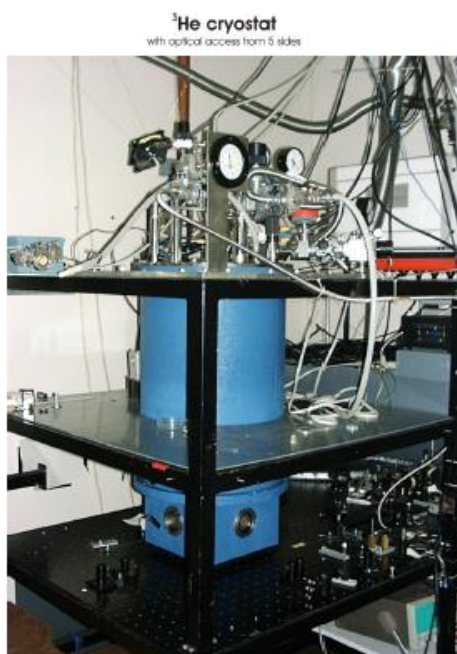
شکل (۱-۳) پیکربندی نوعی آزمایش فتولومینسانس.

برای جدا کردن طول موج های فتولومینسانس از تک رنگ کننده استفاده می‌شود. به این ترتیب آشکار ساز با جاروب کردن طول موج های مختلف خارج شده از تک رنگ کننده، به ثبت داده های لومینسانس می پردازد.

آشکار ساز، سیگنال های لومینسانس را به سیگنال های الکتریکی قابل اندازه گیری تبدیل می کند. بخاطر ضعف بودن شدت لومینسانس و بمنظور اندازه گیری طیف مربوطه ناچار به استفاده از تقویت کننده<sup>۳۰</sup> هستیم و به این منظور باید از یک سیگنال زمینه به منظور تعیین مبدأ استفاده کنیم. در نتیجه با استفاده از

<sup>30</sup> Amplifier

یک جدا کننده پرتو  $^{31}$ ، یک پرتو را به مستقیماً و دیگری را پس از عبور از نمونه مورد مطالعه، به تقویت کننده می بریم. بخاطر طرز کار این تقویت کننده که سیگنال ورودی آن حتماً باید پالسی باشد و از طرفی نور لیزر اولیه پیوسته است از وسیله‌ای تحت عنوان Chopper برای تبدیل سیگنال پیوسته به پالسی استفاده می کنیم. به منظور بدست آوردن طیف بهتر و با کیفیت بالاتر، لنزهایی نیز مورد نیاز است که فاصله کانونی آنها کوچک باشد و بدین ترتیب نوری که به آشکارساز می رسد را به سمت سوراخ کوچکی روی آن متمرکز می کند. در بعضی مواقع نیز در سر راه لیزر، اینگونه لنزها قرار داده می شود که نور بیشتری را به نمونه برساند. سپس از طیف نمایی و تعیین طیف فتولومینسانس، نموداری شامل شدت طیف بر حسب طول موج رسم می گردد.



شکل (۲-۳) طرحواره ای از سرما سنج ( شکل سمت راست) به همراه یک نمونه واقعی (شکل سمت راست) که با He مایع کار می کند.

با تغییر بعضی از قسمت های آزمایش استاندارد فتولومینسانس می توان به طراحی آزمایش هایی مثل فتولومینسانس وابسته به زمان، فتولومینسانس تحریکی و آنتی - استوک فتولومینسانس و غیره پرداخت.

### ۲-۳ فتولومینسانس عادی (NPL):

<sup>31</sup> Beam splitter

سه نوع تکنیک آشکارسازی و یا برانگیختگی وجود دارد که از جمله آنها طیف نمایی فتولومینسانس عادی است که در آن به منظور تحریک نمونه، از لیزری با طول موج ثابت استفاده می شود، اما برانگیختگی با انرژی کمی بالاتر از انرژی گاف نواری انجام می گیرد و نمونه مورد بررسی در این روش معمولاً احتیاج به آماده سازی خاصی قبل از اندازه گیری ندارد. معمولاً در طیف ثبت شده نیز فرایندهای بازترکیب قویتر نمایان می باشند و فرایندهای ضعیف تر حذف می گردند.

### ۳-۳ فتولومینسانس تحریکی (PLE):

این تکنیک بر اساس طیف جذبی است. آشکارساز 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 موج های معینی آشکار ساز در خروجی ماکزیمم سیگنال را ثبت می کند. در این روش بر خلاف روش PL که معمولاً در طیف فرایندهای بازترکیب قوی تر نمایان هستند و فرایندهای ضعیف تر حذف می شوند، هر فرآیندی حتی بازترکیب های ضعیف را می توان آشکار سازی کرد.

### ۳-۴ فتولومینسانس انتخابی (SPL):<sup>۳۲</sup>

نوع سومی که برای تکنیک آشکارسازی وجود دارد ، طیف نمایی فتولومینسانس انتخابی می باشد. در این تکنیک برای افزایش سیگنال لومینسانس از تشدید تحریکی استفاده می گردد، اما انرژی تحریکی به میزان گاف نواری تعیین می شود و آشکارساز در انرژی های کمتر از گاف نواری ، طیف مورد نظر را ثبت می نماید. در واقع در این روش آشکارساز روی طول موج های خاصی ، ثابت شده و قله مربوط به آن نیز در طیف مورد نظر، برجسته تر می شود و بنابراین دقیق تر مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۳-۵ فتولومینسانس وابسته به زمان (TRPL):

مطالعه دینامیکی فرایندهای بازترکیبی توسط فتولومینسانس وابسته به زمان اطلاعات بسیار مفیدی راجع به نوع بازترکیب و طول عمر آنها به ما می دهد که کمک موثری در درک فیزیک این فرایندهاست. در روش TRPL چگالی احتمال گسیل یک فوتون خاص در زمان معین پس از برانگیختگی، از چگالی توزیع لومینسانس

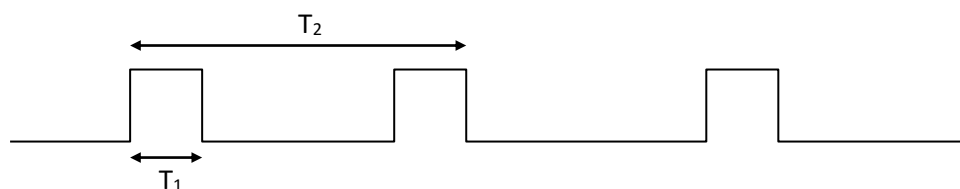
---

<sup>۳۲</sup> Selective Photoluminescence

در طی زمان پیروی می‌کند. با فرض اینکه کسر ثابتی از فوتون‌های گسیلی آشکار سازی می‌شود، آشکار سازی یک فوتون خاص در زمان مشخص بعد از برانگیختگی نیز دارای همان چگالی احتمال است یعنی منحنی شدت لومینسانس بر حسب زمان که در موارد زیادی استفاده می‌شود حتی با باز ترکیب یک الکترون و یک حفره نیز قابل ترسیم است اما به علت انرژی کم یک فوتون آشکار سازی آن با مشکلاتی به همراه خواهد بود. یکی از تفاوت‌های عمده روش TRPL نسبت به روش PL استفاده از لیزر پالسی می‌باشد. لیزر پالسی باعث برانگیختگی لحظه‌ای الکترون می‌گردد و پس از قطع عامل برانگیختگی، شدت لومینسانس کاهش می‌یابد. بر اساس مطالعات تئوری تغییرات زمانی شدت فتولومینسانس یک رابطه نمایی به صورت  $I = I_0 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta\right]$  گزارش شده است [۳] که در این رابطه  $\beta$  به ابعاد مراکز جایگزیدگی مربوط می‌شود و  $\tau$  زمان واهلش است. بنابراین شیب منحنی لگاریتمی شدت بر حسب زمان، معکوس زمان واهلش را نشان می‌دهد. هرچه  $\beta$  به یک نزدیکتر باشد، نمونه دارای مراکز جایگزیدگی کمتری است زیرا نشانگر رفتار تک نمایی زمان واهلش می‌باشد. این رفتار تک نمایی ناشی از آن است که حامل‌ها بدون عمل جایگزیدگی باز ترکیب می‌نمایند. چون رابطه شدت-زمان بصورت نمایی بیان می‌شود برای بدست آوردن زمان واهلش، محور مربوط به شدت را بصورت لگاریتمی رسم می‌کنیم. بدین ترتیب زمان واهلش با معکوس شیب خط، بدست می‌آید. حال اگر منحنی مزبور بصورت یکنواخت میرا شود آنگاه تک نمایی بوده و دارای یک زمان واهلش می‌باشد. نمونه‌هایی که دارای منحنی زمان واهلش تک نمایی هستند، دارای مراکز جایگزیدگی کمتری هستند. غیر تک نمایی بودن تغییرات زمانی پیک طیف فتولومینسانس دلیلی بر دو مرحله‌ای بودن فرایند باز ترکیب در نمونه می‌باشد. قسمت اول منحنی فتولومینسانس نشانگر زمان لازم برای رسیدن حامل‌ها به حداقل انرژی در مراکز جایگزیدگی است. با افزایش توان برانگیختگی، حامل‌های نوری افزایش می‌یابند و بدین ترتیب مراکز جایگزیدگی استتار می‌شود.

با تنظیم آشکار ساز روی بازه طول موجی خاص میتوان به مجموعه‌ای از نتایج به صورت سه بعدی دست یافت. این سه بعد شامل زمان، طول موج و شدت هستند. لیزر پالسی مورد استفاده در TRPL در مدت زمان کوتاهی مثلاً در حدود  $T_1$  فمتوثانیه روی نمونه اعمال شده و باعث برانگیختگی الکترون‌ها می‌گردد. سپس در مدت زمانی در حدود  $T_2$  میکروثانیه نمونه را به حال خود رها می‌کند. با توجه به اینکه فتولومینسانس این نمونه پس از زمانی در حدود چند پیکوثانیه میرا می‌شود، بنابراین محدوده اندازه‌گیری زمانی خود را در بازه‌ی زمانی چند پیکو ثانیه پس از زمان برانگیختگی قرار می‌دهیم. در حقیقت در طی این زمان همواره

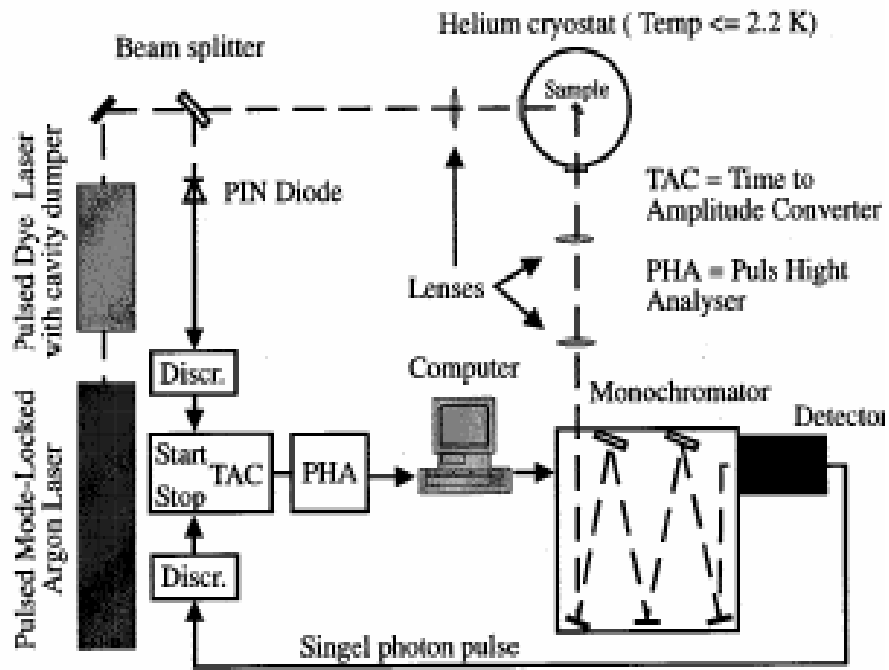
فتولومینسانس داریم و فقط شدت آن کاهش می‌یابد. مسئله شدت نیز همیشه با تعداد بازترکیب‌ها متناسب است بنابراین هر چه شدت فتولومینسانس سریعتر کاهش یابد به این معناست که سرعت بازترکیب‌ها بیشتر بوده است. در نتیجه با استفاده از شیب منحنی شدت — زمان می‌توان به معیاری برای فتولومینسانس نمونه دست یافت. در واقع شیب منحنی فتولومینسانس دقیقاً با میرایی آن نسبت مستقیم دارد. در تمام مدت زمان مورد بحث یعنی چه زمان برانگیختگی و چه زمان رها سازی نمونه، شدت فتولومینسانس ثبت می‌شود. با ثبت شدت فتولومینسانس حاصل از هر نمونه در بازه طول موجی انتخاب شده اطلاعات سه بعدی بر حسب شدت، طول موج و زمان واهلش برای فتولومینسانس آن نمونه را خواهیم داشت. در تصویر زیر طرح شماتیک از بازه زمانی مربوط به لیزر پالسی استفاده شده در آزمایش TRPL نشان داده شده است که زمان برانگیختگی بصورت اغراق آمیز در مقایسه با زمان رها سازی رسم شده است.



شکل (۳-۳) مقایسه طرحوار از زمان برانگیختگی  $T_1$  و زمان رها سازی  $T_2$  در لیزر پالسی مورد استفاده.

تفاوت های عمده میان پیکربندی آزمایش فتولومینسانس در شکل (۳-۱) و سیستم TRPL در شکل (۳-۴) را می‌توان در دو عامل خاصه کرد. علاوه بر قسمت مربوط به برانگیختگی که در بالا توضیح داده شد قسمت موسوم به آشکارساز نیز در این دو پیکربندی متفاوت طراحی شده است.





شکل (۳-۴) پیکربندی نوعی آزمایش فتولومینسانس وابسته به زمان.

- [١] R.dingle , H.L.Stormer , A.C.Gossard and W.Wiegmann , Appl.phys.Lett.33.663.
- [٢] G.Martin ,A.Botchkare and et al ,Appl.phys.Lett 68,2341(1996).
- [٣] R.Mach and G.O.Muller ,G Cryst.Growth 101,989(1990).
- [٤] F.Bernardini and et al ,Phy Rev.B56,R10024(1997).
- [٥] G.Singh , , Appl.phys.Lett.64(20),2694(1994).
- [٦] S.H.Wei and Zunger , Appl.phys.Lett.69,2710(1996).
- [٧] A.Polhmeni and et al , Appl.phy.Lett.77,2870(2000).
- [٨] A.Reale,and et al, J.Appl.phys.93.400(2003).
- [٩] S.Chichibu,and et al, Appl.phys.Lett.69,4188(1996).
- [١٠] P.Lefebvre,and et al,Phys,Rev.b59,15363(1999).
- [١١] G.D.Gilliand,Photoluminescence Spectroscopy of Crystalline Semiconductors,Material Science and Engineering,R18(1997).
- [١٢] F.Karlsson,Single Quantum Dot Spectroscopy by Means of Micro Photoluminescence with Resonant Excitation,LITH-IFM-EX-793,Link  
oping University(1999).

## فصل ٤

# آنتی - استوک فتولومینسانس

- ✓ معرفی پدیده آنتی - استوک فتولومینسانس
- ✓ مشاهدهی آنتی - استوک فتولومینسانس در ترکیبات نیمرسانا
- ✓ مکانیزم‌های آنتی - استوک فتولومینسانس
- ✓ بستگی شدت سیگنال آنتی - استوک فتولومینسانس به توان تحریک
- ✓ مثالی از کاربرد آنتی - استوک فتولومینسانس

## مقدمه :

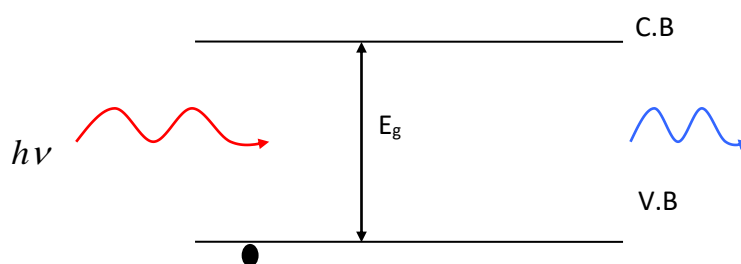
در فصل سوم یکی از روش های مطالعات اپتیکی نیمرساناها را فرایند آنتی-استوک فتولومینسانس معرفی کردیم . زمانی که به خاطر محدودیت ابزار برای تحریک نمونه مورد مطالعه لیزری با فرکانس بالاتر نسبت به گاف نواری آن در اختیار نداریم و ناگزیر هستیم از لیزری با فرکانس پایین تر نسبت به گاف نواری آن استفاده کنیم، چگونگی انجام فرآیند تحریک در این حالت منجر به پدیده ی آنتی — استوک فتولومینسانس<sup>33</sup> و بررسی مکانیزم های موثر در آن خواهد شد. پدیده آنتی- استوک فتولومینسانس در سیستم های گوناگون از قبیل اتم ها و مولکول ها [۱]، پلیمرها [۲]، نیمرساناهای آمورف [۳] و در نیمرساناهای بلوری با ساختارهای ناهمگون [۴،۵] مشاهده شده است. از دلایل بررسی این پدیده می توان به تولید انرژی گسیلی با افزایشی حدود ۷۰۰ (meV) نسبت به انرژی تحریک در سیستم GaAs/ordered-(Al)GaInP [۴] که نواحی قرمز، نارنجی و سبز طیف را شامل می شود و از نظر تکنولوژی بسیار با اهمیت است و تشخیص نوع همردیفی نواری در فصل مشترک ساختارهای ناهمگون اشاره کرد. همچنین این پدیده در تبدیل فرکانسی لیزرهای نیمرسانا قابل استفاده است [۵].

---

<sup>33</sup> Anti-Stokes Photoluminescence (ASPL)

#### ۴-۱ معرفی پدیده آنتی - استوک فتولومینسانس :

همانطور که اشاره شد در پدیده آنتی - استوک فتولومینسانس (ASPL) انرژی فوتون‌های فرودی برای تحریک نمونه از انرژی فوتون‌های گسیلی از آن کمتر است، فرآیند جذب انرژی کمتر توسط نمونه و گسیل انرژی بیشتر، به وارونی انرژی موسوم است. به همین دلیل گاهی به فرایند ASPL ، فتولومینسانس وارونه نیز می‌گویند. اگر انرژی فوتون فرودی  $h\nu$  باشد الکترون نوار ظرفیت با جذب آن خود را به یک تراز مجازی در ناحیه گاف نواری خواهد رساند و از آنجا توسط مکانیزم مناسبی که بعداً شرح داده خواهد شد خود را به لبه‌های نوار رسانش می‌رساند و سپس توسط حفره مستقر در نوار ظرفیت فرآیند بازترکیب تابشی صورت می‌گیرد. به طور کلی تفاوت فتولومینسانس عادی<sup>۳۴</sup> و آنتی - استوک فتولومینسانس را می‌توان بدین صورت اشاره کرد که در فتولومینسانس عادی (NPL) انرژی فوتون‌های گسیلی کوچکتر از انرژی فوتون‌های تحریک است، در حالیکه در آنتی - استوک فتولومینسانس انرژی فوتون‌های گسیلی بزرگتر از انرژی فوتون‌های تحریک است.



تصویر (۴-۱) طرحواره‌ای از پدیده آنتی - استوک فتولومینسانس، انرژی فوتون فرودی  $h\nu$  از گاف نواری کوچکتر است ( $h\nu < E_g$ ).

<sup>34</sup> Normal Photoluminescence (NPL)

عواملی که در افزایش بازده ASPL موثر هستند را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود :

الف) برداشته شدن قید پایستگی تکانه خطی حامل‌ها توسط حضور یک فصل مشترک ناهمگون : بدیهی است که وجود فصل مشترک ناهمگون اثرات اساسی روی رفتار انرژی‌ها و توابع موج حامل‌ها در سیستم‌های با ابعاد کوانتومی خواهد داشت. توسط محاسبات تئوری مشخص شده است [۶] که پایستگی تکانه خطی الکترون در راستای عمود بر فصل مشترک ناهمگون برداشته می‌شود. بنابراین با حذف قید پایستگی تکانه خطی در ای راستا بازدهی بازترکیب تابشی افزایش خواهد یافت.

ب) وجود حالت‌های اکسیتونی مقید یا جایگزیده در منطقه نیم‌رسانای با گاف نواری کوچکتر : در ساختارهای ناهمگون پس از تحریک حامل‌ها و رسیدن آنها به لبه‌های نوار رسانش وجود حالت‌های جایگزیده برای ممانعت از بازگشت حامل‌ها و بازترکیب تابشی در منطقه نیم‌رسانای با گاف نواری کوچکتر، ضروری خواهد بود تا این حامل‌ها مجدداً توسط جذب فوتون خود را به منطقه نیم‌رسانای با گاف نواری بزرگتر برسانند.

ج) وجود هم‌ردیفی نواری نوع II در فصل مشترک ساختار ناهمگون : همانطور که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است، در ساختار ناهمگون نوع- I هم الکترون و هم حفره باید بر انرژی سد غلبه کرده و خود را به منطقه نیم‌رسانای با گاف نواری بزرگتر برسانند، در صورتی که در ساختار ناهمگون نوع- II تنها تحریک یک نوع از حامل‌ها برای غلبه بر انرژی سد کافی است. در حقیقت برای مشاهده سیگنال ASPL از نمونه، در ساختار ناهمگون نوع- I جذب سه فوتون و در ساختار ناهمگون نوع- II جذب دو فوتون ضروری است.



شکل (۴-۲) طرحواره‌ای از وارونی انرژی برای الف) ساختار ناهمگون نوع I ب) ساختار ناهمگون نوع II.

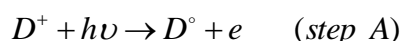
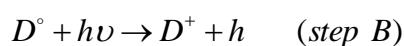
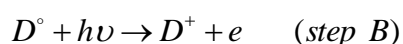
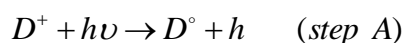
د) وجود افت و خیزهای نواری (حالت‌های جایگزیده در نوار رسانش) در منطقه نیمرسانای با گاف نواری بزرگتر در ساختارهای ناهمگون نوع-ا که از بازگشت حامل‌ها به ماده با گاف نواری کوچکتر جلوگیری می‌کند.

#### ۴-۲ مشاهده آنتی- استوک فتولومینسانس در ترکیبات نیمرسانا :

##### ۴-۲-۱ بررسی پدیده ASPL در ساختارهای حجمی: ۳۵

پدیده آنتی-استوک فتولومینسانس در ساختارهای حجمی گوناگون مشاهده شده است. ایــــن اثر در ترکیبات (II-VI) آرایش یافته با مس و Gap آرایش یافته با اکسیژن [۷] و در GaAs حجمی [۸] گزارش شده است. در این قسمت پدیده ASPL را در یک نمونه GaAs حجمی که شامل یک تراز عمیق می‌باشد را بررسی می‌کنیم.

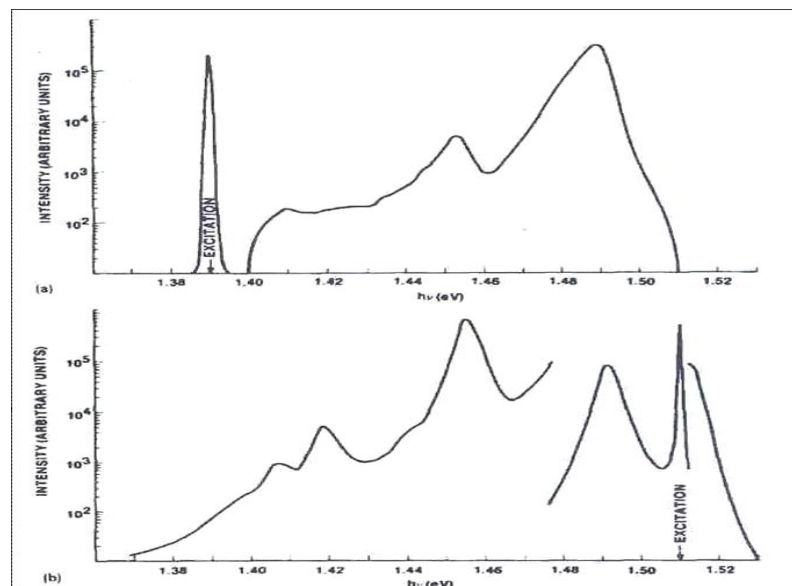
اثر آنتی- استوک فتولومینسانس با فرض یک تحریک اپتیکی دو مرحله‌ای توسط یک زوج الکترون- حفره و از طریق یک تراز عمیق توضیح داده می‌شود. در مرحله A الکترون از نوار ظرفیت به یک تراز عمیق تحریک می‌شود و در مرحله B یک الکترون از تراز عمیق به نوار رسانش انتقال می‌یابد. اگر تراز عمیق یک دهنده باشد مرحله A اولین مرحله در ماده نوع P- و دومین مرحله در ماده نوع n- خواهد بود. مکانیزم دو مرحله‌ای را می‌توان به صورت زیر نوشت:



تصویر (a) (۳-۴) زیر شدت آنتی- استوک فتولومینسانس را برای نمونه GaAs حجمی در دمای ۸ کلوین نشان می‌دهد، در این دما گاف نواری GaAs حدود ۱/۵۲ eV می‌باشد. همانطور که در تصویر مشاهده

<sup>۳۵</sup> Bulk

می‌کنید انرژی فوتون تحریک  $1/39\text{eV}$  است. لومینسانس ASPL عمدتاً شامل دو پیک می‌باشد که شدت پیک بزرگتر حدود ۵ مرتبه بزرگتر از حالت زمینه است. وارونی انرژی مربوط به این پیک حدود  $0/2\text{eV}$  ( $200\text{ kT}$ ) است. بنابراین برانگیختگی گرمایی حامل‌های ایجاد شده در ناحیه GaAs نمی‌تواند باعث ایجاد وارونی انرژی شده باشد.



تصویر (۳-۴) نمودار آنتی-استوک فتولومینسانس (a) و فتولومینسانس (b) مربوط به نمونه GaAs [۸].

در تصویر (b) (۳-۴) طیف فتولومینسانس را برای همین نمونه مشاهده می‌کنید. در این حالت انرژی فوتون تحریک  $1/51\text{ eV}$  است. گرچه این انرژی در دمای ۸ کلوین از گاف نواری GaAs کوچکتر است اما از اختلاف این انرژی میان نوار رسانش و تراز انرژی پذیرنده<sup>۳۶</sup> بزرگتر می‌باشد. با مقایسه طیف NPL و ASPL متوجه تشابه ظاهری گذارها در هر دو مورد خواهیم شد که احتمالاً نحوه‌ی فرآیند باز ترکیب برای هر دو مشابه هم

<sup>۳۶</sup> Acceptor  
<sup>۲</sup> Red shift



بوده است. همچنین با مقایسه این دو، تفاوت‌های اساسی نیز مشاهده می‌شود که عبارتند از: افزایش پهنای طیف ASPL به دلیل برهمکنش‌های کولنی و بواسطه حضور ناخالصی‌های کم عمق یونیزه که توسط حامل‌های آزاد استتار می‌شوند و شیفت قرمز<sup>۲</sup> (جابجایی انرژی به سمت انرژی‌های کوچکتر) در موقعیت پیک‌های ASPL نسبت به NPL که دلیل آن در دست بررسی است. هنگامیکه انرژی فوتون تحریک حدود  $1.32 \text{ eV}$  (تحریک بسیار ضعیف) می‌باشد، لومینسانس ASPL مشاهده شده است. در این شرایط تحریک، پهنای طیف لومینسانس مجدداً افزایش یافته و شیفت قرمز مربوط به موقعیت پیک‌های ASPL قابل ملاحظه‌تر شده است. بنابراین احتمالاً لومینسانس ASPL از نواحی از نمونه ناشی شده است که منشا پیدایش NPL نبوده است.

#### ۴-۲-۲ بررسی پدیده ASPL در ساختارهای ناهمگون:

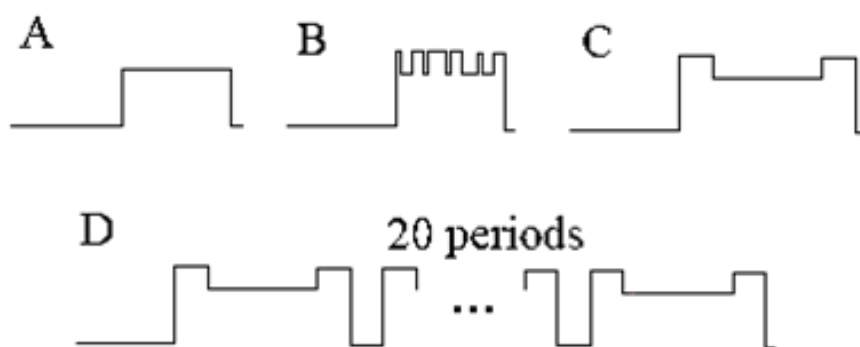
برای بررسی پدیده آنتی-استوک فتولومینسانس در ساختارهای ناهمگون نمونه‌های مختلفی از ساختارهای ناهمگون  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  بررسی کرده و با ساختارهای ناهمگون  $\text{GaAs}/\text{ordered}(\text{Al})\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  مقایسه می‌کنیم. همانطور که در قسمت مقدمه اشاره شد تولید انرژی گسیلی با افزایشی حدود  $700 \text{ meV}$  نسبت به انرژی تحریک در سیستم  $\text{GaAs}/\text{ordered}(\text{Al})\text{GaInP}$  بر اهمیت بررسی این مقایسه می‌افزاید. لازمه مشاهده سیگنال ASPL در این ساختارها عبارتند از: الف) مکانیزمی برای انتقال الکترون‌ها یا حفره‌ها از ماده با گاف نواری کوچکتر به ماده با گاف نواری بزرگتر وجود داشته باشد. ب) حاملها قبل از آنکه باز ترکیب تابشی کنند به منطقه نیمرسانای با گاف نواری کوچکتر بازنگردند. برای مورد الف فرآیندهایی که مسئول وارونی انرژی حامل‌ها و یا انتقال آنها از ماده با گاف نواری کوچکتر به ماده با گاف نواری بزرگتر هستند و در بخشهای بعد توضیح داده خواهد شد، لازم است و برای مورد ب وجود یک مکانیزم جایگزیده برای حامل‌ها در منطقه نیمرسانای با گاف نواری بزرگتر ضروری است. در ساختارهای ناهمگون نوع II- با خمش نوار این شرایط فراهم می‌شود و در ساختارهای ناهمگون نوع I- نیز منطقه نیمرسانای با گاف نواری بزرگتر می‌بایست خود دارای یک مکانیزم جایگزیده باشد. در آلیاژهای  $\text{ordered}(\text{Al})\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  نیز معمولاً افت و خیزهای موضعی در انرژی گاف نواری بدلیل تغییراتی که در میزان درجه نظم<sup>۳۷</sup> وجود دارد به عنوان یک مکانیزم پیشنهاد می‌شوند [۱۰] زیرا از نمونه  $\text{GaAs}/\text{random-alloy}\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  سیگنال آنتی-استوک فتولومینسانس مشاهده نشده است. در هر حال نمونه  $\text{GaAs}/(\text{Al})\text{GaInP}$  به عنوان یک سیستم نوعی برای مطالعه فیزیک آنتی-استوک

<sup>37</sup> ordering

فتولومینسانس نامناسب است، زیرا کیفیت فصل مشترک  $\text{GaAs}/\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  قویا به شرایط رشد وابسته است. از آنجاکه فرایند آنتی-استوک فتولومینسانس با فصل مشترک همه نمونه های اصلی در ارتباط می باشد، تغییر در کیفیت فصل مشترک نمونه ها آنها را برای مقایسه دشوار می سازد. همچنین پدیده نظم خود به خودی<sup>۳۸</sup> (این پدیده غالباً پس از فرایند رشد رخ می دهد). در نمونه های  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  (Al) ساختار نواری آن را به طور قابل توجهی اصلاح می کند و روی همردیفی نواری میان  $\text{GaAs}$  و  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  (Al) تاثیر بسزایی می گذارد، مسلماً همین امر مقایسه نمونه های مختلف را دشوار خواهد ساخت. به عنوان مثال بر اساس مطالعات انجام شده نوع همردیفی نواری میان  $\text{GaAs}$  و  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  بسته به میزان درجه نظم هم از نوع-۱ و هم از نوع-۲ می تواند باشد [۱۱]. زیمان و همکارانش ادعا کردند که همه ساختارهای ناهمگون  $\text{GaAs}/\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  که پدیده آنتی-استوک فتولومینسانس از آنها مشاهده شده است، همردیفی نواری نوع-۲ دارند [۱۲].

در نتیجه بر اساس این ادعا عدم مشاهده سیگنال آنتی-استوک فتولومینسانس در  $\text{GaAs}/\text{random-alloy}$  بدلیل همردیفی نواری نوع-۱ یا فقدان یک مکانیزم جایگزیده می باشد [۱۳]. بدیهی است برای مطالعه فیزیک آنتی-استوک فتولومینسانس حذف هر گونه تردید در مورد نوع همردیفی نواری ضروری می باشد.

نمونه های مختلف ساختار ناهمگون  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  را در تصویر زیر مشاهده می کنیم:

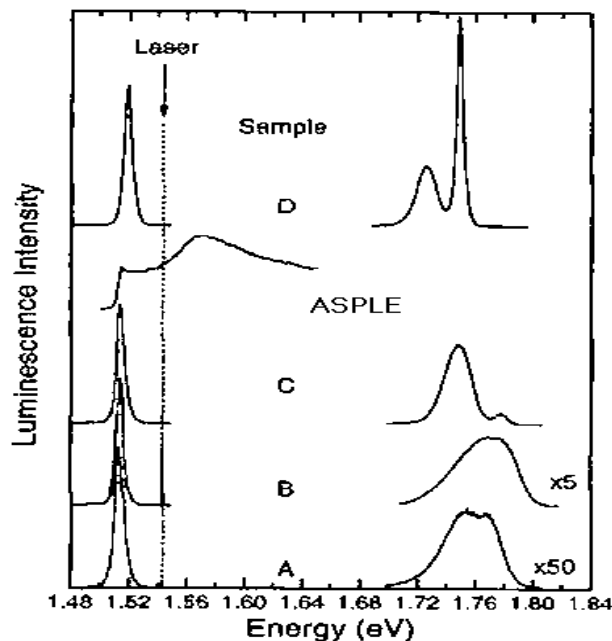


تصویر (۴-۴) نمونه های مختلف از ساختارهای ناهمگون

. [9]  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

<sup>38</sup> spontaneous ordering

نمونه A که به عنوان نمونه مرجع در نظر گرفته شده شامل یک لایه  $1000$  آنگسترومی  $Al_{0.18}Ga_{0.82}As$  بر روی زیر لایه  $GaAs$  می‌باشد. در نمونه B لایه  $Al_{0.18}Ga_{0.82}As$  توسط یک ابر شبکه بی نظم  $^{39}$  جایگزین شده و شامل لایه‌های  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$  و  $Al_{0.20}Ga_{0.80}As$  به ضخامت ده آنگستروم می‌باشد. در نمونه C لایه‌های  $300$  آنگسترومی  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  در میان لایه  $1000$  آنگسترومی  $Al_{0.19}Ga_{0.81}As$  و لایه  $GaAs$  قرار داده شده است. به طوریکه یک چاه کوانتومی  $Al_{0.19}Ga_{0.81}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  تشکیل شده است. در حقیقت لایه‌های  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  به عنوان یک سد برای جلوگیری از برگشتن حامل‌ها از لایه  $Al_{0.19}Ga_{0.81}As$  به لایه‌های  $GaAs$  می‌باشد. نمونه آخر یعنی نمونه D شامل  $20$  پرپود از ساختار  $Al_{0.17}Ga_{0.83}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  مشابه نمونه C می‌باشد به طوری که توسط لایه‌های  $300$  آنگسترومی  $GaAs$  از هم جدا شده‌اند. بنابراین چاه کوانتومی  $GaAs$  برای ایجاد و محدودیت حامل‌های تحریک شده می‌باشد. اندازه گیری آنتی- استوک فتولومینسانس در دمای  $10$  کلوین انجام شده و لیزر تحریک دارای طول موج  $8034$  آنگستروم و انرژی  $1/54$  eV می‌باشد. تصویر (۴-۵) طیف آنتی- استوک فتولومینسانس و فتولومینسانس عادی مربوط به نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در همه نمونه‌ها موقعیت انرژی پیک مربوط به سیگنال آنتی- استوک حدود  $1/75$  eV است.



تصویر (۴-۵) طیف لومینسانس نمونه ها بر حسب انرژی تحریک. سیگنال آنتی-استوک فتولومینسانس برای همه نمونه ها حدود  $eV$  ۱,۷۵ است. برای نمونه C طیف ASPLE نیز نشان داده شده است [۹].

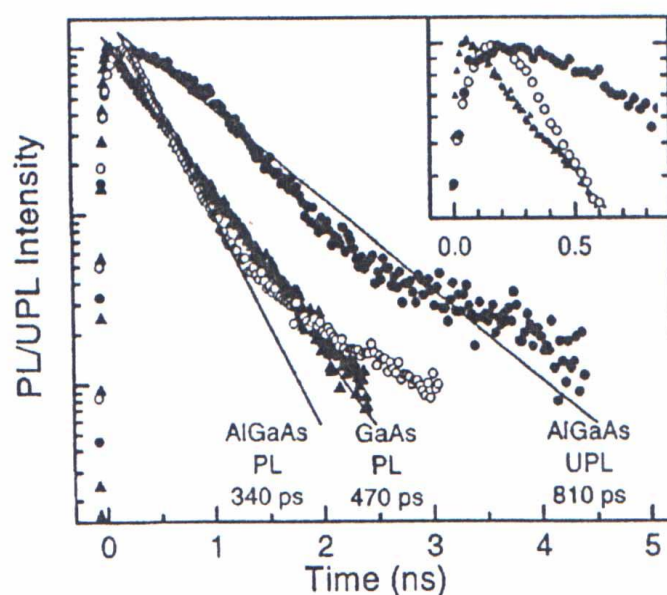
نمونه A ضعیف ترین سیگنال آنتی- استوک فتولومینسانس را نشان می دهد. اگرچه برای حاملها محدودیتی وجود ندارد اما ضخامت نسبتاً بزرگ لایه  $Al_xGa_{1-x}As$  به حامل ها اجازه می دهد تا قبل از آنکه به چاه GaAs بازگردند، باز ترکیب تابشی کنند. همچنین برای لایه  $Al_xGa_{1-x}As$  که ضخامت آنها کمتر از ۵۰۰ آنگستروم است سیگنال ASPL مشاهده نشده است.

در نمونه B که حامل های تحریک شده در لایه یک ابر شبکه بینظم (DSL) جایگزیده میشوند ، سیگنال آنتی- استوک فتولومینسانس، ۱۰ مرتبه نسبت به نمونه A قویتر است که اهمیت مکانیزم جایگزیده را در این پدیده نشان می دهد.

در نمونه C سیگنال آنتی- استوک فتولومینسانس ، ۵ مرتبه قویتر از نمونه B می باشد. بنابراین محدودیت حامل های تحریک شده در لایه  $Al_{0.19}Ga_{0.81}As$  توسط سد  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  برای جلوگیری از بازگشت حامل ها به لایه های GaAs مکانیزم مؤثرتری نسبت به وجود DSL در نمونه B می باشد. در نمونه D سیگنال آنتی- استوک فتولومینسانس، ۲ مرتبه قویتر از نمونه C می باشد و قویترین سیگنال ASPL را نشان می دهد که احتمالاً بدلیل بهبود کیفیت نمونه به لحاظ اپتیکی می باشد.

از آنجا که طیف گسیلی آنتی-استوک فتولومینسانس به انرژی فوتون تحریکی (ASPLE) میتواند اطلاعات مفیدی در خصوص پیدایش حامل های بار شرکت کننده فراهم کند طیف ASPLE مربوط به نمونه C رسم شده است. همانطور که تصویر (۴-۵) نشان داده شده است طیف های آنتی-استوک فتولومینسانس زمانی که انرژی تحریک کمتر از گاف نواری GaAs باشد ایجاد نمی شوند. همچنین حامل های شرکت کننده در باز ترکیب های تابشی آنتی-استوک فتولومینسانس بایستی نخست در ناحیه GaAs ایجاد شده و سپس از این ناحیه توسط مکانیزم مناسبی که باعث وارونی انرژی می شود به نوارهای رسانش و ظرفیت  $Al_xGa_{1-x}As$  برسند. قابل ذکر است طیف ASPLE مشاهده شده مشابه طیف ASPLE در سیستم GaAs/ordered-(Al)GaInP می باشد.

اندازه گیریهای فتولومینسانس وابسته به زمان مربوط به نمونه D در تصویر (۴-۶) نشان داده شده است. واهلش PL مربوط به  $Al_{0.19}Ga_{0.81}As$  به صورت غیر تک نمایی و دارای دو مولفه می باشد. زمان افزایش PL بدلیل سرد شدن حامل ها  $40^\circ$  آهسته می باشد.



تصویر ۴-۶: طرحواره‌ای از اندازه‌گیری‌های فتولومینسانس وابسته به زمان مربوط به نمونه D نقاط مثلثی PL مربوط به GaAs می باشد و نقاط دایره‌های باز PL مربوط به  $Al_xGa_{1-x}As$  می باشد و نقاط دایره‌های بسته مربوط به آنتی - استوک فتولومینسانس می باشد. [۹].

زمان افزایش سیگنال آنتی-استوک فتولومینسانس مشابه زمان افزایش PL مربوط به  $Al_xGa_{1-x}As$  دارای تحذب و واهلش آن در دو نانو ثانیه اول غیر تک نمایی می باشد. بنابراین دینامیک واهلش ASPL باید مشابه واهلش PL مربوط به  $Al_xGa_{1-x}As$  باشد. البته هنگامیکه فرایند ASPL حامل ها را به لایه های  $Al_xGa_{1-x}As$  انتقال می دهد، هنوز حامل هایی در لایه GaAs وجود دارند، به همین دلیل واهلش اولیه مربوط به ASPL به طور قابل ملاحظه ای نسبت به واهلش PL مربوط به  $Al_xGa_{1-x}As$  آهسته تر می باشد. اما پس از اینکه تعداد حامل ها در لایه GaAs

تقلیل پیدا کردند، حامل های جدیدی در لایه  $Al_xGa_{1-x}As$  ایجاد نخواهد شد، بنابراین دنباله خطوط طیفی سیگنال ASPL و PL مربوط به  $Al_xGa_{1-x}As$  مشابه هم می باشد.

همانطور که در ابتدای فصل اشاره شد وجود همردیفی نواری نوع-II یکی از عوامل موثر در افزایش بازدهی ASPL است، بنابراین سیگنال ASPL در ساختارهای ناهمگون نوع-II باید قویتر از ساختارهای ناهمگون نوع-I باشد. بر اساس اندازه گیری های انجام شده روی نمونه های  $Al_xGa_{1-x}As/Ga_{1-y}In_yP$  که همردیفی نواری نوع-II دارند، بزرگی سیگنال ASPL چند مرتبه از نمونه های  $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  یا  $GaAs/Ga_{1-x}In_xP$  بزرگتر می باشد [۱۴].

با وجود این قابل ذکر است که بر اساس مطالعات انجام شده، بیشینه انرژی آنتی-استوک فتولومینسانس در ساختارهای ناهمگون نوع-II دو برابر انرژی گذار میباشد، در حالیکه این مقدار برای ساختارهای ناهمگون نوع-I سه برابر انرژی گاف نواری ماده با گاف نواری کوچکتر می باشد، پس برای کسب انرژی بزرگتر ساختارهای ناهمگون نوع-I مناسب تر می باشد [۹].

#### ۴-۳: مکانیزم های آنتی- استوک فتولومینسانس:

مکانیزم هایی که غالباً برای توجیه وارونی انرژی پیشنهاد می شوند عبارتند از:

الف) جذب دو فوتون یک مرحله ای<sup>۴۱</sup>

ب) جذب دو فوتون دو مرحله ای<sup>۴۲</sup>

ج) فرایند اوژه سرد<sup>۴۳</sup>

#### ۴-۳-۱ فرایند جذب دو فوتون یک مرحله ای (TPA):

<sup>41</sup> One step two photon absorption (TPA)

<sup>42</sup> Two step two photon absorption (TS-TPA)

<sup>43</sup> Cold Auger

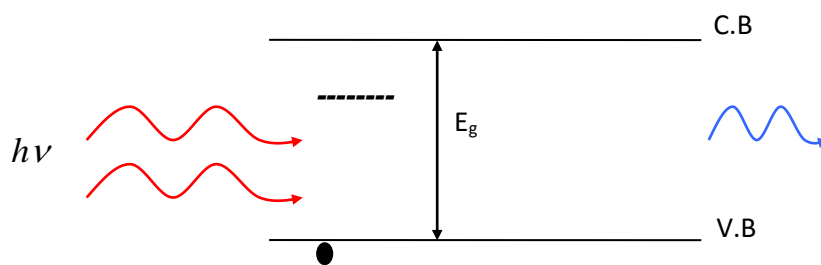
فرایند جذب دو فوتون یک مرحله ای با جذب دو فوتون کاملاً همدوس در یک مرحله توسط نمونه و با فرض وجود یک حالت میانی در نمونه توضیح داده می شود. فوتون های فرودی لزوماً در فضا و بالاخص در زمان همپوشانی می کنند و انرژی هر فوتون از گاف نواری نمونه کوچکتر می باشد.

همچنین حالت میانی در نمونه واقعی نیست و طول عمر یک تحریک در این حالت مجازی توسط فاصله زمانی وارونی انرژی به حالت واقعی بعدی تعیین می شود. ابتدا الکترون نوار ظرفیت با جذب فوتون های فرودی خود را به تراز مجازی می رساند و سپس به نوار رسانش منتقل می شود. حاصل بازترکیب تابشی الکترون با حفره مستقر در نوار ظرفیت فوتونی است که از نظر انرژی به اندازه گاف نواری و یا مجموع دو فوتون فرودی می باشد. بدلیل جذب دو فوتون به صورت همزمان، فرایند TPA غیرخطی محسوب می شود.

به طور کلی برای جذب دو فوتون، تغییرات شدت نور در درون نیمرسانا می توان نوشت: [۱۵]

$$\frac{dI}{dZ} = -\beta I^2 \quad (1-4)$$

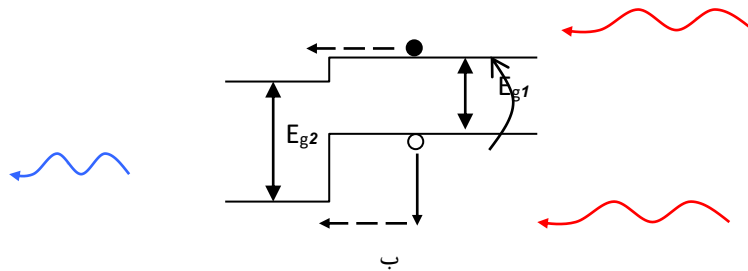
در رابطه (۱-۴)،  $\beta$  ضریب جذب دو فوتون است که فرض می شود کمیت مثبت باشد و Z در جهت انتشار لیزر قرار دارد. معادله فوق مشخص می کند که تغییر شدت لیزر با مربع شدت نور متناسب است که برای دو فوتون انتظارش می رود.



تصویر (۷-۴) طرحواره ای از فرآیند جذب دو فوتون یک مرحله ای.

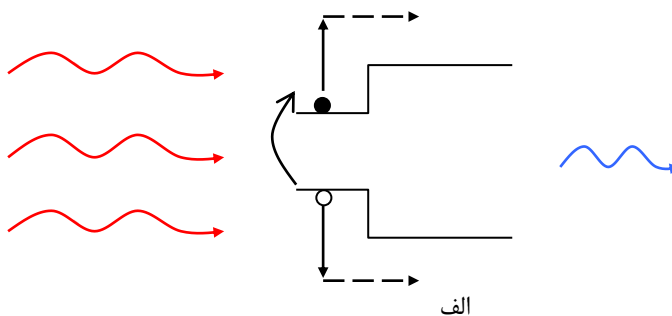
#### ۴-۳-۲ فرایند جذب دو فوتون دو مرحله ای (TS-TPA):

در فرایند جذب دو فوتون دو مرحله ای، جذب فوتون های فرودی در دو مرحله صورت می پذیرد. تفاوت های اساسی این فرایند با فرایند TPA عبارتند از: حالت میانی در این فرایند بر خلاف فرایند TPA واقعی است، همچنین در این فرایند در مرحله دوم قبل از اینکه فوتون دوم جذب شود ممکن است حامل های تحریک شده به حالت های واقعی پایین تر رها شوند. فرایند TS-TPA در ساختار ناهمگون نوع-II بدین صورت است که در مرحله نخست پس از جذب یک فوتون در نزدیکی مرز مشترک ساختار ناهمگون و در ناحیه نیم رسانای با گاف کوچکتر یک الکترون و حفره ایجاد میشود. سپس فوتون دیگر توسط حفره مستقر در نوار ظرفیت نیم رسانای با گاف کوچکتر جذب و این حفره انرژی کافی برای نفوذ به نوار ظرفیت نیم رسانای با گاف بزرگتر را بدست میاورد. در نهایت میان این حفره و الکترونی که به نوار رسانش نیم رسانای با گاف بزرگتر رها شده، باز ترکیب تابشی صورت می گیرد.



تصویر (۴-۸) طرحواره ای از فرایند جذب دو فوتون دو مرحله ای در ساختار ناهمگون نوع-II.

اما این فرایند در ساختار ناهمگون نوع-I با جذب سه فوتون و در سه مرحله صورت می پذیرد. قابل ذکر است که انرژی فوتون های فرودی از گاف نواری نیم رسانای با گاف کوچکتر، بزرگتر بوده اما از گاف نواری نیم رسانای با گاف بزرگتر، کوچکتر می باشد.



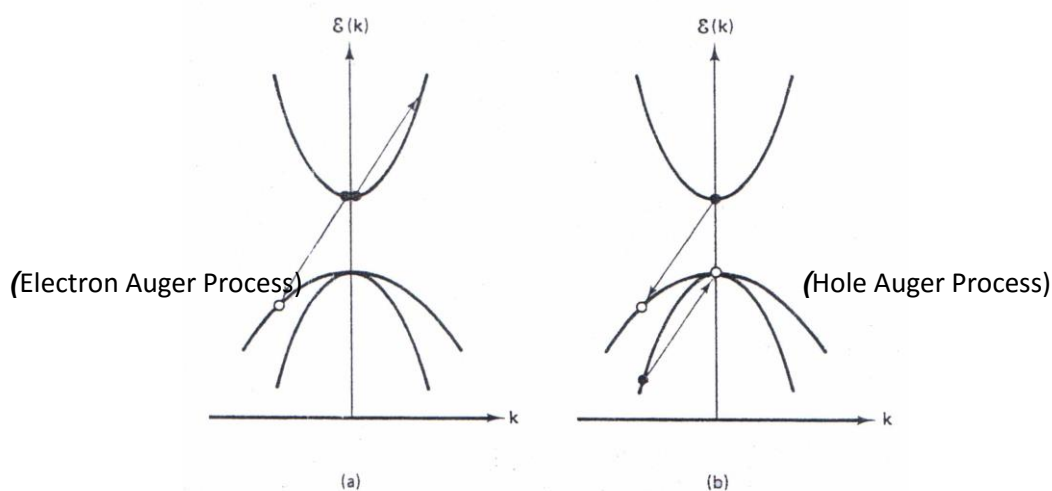
تصویر (۴-۹) طرحواره ای از فرایند جذب سه فوتون دو مرحله ای در ساختار ناهمگون نوع-I.



در فرایند TS-TPA مرحله دوم جذب می تواند با جذب فوتونی که در محیط خود نمونه تولید می شود، صورت پذیرد. به این فوتون که از باز ترکیب الکترون و حفره در محیط خود نمونه حاصل می شود فوتون باز چرخان<sup>۴۴</sup> می گوئیم و ارتباطی به نور لیزر تحریک ندارد. از آنجائیکه در فرآیند TS-TPA این فوتون میتواند توسط نور لیزر در مرحله دوم جذب فراهم شود. بنابراین می بایست به اندازه انرژی فوتون مرحله دوم، افزایش انرژی در سیگنال آنتی-استوک فتولومینسانس مشاهده شود. بدیهی است که انرژی فوتون مرحله دوم باید از گاف نواری نیم رسانای با گاف نواری کوچکتر، کمتر باشد.

#### ۴-۳-۳ فرایند اوژه سرد:

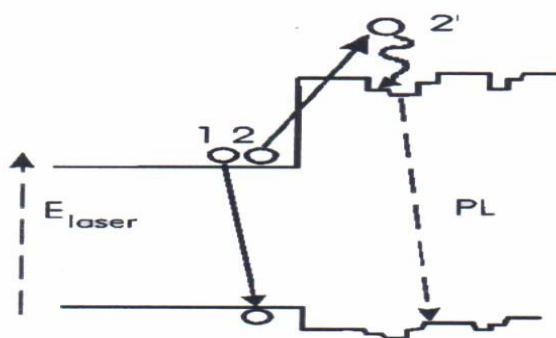
در فرایند اوژه انرژی و تکانه حاصل از باز ترکیب غیرتابشی الکترون-حفره به الکترون یا حفره دوم منتقل می شود و سپس این انرژی و تکانه توسط گسیل فونون ها از بین می رود. در تصویر الف توسط فرایند اوژه، الکترون به حالت های بالا تری ارتقا می یابد. اما در تصویر ب فرایند اوژه حفره را در شکافتگی نوار ظرفیت ایجاد می کند.



<sup>44</sup> Photon Recycling

تصویر (۴-۱۰) طرحواره‌ای از فرآیند اوژه، (a) انرژی و تکانه حاصل از بازترکیب به یک الکترون داده می‌شود (b) انرژی و تکانه حاصل از بازترکیب به یک حفره داده می‌شود.

فرایند اوژه در ساختارهای ناهمگون بدلیل برداشته شدن پایستگی تکانه خطی و بدلیل اینکه آستانه گرمایی برای این فرایند وجود ندارد، به فرایند اوژه سرد موسوم است. در این مدل فوتون‌های لیزر الکترون‌ها و حفره‌ها را در منطقه نیمرسانای با گاف نواری کوچکتر ایجاد می‌کنند. این حامل‌ها به لبه‌های نوار رسانش نیمرسانای با گاف نواری کوچکتر رها می‌شوند، سپس یک الکترون با یک حفره بازترکیب می‌کند و انرژی حاصل از بازترکیب به الکترون یا حفره دیگر منتقل می‌شود (فرایند اوژه)، الکترون‌ها و یا حفره‌ها بدین طریق تحریک شده و به لبه‌های نوار رسانش نیمرسانای با گاف نواری بزرگتر رها می‌گردند و سپس بواسطه حضور مکانیزم‌های جایگزیده در منطقه نیمرسانای با گاف نواری بزرگتر به تله افتاده و پس از بازترکیب در این ناحیه سیگنال آنتی-استوک فتولومینسانس را می‌دهند.



تصویر (۴-۱۱) طرحواره‌ای از فرآیند اوژه سرد.

فرآیند اوزه در ساختارهای حجمی به دلیل تحمیل قید پایستگی تکانه خطی از نظر بازدهی پایین می‌باشد اما در ساختارهای ناهمگون با برداشته شدن پایستگی تکانه خطی حامل‌ها در راستای عمود بر فصل مشترک ناهمگون انتقال حامل‌های تحریک شده با انرژی بیشتر که در این راستا حرکت می‌کنند، از منطقه نیم‌رسانای با گاف نواری کوچکتر به منطقه نیم‌رسانای با گاف نواری بزرگتر آسان‌تر می‌شود، در نتیجه فرآیند اوزه در ساختارهای ناهمگون بازده قابل توجهی را نسبت به ساختارهای حجمی دارا خواهد بود.

#### ۴-۴: بستگی شدت سیگنال ASPL به توان تحریک:

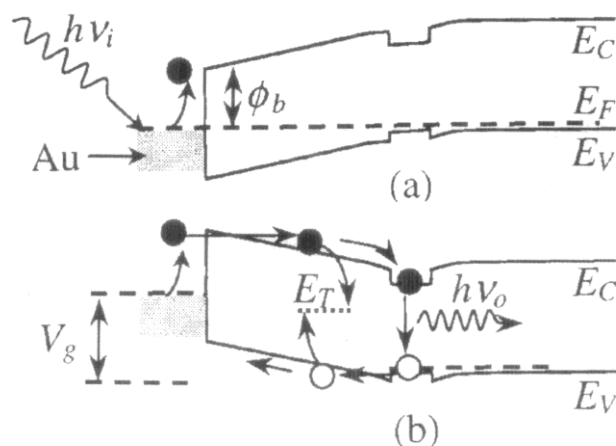
اصولاً برای بررسی بیشتر در خصوص مکانیزم‌های غالب در وارونی انرژی در فرآیند ASPL اندازه‌گیری‌های وابستگی شدت سیگنال ASPL به توان تحریک انجام می‌شود. شدت ASPL طبق رابطه  $I_{ASPL} = CP_{exc}^{\beta}$  به توان تحریک وابسته است. در این رابطه  $P_{exc}$  توان تحریک و  $\beta$  فاکتور توان است.

فرآیند جذب دو فوتون یک مرحله‌ای (TPA) غالباً در توانهای تحریک از مرتبه  $1000 \frac{W}{cm^2}$  و بالاتر رخ می‌دهد. اما در فرآیند جذب دو فوتون دو مرحله‌ای (TS-TPA) شدت  $I_{ASPL}$  با تعداد فوتون‌های مسوول برای مرحله دوم جذب و تراکم حالت‌های میانی  $N_{exc}$  (حالت‌های اکسیتونی مقید مربوط به ناخالصی و حالت‌های جایگزیده عمیق) متناسب است. معمولاً تعداد فوتون‌هایی که موجب مرحله دوم جذب می‌شوند ( $N_{ph}$ ) مستقیماً با شدت لیزر تحریک  $I$  متناسب هستند. در شدت‌های تحریک کم که هنوز حالت‌های میانی پر تراکم ( $N_{exc}$ ) اشباع نشده‌اند، شدت  $I_{ASPL}$  مستقیماً با شدت لیزر تحریک ( $I$ ) متناسب خواهد بود و از آنجا که  $I_{ASPL}$  با  $N_{ph}N_{exc}$  متناسب است بنابراین با  $I^2$  متناسب می‌شود. اما در شدت‌های بزرگتر هنگامیکه حالت‌های میانی اشباع شده‌اند یعنی  $N_{exc} = N_{ph}$ ، شدت  $I_{ASPL}$  با  $N_{ph}N_{sat}$  و در نتیجه با  $I$  متناسب می‌شود. بنابراین احتمالاً شدت سیگنال آنتی-استوک فتولومینسانس در توان‌های تحریک کمتر به طور مربعی افزایش می‌یابد و در توان‌های تحریک بیشتر به طور خطی افزایش می‌یابد. در فرآیند اوزه سرد وابستگی  $I_{ASPL}$  به توان تحریک معمولاً به صورت مکعبی  $\beta \cong 3$  است، زیرا برای ایجاد یک زوج الکترون-حفره تحریک شده، سه الکترون و سه حفره لازم هستند، البته اگر بازدهی تحریک الکترون‌ها نسبت به حفره‌ها بزرگتر باشد، شدت  $I_{ASPL}$  بستگی مربعی به توان تحریک خواهد داشت. از آنجا که لازمه بازترکیب اوزه همپوشانی توابع موج حامل‌های درگیر می‌باشد، در توان‌های تحریک کم فرآیند اوزه به نظر قابل قبول نیست.

#### ۴-۵: مثالی از کاربرد آنتی- استوک فتولومینسانس:

##### وارونی انرژی از ناحیه فروسرخ نزدیک به مرئی در یک دیودشوتکی با بایاس مستقیم:

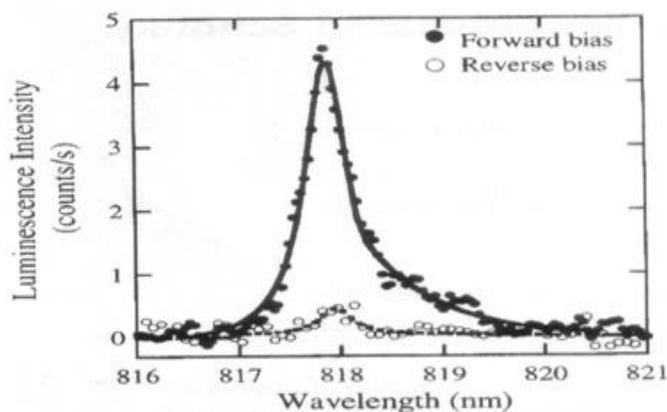
از زمان اختراع دیود های لیزری  $I_n GaAs / I_n P$  با طول موج گسیلی  $1/5$  میکرومتر، روش های وارونی انرژی نور از ناحیه فروسرخ نزدیک به محدوده طیف مرئی با توجه بیشتری پیگیری شد. فرآیند- آنتی استوک فتولومینسانس می تواند توسط یون های تحریکی مربوط به نور فرو سرخ، لومینسانس مرئی را تولید کند. در این قسمت وارونی انرژی تابشی با طول موج  $1/5$  میکرو متر به  $818$  نانومتر را به عنوان یکی از کاربردهای آنتی- استوک فتولومینسانس بررسی می کنیم، همچنین بستگی شدت لومینسانس را به نوع بایاس اعمال شده نشان می دهیم. در این فرآیند باز ترکیب حامل ها در فصل مشترک فلز- نیمرسانا رخ می دهد. نور مربوط به ناحیه فروسرخ نزدیک با طول موج  $1/5$  میکرومتر بر روی سطح یک فلز که در تماس با چاه کوانتومی GaAs/AlGaAs که با نوع P- آلیش یا فته است، اعمال می گردد، در نتیجه زوج الکترون - حفره در فلز ایجاد می شود. همانطور که در تصویر (۴-۱۲) نشان داده شده است در غیاب ولتاژ خارجی خمش موجود در فصل مشترک دیودشوتکی مانع رسیدن الکترون های تحریک شده به چاه کوانتومی می باشد. با اعمال ولتاژ به صورت بایاس مستقیم، تراز فرمی در فصل مشترک فلز- نیمرسانا بالاتر می رود و در نتیجه راستای خمش معکوس می شود. سپس الکترون های تحریک شده با انرژی که اندکی از انرژی سد دیودشوتکی کمتر است به ناحیه نیمرسانا می رسند و به سمت چاه کوانتومی سوق می یابند. الکترون هایی که در چاه کوانتومی به تله می افتند باز ترکیب تابشی می کنند و لومینسانس حاصل از این بازترکیب متناظر با کمترین گذار زوج الکترون-حفره در چاه کوانتومی می باشد. انرژی نور گسیلی نسبت به انرژی فوتون های فرودی که لازمه جداسدن الکترون ها از سد شوتکی بودند، بزرگتر است بنابراین وارونی انرژی از نور فروسرخ نزدیک به نور مرئی رخ داده است. در طول این فرایند بدلیل فرایند پراکندگی اطلاعات ما راجع به فوتون های فرودی از بین می رود، بنابراین نور گسیلی با طول موج  $818$  نانومتر با نور فرودی با طول موج  $1/5$  میکرومتر ناهمدوس است.



تصویر (۴-۱۲) طرحواره نوار انرژی دیود شوتکی با یک چاه کوانتومی آلیش یافته از نوع-p تصویر (a)

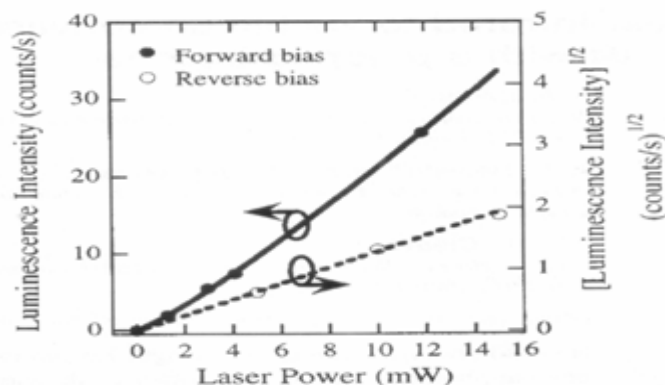
حالت بدون بایاس و تصویر (b) حالت بایاس مستقیم میباشد [۱۶].

تصویر (۴-۱۳) شدت لومینسانس حاصل از قطعه را بر حسب طول موج هم در حالت بایاس مستقیم و هم در حالت بایاس معکوس نشان می دهد، ولتاژ اعمالی در حالت بایاس مستقیم ۱- ولت در حالت بایاس معکوس ۱+ ولت می باشد. همانطور که مشاهده می کنید موقعیت پیک ۸۱۷/۸ نا نومتر است. در حالت بایاس مستقیم شدت لومینسانس قابل توجه است زیرا خمش موجود، انتقال الکترون ها را از فلز به نیمرسانا میسر می سازد. اما در حالت بایاس معکوس مشابه حالت بدون بایاس خمش موجود در قطعه مانع رسیدن الکترون ها به چاه کوانتومی خواهد بود.



تصویر (۴-۱۳) طیف لومینسانس نور حاصل از ولتاژ ۱- ولت (بایاس مستقیم) و ۱+ ولت (بایاس معکوس) [۱۶].

در تصویر (۴-۱۴) شدت پیک های لومینسانس بر حسب توان تحریک نشان داده شده است. در حالت بایاس مستقیم شدت لومینسانس بستگی تقریباً خطی را نسبت به توان تحریک نشان می دهد پس می توان نتیجه گرفت که این فرآیند با جذب یک فوتون صورت گرفته است. اما در حالت بایاس معکوس شدت لومینسانس بستگی مربعی به توان تحریک دارد. همچنین در حالت بایاس معکوس، هنگامی که لیزر تحریک از کنار به سمت فصل مشترک دیود شوتکی اعمال شده پیک لومینسانس مشاهده شده است. پس احتمالاً چاه کوانتومی GaAs مستقیماً توسط لیزر تحریک شده و الکترون و حفره مستقر GaAs با جذب دو فوتون خود را به لایه های AlGaAs رسانده اند. البته ممکن است انرژی گاف نواری از دو برابر انرژی فوتون فرودی بزرگتر باشد.



تصویر (۴-۱۴) بستگی شدت لومینسانس به توان تحریک برای حالت بایاس مستقیم و معکوس [۱۶].

- [۱] N.R.I Senor and M.C.Richardson,Appl.phy.Lett.18,224(1971).
- [۲] Z.G.Soos and R.G.Keplir,Phy .Rev.B43,11 908(1992).
- [۳] S.Q.Gu et al, Phy .Rev.Lett.69,2697(1992).
- [۴] F.A.J.M.Driessen ,and et al, Phy .Rev.B54,R5263(1996).
- [۵] R.Hellmann et al, Phy .Rev .B51(1995).
- [۶] G.G.Zegrya and V.A.Kharchenko,sov.P hy.JETP74,173(1992).
- [۷] A.Schindlir and et al ,Phy.states solidi B59,439(1973).
- [۸] E.J.Johnson and et al , Appl.phy.Lett.40(1982).
- [۹] Hyeonsik M.cheonj and et al , Phy .Rev.B58(1998) .
- [۱۰] K.Yamashita ,T.Kita, and T.Nishino ,J. Appl.phy.84,359(1996).
- [۱۱] S.Froyen and et al , Appl.phy.Lett.68,28 52 (1996).
- [۱۲] J.Zeman and etal , , Phy .Rev.B55,R13 428(1997).
- [۱۳] F.A.J.M Driessen ,Appl.Phys.lett.67,2813(1995).
- [۱۴] Y.H.Cho and et al , Phy .Rev.B56,R4375(1997).
- [۱۵] مقدمه ای بر نور شناخت نیمرساناها ، ناصر پیغمبریان ، استفان کوچ ، آندره میزروویچ ، ترجمه دکتر حمید رضا مهاجری مقدم ، دکتر حبیب تجلی ، چاپ اول ، انتشارات آستان قدس رضوی (۱۳۸۰).
- [۱۶] J.S.Sandhu and et al, Appl.phy.Lett 7612 (2000).
- [۱۷] S.C.Hohng and et al,Appl.phy.Lett.7523(1999).
- [۱۸] S.C.Hohng and et al, Phy .Rev.B60,12(1999).
- [۱۹] C.Kammerer and et al Phy .Rev.Lett,87,20(2001).
- [۲۰] J.S.Sandhu and et al, Appl.phy.Lett 7612 (2000).
- [۲۱] P.Vagos and et al,Phy.Rev Lett 70,7(1993).

[۲۲] Z.P.Su, and et al, Solid State Communication, 99, No.12. pp.933-936(1996).

[۲۳] Wolfram Heimbrod and et al, Phy Rev B, 60, 24(1999).

[۲۴] Akihiro Stake and et al, Phy Rev B, 61, 19(2000).

[۲۵] G.Cassabois, and et al, Appl Phys 91, 8(2002).

[۲۶] Ehud Poles and et al, Appl Phy Lett, 73, 7(1999).

## فصل ۵

# نتایج حاصل از آنالیز داده‌ها

✓ معرفی نمونه‌ها و شرح آزمایش

✓ نتایج و آنالیز داده‌ها



## مقدمه :

در نیمه دوم دهه ۱۹۹۰، شاهد گسترش چشمگیر تحقیقات بر روی نیمرساناهای نیتروژن دار رقیق (با درصد نیتروژن در حدود  $5\% \leq [N] \leq 10\%$ ) به علت خصوصیات جالب توجه این مواد و بررسی کاربردهای آنها بوده ایم که این بررسی و تفحص تاکنون نیز ادامه داشته است. افزودن مقادیر ناچیز نیتروژن به ترکیبات III-V متعارف مانند GaAs، GaInAs، GaInP و ... باعث ایجاد خصوصیات غیر معمولی در این گونه ساختارها می گردد که از جمله آنها می توان خمش قابل توجه در نوار رسانش و در نتیجه کاهش گاف نواری، افزایش جرم موثر و کاهش تحرک الکترون اشاره کرد [۱،۲]. از این مواد می توان در ساخت قطعات اپتوالکترونیکی نظیر لیزرها، دیودهای گسیل کننده نور<sup>۴۵</sup> و سلول های خورشیدی دارای بازده بالا استفاده کرد. آلیاژهای GaInP که با زیرلایه GaAs هماهنگی خوبی دارند، کاربردهای زیادی در محدوده طول موجی ۱/۳-۱/۵۵ میکرون دارند. اضافه نمودن نیتروژن به این ساختار و تشکیل GaInNP تغییرات زیادی در ساختارهای الکترونی آلیاژ شکل گرفته ایجاد می گردد. مشارکت نیتروژن در هر صورت روی کیفیت آلیاژ و همچنین خصوصیات انتقال حامل ها و فرآیندهای بازترکیب آنها اثرات زیادی دارد. در این فصل به نتایج حاصل از آنالیز و تحلیل داده های تجربی مربوط به نمونه های GaInNP موجود خواهیم پرداخت و نتایج فیزیکی را مورد بحث و تحلیل قرار می دهیم. ترکیبات آلیاژی GaInNP با ثابت های شبکه ای نزدیک به ثابت شبکه GaAs سیستمی جدید و نوید بخشی از مواد نیمرسانا را تشکیل می دهند که اخیراً برای بهبود عملکرد ابزارهای اپتوالکترونیکی بر پایه این مواد (GaInNP/GaAs) نظیر ترانزیستورهای دو قطبی ناهمگون<sup>۴۶</sup> پیشنهاد شده اند [۱]. این مسئله باعث سوق مطالعات اخیر به سمت درک عمیق تر مکانیزمهای بازترکیبی حامل های بار در این ساختارها شده است. نظیر سایر نیمرساناهای نیتروژن دار رقیق انتظار داریم حضور نیتروژن در ساختار GaInP سبب تغییرات چشمگیر گاف نواری و در نتیجه تغییر لبه نوار رسانش گردد که زمینه نوعی

<sup>45</sup> LED

<sup>46</sup> Heterojunction Bipolar Transistor

مهندسی گاف نواری را ایجاد خواهد کرد. لذا با انتخاب مناسب مقدار نیتروژن (N) می توان میزان عدم همدیفی نواری رسانش در مرز تماس ساختارهای ناهمگون GaInNP/GaAs را به دلخواه تغییر داد. با وجود مطالعات انجام شده و در حال انجام روی این مواد جدید، لکن هنوز سؤالات و ابهامات زیادی در خصوص اثرات حضور ناخالصی‌هایی نظیر نیتروژن روی خواص اپتیکی و نوع آرایش نواری این ترکیبات وجود دارد که پاسخ به این موارد تحول چشمگیری در صنایع اپتوالکترونیک را به همراه خواهد داشت. در این مطالعه از نتایج آزمایشات اپتیکی مبسوطی همچون آنتی — استوک فتولومینسانس (ASPL) و آنتی-استوک فتولومینسانس تحریکی (ASPLE)، فتولومینسانس وابسته به زمان (TRPL) استفاده شده است تا ضمن بررسی اثر حضور نیتروژن روی خواص اپتیکی و آرایش نواری در مرز مشترک ساختارهای ناهمگون GaInNP/GaAs، مکانیزم آنتی-استوک فتولومینسانس پر بازده مشاهده شده در این ترکیبات را توجیه کنیم.

## ۵-۱ معرفی نمونه‌ها و شرح آزمایشات :

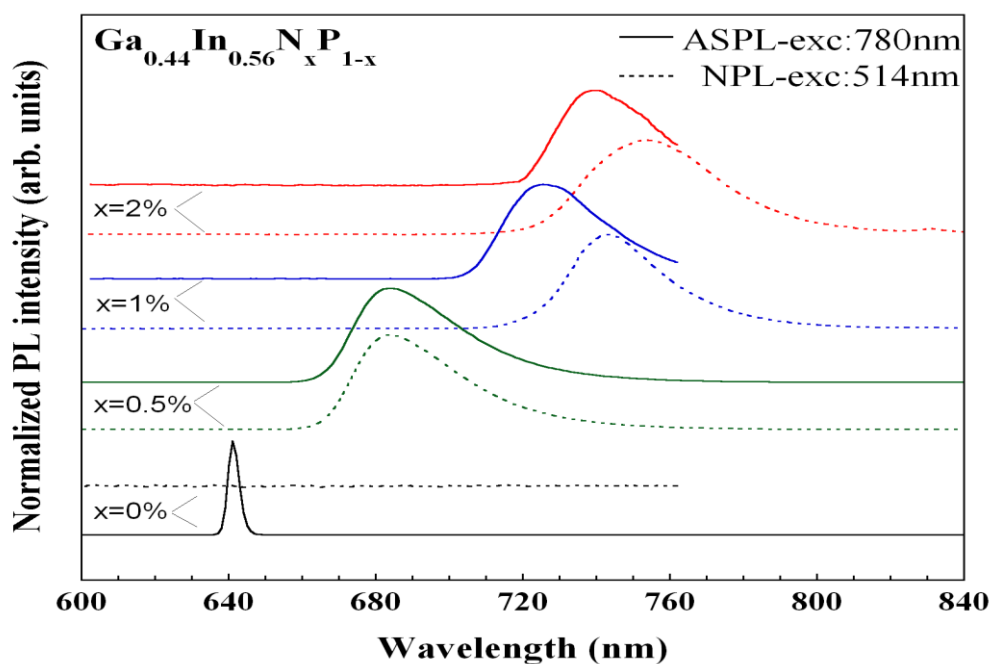
تمام نمونه های GaInNP مورد مطالعه در این پایان نامه در دمای ۴۶۰ درجه سانتیگراد و در راستای (۱۰۰) روی زیر لایه نیم عایق GaAs با استفاده از روش روآراستی پرتو مولکولی<sup>۴۷</sup> رشد داده شده‌اند. ضخامت لایه‌های روآراستی GaInNP رشد داده شده ۲۳۵ نانومتر است. درصد نیتروژن (N) در نمونه‌هایی مورد مطالعه میان صفر تا ۲٪ متغیر بوده است که با استفاده از اندازه‌گیری‌های پراش اشعه x تعیین شده‌اند. درصد ایندیم (In) موجود در نمونه‌ها ۵۶٪ بوده است. تمام نمونه های GaInNP مطالعه شده توسط گروه پروفیسور سی.دبلیو.تو در دانشگاه کالیفرنیا در سن دیاگو امریکا رشد داده شده اند. اندازه‌گیری های فتولومینسانس در دماهای ۵ کلوین انجام شده است. نمونه‌ها در اندازه‌گیری های فتولومینسانس عادی و در اندازه‌گیری های آنتی-استوک فتولومینسانس و فتولومینسانس برانگیخته به ترتیب توسط خط ۵۱۴ نانومتر گسیلی از یک لیزر یونی آرگون و یک لیزر حالت جامد Ti : sapphire با قابلیت تنظیم طول موج تحریک شده‌اند. فتولومینسانس حاصل از نمونه‌ها پس از عبور از یک تکفام ساز دوگانه توسط یک آشکارساز مولتی پلایر و یا یک آشکارساز ژرمانیومی سرد شده با نیتروژن مایع ثبت می شوند. بخش دیگری از داده های تجربی مورد استفاده در این پایان نامه مربوط به اندازه‌گیری های فتولومینسانس وابسته به زمان<sup>۴۸</sup> (TRPL) در دمای ۲ کلوین می باشد که معرف دینامیک فرایند بازترکیب حامل هاست. برای آزمایش های TRPL یک لیزر پالسی Ti : sapphire به عنوان منبع تحریک استفاده شده است و برای اندازه‌گیری در وضعیت NPL از طول موج ۴۰۰nm و برای اندازه‌گیری در وضعیت ASPL از طول موج ۸۰۰nm استفاده شده است. سیگنال فتولومینسانس توسط یک توری تکفام ساز، پراکنده و بوسیله یک سیستم streak camera آشکارسازی شده است. لیزر پالسی مورد استفاده در TRPL در مدت زمان کوتاهی در حدود ۱ فمتوثانیه روی نمونه اعمال شده و باعث برانگیختگی الکترون ها می گردد. تمام اندازه‌گیری های ASPL ، ASPLE ، و TRPL در آزمایشگاه فتولومینسانس پروفیسور ومین چن در دانشگاه لینشوپینگ در کشور سوید انجام شده اند.

## ۵-۲ نتایج و آنالیز داده ها

<sup>47</sup> MBE

<sup>48</sup> Time Resolved Photoluminescence

شکل ۵-۱ طیف های آنتی-استوک فتولومینسانس (ASPL) و فتولومینسانس عادی (NPL) حاصل از ساختارهای مورد بررسی، زمانی که طول موج تحریک، به ترتیب برابر  $780\text{ nm}$  ( $E_{\text{exc}} = 1.59\text{ eV}$ ) در حدود گاف نواری GaAs و  $514\text{ nm}$  ( $E_{\text{exc}} = 2.412\text{ eV}$ ) بیشتر از گاف نواری GaInP و دمای اندازه گیری ۵ کلوین بوده است را نشان می دهد. همانطور که در این شکل دیده می شود در نمونه های نیتروژن دار موقعیت قله های فتولومینسانس مشاهده شده در انرژی های نزدیک به انرژی گاف نواری واقع هستند، که این قله ها نتیجه باز ترکیب های تابشی اکسیتون ها یا حامل های جایگزیده در حالت های دنباله نواری<sup>۴۹</sup> کشیده شده در گاف نواری این ترکیبات می باشد. همچنین در این شکل دیده می شود که به دلیل حضور این حالت های مربوط به دنباله های نواری شکل خطوط طیفی مشاهده شده در نمونه های نیتروژن دار نامتقارن هستند [۱].



تصویر ۵-۱: طیفهای ASPL و NPL نمونه های مورد مطالعه اندازه گیری شده در دمای ۵ کلوین اندازه گیری شده اند. به منظور واضح دیدن تفاوت بین خطوط طیفی، آنها در راستای قائم جابه جا شده اند.

همانطور که در شکل (۵-۱) بوضوح دیده می شود با افزایش غلظت نیتروژن در ترکیبات مورد مطالعه قله خطوط طیفی مربوط به هر دو تابش آنتی-استوک فتولومینسانس و فتولومینسانس عادی، به دلیل اثر خم

<sup>۴۹</sup> Band tail states

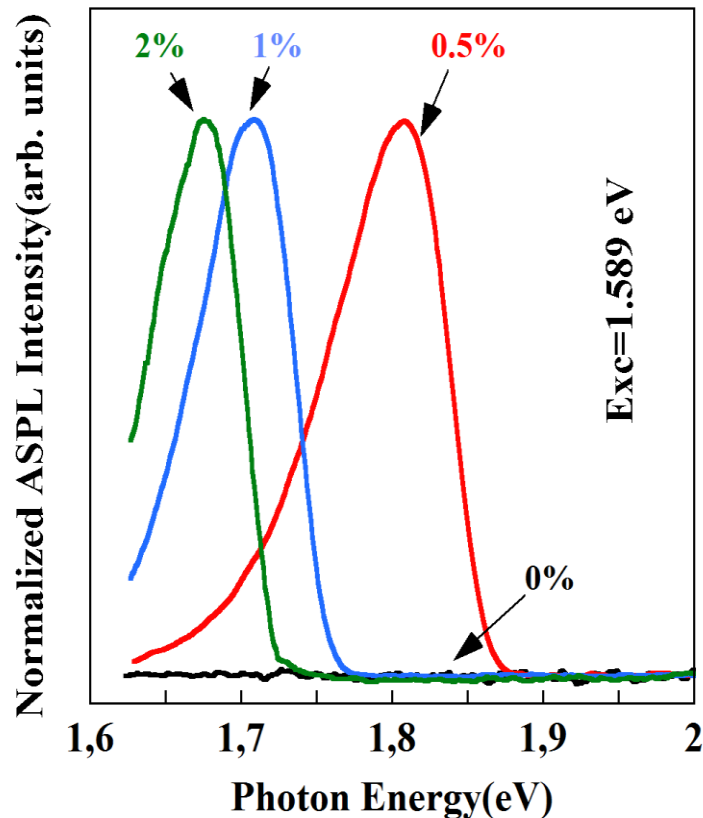
نواری<sup>۵۰</sup> [۱]، جابه جایی قابل توجهی به سمت انرژی های پایین را نشان می دهند. این خطوط در نمونه های نیتروژن دار (موقعیت مکانی قله طیف و شکل خطوط طیفی) در اندازه گیری های ASPL و NPL که هر یک در شرایط یکسانی انجام شده اند به صورت تقریبا مشابه رفتار می کنند. این مساله به خوبی نشان می دهد که مکانیزم بازترکیب تابشی (گذارهای تابشی) در هر دو فرایند ASPL و NPL در مواد مورد مطالعه یکسان می باشد. همچنین همانطور که در شکل (۵-۱) دیده می شود در نمونه های شامل ۱٪ و ۲٪ نیتروژن یک جابه جایی آبی<sup>۵۱</sup> کوچک (جابجایی انرژی به سمت انرژی های بیشتر) در حدود ۲۰ meV در موقعیت قله های طیف ASPL نسبت به طیف NPL مشاهده می شود. مشابه این شیفت آبی در نمونه های GaAs حجمی توسط گروه جانسون<sup>۵۲</sup> و همکارانش نیز گزارش شده است [۲] که در آنجا برای نمونه های مطالعه شده دلیلی برای آن مشخص نشده و تنها به ذکر آن اکتفا گردیده است. با توجه به پهنای باریکه لیزر تحریک (کمتر از یک میلی متر) توزیع نیتروژن در نمونه ها با یک نایکنواختی روبرو است و این مساله با افزایش درصد نیتروژن نمود بیشتری خواهد داشت لذا توجیه این جابه جایی احتمالا می تواند مربوط به این واقعیت باشد که گسیل طیف ASPL و NPL مشاهده شده برای هر نمونه ممکن است از نواحی متفاوتی از آن نمونه صورت پذیرفته باشد، زیرا این دو طیف به طور همزمان اندازه گیری نشده اند. برای بررسی این موضوع می بایستی این طیف ها در شرایط یکسان و به طور همزمان در حالی که محل باریکه لیزر تحریک در هر دو حالت روی نمونه ثابت است اندازه گیری و مقایسه شوند که این عمل صورت نگرفته و در حال حاضر نیز انجام آن مقدور نمی باشد. البته در شرایط عملی نیز انجام این کار دشوار است زیرا مسیر باریکه لیزر تحریک در اندازه گیری های ASPL و NPL یکسان نبوده و بنابراین میزان کردن دقیق و یکسان محل برخورد باریکه لیزری روی نمونه ای که در هنگام اندازه گیری در درون سرماسنج قرار داشته و خیلی قابل دسترس نمی باشد آسان نیست. برای مقایسه و مشاهده بهتر طیف های ASPL مربوط به نمونه های مطالعه شده این خطوط مجدداً به صورت دیگری در شکل (۵-۲) نشان داده شده اند.

---

<sup>۵۰</sup> Band bowing

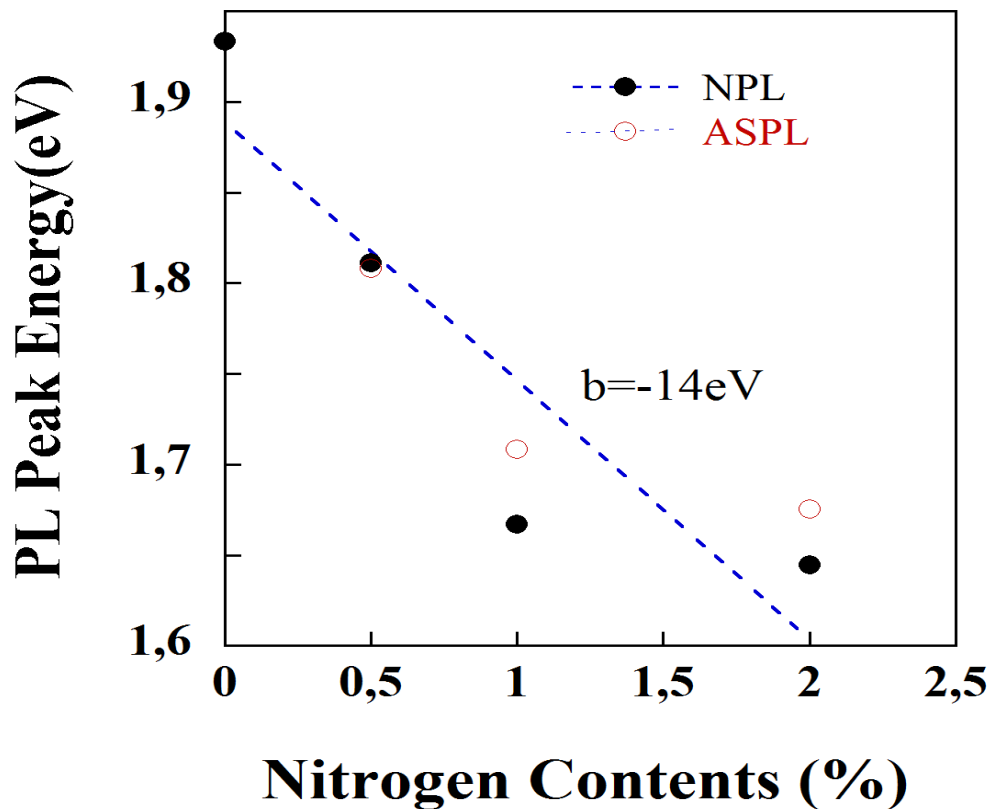
<sup>۵۱</sup> Blue shift

<sup>۵۲</sup> Johnson



تصویر ۲-۵: طیفهای نرمالیزه ASPL نمونه های مورد مطالعه اندازه گیری شده در دمای ۵ کلوین.

همانطور که در این شکل دیده می شود فاصله انرژی قله های طیف های آنتی — استوک فتولومینسانس مشاهده شده نسبت به انرژی تحریک ( $E_{exc} = 1/589 \text{ eV}$ ) در حدود ۸۰ الی ۲۲۰ میلی الکترون ولت است. همانطور که اشاره کردیم همانند خطوط طیفی NPL، با افزایش غلظت نیتروژن، قله مربوط به هر خط طیفی، به دلیل پدیده خمش نواری که از ویژگی های بارز و جالب توجه ترکیبات نیتروژن دار رقیق است، یک جابجایی قرمز قابل توجه (جابجایی انرژی به سمت انرژی های کوچکتر) نشان می دهد. این ویژگی را در شکل ۳-۵ نیز نشان داده ایم، در این تصویر موقعیت انرژی طیف ASPL و NPL بر حسب تغییر غلظت نیتروژن نشان داده شده است. خمش نواری مشاهده شده در شکل (۳-۵) با استفاده از ترم تصحیح گاف نواری یعنی رابطه  $\Delta E_g(x) = bx(1-x)$  با پارامتر خمش  $b$  مشخص می شود [۹]. با توجه به داده های حاصل از اندازه گیری های ASPL مقدار پارامتر خمش بدست آمده عدد بزرگ  $15 \text{ eV}$  است و همانطور که انتظار داریم با مقادیر  $b$  مربوط به ترکیبات دوتایی مادر GaP و InP که در حدود  $14 \text{ eV}$  گزارش شده اند [۳] در توافق است.



تصویر ۳-۵: موقعیت انرژی قله طیف های ASPL و NPL نمونه های مورد مطالعه بر حسب تغییر غلظت نیتروژن.

همانطور که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است، علی رغم اینکه برای نمونه بدون نیتروژن شدت پیک فتولومینسانس قابل ملاحظه است، بازده آنتی - استوک فتولومینسانس این نمونه بسیار ضعیف بوده است به گونه ای که شدت این طیف برای این ترکیب با ابزار موجود قابل اندازه گیری نیست. در اینجا خوب است که در خصوص عدم مشاهده سیگنال آنتی - استوک فتولومینسانس از نمونه ی بدون نیتروژن GaInP/GaAs مطالعه شده در این تحقیق به این مطلب اشاره کنیم که گزارش هایی از مشاهده این سیگنال برای همین ساختار موجود است [۴-۷]. براساس این گزارشات روش رشد نمونه های مذکور روش MOVPE بوده است که با روش رشد نمونه های مورد مطالعه ما یعنی روش MBE متفاوت می باشد. همانطور که در فصل چهارم اشاره کردیم کیفیت فصل مشترک ساختار ناهمگون GaInP/GaAs قویا به شرایط رشد وابسته است. از آنجایی که وارونی انرژی مورد نیاز در فرآیند آنتی - استوک فتولومینسانس به فصل مشترک ساختار نمونه مورد بررسی بستگی بسیار زیادی دارد لذا به نظر می رسد به دلیل بالا بودن دمای رشد در روش MOVPE (حدود ۷۰۰ درجه سانتی گراد) نسبت به دمای رشد در روش MBE (حدود ۴۶۰ درجه سانتی گراد) کیفیت فصل

مشترک از نظر پیدایش انواع نآراستی بواسطه عدم تطابق ثابت شبکه ای زیر لایه و لایه روآراستی در نمونه های رشد داده شده به این روش مطلوب تر باشد. اما با افزایش درصد نیتروژن ضمن ظهور طیف های آنتی- استوک فتولومینسانس شدت آنها نیز قابل توجه می شود. همچنین به نظر می رسد حضور نیتروژن شرایط دیگری را روی نوارهای انرژی ساختار ناهمگون ایجاد کرده که منجر به مشاهده طیف های ASPL پر بازده ای می شویم. در بررسی شدت قله ASPL های مشاهده شده به این نتیجه می رسیم که شدت این طیف در نمونه شامل یک در صد نیتروژن نسبت به سایر نمونه های نیتروژن دار قوی تر است به گونه ای که:

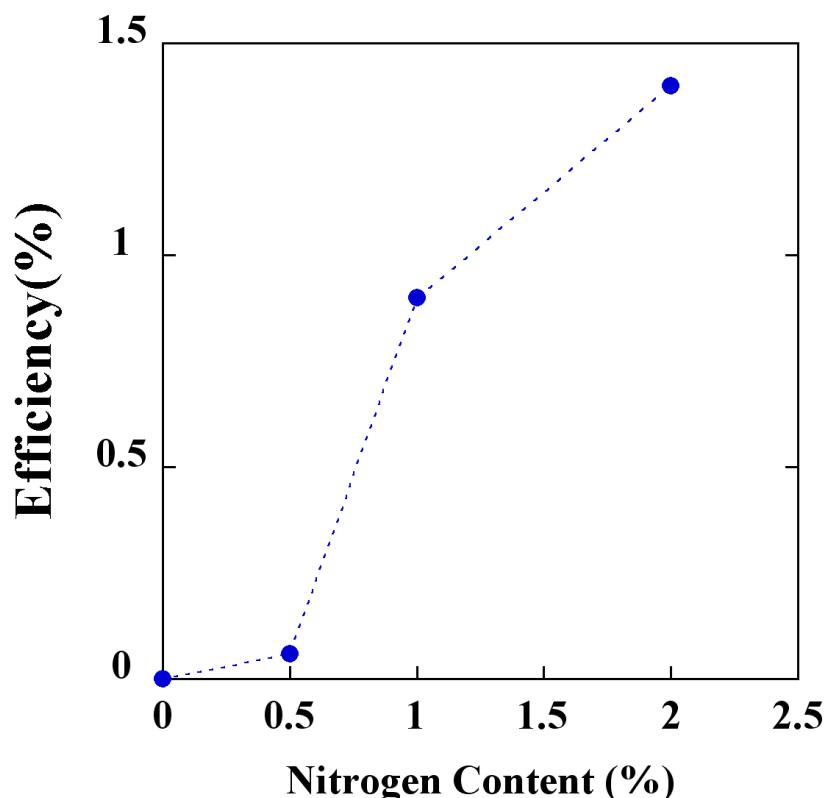
$$\left( \frac{I_{ASPL}^{(1\%)}}{I_{ASPL}^{(0/5\%)}} \approx 2 \right) \text{ در حالیکه با افزایش غلظت نیتروژن تا } 2 \text{ درصد شدت طیف آنتی-استوک فتولومینسانس}$$

کاهش می یابد  $\left( \frac{I_{ASPL}^{(1\%)}}{I_{ASPL}^{(2\%)}} \approx 40 \right)$ . این مساله نشان می دهد که کیفیت اپتیکی نمونه با یک در صد نیتروژن

در مقایسه با نمونه شامل دو درصد نیتروژن بالاتر می باشد. علت این مساله احتمالاً بدلیل افزایش تله های غیر تابشی و تشکیل ترازهای عمیق انرژی در لایه های روآراستی در اثر افزایش غلظت نیتروژن در نمونه هاست. علت بالاتر بودن شدت نمونه شامل یک درصد نیتروژن در مقایسه با نمونه شامل نیم در صد نیتروژن مربوط به جابه جایی لبه نوار رسانش و تغییر ساختار نمونه ها از نوع-۱ به نوع-۱۱ می باشد که در ادامه در این خصوص توضیحات و شواهد بیشتری ارائه خواهیم کرد. همچنین در بررسی های خود به این نتیجه می رسیم که بازده ASPL های مشاهده شده بسیار قابل توجه است زیرا حتی برای زمانی که چگالی توان تحریک باریکه لیزری روی نمونه به کوچکی حدود  $0.1 \text{ W/cm}^2$  تنظیم می شود این طیف ها قابل مشاهده هستند.

برای مشاهده این مورد نمودار بازده آنتی-استوک فتولومینسانس را بر حسب تغییر غلظت نیتروژن در شکل (۴-۵) به تصویر کشیده ایم. همانطور که در این نمودار دیده می شود با افزایش غلظت نیتروژن بازده خطوط طیفی ASPL آن افزایش می یابد. بازده آنتی - استوک فتولومینسانس برای نمونه بدون نیتروژن برابر صفر و برای نمونه با  $[N] = 0.5\%$  حدود  $6\%$  برای نمونه ای با  $[N] = 1\%$  حدود  $1\%$  و برای نمونه ای با  $[N] = 2\%$  حدود  $1/5\%$  می باشد. قابل ذکر است که در اینجا بازده را به صورت نسبت شدت قله خط طیفی آنتی - استوک فتولومینسانس به شدت قله خط طیفی فتولومینسانس عادی تعریف کرده ایم.

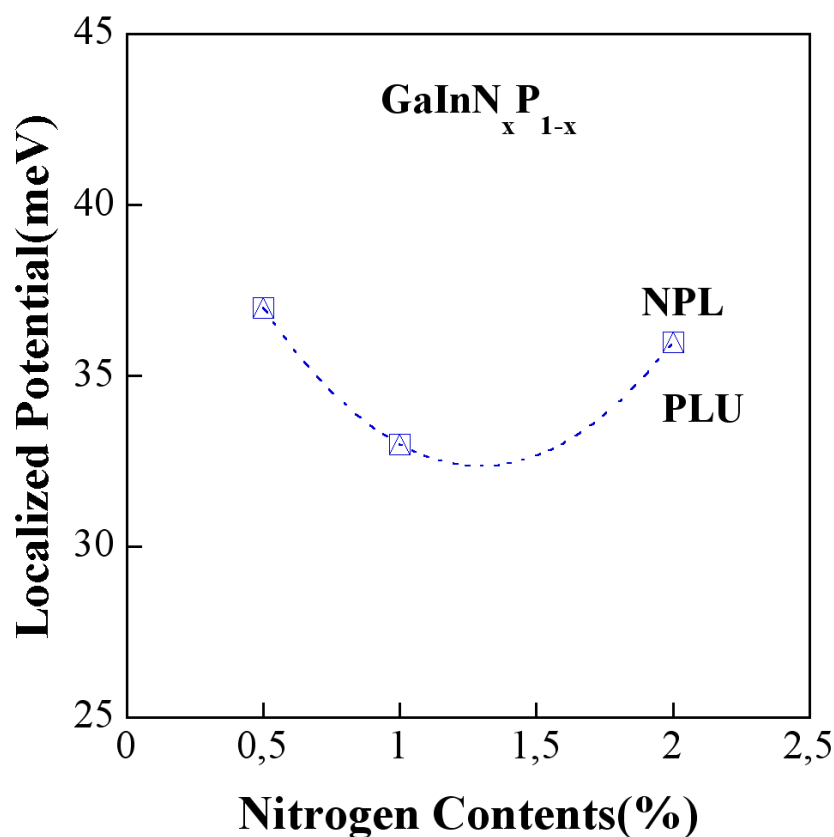




تصویر (۴-۵) نمودار بازده آنتی-استوک فتولومینسانس مشاهده شده بر حسب تغییر غلظت نیتروژن.

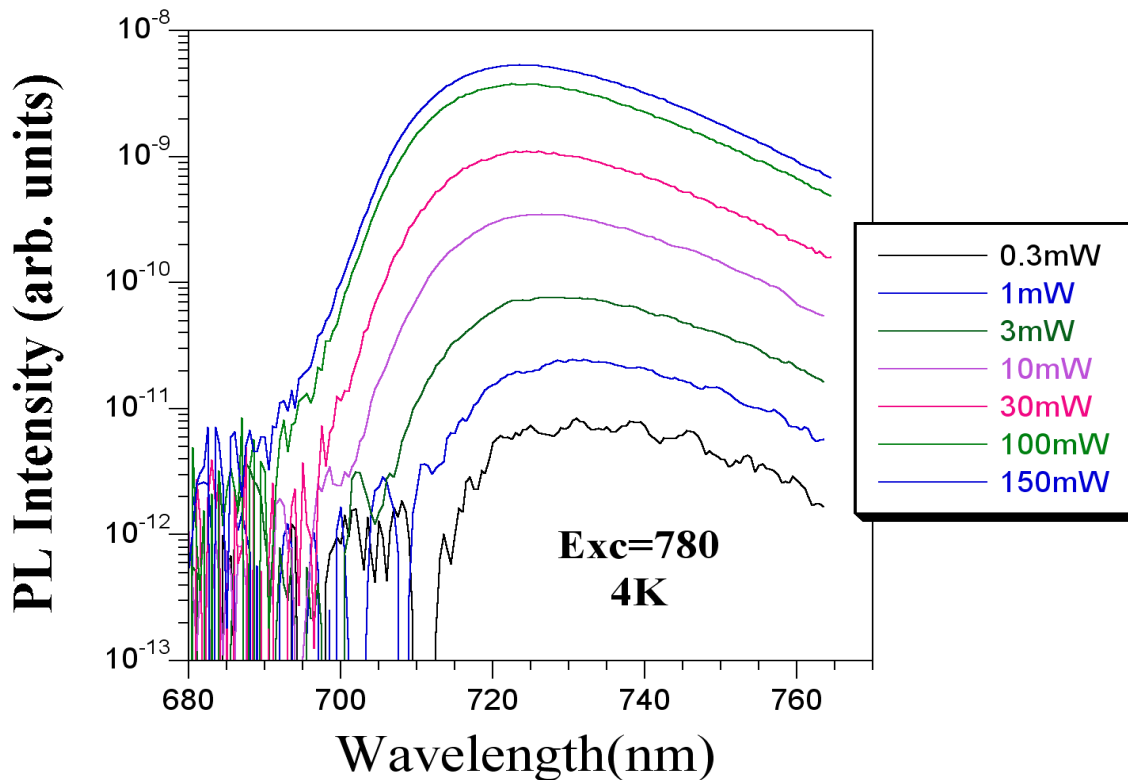
همچنین می توان با استفاده از شیب خطوط طیفی آنتی-استوک فتولومینسانس در نواحی کم انرژی مقدار پتانسیل جایگزیده (افت و خیزهای نواری که به طور غالب در نوار رسانش رخ می دهند) را که گاهی اوقات ممکن است نقش موثری در افزایش بازده آنتی-استوک فتولومینسانس ایفا نماید را برای هر نمونه برآورد نمود. لذا چون گذارهای تابشی در نمونه های مورد بحث وابسته به حالت های جایگزیده هستند هر چه این حالت های جایگزیده بیشتر باشد خط طیفی مربوط به آنها نامتقارن تر خواهد بود. این پتانسیل جایگزیده در نواحی کم انرژی را می توان از رابطه  $I = I_0 e^{E/E_0}$  بدست آورد که در آن شدت فتولومینسانس و  $E$  انرژی فوتون های باریکه تحریک و  $E_0$  پتانسیل حالت های جایگزیده می باشد. بنابراین با توجه به این رابطه اگر نمودار شدت ASPL بر حسب انرژی در یک مقیاس نیمه لگاریتمی ترسیم شود از روی باریکه شیب دنباله خط طیفی ASPL در نواحی کم انرژی می توان  $E_0$  را بدست آورد. نتایج حاصل از این محاسبات در شکل (۵-۵) نشان داده شده است. همانطور که در این نمودار دیده می شود مقدار پتانسیل بدست آمده در این روش را

می توان برای تمام نمونه های نیتروژن دار به طور میانگین حدود ۳۵ meV تخمین زد. لذا با توجه به این مقادیر می توان پیش بینی کرد که این پتانسیل های جایگزیده نقشی در بازده ASPL مشاهده شده ندارند.



تصویر ۵-۵: نمودار پتانسیل جایگزیده بر حسب تغییر غلظت نیتروژن برای آنتی-استوک فوتولومینسانس و فوتولومینسانس عادی.

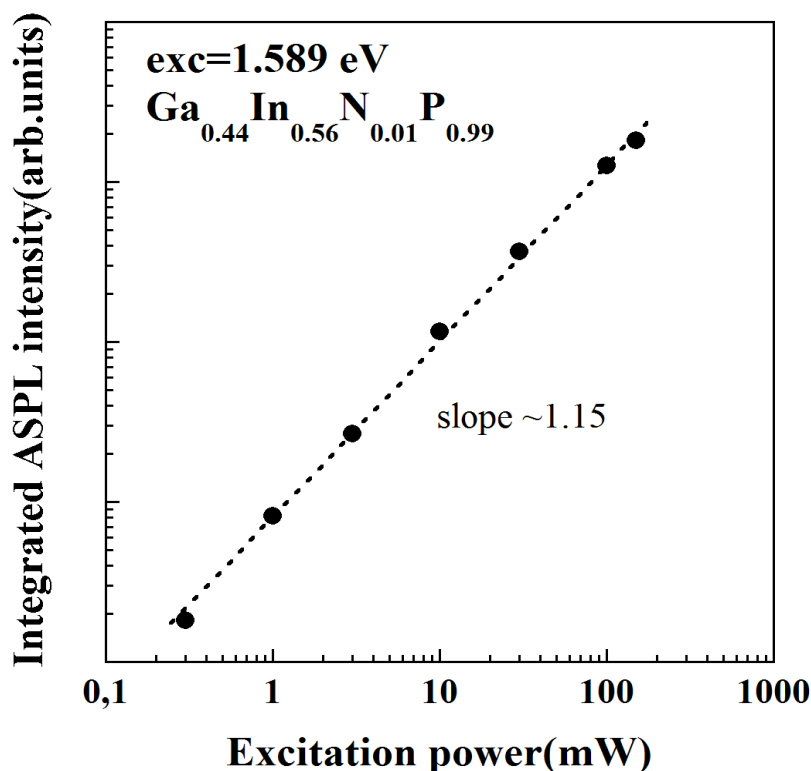
اطلاعات عمیق تر در خصوص مکانیزم بازترکیب تابشی و منشا آن که منجر به مشاهده خطوط طیفی ASPL می شود را می توان از تحلیل وابستگی این خطوط به توان تحریک و دما بدست آورد که در ادامه مورد بررسی و بحث قرار می گیرند. با استفاده از نمودار (۵-۶) می توان چگونگی تغییر محل قله خط طیفی را بر حسب توان تحریک بررسی کرد.



تصویر ۵-۶: نمودار مربوط به شدت طیف ASPL بر حسب توان تحریک برای نمونه شامل یک در صد نیتروژن.

همانطور که در فصل چهارم اشاره شد شدت آنتی-استوک فتولومینسانس طبق رابطه  $I_{ASPL} = CP_{exc}^{\beta}$  به توان تحریک وابسته است. در این رابطه  $P_{exc}$  توان تحریک و  $\beta$  فاکتور توان است. در شکل (۷-۵) برای نمونه ، نتایج مربوط به اندازه گیری شدت آنتی-استوک فتولومینسانس بر حسب توان تحریک را برای یک نمونه با  $[N] = 1\%$  در یک مقیاس نیمه لگاریتمی در دمای ۵ کلوین نشان داده ایم. همانطور که در این شکل دیده می شود با افزایش توان تحریک بدلیل افزایش تعداد حامل های موثر جهت شرکت در بازترکیب های تابشی مربوط به طیف ASPL شدت قله خط طیفی نیز افزایش می یابد. اگر با استفاده از این نمودار شدت ASPL مجتمع را بر حسب توان تحریک در یک مقیاس نیمه لگاریتمی رسم نماییم با توجه به رابطه مذکور واضح است که شیب این نمودار مقدار  $\beta$  را بدست می دهد. نتیجه این عمل در شکل (۷-۵) نشان داده شده است.

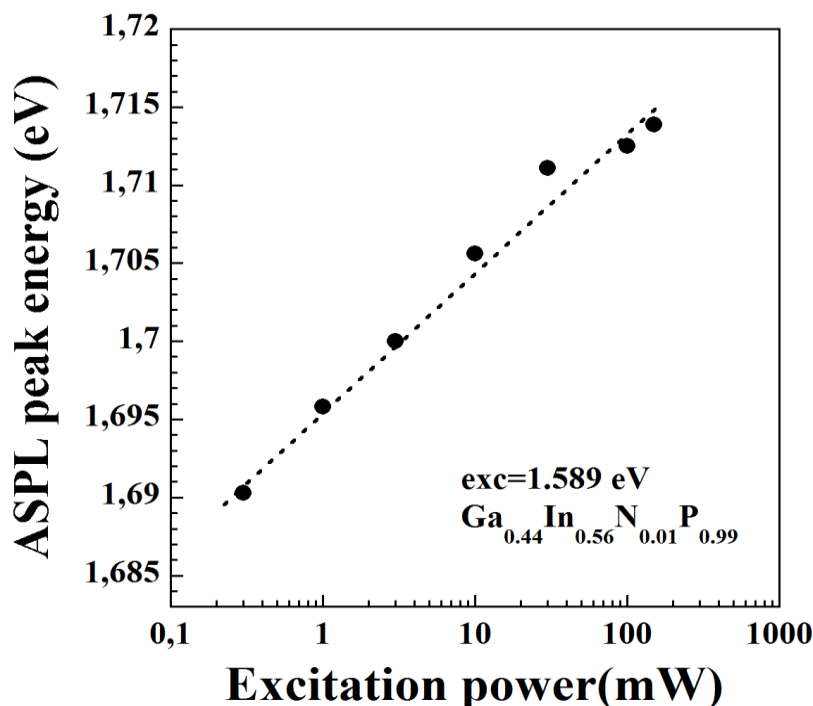
چنانکه نمودار (۷-۵) نشان می دهد، شدت طیف آنتی-استوک فتولومینسانس با تغییر توان تحریک یک رفتار نسبتاً خطی با شیب  $\beta \sim 1.15$  را از خود نشان می دهد. بررسی این نمودار برای تمام نمونه های نیتروژن دار نشان می دهد که ضریب  $\beta$  با تغییر در صد نیتروژن با اندکی تغییر در همین حدود می باشد.



تصویر ۷-۵: نمودار مربوط به شدت طیف ASPL بر حسب توان تحریک برای یک نمونه نوعی نیتروژن دار [N]=1%.

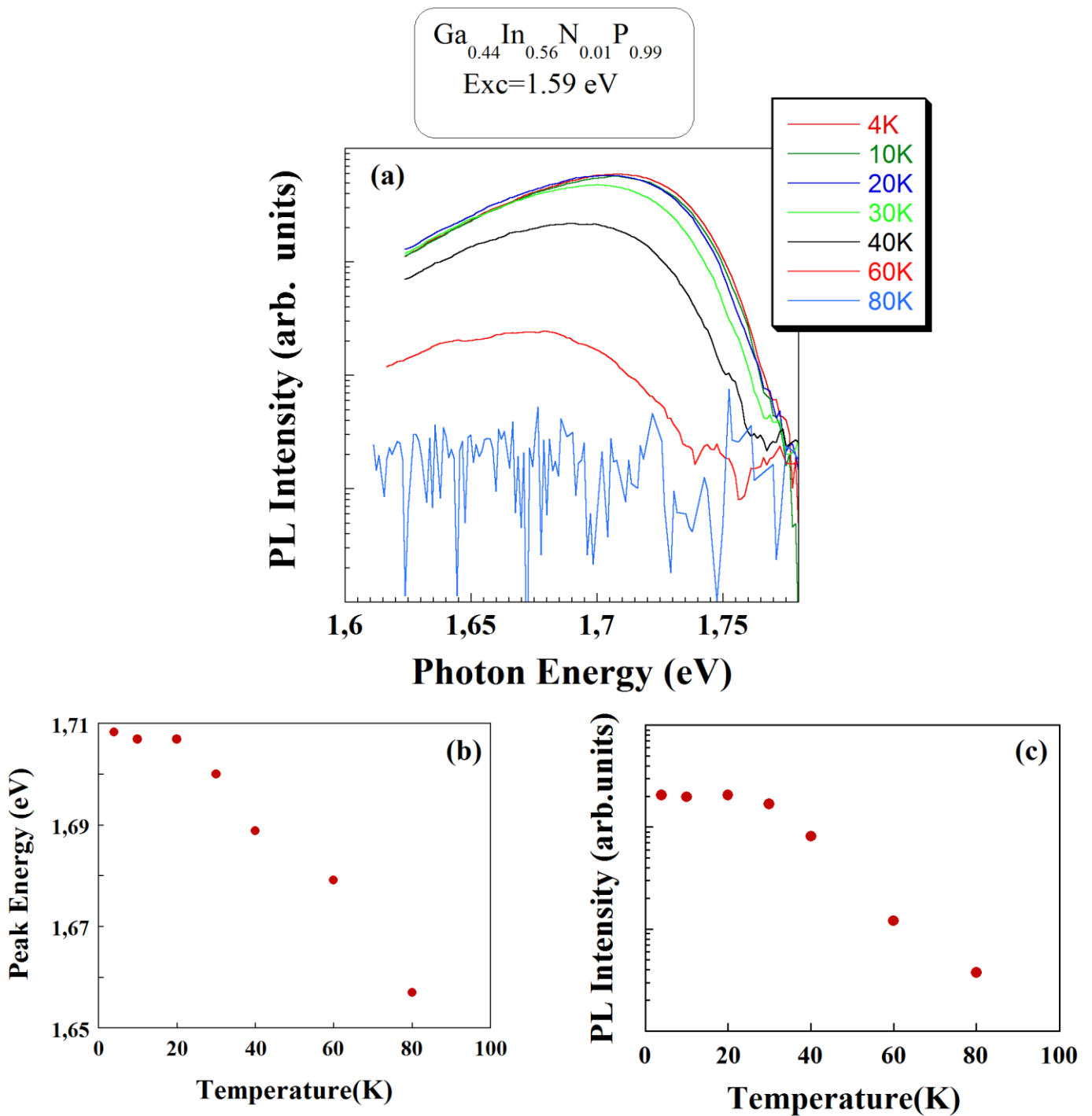
در نمودار (۸-۵) موقعیت انرژی طیف ASPL بر حسب توان تحریک برای یک نمونه نوعی با [N]=۱٪ نشان داده شده است. همانطور که انتظار داریم افزایش توان تحریک سبب جابجایی موقعیت قله طیف های آنتی استوک فتولومینسانس به سمت انرژی های بیشتر به دلیل اثر پر شدگی نواری<sup>۵۳</sup> می شود. با توجه به شکل با افزایش تا سه مرتبه بزرگی توان تحریک یک جابجایی در حدود ۲۲meV به سمت انرژی های بالاتر را نشان می دهد.

<sup>۵۳</sup> Band filling effect



تصویر ۵-۸: نمودار مربوط به موقعیت قله انرژی طیف ASPL بر حسب توان تحریک برای یک نمونه نوعی نیتروژن دار با  $[N]=1\%$ .

در ادامه بررسی مکانیزم بازترکیب های تابشی مشاهده شده در ASPL اندازه گیری های وابستگی دمایی این خطوط طیفی انجام شده اند. در شکل (a-c)(۵-۹) نتایج حاصل از این اندازه گیری ها را برای یک نمونه نوعی با ۱ درصد نیتروژن نشان داده ایم. اصولاً رفتار قله طیف فوتولومینسانس ناشی از بازترکیب های تابشی وابسته به حالت های جایگزیده بر حسب دما رفتاری S شکل (جابه جایی انرژی قرمز-آبی-قرمز) است. جابه جایی قرمز قابل توجه در دمای پایین برای گذارهای نوعی وابسته به حالت های جایگزیده امری طبیعی است زیرا با افزایش دما در این حالت حامل های بار جایگزیده می توانند به طور گرمایی فعال شده و در حالت های غیر جایگزیده جانشین شده و در نتیجه در فرایندهای بازترکیبی دیگری که رقیب فرایندهای بازترکیب تابشی هستند شرکت کنند (جابه جایی قرمز). با افزایش بیشتر دما مولفه های فوتولومینسانس با انرژی بالاتر می توانند فعال شده و در بازترکیب های تابشی که ناشی از حامل آزاد یا اکسیتون های آزاد هستند شرکت نمایند (جابه جایی آبی). سپس افزایش بیشتر و بیشتر دما مجدداً بدلیل کاهش گاف نواری باعث یک جابه جایی قرمز خواهد شد.

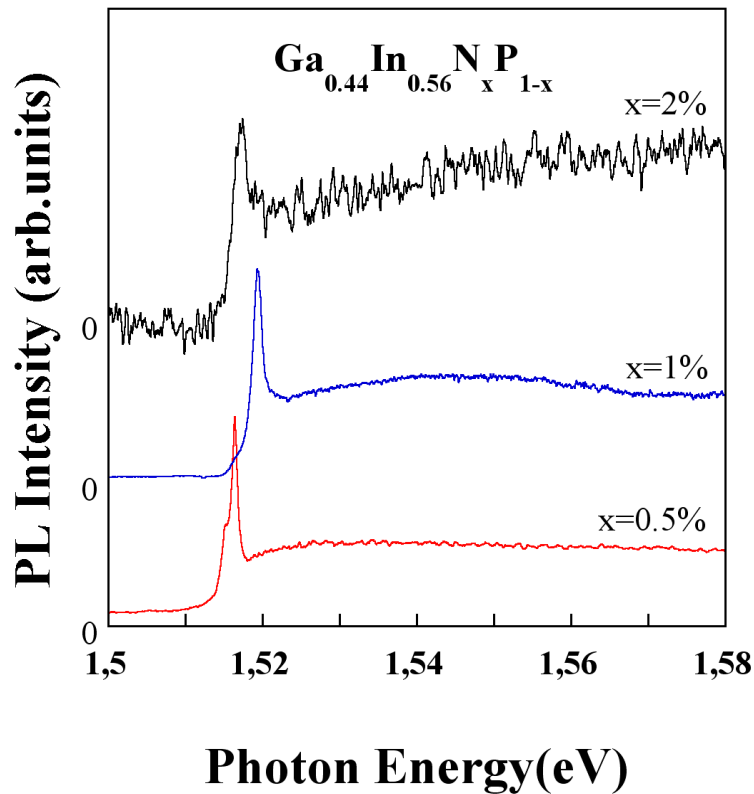


تصویر ۹-۵: شکل (a) (۹-۵) بستگی دمایی طیف نوعی ASPL مربوطه که به عنوان مثال برای نمونه با 1% نیتروژن نشان داده شده است. انرژی فوتون تحریکی در تمام این اندازه گیری ها 1.59 eV و توان تحریک روی نمونه ها حدود ۲۰ میلی وات بوده است. شکل (b) بستگی قله طیف ASPL به دما برای نمونه با 1% نیتروژن و شکل (c) بستگی شدت ASPL مجتمع به دما برای نمونه با 1% نیتروژن را نشان می دهد.

در نمونه های ما همانطور که در شکل (۹-۵) دیده می شود با افزایش دما تا حدود ۱۰۰ کلوین شدت طیف های ASPL تقریباً به صفر کاهش یافته و دیگر قابل اندازه گیری نیستند. به همین دلیل امکان بررسی رفتار

دمایی فوق الذکر تا دمای محیط امکان پذیر نبوده است. افزایش دما سبب جابه جایی قرمز قابل توجهی در موقعیت قله طیف های ASPL می شود به عنوان مثال در نمونه با ۱در صد نیتروژن در گستره دمایی ۴ تا ۸۰ کلوین این مقدار در حدود ۶۰ meV است شکل (b)(۵-۹). همچنین همانطور که در شکل (c)(۵-۹) به طور واضح دیده می شود با افزایش دما شدت طیف ASPL کاهش می یابد که این همانطور که تلویحا اشاره شد بدلیل کاهش جمعیت حامل های ترازهای جایگزیده به سبب کسب انرژی گرمایی توسط آنها و گذار به ترازهای بالاتر و در نتیجه امکان شرکت در کانال های غیر تابشی که معمولا در دماهای بالا فعال هستند می باشد.

بررسی وابستگی طیف گسیلی آنتی- استوک فتولومینسانس به انرژی فوتون تحریکی (ASPLE) در نمونه های نیتروژن دار می تواند اطلاعات مفیدی در خصوص منشا پیدایش حامل های بار شرکت کننده در این فرایند را فراهم کند. بر اساس این اندازه گیری ها که در دمای پایین انجام شده و نتایج آن در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است، اگر چه سیگنال ASPLE در تمام انرژی های بالاتر از ۱/۵eV وجود دارد لیکن زمانی که انرژی فوتون های تحریک از حدود ۱/۵۱۳ eV فراتر می رود افزایش قابل ملاحظه ای که به شکل قله های تیز در حوالی انرژی هایی حدود ۱/۵۱۹ - ۱/۵۱۵ eV قابل مشاهده است، دیده می شود. و این محدوده انرژی به گاف نواری اکسیتونی زیر لایه GaAs بسیار نزدیک است. مقایسه موقعیت قله تیز طیف ASPLE مربوط به نمونه های نیتروژندار جابه جایی اندکی را نشان می دهد. این مساله نشان می دهد که لایه های روآراستی GaInNP با توجه به در صد نیتروژن کرنش متفاوتی را روی لایه های GaAs ایجاد می کنند. در نتیجه حامل های موثر در طیف ASPL در نزدیکی مرز مشترک تحت تاثیر این کرنش قرار می گیرند و موقعیت قله انرژی طیف ASPLE مربوط به نمونه ها اندکی تغییر می کند. این مساله خود نشان می دهد که گذارهای تابشی مرتبط با این قله های تیز بایستی در نزدیکی مرز مشترک ساختار ناهمگون GaInNP/ GaAs اتفاق بیافتد.



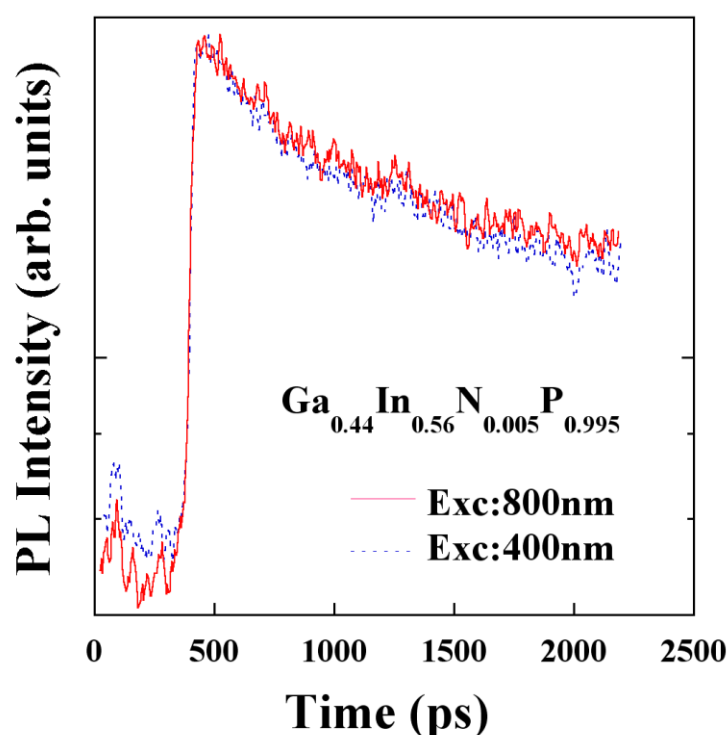
تصویر ۵-۱۰: طیف ASPLE برای نمونه های نیتروژندار ثبت شده در دمای پایین. انرژی اشکار سازی در این اندازه گیری ها در موقعیت قله انرژی خطوط طیفی ASPL مربوط به آن نمونه تنظیم شده است.

همچنین نتایج این اندازه گیری ها نشان می دهند که شدت طیف های آنتی- استوک فتولومینسانس زمانی که انرژی تحریک کمتر از حدود  $1/5\text{eV}$  (حدود گاف نواری GaAs) باشد، بسیار ضعیف بوده و قابل مشاهده نخواهند بود. به علاوه افزایش قابل توجه (به شکل قله های تیز) در انرژی های نزدیک گاف نواری GaAs روی طیف های ASPLE، مبین این نکته است که حامل های شرکت کننده در باز ترکیب های تابشی فرایند آنتی- استوک فتولومینسانس نخست در زیر لایه GaAs در نزدیکی مرز مشترک با لایه اصلی ایجاد شده و سپس از این ناحیه توسط مکانیزم مناسبی که باعث وارونی انرژی می شود به نوارهای رسانش و ظرفیت لایه روآراستی GaInNP می روند. نوع و نحوه این وارونی انرژی در قسمت های بعدی مورد بررسی و بحث قرار خواهد گرفت.

اطلاعات بیشتر در خصوص منشأ وارونی انرژی حامل ها در نمونه های GaInNP مورد مطالعه را می توان با توجه به نتایج حاصل از اندازه گیری های فتولومینسانس وابسته به زمان (TRPL) بدست آورد. خطوط طیفی



نوعی حاصل از اندازه گیری های TRPL هنگامی که نمونه ها با طول موج ۸۰۰ nm (ASPL) و ۴۰۰ nm (NPL) تحریک شده اند برای نمونه با  $[N] = 0.5\%$  در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است. منحنی مربوط به ASPL با رنگ قرمز و منحنی مربوط به NPL نیز با رنگ آبی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود شدت طیف فتولومینسانس (ASPL و NPL) در مدت رها سازی نمونه پس از عملیات تحریک کاهش می یابد که امری طبیعی می باشد. اما چگونگی کاهش و زمان واهلش این منحنی ها می تواند بازتابی از رفتار حامل های شرکت کننده در گذارهای تابشی وابسته باشد، از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردار خواهد بود.



شکل ۵-۱۱: نمودار مربوط به نتایج حاصل از اندازه گیری های TRPL مربوط به یک نمونه نوعی با  $[N] = 0.5\%$  در یک مقیاس نیمه لگاریتمی. طیف مربوط به ASPL با رنگ قرمز و طیف مربوط به NPL با رنگ آبی نشان داده شده است. در این اندازه گیری ها انرژی آشکارسازی طیف در هر دو وضعیت NPL و ASPL در نزدیکی قله انرژی خط طیفی آنها (حدود ۱/۸۲eV) تنظیم شده بود. تمام اندازه گیری های TRPL در دمای ۲ کلوین انجام شده اند.

همانطور که در شکل (۵-۱۱) دیده می شود وابستگی زمانی خط طیفی مربوط به NPL و ASPL شباهت بسیار زیادی به یکدیگر دارند، که می توان نتیجه گرفت که رفتار دینامیکی در هر دو فرایند یکسان بوده

است. همچنین می بینیم که زمان واهلش<sup>۵۴</sup> خط طیفی مربوط به NPL و ASPL به طور غیر نمایی تغییر می کند و شامل دو مولفه تند گذرا و کند گذرا می باشد که با گذشت زمان مولفه کند گذرا به آهستگی صفر می شود. در واقع نیمرخ نمودار واهلش بدست آمده را می توان شامل دو شاخه نمایی (مولفه کند میرا و مولفه تند میرا) در نظر گرفت که با معادله زیر سازگار است [۸].

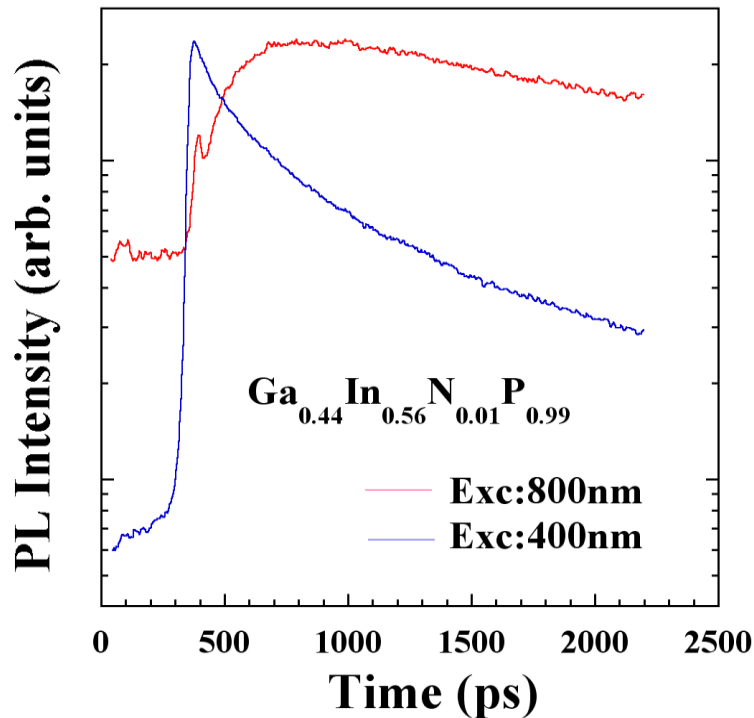
$$I(t) = A \exp(-t/\tau_{fast}) + B \exp(-t/\tau_{slow}) \quad (۱-۵)$$

از منطبق کردن معادله فوق با داده های تجربی نشان داده شده در شکل (۵-۱۱) برای زمان واهلش شاخه کند میرا با توجه به انرژی آشکارسازی تنظیم شده مقادیری در حدود ۲۲-۳ نانوثانیه بدست می آید. مقادیر کوچکتر مربوط به انرژی های آشکارسازی بزرگتر است. برای شاخه تند گذرا نیز مقادیری در حدود ۲۳۰-۱۹۰ پیکوثانیه بدست می آید. شاخه کند میرا معمولاً مربوط به طول عمر تابش گذارهای وابسته به نیتروژن است در حالی که شاخه تند میرا بازتاب کننده انتقال انرژی از طریق کانال های غیر تابشی است. بنابراین در انرژی های آشکارسازی بالاتر بدلیل انتقال انرژی آسان تر از حالت های غیر عمیق وابسته به نیتروژن که هم دارای فراوانی بیشتر و جایگزیدگی کمتر هستند زمان واهلش کاهش می یابد. زمان افزایش<sup>۵۵</sup> شدت طیف فتولومینسانس در هر دو انرژی تحریک به طور قابل ملاحظه ای کوتاه بوده است (حدود ۳۰ پیکوثانیه). که احتمالاً توسط واهلش حامل ها به حالت های جایگزیده تعیین می شود.

نتایج اندازه گیریهای TRPL مربوط به نمونه با  $[N] = 1\%$  نیز در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است. در این شکل نیز منحنی مربوط به وضعیت ASPL با رنگ قرمز و منحنی مربوط به وضعیت NPL با رنگ آبی مشخص شده است. در اینجا نیز انرژی آشکارسازی طیف برای هر دو وضعیت ASPL و NPL در نزدیکی قله انرژی خط طیفی هر یک از آنها (حدود ۱/۷۲eV) تنظیم گردیده بود. در این نمودار برای وضعیت ASPL یک زمان افزایش سریع به شکل یک قله تیز روی نمودار قابل رویت است که مربوط به نور پراکنده شده لیزر تحریک بوده که توسط آشکار ساز ثبت و به شکل قله تیز روی منحنی ظاهر شده است و ربطی به فتولومینسانس حاصل از نمونه ندارد.

<sup>۵۴</sup> Decay time

<sup>۵۵</sup> Rise time

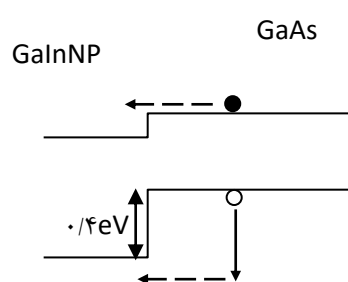


شکل ۵-۱۲: نتایج اندازه گیری های TRPL مربوط به نمونه با  $N=1\%$ ، منحنی مربوط به ASPL با رنگ قرمز و منحنی مربوط به NPL با رنگ آبی نشان داده شده است در این اندازه گیری ها انرژی آشکار سازی نزدیک به قله خطوط طیفی هر یک از دو وضعیت ASPL و NPL تنظیم شده بود. تمام اندازه گیری های TRPL در دمای ۲ کلوین انجام شده اند.

همانطور که نمودار (۵-۱۲) نشان می دهد رفتار زمانی منحنی مربوط به وضعیت های ASPL و NPL مشابه هم نیستند. با توجه به شکل می بینیم که زمان واهلش مربوط به وضعیت ASPL بسیار آهسته تر از وضعیت مربوط به NPL است. زمان واهلش مولفه کند میرا مربوط به وضعیت NPL حدود ۵-۱۰ نانو ثانیه تخمین زده می شود که این در مقایسه با زمان واهلش مولفه نظیر در نمونه با  $N=0.5\%$  کوتاهتر است. این مطلب نشان می دهد که برای نمونه با  $N=1\%$  نرخ باز ترکیب تابشی بزرگتر بوده و بنابر این کال های غیر تابشی فعال تر هستند. همچنین علی رغم اینکه زمان افزایش وضعیت NPL سریع است، لیکن زمان افزایش وضعیت ASPL آهسته تر، منحنی آن دارای تحدب و مقدار زمان افزایش حدود  $280\text{ ps}$  است. از آنجا که این زمان افزایش از طول عمر پالس لیزر (حدود  $150\text{ fs}$ ) به طور قابل ملاحظه ای بزرگتر است، نتیجه می گیریم که فوتون دوم شرکت کننده در فرایند ASPL توسط نور لیزر فراهم نمی شود. بنابراین با توجه به این نکته که افزایش سیگنال وضعیت ASPL حتی پس از پایان پالس لیزر نیز ادامه دارد، به این نتیجه می رسیم که فوتون های

دیگری (که آنها را فوتون های بازچرخان<sup>۵۶</sup> می نامیم) غیر از فوتون های نور لیزر در ایجاد این افزایش دخالت دارند. در ادامه در این خصوص بحث بیشتری خواهیم داشت.

اکنون با استفاده از نتایج حاصل از داده های تجربی استخراج شده می توانیم به پیش بینی مکانیزم احتمالی وارونی انرژی که منجر به مشاهده طیف های پر بازده آنتی-استوک فتولومینسانس در نمونه های مورد مطالعه شده است، بپردازیم. با توجه به موقعیت قله انرژی خط طیفی NPL نمونه بدون نیتروژن که مقدار  $1/933\text{eV}$  می باشد، و نتایج بدست آمده و مقایسه با گزارشات موجود قاعدتا می بایستی آرایش نواری این ترکیب در مرز ناهمگون آن از نوع-۱ باشد [۹]. از آنجا که طیف های آنتی-استوک فتولومینسانس در توان های تحریک با چگالی بسیار پایین نیز قابل مشاهده هستند بنابراین مکانیزم های غیرخطی نظیر جذب یک مرحله ای دو فوتون (TPA) که تنها در توان های تحریک از مرتبه  $1000\text{ W/cm}^2$  و بالاتر رخ می دهند نمی توانند باعث ایجاد این وارونی انرژی شده باشند. مکانیزم های احتمالی دیگر برای وارونی انرژی فرآیندهای اوژه سرد (بدون نیاز به فونون) و جذب دو فوتون دو مرحله ای (TS-TPA) خواهند بود. در هر دو مورد با جذب فوتون های نور تحریکی حامل های غیر تعادلی در ناحیه GaAs و در نزدیکی های فصل مشترک ایجاد می شوند. الکترون های تحریک شده به راحتی می توانند در لایه های GaInNP پخش شوند، مرحله دوم تحریک نیز شامل نفوذ حفره های تحریک شده از سد تقریباً  $0/4\text{ eV}$  در نوار ظرفیت خواهد بود. (به تصویر ۵-۱۳ دقت کنید) [۱۰].

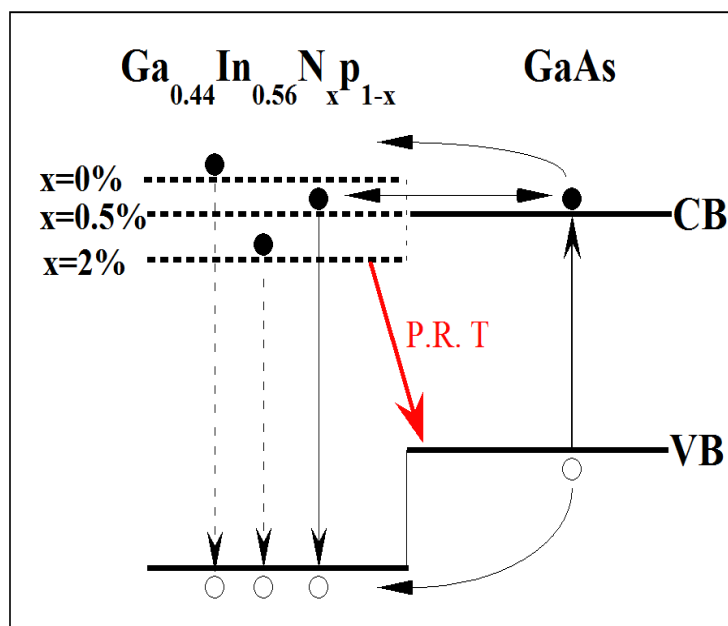


تصویر ۵-۱۳: طرحواره ای از همردیفی نواری نوع II در GaInNP/GaAs برای  $[N] > 0/5\%$

<sup>۵۶</sup> Photon recycling

در فرآیند اوزه سرد انرژی لازم برای وارونی انرژی توسط بازترکیب غیر تابشی زوج الکترون - حفره همسایه فراهم می‌شود در حالیکه در فرآیند TS-TPA، حفره انرژی لازم برای نفوذ به نوار ظرفیت لایه GaInNP را توسط جذب فوتون دوم بدست می‌آورد. بازترکیب اوزه مستلزم همپوشانی توابع موج حامل های همسایه می‌باشد بنابراین در توان های تحریک با چگالی بسیار پایین نظیر مورد مطالعه شده در این پایان نامه امکان حضور موثر چنین فرایندی بعید به نظر می‌رسد. همچنین با توجه به اینکه وابستگی شدت طیف آنتی- استوک فتولومینسانس به توان تحریک به شکل تقریباً خطی است لذا به نظر می‌رسد مکانیزم اوزه سرد نمی‌تواند مکانیزم موثر برای وارونی انرژی باشد زیرا همانطور که در فصل چهارم اشاره کردیم، در فرایند اوزه سرد این وابستگی معمولاً به صورت مکعبی ( $\beta \sim 3$ ) است. از سوی دیگر همانگونه که قبلاً اشاره شده است در صورت ردیف شدگی نواری از نوع-II در فصل مشترک ساختار ناهمگون GaInNP/GaAs و یا افزایش جایگزیدگی در لایه روآراستی با گاف نواری بزرگتر بازده ASPL افزایش می‌یابد. در صورت برقراری حالت اول پخش حامل های بار(الکترونها) ایجاد شده توسط عمل تحریک نوری از منطقه با گاف نواری کوچکتر(زیرلایه) به منطقه با گاف نواری بزرگتر بدون جذب فوتون اضافی می‌تواند صورت بگیرد. همچنین در صورت برقراری حالت دوم بازگشت حامل های بار تجمع کرده در منطقه با گاف نواری بزرگتر به منطقه با گاف نواری کوچکتر متوقف می‌گردد. واضح است که در هر دو حالت بازده طیف مشاهده شده ناشی از حامل های مورد بحث افزایش می‌یابد. اما لبه نوار رسانش نیمرساناهای نیتروژن دار رقیق بدلیل عدم یکنواختی در توزیع نیتروژن دارای افت و خیزهای قابل توجهی است [۱۱] که به نظر می‌رسد باعث افزایش جایگزیدگی حامل های بار گردد. اما همانگونه که در قسمت نتایج اشاره شد پتانسیل جایگزیده بدست آمده برای نمونه های نیتروژن دار تفاوت قابل توجهی با یکدیگر ندارند. لذا اعتقاد ما بر این است که افزایش جایگزیدگی در نتیجه افزایش غلظت نیتروژن در نمونه ها عامل موثر در افزایش بازده ASPL مشاهده شده ندارد. بنابراین بایستی حالت دیگر یعنی تغییر ردیف شدگی نواری ساختار از نوع-I به نوع-II عامل اساسی برای مشاهده طیف پربازده ASPL باشد. این مساله امر قریبی است زیرا می‌دانیم که در این مواد کاهش گاف نواری عمدتاً بدلیل جابه جایی لبه نوار رسانش به سمت نوار ظرفیت اتفاق می‌افتد [۱۱]. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده عقیده ما این است که در نمونه دارای ۰/۵٪ نیتروژن چنانکه در شکل (۵-۱۴) به طور شماتیک نشان داده ایم یک همردیفی نواری بین لبه نوار رسانش GaInNP و لبه نوار رسانش GaAs وجود دارد. این مطلب با نتایج وابستگی شدت طیف ASPL به توان تحریک در توافق است. زیرا در این نمونه مشاهده می‌کنیم که این وابستگی نسبت به نمونه های دارای مقادیر بیشتر نیتروژن شدیدتر است، زیرا امکان بازگشت حامل های

رسیده به نوار رسانش GaInNP به نوار رسانش GaAs وجود دارد پس نیاز به جذب فوتون برای جبران این وضعیت وجود خواهد داشت. با این تفاسیر و با توجه به شکل ترسیم شده (۵-۱۴) به نظر ما مکانیزم موثر مسوول جهت وارونی انرژی در فرایند ASPL مشاهده شده در نمونه های مورد مطالعه بایستی فرایند TS-TPA باشد. در فرآیند TS-TPA مرحله دوم تحریک برای کامل شدن فرآیند آنتی- استوک فتولومینسانس می تواند توسط الف) نور لیزر یا ب) کانالهای باز ترکیب تابشی از طریق فوتون باز چرخان، فراهم شود. اهمیت فوتون باز چرخان در اندازه گیری های TRPL موقعی است که غالباً زمان افزایش آهسته سیگنال آنتی — استوک فتولومینسانس پس از پایان پالس لیزر (چنانکه در نتایج اندازه گیری های این مساله نشان داده شد) نیز ادامه دارد. فوتون باز چرخان در ساختارهای GaInNP/GaAs دارای  $[N] > 0/5\%$  اهمیت می یابد. پس می توان نتیجه گرفت که لازمه وجود فوتون باز چرخان همردیفی نواری نوع- II می باشد. نوع همردیفی نواری در مرز ناهمگون GaInNP/GaAs به ازای  $[N] = 0/5\%$  نه از نوع- I و نه از نوع- II است. زیرا اصولاً زمان افزایش ASPL از زمان افزایش PL طولانی تر است و از آنجا که فرایند ASPL در ۳۰ ps اول کامل می شود بنابراین اگر فرایند TS-TPA مکانیزم مسئول برای وارونی انرژی باشد، مرحله دوم تحریک در این نمونه به خاطر جذب فوتون های لیزر خواهد بود و ارتباطی به فوتون باز چرخان ندارد. احتمالاً بزرگ بودن طول پخش الکترون در لایه  $Ga_{0.44}In_{0.56}N_{0.005}P_{0.995}$  که در توافق با بزرگ بودن زمان واهلش برای این نمونه است می تواند سبب توقف فرایند فوتون باز چرخان شده باشد. این مساله کاهش تجمع الکترون های تحریک شده را در مجاورت فصل مشترک  $Ga_{0.44}In_{0.56}N_{0.005}P_{0.995} / GaAs$  به دنبال خواهد داشت. ما معتقدیم محتملترین فرایند برای تولید فوتون های باز چرخان گذارهای نوع- II غیر مستقیم در محدوده انرژی فرو سرخ چنانچه در شکل (۵-۱۴) با علامت P.R.T مشخص کرده ایم می باشند. بازده این گذارها در نمونه های مورد بحث قابل توجه می باشد [۱۲].



تصویر ۵-۱۴: طرحواره ای از فرایند جذب دو فوتون دو مرحله ای برای یک نمونه نوعی .

بر اساس فرایند TS-TPA برای نمونه های نیتروژن دار شکل (۵-۱۴) در مرحله نخست پس از جذب یک فوتون در نزدیکی مرز مشترک ساختار ناهمگون و در ناحیه نیم رسانای باگاف نواری کوچکتر، ناشی از تحریک نوری نمونه، یک الکترون و یک حفره ایجاد می شود. سپس فوتون دیگر توسط حفره مستقر در نوار ظرفیت GaAs جذب و این حفره انرژی کافی برای نفوذ به نوار ظرفیت لایه GaInNP را بدست می آورد. همچنین با توجه به تصویر (۵-۱۴) برای نمونه با  $[N] = 0.5\%$  احتمال بازگشت حامل های تحریک شده به نوار رسانش GaAs وجود دارد، بنابراین انتظار داریم شدت طیف آنتی-استوک فتولومینسانس مربوط به این نمونه از نمونه با  $[N] = 1\%$  ضعیف تر باشد، زیرا از تعداد حامل هایی که در فرایند آنتی-استوک فتولومینسانس شرکت می کنند، کاسته خواهد شد. در نهایت الکترون و حفره های رسیده به لبه نوار رسانش و به نوار ظرفیت در فرایند باز ترکیب تابشی شرکت و خطوط طیفی ASPL مشاهده خواهند شد.

- [١] Y.G. Hong, A.Nishikawa, and C.W.Tu, Appl. Phys. Lett., 83. 5446(2003).
- [٢] E.J. Johnson and et al, Appl. Phys.Lett 40(1982).
- [٣] M. Izadifard and et al, Appl. Phys. Lett,85,26(2004).
- [٤] T. Kita, and et al, elsevier 87-89 Journal of Luminescence(2000).
- [٥] F.A.J.M Driessen , Appl. Phys. Lett.67,2813(1995).
- [٦] F.A. J.M Driessen and et al, Phys .Rev.B54,R5263(1996).
- [٧] Takashi and et al, Phys .Rev.B59 23(1998).
- [٨] K.Yamashita ,T. Kita, and T. Nishino , J. Appl.phy.84,359(1996).
- [٩] S.Froyen and et al , Appl. Phys.Lett.68,28 52 (1996).
- [١٠] N.M.Johnson, and et al, Phys. Today 53, 31 (2000).
- [١١] A.Buyanova,W. M.Chen, and B. Monemar , MRS Internet J.Nitride Semicond.Res.6.2(2001).
- [١٢] M. Izadifard and et al, Appl. Phys. 99,073515(2006).
- [١٣] H.Yaguchi,S. Miyashi, H. Arimoto, Solid-State Electron.41,231(1997).
- [١٤] J. Zeman and et al , Phys. Rev.B55,R13 428(1997).
- [١٥] Y. H.Cho and et al , Phys. Rev.B56,R4375(1997).
- [١٦]S.C. Hohng and et al, Appl. Phys. Lett.7523(1999).
- [١٧] S.C. Hohng and et al, Phys. Rev.B60,12(1999).
- [١٨] C. Kammerer and et al Phys. Rev. Lett,87,20(2001).
- [١٩] L. Grenouillet and et al , Appl. Phys. Lett . 76,2241(2000).
- [٢٠] H.B.Yu and et al, Chinese Phys. Lett. 21, 1323(2004).
- [٢١] A. Bell, S. Srinivasan and et al, Appl. Phys. 95, 4670 (2004).
- [٢٢] Z.P. Su, K.L.Teo,P.Y.Yu, Solid State Commun.99,933(1996).



سمه تعالی

شماره مقاله: ۳۷۹

کنفرانس فیزیک ایران  
۵ تا ۸ شهریور ۱۳۸۶  
یاسوج - دانشگاه یاسوج

جناب آقای مهدی جعفری مته کلایی

با احترام، مقاله جنابعالی و همکاران با عنوان :

تاثیر آرایش نیتروژن روی آنتی- استوک فتولومینسانس مشاهده شده در نیمرسانای GaInP

در کمیته علمی کنفرانس فیزیک ۱۳۸۶ مطرح و برای ارائه به صورت شفاهی در کنفرانس پذیرفته شد.

زمان ارائه سخنرانی شما طبق برنامه زیر تعیین شده است:

ساعت ۱۸:۱۵ تا ۱۸:۴۰ روز دوشنبه. ۱۳۸۶/۶/۵

از مدت زمان تعیین شده، ۲۰ دقیقه به ایراد سخنرانی و ۵ دقیقه آخر به پرسش و پاسخ اختصاص یافته است.

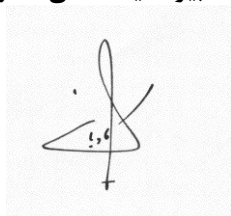
متمنی است در صبح روز سخنرانی خود، نماینده دفتر انجمن را از حضورتان مطلع فرمایید. نحوه ارائه مقالات به صورت Power Point، ویا Overhead خواهد بود. لطفاً قبل از ارائه سخنرانی خود هماهنگی لازم را با کمیته اجرایی فراهم سازید.

خواهشمند است در صورتی که به دلیلی از شرکت در کنفرانس منصرف شدید، در اولین فرصت تا هنگام تنظیم برنامه و حداکثر تا ۱۳۸۶/۵/۱۸، کمیته علمی (دفتر انجمن) را مطلع فرمایید تا خللی در برنامه کنفرانس پیش نیاید. ضمناً طبق روال انجمن از مقاله‌دهندگانی که بدون اطلاع قبلی مقاله خود را در کنفرانس ارائه نکنند، تا دو سال مقاله دیگری پذیرفته نخواهد شد.

با احترام

کامران کاویانی

دبیر کمیته علمی کنفرانس فیزیک ۱۳۸۶



# تأثیر آرایش نیتروژن روی آنتی-استوک فتولومینسانس مشاهده شده در

## نیمرسانای GaInP

جعفری مته کلایی، مهدی؛ ایزدی فرد، مرتضی

دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

### چکیده

در این مقاله ما نشان داده ایم که تأثیر آرایش نیتروژن ( $0 \leq x \leq 2\%$ ) روی ساختارهای نیمرسانای بی نظم GaInP/GaAs به یک فرایند آنتی-استوک فتولومینسانس (ASPL) قوی منجر می شود. بازده این فرایند به طور بحرانی به غلظت نیتروژن در نمونه ها وابسته است. دلیل این مسأله به تغییر نوع ردیف شدگی نواری در فصل مشترک این ساختارها بدلیل حضور نیتروژن نسبت داده می شود. شدت سیگنال ASPL مشاهده شده تقریباً به طور خطی با چگالی توان تحریک تغییر میکند. بر اساس مشاهده سیگنالهای ASPL با بازده بالا حتی در توانهای تحریک بسیار پایین و نیز اندازه گیری پارامترهای وابسته به توان تحریک مکانیزم جذب دو فوتون دو مرحله ای برای توجیه وارونی انرژی در این فرایند پیشنهاد می شود.

## Effect of nitrogen on the observed anti-stokes photoluminescence in GaInP semiconductor

Jafari Matehkolae, Mehdi; Izadifard, Morteza

physics Department, shahrood university of Technology, shahrood, Iran

### Abstract

*In this paper we have shown that alloying of disordered GaInP with nitrogen ( $0 \leq x \leq 2\%$ ) leads to very efficient anti-stokes photoluminescence (ASPL) in GaInP/GaAs heterostructures. The ASPL efficiency is found to depend critically on N concentration. This is attributed to the N-induced changes in the band alignment at the heterointerface. The intensity of this ASPL signal nearly varies linearly with excitation power density. Based on the highly efficient observed ASPL even at the very low excitation power and the performed excitation power dependent measurements, a possible mechanism for the energy up conversion is suggested as being due to the two-step two-photon absorption..*

PACS No:78

ناهمگون و چاه کوانتومی قابل توجه می باشد. افزایش انرژی نور تابشی نسبت به انرژی تحریکی [حدود  $700 \text{ meV}$  در  $[GaAs/ordered-(Al)GaInP]$  این ترکیبات جدید را در ابزارهای اپتوالکترونیکی نظیر تبدیل فرکانسی میسر می سازد. بازده این فرایند توسط مکانیزمهای که

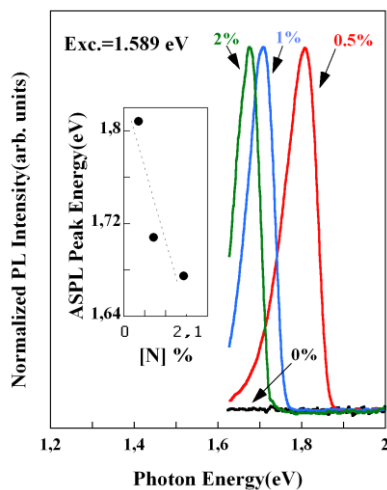
### مقدمه:

آنتی-استوک فتولومینسانس (ASPL) فرایندی است که طی آن گسیل فوتون ها در انرژی هایی بالاتر از انرژی فوتون های تحریک رخ می دهد. مطالعات اخیر نشان می دهند که بازده این فرایند در نیمرساناهای با ساختارهای

مسئول تحریک و انتقال حاملها به منطقه نیمرسانای با گاف نواری بزرگتر هستند، تعیین می شود. مکانیزمهایی که غالباً در این ساختارها برای توجیه وارونی انرژی پیشنهاد می شوند عبارتند از: جذب دو فوتون یک مرحله‌ای و جذب دو فوتون دومرحله‌ای [۲-۴]، فرآیند اوزه سرد [۵-۶]. برداشته شدن قید پایستگی تکانه خطی حامل ها در مرز مشترک یک ساختار ناهمگون [۲-۳] و همچنین وجود حالت های اکسیتونی جایگزیده در منطقه نیمرسانای با گاف نواری کوچکتر [۲-۴] و وجود حالت های جایگزیده درنوار رسانش از عواملی هستند که باعث افزایش بازده این فرایند در این ساختارها می شوند.

## نمونه ها و آزمایش

نمونه های *GaN*P الایش شده با نیتروژن در این مطالعه بروش رو آراستی پرتو- مولکولی و در دمای ۴۶۰ در جه سلسیوس روی یک زیر لایه *GaAs* (۱۰۰) رشد داده شده اند. ضخامت تمام لایه های اصلی ۲۳۵ نانومتر و غلظت نیتروژن الایش شده در نمونه ها بین ۰ تا ۲٪ متغیر بوده است. برای تحریک لایه های ترکیبات مورد مطالعه از طیف گسیلی حاصل از یک لیزر یونی آرگون یا یک لیزر حالت جامد قابل تنظیم استفاده شده است. فتولومینسانس حاصل از نمونه ها پس از عبور از یک تکفام ساز دوگانه توسط یک آشکار ساز مولتی پلایر و یا یک آشکار ساز ژرمانیومی ثبت شده اند. کلیه اندازه گیری هادر آزمایشگاه *ODMR* دانشکده فیزیک و سنجش اندازه گیری دانشگاه لینکشوپینگ در کشور سوئد انجام شده است.



شکل ۱: طیف *ASPL* نمونه های مورد مطالعه در دمای ۵

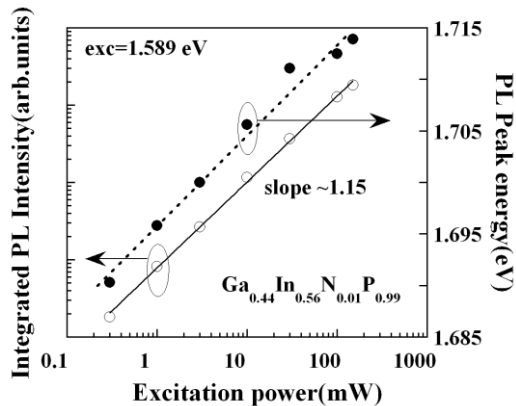
کلوین

همان طور که در شکل ۱ دیده می شود برای نمونه بدون نیتروژن بازدهی *ASPL* بسیار ضعیف است به گونه ای که شدت این طیف برای این ترکیب تقریباً صفر است. در حالی که با افزایش درصد نیتروژن ضمن ظهور طیف های *ASPL* شدت آنها نیز قابل توجه می شود. این مسأله به خصوص

## نتایج و بحث :

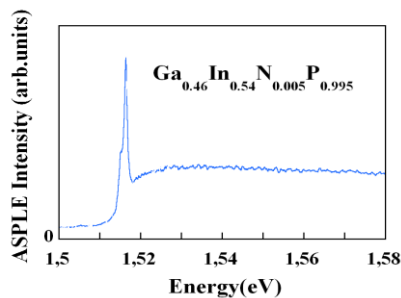
همان طور که اشاره شد گسیل تابشی نزدیک گاف نواری لایه های نانومتری مورد مطالعه (*ASPL*) می تواند وقتی که انرژی نور تحریکی (طیف گسیلی از یک لیزر مناسب) کمتر از گاف نواری لایه های اصلی باشد نیز رخ دهد ( $E_g^{GaAs} < E_{exc} < E_g^{GaNnP}$ ). در شکل ۱ طیف های نرمالیزه *ASPL* نوعی حاصل از تحریک نوری نمونه های مورد مطالعه را زمانی که انرژی تحریک

برای نمونه‌های با غلظت ۱٪ و ۵٪ نیتروژن چشمگیرتر است  
 دما نشان می‌دهد. بررسی رفتار شدت  $ASPL$  با  
 دما نشان می‌دهد که با افزایش دما تا حدود ۱۰۰ کلوبین  
 شدت طیف‌های  $ASPL$  در نمونه‌های نیتروژن‌دار تقریباً به  
 صفر کاهش می‌یابد و بنابراین امکان بررسی این رفتار تا  
 دمای محیط امکان‌پذیر نمی‌باشد.



شکل ۲: طیف مربوط به شدت  $ASPL$  برحسب توان تحریک برای  
 یک نمونه نیتروژن‌دار

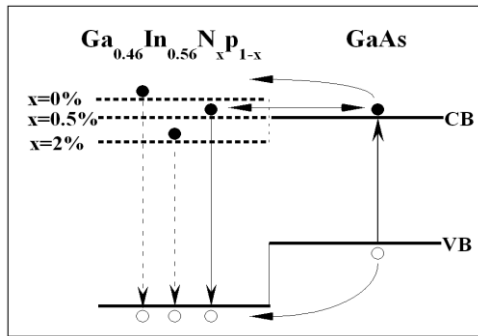
همچنین چنان که انتظار می‌رود افزایش دما باعث  
 جابه‌جایی قابل توجهی در قله خطوط طیفی  $ASPL$  در  
 نمونه‌های نیتروژن‌دار به سمت انرژی‌های کمتر  
 می‌شود. وابستگی طیف گسیلی  $ASPL$  به انرژی فوتون  
 تحریکی ( $ASPLE$ ) در نمونه‌های نیتروژن‌دار می‌تواند  
 اطلاعات مفیدی در خصوص پیدایش حامل‌های بار شرکت  
 کننده در این فرایند فراهم کند. این اندازه‌گیری‌ها نشان  
 می‌دهند که طیف‌های  $ASPL$  زمانی که انرژی تحریک کمتر  
 از گاف نواری  $GaAs$  باشد ایجاد نمی‌شوند. بعلاوه یک  
 افزایش معنادار قابل توجهی به شکل قله تیز در انرژی  
 های نزدیک گاف نواری  $GaAs$  در طیف‌های  $ASPLE$  دیده  
 می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳: طیف تحریک  $ASPL$  برای یک نمونه نوعی

۲٪ شدت طیف  $ASPL$  کاهش می‌یابد ( $\frac{I_{ASPL}^{(1\%)}}{I_{ASPL}^{(2\%)}} \approx 40$ ).

این مسأله می‌تواند ناشی از کاهش کیفیت اپتیکی نمونه به  
 دلیل افزایش درصد نیتروژن که باعث ازدیاد نقص‌های  
 بلوری و تله‌های غیرتابشی می‌شود باشد. فاصله انرژی  
 قله‌های طیف‌های  $ASPL$  مشاهده شده از انرژی تحریکی در  
 حدود ۸۰ الی ۲۲۰ meV (بسته به درصد نیتروژن موجود  
 در نمونه‌ها) بالاتر می‌باشند. بازدهی  $ASPL$  های مشاهده  
 شده نیز بسیار قابل توجه بوده است. زیرا حتی برای زمانی  
 که چگالی تحریکی به کوچکی حدود  $0.1 \text{ w/cm}^2$  است  
 این طیف‌ها قابل مشاهده هستند. از روی شیب دنباله  
 خطوط طیفی  $ASPL$  در نواحی کم انرژی می‌توان  
 پتانسیل‌های جایگزیده (افت و خیزهای نواری در نوار  
 رسانش) را که نقش مؤثری در افزایش بازدهی  $ASPL$  دارند  
 در هر نمونه تخمین زد. با انجام این کار مشاهده کردیم که  
 مقدار پتانسیل جایگزیده به دست آمده در این روش برای  
 تمام نمونه‌های نیتروژن‌دار تقریباً یکسان است. این مطلب  
 نشان می‌دهد که این پتانسیل‌های جایگزیده نقشی در  
 $ASPL$  های پر بازده مشاهده شده ندارند. برای بررسی  
 بیشتر در خصوص مکانیزم‌های غالب در وارونی انرژی در  
 فرآیند  $ASPL$  اندازه‌گیری‌های وابستگی شدت سیگنال  
 $ASPL$  به توان تحریک و نیز دما انجام شده است. شدت  
 $ASPL$  طبق رابطه  $I_{ASPL} = cP_{exc}^\beta$  به توان تحریک ( $P_{exc}$ )  
 وابسته است. در شکل ۲ نتایج مربوط به اندازه‌گیری شدت  
 $ASPL$  بر حسب توان تحریک برای یک نمونه نوعی  
 نیتروژن‌دار در مقیاس لگاریتمی نشان داده شده است.  
 همان طور که در این شکل به وضوح دیده می‌شود با  
 افزایش تا سه مرتبه بزرگی توان تحریک یک جابه‌جایی در  
 حدود ۲۲ meV به سمت انرژی‌های بالاتر به دلیل اثر  
 پرشدگی نواری رخ می‌دهد. این رفتار مشابه رفتاری است  
 که نمونه‌های نوعی مورد نظر هنگامی که تحت  
 $E_{exc} > E_g^{GaInNP}$  تحریک می‌شود از خود بروز می‌دهد.  
 بعلاوه بررسی شدت طیف  $ASPL$  با تغییر توان تحریک در  
 نمونه‌های نیتروژن‌دار یک رفتار نسبتاً خطی با شیب



شکل ۴: طرحواره‌ای از فرایند جذب دو فوتون دو مرحله‌ای برای یک نمونه نوعی

برای نمونه‌های نیتروژن دار در مرحله نخست پس از جذب یک فوتون در نزدیکی مرز مشترک ساختار ناهمگون و در ناحیه نیمرسانای با گاف نواری کوچک یک الکترون و حفره ایجاد می‌شود. سپس فوتون دیگر توسط حفره مستقر در نوار ظرفیت  $GaAs$  جذب و این حفره انرژی کافی برای نفوذ به نوار ظرفیت لایه  $GaInP$  را بدست می‌آورد. البته برای بررسی دقیقتر مکانیزم موثر برای وارونی انرژی نیازمند مطالعات و اندازه‌گیری‌های بیشتر به منظور بررسی دینامیک حامل‌های شرکت کننده در باز ترکیبهای تابشی  $ASPL$  می‌باشد.

### نتیجه گیری

در این مطالعه تاثیر آرایش نیتروژن روی فرایند  $ASPL$  در نیمرسانای مرکب و بی نظم  $GaInP$  مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه نشان می‌دهد که حضور نیتروژن باعث ایجاد طیفهای قوی  $ASPL$  حتی در توان‌های تحریک بسیار پائین ( $0.1w/cm^2$ ) در نمونه‌های نیتروژن دار می‌شود. وابستگی طیفی  $ASPL$  به چگالی توان تحریک به صورت تقریباً خطی است. وابستگی طیفی  $ASPL$  به انرژی فوتون تحریکی ( $ASPLE$ ) یک قله تیز در ناحیه انرژی گاف نواری  $GaAs$  نشان می‌دهد. برای انرژی‌های تحریک کمتر از گاف نواری  $GaAs$  شدت  $ASPLE$  تقریباً صفر است. از نتایج بدست آمده در این مطالعه می‌توان پیش بینی کرد که مکانیزم موثر برای وارونی انرژی حامل‌های شرکت

این مشاهده واضح نشان می‌دهد که حامل‌های شرکت کننده در باز ترکیبهای تابشی  $ASPL$  بایستی نخست در ناحیه  $GaAs$  در نزدیکی‌های مرز مشترک با لایه‌های اصل  $GaInNP$  ایجاد شده و سپس از این ناحیه توسط مکانیزم مناسبی که باعث وارونی انرژی می‌شود به نوارهای رسانش و ظرفیت  $GaInNP$  برسند. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند ما را در پیش بینی مکانیزم وارونی انرژی که منجر به مشاهده طیفهای  $ASPL$  شده است تا حدودی یاری نماید. اولاً با توجه به اینکه اندازه‌گیریهای  $ASPL$  در دمای پائین انجام شده‌اند لذا برانگیختگی گرمایی حامل‌های ایجاد شده در ناحیه  $GaAs$  نمی‌تواند باعث ایجاد این وارونی انرژی شده باشد. ثانیاً چون طیفهای  $ASPL$  در چگالی‌های بسیار پائین توان تحریک نیز قابل مشاهده هستند لذا مکانیزم‌های غیر خطی نظیر جذب یک مرحله‌ای دو فوتون که تنها در توانهای تحریک از مرتبه  $1000w/cm^2$  و بالاتر اتفاق می‌افتند [۸] نمی‌توانند باعث ایجاد این وارونی انرژی شده باشند از طرف دیگر چون وابستگی شدت  $ASPL$  به توان تحریک به شکل تقریباً خطی است لذا به نظر می‌رسد مکانیزم اوزه سرد نیز نمی‌تواند مکانیزم موثر برای وارونی انرژی باشد. در فرایند اوزه سرد این وابستگی معمولاً به صورت مکعبی ( $\beta \approx 3$ ) است. [۵-۶-۹] اما با توجه به موقعیت قله خط طیفی نمونه بدون نیتروژن هنگامی که تحت انرژی  $E_{exc} > E_g^{GaInNP}$  تحریک می‌شود ( $1.0933 eV$ ) حدس می‌زنیم که نوع ردیف شدگی نواری در محل مرز ساختاری ناهمگون مورد مطالعه از نوع  $I$  باشد. اما مطالعات اخیر نشان می‌دهد که افزودن نیتروژن در محدوده  $0.5\% < [N] \leq 2\%$  نوع  $I$  ردیف شدگی نواری را به نوع  $II$  انتقال می‌دهد. [۱۰-۱۱] بر این اساس می‌توانیم بگوئیم مکانیزم موثر و غالب در وارونی انرژی چنانکه در شکل ۴ به طور شماتیک نشان داده شده است به احتمال زیاد فرآیند جذب دو فوتون دو مرحله‌ای می‌باشد.

کننده در بازهای ترکیب های تابشی *ASPL* احتمالاً فرایند جذب دو فوتون دو مرحله ای است.

## مراجع :

- [1] F.A.J.M Driessen et al. *phys.Rev.*B54 R5263(1996).
- [2].R.Hellmann et al, *Phys. Rev. B* 51, 18053 (1995).
- [3].G.G.Zegrya and V.A.kharchenko,*Sov.Phys.JETP*74,173(1992).
- [4].J.Ieman, G.Martinez, P.Y.YU, and k. Uchida, *Phys. Rev. B* 55, R13428(1997).
- [5] W. Seidel.A.Titkov,J.P. Andre, P. Voisin, and M.VoDs,*Phys. Rev.Lett.* 73, 2356(1994).
- [6].F.A.J.M. Driessen. *APPL. Phys. Lett* 67, 2813 (1995).
- [7] Z.P.Su,K.L.Teo,P.Y.Yu, and k. Uchida, *Solid State commun.* 99, 933 (1996).
- [8] See,E.g Y.R Shen,Then principlg of Nonlinear optic, Wiley,New York,(1984),
- [9]Y.H.Cho et al, *phys. Rev*B56R4375(1997),
- [10] M.IZadifarad etal. *Appl.phya.leH* .86 ,261904(2005),
- [11] S.Froyen et al *Appl. .phya.leH*.682852(1996).

## Abstract :

Combinations of dilute Nitride like GaInNP(As) because of this wonderful quality and also unusual in the comparison with N-free group III-V and recently, they always pay attention to the usage of these combinations is in optoelectronic and photonic in industry that use them in making In fra-red(IR) lasers and Hetrojunction Bipolar Transistor. In this way observation of phenomenon Anti-Stokes Photoluminescence in these combinations lead to increasing efficiency of energy (frequency conversion) about 700 meV is very important. So in this thesis for a beginning, we introduce the phenomenon of Anti-Stokes Photoluminescence and investigation of detailed mechanisms for the energy conversion.then investigate some reports of observation of this phenomenon in combination of semiconductor and usage of that in semiconductor industry. To end of results we show on the basis of nitrogen concentration on disordered GaInP/GaAs structures lead to highly efficient Anti-Stokes Photoluminescence. The first study revealed that efficiency of process of ASPL strongly related to concentration of nitrogen. Our conclusion on this problem is that the change in the kind of band alignment in the samples studied heterointerface is on account of existence of nitrogen.in addition to conclusion of measurements showed that the intensity signal of ASPL emission from a linear relation. Also transient PL mesurments(TRPL) were find to be nonexponential. With the observation signal ASPL with highly efficiency even at very low excitation densities, in our idea TS-TPA mechanism for justifying this energy up conversion. In this process most probably from other mechanisms.





*Shahrood University of Technology*

*Physics Department*

Master of Science Thesis

Solid State Physics

Investigation of Anti-Stokes  
Photoluminescence in GaInNP(As)  
Semiconductors

By:

Mehdi Jafari

Supervisors:

Dr. Morteza Izadifard - Dr. Hamid Haratizade

March 2008