



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

# خواص اپتیکی نیدرساناهای نانو ساختار

استاد راهنما

دکتر غلامحسین سدیر عابدی

دانشجو

ابوالقاسم تازیکی

تابستان ۸۳

۶۶

۱۳۸۳/۰۷/۰۷

# تقدیم بہ:

خانوادہ محترمہ

و

استاد ارجمندہم :

جناب آقای دکتر غلامحسین سدید عابدی

## تشکر و قدردانی

اینجانب لازم و ضروری می‌دانم که از آقای دکتر غلامحسین سدید عابدی، استاد راهنمای محترم اینجانب که به خاطر راهنمایی‌های فراوان که قطعاً باعث پیشرفت در کارم و حل مشکلات جانبی شده کمال تشکر را دارم و باعث افتخار است که ایشان استاد راهنمای بنده بوده‌اند.

## و نیز از اساتید محترم:

آقای دکتر قاضی، مدیر گروه و رئیس دانشکده فیزیک و مدرس درس خواص مغناطیسی مواد و آقای دکتر علی اکبر رجبی رئیس دانشگاه صنعتی شاهرود و مدرس درس مکانیک آماری پیشرفته و آقای دکتر حسین عشقی مدرس درس قطعات نیم‌رسانا و آقای دکتر سرکرده‌ای مدرس درس مکانیک تحلیلی پیشرفته کمال تشکر و قدردانی را دارم.  
همچنین از سایر افرادی که در اجرای این پایان‌نامه به من کمک نموده‌اند، کمال تشکر را دارم.

# خواص اپتیکی نیمرساناهای نانو ساختار

## چکیده:

هدف از انجام این پایان نامه ، شناخت علم مواد نانوساختار به خصوص مواد نیمرسانای نانو بلور، بویژه خواص اپتیکی آنها می باشد که به خاطر اندازه کوچکشان از خود بروز می دهند. همچنین در ادامه کاربردها و خواص گسترده فناوری جدید یعنی نانوتکنولوژی مورد توجه قرار می گیرد.

در این رساله ابتدا امواج الکترومغناطیسی و سپس خواص اپتیکی مواد نیمرسانا را مورد بحث قرار داده ایم. بعد از آن مواد نانوساختار را بطور مفصل بررسی نموده ایم و علاوه بر خواص اپتیکی کاربردهای گسترده دیگری که این فناوری در شاخه های مختلف علوم دارد را مورد مطالعه قرار داده ایم. همچنین روشهای مختلف تهیه و رشد نیمرسانای نانوبلور را بیان نموده ایم. در آخر خواص اپتیکی این مواد و علت بروز آنها را بویژه در مورد چند ماده مخصوص بررسی کرده ایم.

## فهرست مطالب

### فصل اول: دانش نور جامدات

۱-۱: مقدمه	۱
۲-۱: منابع امواج الکترومغناطیسی	۲
۳-۱: امواج هماهنگ تخت - سرعت فاز	۳
۴-۱: سرعت گروه	۵
۵-۱: مفاهیم اساسی پاسخ نوری	۹
۱-۵-۱: رابطه پاشندگی	۹
۲-۵-۱: ضریب شکست، ضریب جذب شدت، قانون بیرلامبرت	۱۱
۶-۱: مدل نوسانگر	۱۳
۷-۱: نوسانهای پلاسما و پلاسمونها	۱۶

### فصل دوم: مواد نیمرسانا و خواص نوری آنها

۱-۲: مقدمه	۱۸
۲-۲: ساختار بلوری	۱۹
۳-۲: دهنده‌ها و پذیرنده‌ها	۲۰
۴-۲: نوارهای انرژی در یک نیمرسانا	۲۰
۵-۲: گاف انرژی در یک نیمرسانا	۲۱
۶-۲: فرآیند جذب در نیمرسانا	۲۱
۷-۲: بلور شفاف در نیمرسانا	۲۲
۸-۲: تعریف طیف جذبی خطی یک نیمرسانا	۲۲
۹-۲: فرآیند پراکندگی میان نواری	۲۶
۱۰-۲: فرآیند گذار میان نواری	۲۶

۲۶	۱۱-۲: آمار سیستمهای غیر قابل تشخیص
۲۷	۱۲-۲: انرژی فرمی در نیمرسانا
۲۷	۱۳-۲: گسیل تابش در نیمرساناها
۲۸	۱۴-۲: برانگیختگی مستقیم و غیرمستقیم
۲۹	۱۵-۲: تعریف تحرک $\mu$
۲۹	۱۶-۲: باز ترکیب و به دام اندازی
۳۰	۱۷-۲: گذارهای میان نواری الکترونی
۳۱	۱۸-۲: اکسیتونها
۳۲	۱۹-۲: اکسیتونهای فرنکل
۳۲	۲۰-۲: اکسیتونهای به طور ضعیف مقید
۳۴	۲۱-۲: چگالیده شدن اکسیتونها به صورت قطره‌های الکترون - حفره (EHD)
۳۴	۲۲-۲: تعریف لومینسانس اکسیتون
۳۵	۲۳-۲: لومینسانس اکسیتون آزاد
۳۵	۲۴-۲: دو اکسیتونها

## فصل سوم: آشنایی با نانو تکنولوژی

۳۷	۱-۳: مقدمه
۳۸	۲-۳: تعریف نانو تکنولوژی
۳۹	۳-۳: پیشگامان نانو تکنولوژی
۴۱	۴-۳: نانو تکنولوژی و همگرایی علمی
۴۲	۵-۳: مدل سازی مولکولی و مونتاژگر
۴۳	۶-۳: کربن واحد جدید اندازه گیری طول
۴۴	۱-۶-۳: نانوتیوب ها
۴۴	۲-۶-۳: فولرین ها
۴۴	۳-۶-۳: نانوفیبرهای کربنی
۴۵	۴-۶-۳: نانو قطعات

- ۳-۷: افزایش کارایی سرامیکها توسط نانولوله‌های کربنی ..... ۴۵
- ۳-۸: برخی از اصطلاحات مرسوم در نانو تکنولوژی ..... ۴۶
- ۳-۸-۱: نانو تکنولوژی بیومولکولی ..... ۴۶
- ۳-۸-۲: روش پایین به بالا ..... ۴۷
- ۳-۸-۳: پرتو الکترونی ..... ۴۷
- ۳-۸-۴: چاپ الکترونی ..... ۴۷
- ۳-۸-۵: سیستمهای میکرو الکترونی ..... ۴۸
- ۳-۸-۶: ساخت مولکولی ..... ۴۸
- ۳-۸-۷: نانو الکترونیک ..... ۴۸
- ۳-۸-۸: نانو لوله ..... ۴۸
- ۳-۹: چشم انداز آینده نانو تکنولوژی ..... ۴۹
- برخی از کاربردهای نانو تکنولوژی: ..... ۴۹
- ۳-۱۰: سازماندهی اتمها برای ساخت یک تراشه کوانتومی ..... ۵۰
- ۳-۱۱: شبیه سازی کوانتومی ..... ۵۲
- ۳-۱۲: ساخت کپسولهای در حد اتم ..... ۵۴
- ۳-۱۳: جانداران میکروسکوپی دریایی راهی به سوی نانو چیننده‌ها ..... ۵۵
- ۳-۱۴: دستگاههای الکترونیکی با مقیاس نانو ..... ۵۷
- ۳-۱۵: نانو بلورهای سیلیسیوم ..... ۶۲

### فصل چهارم: روشهای ساخت و رشد بلورهای نیم رسانای نانو ساختار

- ۴-۱: مقدمه ..... ۶۴
- ۴-۲: لیتوگرافی و حکاکی ..... ۶۷
- ۴-۳: لیتوگرافی نوری ..... ۶۸
- ۴-۳-۱: اتاق تمیز ..... ۶۸
- ۴-۳-۲: لیتوگرافی نوری ..... ۶۹
- ۴-۳-۳: نقابها ..... ۷۲



۷۳	..... نور مقاوم ۴-۳-۴
۷۵	..... انتقال الگو برای نور مقاوم‌های مثبت و منفی ۴-۳-۴
۷۹	..... لیتوگرافی‌های پرتو الکترونی، پرتو X و پرتو یونی ۴-۴
۷۹	..... لیتوگرافی پرتو الکترونی ۱-۴-۴
۸۴	..... لیتوگرافی پرتو یونی ۲-۴-۴
۸۴	..... لیتوگرافی پرتو X ۳-۴-۴
۸۶	..... مقایسه روش‌های لیتوگرافی ۴-۴-۴
۸۶	..... حکاکی شیمیایی مرطوب ۵-۴
۸۷	..... حکاکهای همسانگرد ۱-۵-۴
۸۹	..... حکاکی وابسته به جهت‌گیری ۲-۵-۴
۹۱	..... حکاکی خشک ۶-۴
۹۵	..... تکنیکهای حکاکی به کمک پلاسما ۱-۶-۴

### فصل پنجم: خواص اپتیکی نیمرساناهای نانو ساختار

۹۸	..... مقدمه :
۹۹	..... ۱-۵: چگالی حالتها در نیمرساناهای یک بعدی
۱۰۱	..... ۲-۵: جذب اپتیکی (نوری) در سیم‌های کوانتومی
۱۰۲	..... ۳-۵: چگالی حالتها در نیمرساناهای صفر بعدی (با بعد تقریباً صفر)
۱۰۴	..... ۴-۵: جذب نوری در نقاط کوانتومی
۱۰۸	..... ۵-۵: نقاط کوانتومی نیمرساناها در شیشه
۱۱۱	..... ۶-۵: غیر خطی‌های اپتیکی (نوری) نیمرساناها
۱۱۱	..... ۷-۵: طبقه‌بندی غیر خطی‌های نوری
۱۱۳	..... ۸-۵: غیر خطی‌های اپتیکی در نانو ساختار نقاط کوانتومی
	..... ۹-۵: جذب کننده‌های قابل اشباع بر اساس نیمرساناهای نانو بلور برای کاربردهای کلیدزنی
۱۱۳	..... اپتیکی
	..... ۱-۹-۵: شیوه‌های تئوری جذب کننده‌های قابل اشباع برای نیمرساناهای نانو بلور برای

کاربردهای کلید زنی اپتیکی .....	۱۱۵
مدل ذره در یک کره ۲-۹-۵ .....	۱۱۷
رابطه میدان غیر خطی ۳-۹-۵ .....	۱۱۷
طیف جذبی PbS ۴-۹-۵ .....	۱۱۸
کاربردهای کلید زنی نوری ۵-۹-۵ .....	۱۱۹
نقاط کوانتومی بعنوان نقاط رنگی و درخشنده‌های اپتیکی برای فیبرها ۱۰-۵ .....	۱۲۱
پراکندگی و جذب اپتیکی بوسیله نانو خوشه‌های فلزی در GaAs ۱۱-۵ .....	۱۲۷
رسوب As در GaAs ۱-۱۱-۵ .....	۱۲۹
خواص اپتیکی چاههای کوانتومی $Ga_{1-x}Al_xAs$ / GaAs بوسیله کاشت یونی بی‌نظم شده ۱۲-۵ .....	۱۳۰
فیلمهای نیمرسانای نانوبلور الکتروکرومیک ۱۳-۵ .....	۱۳۶

## فصل ۶: نتیجه‌گیری

نتایجی از خواص نوری نیمرساناهای نانوساختار .....	۱۴۰
مراجع .....	۱۴۴

# فصل اول

## دانش نور جامدات

### ۱-۱: مقدمه

مطالعه انتشار نور از داخل یک ماده، به خصوص ماده جامد، یکی از مهمترین و جالبترین شاخه‌های دانش نور را تشکیل می‌دهد. جامدات پدیده‌های نوری مختلف و متعددی را نشان می‌دهند، نظیر جذب گزینشی، پاشندگی، شکست دوگانه، آثار قطبش، و آثار الکترواپتیکی (نور الکتریکی) و مگنتو-اپتیکی (نور - مغناطیسی). بسیاری از خواص نوری جامدات را می‌توان براساس نظریه الکترومغناطیسی کلاسیک درک کرد.

همچنین می‌دانیم نور مرئی صرفاً شکلی از انرژی الکترومغناطیسی است که معمولاً به صورت امواج الکترومغناطیسی توصیف می‌شوند. بیناب کامل چنین امواجی شامل امواج رادیویی، پرتو مادون قرمز، بیناب مرئی رنگهای قرمز تا بنفش، پرتو ماورای بنفش، پرتو X و پرتو  $\gamma$  می‌باشد که آن را مدیون نبوغ جیمز کلارک ماکسول (۱۸۳۱ - ۱۸۷۸) هستیم.

علاوه بر این با توجه به نظریه کوانتومی نور که بوسیله پلانک، انیشتن و بوهر در طول دودهمه اول قرن بیستم تدوین شد، می‌دانیم که انرژی الکترومغناطیسی کوانتایی است، یعنی آن را تنها می‌توان به صورت مقادیر مجزا بنام فوتون به یک میدان الکترومغناطیسی اضافه کرد یا از آن گرفت.

بنابراین مفهوم جدید نور برداشتهای نیوتن و هویگنس از نور را شامل می‌شود و بنابراین گفته می‌شود نور دارای طبیعت دوگانه است. پدیده‌های معینی نظیر تداخل و پراش، خاصیت موجی نور را

نشان می‌دهد و پدیده‌های دیگر، مانند اثر فوتوالکتریک، جنبه ذره‌ای نور را به نمایش می‌گذارد.

## ۲-۱: منابع امواج الکترومغناطیسی

پرتوهای الکترومغناطیسی توسط بارهای الکتریکی نوسانگر بوجود می‌آیند. بسامد نوسان نوع پرتو تابش شده را مشخص می‌کند قسمتهای مختلف طیف الکترومغناطیسی، که بر طبق بسامد و طول موج مشخص شده‌اند، در جدول (۱-۱) نشان داده شده است.

نوع پرتو	بسامد	طول موج	انرژی کوانتومی
امواج رادیویی	$10^9 \text{ Hz}$ و کمتر	300mm و بیشتر	0.000004eV و کمتر
امواج خیلی ریز	$10^9 \text{ Hz}$ تا $10^{12} \text{ Hz}$	300mm تا 0.3mm	0.000004eV تا 0.004eV
مادون قرمز	$4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$300 \mu\text{m}$ تا $0.7 \mu\text{m}$	0.004eV تا 1.7eV
مرئی	$4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ تا $5.7 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$0.7 \mu\text{m}$ تا $0.4 \mu\text{m}$	1.7eV تا 7.3eV
ماورای بنفش	$5.7 \times 10^{14} \text{ Hz}$ تا $10^{17} \text{ Hz}$	$0.4 \mu\text{m}$ تا $0.03 \mu\text{m}$	2.3eV تا 40eV
پرتو X	$10^{17} \text{ Hz}$ تا $4.3 \times 10^{19} \text{ Hz}$	$300 \text{ \AA}$ تا $0.3 \text{ \AA}$	40eV تا 40000eV
پرتو گاما	$10^{19} \text{ Hz}$ و به بالا	$0.3 \text{ \AA}$ و کمتر	40000eV و به بالا

جدول ۱-۱: طیف الکترومغناطیسی [۱]

نمادهای زیر بطور متداول برای طول موج ناحیه اپتیکی به کار برده می‌شوند

واحد	علامت اختصاری	معادل بر حسب متر
میکرون	$\mu\text{m}$	$10^{-6} \text{ m}$
نانومتر	nm	$10^{-9} \text{ m}$
آنگستروم	$\text{ \AA}$	$10^{-10} \text{ m}$

واحد بسامد دور بر ثانیه است که هر تیز (Hz) هم گفته می‌شود.

اگر در یک منبع معین بارها همگی بطور هماهنگ نوسان کنند، گفته می‌شود منبع همدوس است

منابع پرتوی امواج و امواج ریز ساخت بشر بطور عمومی همدوس هستند. [۱]

اساساً این منابع همدوس با بسامد پایین نوسانگرهای الکترونیکی هستند که در دستگاههای تقویت کننده، مانند لوله‌های خلاء، ترانزیستورها و نظیر اینها مورد استفاده قرار می‌گیرند. توسعه تقویت کننده‌های اپتیکی (لیزر)، محدوده منابع همدوس را به ناحیه اپتیکی الکترومغناطیسی گسترش داده‌اند.

اگر بارها مستقلاً و بطور اتفاقی نوسان کنند منبع غیر همدوس گفته می‌شود. منابع معمولی پرتو در ناحیه اپتیکی مانند لامپهای رشته‌های تنگستن، لامپهای فلورسانس، شعله و نظیر اینها غیر همدوس است.

### ۳-۱: امواج هماهنگ تخت - سرعت فاز

اگر معادلات موج برداری (۱-۱) و (۲-۱) را در نظر گرفته و مختصات دکارتی را به کار گیریم، مشاهده

می‌کنیم که هر مؤلفه  $E$ ،  $H$  معادله موج نرده ای (۳-۱) را محقق می‌سازد:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1-1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (3-1)$$

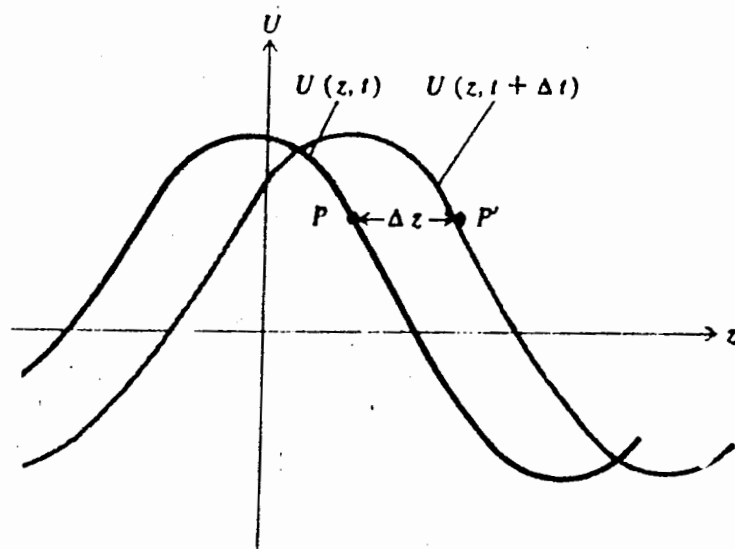
در اینجا کمیت  $U$  نماینده هر یک از مؤلفه‌های  $H_x$ ،  $H_y$ ،  $H_z$ ،  $E_x$ ،  $E_y$ ،  $E_z$  می‌باشد. با حل معادله

(۳-۱) ابتدا در یک بعد مثلاً در راستای  $Z$ ، جواب معادله (۳-۱) در یک بعد، بصورت زیر در می‌آید:

$$U(z,t) = U_0 \cos(kz - \omega t) \quad (4-1)$$

که در آن نسبت ثابتهای  $\omega$  ,  $k$  برابر با ثابت  $u$  است. آنچه معادله (۴-۱) نشان می‌دهد به عنوان یک موج هماهنگ تخت شناخته شده است. نموداری از آن در شکل (۱-۱) نشان داده می‌شود. در یک لحظه معین، تابع موج  $U(z,t)$  بطور سینوسی با مسافت  $z$  تغییر می‌کند، و در یک مقدار ثابت  $z$  تابع موج به طور هماهنگ با زمان تغییر می‌کند. طبیعت پیشرونده موج با ترسیم دو منحنی ثابت  $U(z,t)$  ,  $U(z,t+\Delta t)$  روشن شده است. منحنی دوم نسبت به منحنی اول در راستای مثبت  $z$  دارای جابجایی به اندازه مقدار روبرو است:  $\Delta z = u\Delta t$

به دلیل اینکه این مقدار مثلاً  $pp'$  فاصله بین هر دو نقطه همفاز می‌باشد  $u$  سرعت فاز گفته می‌شود. واضح است که تابع  $U_0 \cos(kz + \omega t)$  موج متحرک در راستای منفی  $z$  را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱): نمودار  $U$  نسبت به  $z$  در زمانهای  $t$  و  $t + \Delta t$  [۱]

مقادیر ثابت  $\omega$  و  $k$  به ترتیب بسامد زاویه‌ای و عدد موج زاویه‌ای گفته می‌شوند. طول موج  $\lambda$  که در راستای انتشار اندازه‌گیری می‌شود، بنا به تعریف فاصله‌ای است که تابع موج در یک دور کامل می‌پیماید: عکس طول موج، عدد موجی طیفی گفته می‌شود و با نماد  $\sigma$  مشخص می‌گردد.

زمان یک دور کامل پریود گفته شده و با  $T$  نشان داده می‌شود. تعداد دورها در واحد زمان بسامد گفته می‌شود. بر طبق تعاریف بالا، موج مسافت  $\lambda$  را در زمان  $T$  می‌پیماید. روابط زیر بین پارامترهای مختلف به آسانی ثابت می‌گردند:

$$\lambda = uT = \frac{2\pi}{K} = \frac{1}{\sigma} \quad (5-1)$$

$$v = \frac{u}{\lambda} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} \quad (6-1)$$

در سه بعد جواب معادله به صورت زیر است:

$$U(\mathbf{r}, t) = U_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)$$

که در آن بردار مکان  $\mathbf{r}$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{r} = \hat{i}x + \hat{j}y + \hat{k}z \quad (7-1)$$

و بردار انتشار یا بردار موج برحسب مؤلفه‌هایش به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mathbf{K} = \hat{i}K_x + \hat{j}K_y + \hat{k}K_z \quad (8-1)$$

اندازه بردار موج، برابر عدد موج است، یعنی:

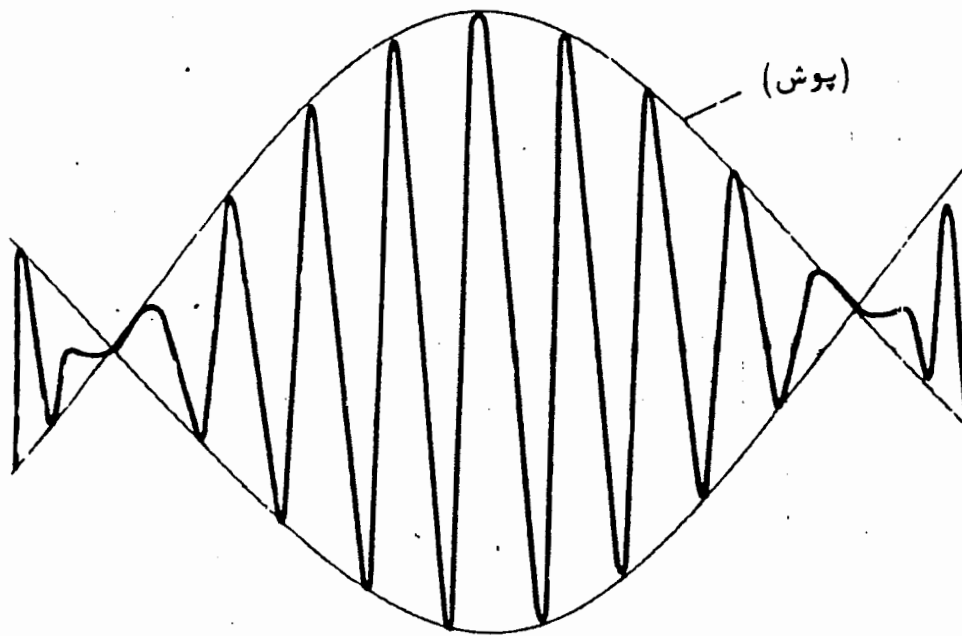
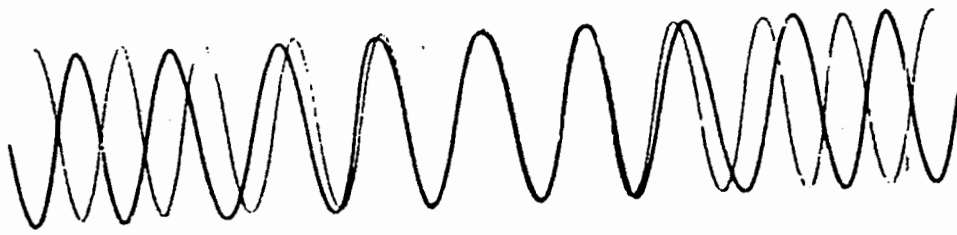
$$|\mathbf{K}| = K = (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{1/2} \quad (9-1)$$

در حالت ۳ بعدی سرعت فاز بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$U = \frac{\omega}{K} = \frac{\omega}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}} \quad (10-1)$$

### ۴-۱: سرعت گروه

دو موج هماهنگ که دارای اختلاف بسامد زاویه‌ای کمی هستند را در نظر می‌گیریم. این بسامدهای مشخص را به ترتیب با  $\omega + \Delta\omega$ ،  $\omega - \Delta\omega$  نشان می‌دهیم. به طور کلی اعداد موج مربوطه نیز با یکدیگر تفاوت خواهند داشت، این کمیتها را با  $K + \Delta K$ ،  $K - \Delta K$  مشخص می‌کنیم.



شکل (۲-۱): پوش بر هم نهی دو موج هماهنگ تخت [۱]

معادلات ماکسول برای محیطهای غیر هادی همسانگرد بصورت زیر است:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial T} \quad (۱۶-۱)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial T} \quad (۱۷-۱)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (۱۸-۱)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (۱۹-۱)$$

با استفاده از روابط عملگری و اعمال روی تابع موج هماهنگ تخت، معادلات ماکسول بصورت زیر



درمی آید: با توجه به:  $\nabla \rightarrow ik$  و  $\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow -i\omega$

$$\mathbf{K} \times \mathbf{E} = \mu\omega \mathbf{H} \quad (20-1)$$

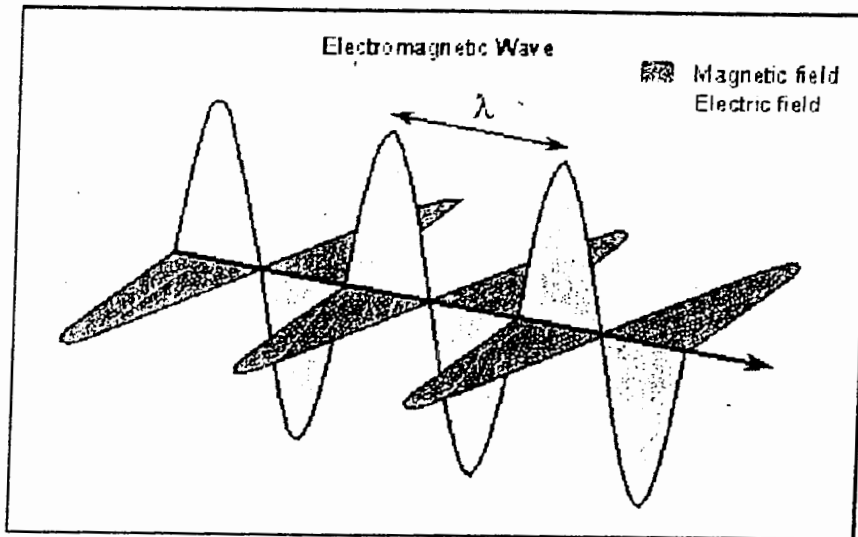
$$\mathbf{K} \times \mathbf{H} = -\varepsilon\omega \mathbf{E} \quad (21-1)$$

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (22-1)$$

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (23-1)$$

معادلات بالا نشان می دهد که بردار  $\mathbf{K}$  و  $\mathbf{E}$  و  $\mathbf{H}$  یک دستگاه ۳ گانه دو به دو متعامد را تشکیل می دهند. میدانهای الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر عمود هستند و آن چنانکه در شکل (۳-۱) نشان داده شده است هر دو بر راستای انتشار عمود می باشند. همچنین نتیجه می شود که اندازه میدانها طبق معادلات زیر به یکدیگر مربوط شوند:

$$\mathbf{H} = \frac{\varepsilon\omega}{\mathbf{K}} \mathbf{E} = \varepsilon u \mathbf{E} \quad (24-1)$$



شکل (۳-۱): روابط بین بردارهای میدان و بردار موج در یک موج الکترو مغناطیسی [۸]

در این رابطه ما از این حقیقت که سرعت فاز برابر  $u = \frac{\omega}{k}$  است، استفاده نموده ایم. بعلاوه، بر حسب

ضریب شکست  $n = \frac{c}{u}$ ، داریم:

$$\mathbf{H} = \varepsilon u \mathbf{E} = \varepsilon \frac{c}{n} \mathbf{E} \quad (25-1)$$

$$c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2}$$

$$H = \frac{nE}{Z_0}$$

که در آن کمیت  $Z_0 = (\frac{\mu_0}{\epsilon_0})^{1/2}$  به نام مقاومت ظاهری فضای آزاد معروف است. از نظر عددی اندازه آن حدود ۳۷۷ اهم می باشد، معادله (۱-۲۵) نشان می دهد که نسبت میدان مغناطیسی به میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی که در یک محیط منتشر می شود با ضریب شکست محیط متناسب است.

## ۱-۵: مفاهیم اساسی پاسخ نوری

### ۱-۵-۱: رابطه پاشندگی<sup>۱</sup>

معادلات ماکسول امواجی که می توانند در بلور منتشر شوند، را توصیف می کنند، جواب این معادلات و تعیین بسامد این امواج به صورت تابعی از بردار موج برای امواج طولی و امواج عرضی، توسط رابطه پاشندگی داده می شود. ابتدا از معادلات ماکسول در غیاب بارهای خارجی آغاز می کنیم (در سیستم

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad \text{C.G.S از واحدهای گوسی استفاده شده است}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{D} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{معادلات ماکسول در غیاب بارهای خارجی [۲]}$$

در این جا  $\mathbf{D}$  میدان جابجایی و  $\mathbf{H}$  میدان مغناطیسی است. در بسامدهای نوری  $\mathbf{H} = \mathbf{B}$  است. با استفاده از تابع دی الکتریک می توان تبدیل فوریه میدان جابجایی  $\mathbf{D}(\omega, \mathbf{q})$  را بر حسب تبدیل فوریه میدان الکتریکی  $\mathcal{E}(\omega, \mathbf{q})$  نوشت.

$$\mathbf{D}(\omega, \mathbf{q}) = (\epsilon, \mathbf{q})\mathbf{E}(\omega, \mathbf{q}) \quad (26-1)$$

حال رابطه پاشندگی بین بسامد  $\omega(\mathbf{q})$  و بردار موج فوتون  $\mathbf{q}$  را به دست می آوریم یک موج الکترومغناطیسی را با میدان الکتریکی که با رابطه زیر داده می شود، در نظر میگیریم

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{q} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad (27-1)$$

با وارد کردن معادله (27-1) در معادله اول ماکسول و با استفاده از معادله (26-1) خواهیم داشت:

$$\epsilon \nabla \cdot \mathbf{E} = \epsilon i \mathbf{q} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (28-1)$$

این رابطه باید هم برای امواج طولی و هم برای امواج عرضی صدق کند، بنابراین برای یک موج طولی که در آن جهت انتشار موج با جهت دامنه آن یکی است، یعنی  $\mathbf{q}$  موازی خواهیم داشت:

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{E} \neq 0 \quad (29-1)$$

در نتیجه معادله (28-1) فقط وقتی صادق است که:

$$\epsilon = \epsilon_L(\omega, \mathbf{q}) = 0 \quad (30-1) \quad \text{رابطه پاشندگی برای امواج طولی}$$

این رابطه مهم این موضوع را می رساند که هر وقت تابع دی الکتریک محیط صفر می شود، یک موج طولی متحرک در محیط بوجود می آید. از طرفی برای امواج عرضی  $\mathbf{q}$  بر  $\mathbf{E}_0$  عمود است و در نتیجه

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (31-1)$$

و معادله (28-1) همیشه درست است. در نتیجه تابع دی الکتریک عرضی را از این معادله نمی توان بدست آورد، برای به دست آوردن آن از معادلات سوم و چهارم ماکسول استفاده می کنیم، با اعمال روی دو طرف معادله سوم ماکسول و با جانشینی  $\nabla \times \mathbf{H}$  از معادله چهارم، عبارت زیر را بدست می آوریم: [۲]

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \frac{-1}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2} \quad (32-1)$$

با استفاده از تساوی  $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$  و همچنین یاد آوری مجدد که

برای امواج عرضی  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$  است، می‌توانیم معادله (۳۲-۱) را به صورت زیر بنویسیم:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} \quad (۳۳-۱) \text{ معادله موج عرضی}$$

با وارد کردن معادله (۲۷-۱) در معادله (۳۳-۱) و مقدار یابی مشتق‌های آنها عبارت زیر به دست می‌آید:

$$[q^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon] \mathbf{E} = 0 \quad (۳۴-۱)$$

که مستلزم برقراری عبارت زیر است:

$$\varepsilon = \varepsilon_i(\omega, q) = \frac{q^2 c^2}{\omega^2} \quad (۳۵-۱) \text{ رابطه پاشندگی برای امواج عرضی}$$

این معادله بسامد یک موج عرضی متحرک در داخل ماده را به بردار موج آن مرتبط کند. یک موج

عرضی وقتی می‌تواند به صورت پایدار منتشر شود که رابطه فوق برقرار باشد.

### ۱-۵-۲: ضریب شکست، ضریب جذب شدت<sup>۱</sup>، قانون بیر لامبرت<sup>۲</sup>

تابع دی الکتریک، معمولاً یک کمیت مختلط به صورت زیر است: [۲]

$$\varepsilon(\omega, q) = \text{Re} [\varepsilon(\omega, q)] + i \text{Im} [\varepsilon(\omega, q)] = \varepsilon'(\omega, q) + i\varepsilon''(\omega, q) \quad (۳۶-۱)$$

که در آن اندیس تبری سادگی حذف شده است. با وارد کردن معادله (۳۶-۱) در معادله (۳۳-۱)

خواهیم داشت:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\varepsilon'}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} + i \frac{\varepsilon''}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} \quad (۳۷-۱)$$

برای حل این معادله، از عبارت زیر استفاده می‌کنیم:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t} e^{i(q+i k)z} \quad (۳۸-۱)$$

1 - Intensity Absorption

2 - Beer Lambert's Law

که در آن از معادله (۳۷-۱) استفاده کردیم. فرض کردیم  $q \rightarrow q+ik$  باشد، و نیز برای سادگی فرض کردیم، انتشار یک بعدی و در جهت محور  $Z$ ها باشد کمیت  $K$  «ضریب خاموشی» است که به ضریب جذب  $\alpha$  به صورت زیر مربوط است، با وارد کردن معادله (۳۸-۱) در معادله (۳۷-۱) و مقدار یابی مشتقهای آنها خواهیم داشت:

$$(q+ik)^2 = \frac{\omega^2}{c^2} (\varepsilon' + i\varepsilon'') \quad (39-1)$$

تابع مختلط (۳۹-۱) را می توان به دو معادله جداگانه حقیقی برای هر قسمت حقیقی و موهومی تقسیم کرد. این معادلات عبارتند از:

$$q^2 - k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon' \quad (40-1)$$

و

$$2kq = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon'' \quad (41-1)$$

ضریب شکست  $n(\omega)$  به صورت نسبت عدد موج  $q$  در ماده به عدد  $q_0 = \frac{\omega}{c}$  در خلأ تعریف می شود:

$$n(\omega) = \frac{q}{q_0} = \frac{qc}{\omega} \quad (42-1)$$

از معادله (۴۲-۱) می توان برای حذف کردن  $q$  از معادلات (۴۰-۱) و (۴۱-۱) استفاده کرد، تا

معادلات زیر به دست آید:

$$n^2(\omega) = \frac{k^2 c^2}{\omega^2} \varepsilon' \quad (43-1)$$

$$4 \frac{k^2 c^2}{\omega^2} n^2(\omega) = (\varepsilon'')^2 \quad (44-1)$$

با حل معادله (۴۱-۱) به ازای  $\frac{k^2 c^2}{\omega^2}$  و وارد کردن آن در معادله (۴۳-۱) و با ضرب کردن در  $n^2(\omega)$

1 - Extinction Coefficient

2 - Refractive Index

خواهیم داشت :

$$n^4(\omega) - \varepsilon' n^2(\omega) - \frac{\varepsilon''^2}{4} = 0 \quad (45-1)$$

در نتیجه ضریب شکست برابر خواهد بود با :

$$n(\omega) = \sqrt{\frac{1}{2} [\varepsilon' + \sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2}]} \quad (46-1)$$

از معادله (44-1) می بینیم که

$$2k = \frac{\omega}{cn(\omega)} \varepsilon''(\omega) \quad (47-1)$$

این عبارت «ضریب جذب شدت»، یا بطور ساده «ضریب جذب» است :

$$\alpha(\omega) = 2k(\omega) = \frac{\omega}{cn(\omega)} \varepsilon''(\omega) \quad (48-1)$$

برای درک بیشتر این اصطلاح اگر از معادله (27-1) مربع مطلق بگیریم خواهیم داشت :

$$|E|^2 = |E_0|^2 e^{-2kz} = |E_0|^2 e^{-\alpha z} \quad (49-1)$$

شدت تابش  $I(z)$  با مجذور مطلق دامنه میدان متناسب است و این امکان را می دهد که معادله

(49-1) را به صورت زیر بنویسیم :

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (50-1)$$

این معادله، که به عنوان قانون بیر-لامبرت معروف است، بیان می کند که شدت پرتوی فرودی در  $I_0$

ماده نمونه به صورت نمایی کاهش پیدا می کند.

## ۱-۶: مدل نوسانگر

در این مدل فرض شده است که بلور از بارهایی (الکترونهايي) تشکیل شده است که می توانند تحت

اعمال میدان الکتریکی متناوب نور،  $E(t)$  که در جهت  $x$  قطبیده است، به حرکت در آیند. قانون دوم

نیوتن، معادله حرکت هر الکترون در میدان متناوب نور را به صورت زیر ارائه می کند:

$$m_e \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{m_e}{\tau} \frac{dx(t)}{dt} = -eE(t) \quad (51-1)$$

که در آن  $x(t)$  جابجایی الکترون حول موضع تعادلش را نشان می‌دهد. جمله دوم در معادله (51-1) میرایی نمود شناختی<sup>۱</sup> الکترونها را، که به عنوان مثال ناشی از برخورد با یونها باشد، توصیف می‌کند  $\tau$  زمان واپاشی و اهلش است.

حال اگر یک میدان تکرنگ با بسامد  $\omega$  در نظر بگیریم:

$$E(t) \sim E_0 e^{-i\omega t} \quad (52-1)$$

جابجایی  $x(t)$  که توسط میدان ایجاد شده است نیز در مطابقت با آن نوسان می‌کند:

$$x(t) \sim x_0 e^{-i\omega t} \quad (53-1)$$

با جانشینی  $E(t)$ ،  $x(t)$  از معادله (52-1) و (53-1) در معادله (51-1) و تقسیم هر دو طرف به  $\exp(-i\omega t)$  داریم:

$$-m_e \omega^2 x_0 - m_e \frac{i\omega}{\tau} x_0 = -eE_0 \quad (54-1)$$

و یا:

$$x_0 = \frac{e\tau}{m_e \omega} E_0 \frac{\omega\tau - i}{\omega^2 \tau^2 + 1} \quad (55-1)$$

عبارت بالا یک جواب خاص معادله دیفرانسیل (51-1) را نشان می‌دهد که نتیجه مربوط به رانش است. حاصل ضرب گشتاور دو قطبی الکتریکی  $\exp(t)$  در چگالی الکترون  $n$ ، چگالی قطبش الکترونها را نشان می‌دهد. [۴]

$$P_c = -n e x(t) = \frac{-ne^2 \tau}{m_e \omega} E(t) \frac{\omega\tau - i}{\omega^2 \tau^2 + 1} \quad (56-1)$$

علاوه بر قطبش الکترونی  $P_c$ ، میدان الکتریکی اعمال شده یک قطبش  $P_b$  نیز ایجاد میکند که قطبش زمینه نام دارد. این قطبش زمینه ناشی از جابجایی ذرات مقید، همچون الکترونها، پوسته

1 Phenomenological Damping

داخلی حول موضع تعادل خود است. بنابراین قطبش کل خواهد بود:

$$P = P_b + P_c \quad (57-1)$$

پذیرفتاری نوری ماده  $X(\omega)$  را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$X(\omega) = \frac{P(\omega)}{E(\omega)} \quad (58-1)$$

چون میدان جابجایی  $D$  بر حسب قطبش به صورت زیر است:

$$D = E + 4\pi P = E(1 + \epsilon\pi X(\omega)) \quad (59-1)$$

و بر حسب تابع دی الکتریک به صورت زیر است:

$$D = \epsilon(\omega)E \quad (60-1)$$

رابطه ساده ای بین پذیرفتاری و تابع دی الکتریک وجود دارد:

$$\epsilon(\omega) = 1 + 4\pi X(\omega) \quad (61-1)$$

در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$\epsilon(\omega) = 1 + 4\pi X(\omega) = 1 + 4\pi \frac{P_b}{E} + 4\pi \frac{P_c}{E} \quad (62-1)$$

$$= 1 + 4\pi \frac{P_b}{E} - \frac{4\pi n e^2 T}{m_e \omega} \frac{\omega \tau - i}{\omega^2 \tau^2 + 1}$$

$$= \epsilon'(\omega) + i\epsilon''(\omega)$$

برای بسامدهای بالا، عبارت وابسته به بسامد در معادله (62-1) به سمت صفر میل کرده و لذا عبارت

زیر به دست می‌آید:

$$\epsilon(\omega \rightarrow \infty) \equiv \epsilon_\infty + 1 + 4\pi \frac{P_b}{E} \quad (63-1)$$

با این رابطه معادله (61-1) به صورت زیر نوشته می‌شود:



$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{4\pi n e^2 T}{m_e \omega} \frac{\omega \tau - i}{\omega^2 \tau^2 + 1} \quad (۶۴-۱)$$

که تابع درود<sup>۱</sup> برای دی‌الکتریک نوسانی می‌باشد.

همچنین معادله (۶۴-۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{4\pi n e^2 \tau}{m_e \omega} \frac{1}{\omega^2 \tau^2 + 1} + i \frac{4\pi n e^2 \tau}{m_e \omega} \frac{1}{\omega^2 \tau^2 + 1} \quad (۶۵-۱)$$

### ۷-۱: نوسانهای پلاسما و پلاسمونها

بسامد پلاسما « $\omega_p$ » عبارت است از بسامد آستانه بین انتشار درون ماده و انعکاس قوی از سطح نمونه

، از نظر  $\omega_p$  بسامد نوسانهای دسته جمعی گاز الکترون (پلاسما) است [۷].

پلاسما محیطی است که تراکم بارهای منفی و مثبت آن مساوی است و در آن لااقل یک نوع از بارها

متحرک است. در جامد، بارهای منفی الکترونها رسانش با یک تراکم مساوی از بارهای مثبت

مغزهای یونی موازنه می‌شود.

برانگیختگیهای دسته جمعی آنها می‌باشند که به تمام سیستم متعلقند، نوسانات پلاسما

برانگیختگیهای طولی هستند، کوانتوم نوسان پلاسما را «پلاسمون» می‌گویند. در تقریب مدل نوسانگر

«درود» پلاسمونها دارای پاشندگی نیستند، که بر عدم وابستگی بسامد پلاسما بر بردار موج دلالت دارد.

بسامد پلاسما فقط به چگالی الکترون بستگی دارد. بنابر مکانیک کوانتومی، نوسان پلاسما فقط با

واحدهای کوانتیده انرژی، اتفاق می‌افتد. پلاسمونها می‌توانند مثلاً به وسیله آزمایشهای پراکندگی

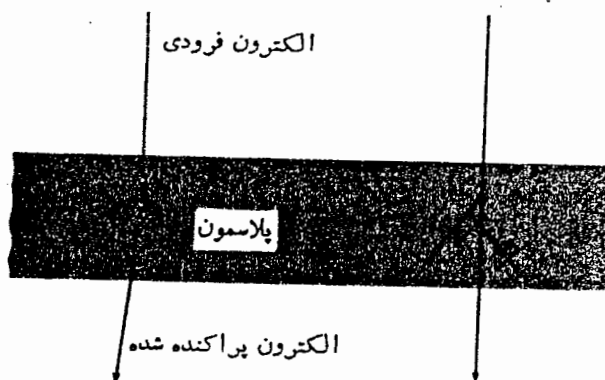
ناکشان الکترونها، که در آن الکترونها پر انرژی از میان ورقه فلزی نازک می‌گذرند، برانگیخته شوند [۷].

پلاسمونها را می‌توان توسط تحریک پرتو ایکس یا نور نیز تولید کرد. تحریک پلاسمون بوسیله نور،

با به کار بردن پرتو مایل با قطبش بردار  $E$ ، در صفحه‌ای که بوسیله جهت پرتو و جهت عمود بر سطح تعریف می‌شود، قابل مشاهده است.

بدین طریق مؤلفه میدان در جهت عمود بر سطح می‌تواند پلاسمونهای طولی را تحریک کند. با عبور دادن الکترون از یک فیلم فلزی نازک شکل (۴-۱) یا با بازتاب یک الکترون یا یک فوتون از یک فیلم، می‌توان یک پلاسمون برانگیخت.

بار الکترون با افت و خیزهای میدان الکترو استاتیکی نوسانهای پلاسما جفت می‌شود. الکترون بازتابیده یا تراگسیلیده اتلاف انرژی برابر با مضارب درستی از انرژی پلاسمون نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱): پراکندگی ناکشسان یک الکترون پلاسمونی در یک فیلم فلزی ایجاد می‌کند. انرژی الکترون فرودی نوعاً برابر با ۱ تا ۱۰ keV است، انرژی پلاسمون می‌تواند از مرتبه ۱۰ eV باشد. رویدادی نیز نشان داده شده است که در آن دو پلاسمون بوجود می‌آید [۵].

## فصل دوم:

### مواد نیم رسانا و خواص نوری آنها

#### ۱-۲: مقدمه

مواد جامد به سه دسته، نارسانا (عایق)، نیم رسانا (نیمه هادی) و رسانا (هادی) گروه بندی می شوند. نیم رساناها دارای رسانندگی بین نارساناها و رساناها هستند. رسانندگی یک نیم رسانا بطور کلی نسبت به دما، روشنائی، میدان مغناطیسی و مقدار دقیق ناخالصی اتمها حساسیت دارد. این حساسیت در رسانندگی، نیم رسانا را به یکی از مهمترین مواد برای کاربردهای الکترونیکی تبدیل می کند. مطالعه مواد نیم رسانا در اوایل قرن نوزدهم شروع شد.

در طول این مدت نیم رساناهای فراوانی مورد بررسی قرار گرفته اند. نیم رساناهای عنصری، یعنی آنهایی که از نمونه های منفرد، اتمها تشکیل می شوند نظیر سیلیسیوم (Si) ژرمانیوم (Ge) در گروه چهار جدول تناوبی قرار دارند. مع ذلک، نیم رساناهای مرکب بی شماری از دو یا تعداد بیشتری عنصر تشکیل شده اند. برای مثال، گالیوم آرسنید (Ga As) یک ترکیب (III-V) است که ترکیبی از گالیوم از ستون (III) و آرسنیک As از ستون (V) است. مثال دیگر، روی سلناید (ZnSe) یک ترکیب نیم رسانای (II-VI) است.

مهمترین نیم رسانای تک عنصری که در حال حاضر مورد استفاده قرار می گیرد، سیلیسیوم است. دلایل عمده استفاده کنونی ما از سیلیسیوم عبارتند از این که قطعات سیلیسیومی جریان نشت کمتری

را نشان می‌دهند و اکسید سیلیسیوم با کیفیت بالا را می‌توان به طور گرمایی رشد داد.

یک ملاحظه تجاری نیز وجود دارد، قطعات سیلیسیوم ارزانتر از مواد نیمرسانای دیگر هستند.

سیلیسیوم به شکل سیلیکا و سیلیکاتها ۲۵٪ پوسته زمین را تشکیل می‌دهند و تکنولوژی سیلیسیوم تاکنون در بین تمام تکنولوژیهای نیمرسانای پیشرفته ترین می‌باشد. معذک بسیاری از نیمرساناهای مرکب دارای خواص الکتریکی و اپتیکی هستند که سیلیسیوم فاقد آنهاست. این نیمرساناها، بویژه گالیوم آرسنید، بطور عمده برای کاربردهای موج ریز نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶].

در مقایسه با نیمرساناهای ترکیبی گروه (III - V) که مطالعات بسیار فراوانی روی آنها صورت گرفته است نیمرساناهای گروه (II-VI) کمتر مورد توجه قرار گرفته اند.

اخیراً به سبب پیشرفت در تکنولوژی ساخت دیودهای گسیل کننده نور و دیودهای لیزری با طول موج کوتاه تحقیقات بر روی مواد گروه (II-VI) بطور گسترده‌ای شروع شده و بودجه‌های کلانی برای صرف پژوهش در زمینه مواد (II-VI) اختصاص داده شده است.

## ۲-۲: ساختار بلوری

مواد نیمرسانای مورد مطالعه تک بلورها می‌باشند که در آنها اتمها به طریق سه بعدی دوره‌ای آرایش یافته‌اند. آرایش دوره ای اتمها در بلور، شبکه نامیده می‌شود. نیمرساناهای عنصری نظیر سیلیسیوم و ژرمانیوم دارای ساختار شبکه الماسی می‌باشند [۶].

این ساختار نیز به خانواده بلور مکعبی تعلق دارد و می‌توان آن را به صورت دو زیر شبکه (f . c . c) مکعب رخ مرکز دار که در یکدیگر نفوذ کرده‌اند مشاهده نمود. بدین طریق که یک زیر شبکه به اندازه  $\frac{1}{4}$  فاصله در راستای قطر مکعب (یعنی تغییر مکانی به اندازه  $(\frac{a\sqrt{3}}{4})$ ) نسبت به زیر شبکه دیگر جابجا شده است، تمام اتمها در شبکه الماسی یکسان هستند.

اما بیشتر نیمرساناهای مرکب، گروه (III-V) نظیر GaAs دارای شبکه «زینک بلند» Zincblende هستند، بجز اینکه یک زیر شبکه (f . c . c) دارای اتمهای ستون ۳ (Ga) و دیگری دارای اتمهای ستون ۵ (As) هستند.

### ۲-۳: دهنده‌ها و پذیرنده‌ها

چگالی حاملهای آزاد بار در نیمرسانای خالص بسیار کم است به این نیمرسانای خالص، نیمرسانای ذاتی می‌گویند. برای افزایش چگالی حاملهای آزاد، ناخالصیهایی بعنوان آلاینیگر به نیمرسانای خالص افزوده می‌شود. این نیمرساناها را غیر ذاتی می‌گویند. آلاینیگرها از جدول تناوبی انتخاب می‌شوند و اگر در خارجی‌ترین پوسته نسبت به نیمرسانای میزبان یک الکترون بیشتر داشته باشند، دهنده نامیده می‌شود و در صورتیکه یک الکترون کمتر داشته باشد پذیرنده نام دارند، نیمرسانای حاوی اتمهای دهنده را نیمرسانای نوع n می‌نامند [۱۱]. و نیمرساناهای شامل اتمهای پذیرنده را نیمرسانای نوع p می‌نامند.

### ۲-۴: نوارهای انرژی در یک نیمرسانا

اتمهای بلور نیمرسانا از تعداد بسیار زیادی الکترون تشکیل شده، بعضی از این الکترونها پوسته‌های داخلی اتم مربوط به خود را اشغال کرده و قویاً به هسته خود مقیدند. اما بر الکترونهای پوسته خارجی آنها از طرف هسته پتانسیل ربایشی ضعیفتری اثر میکنند چون اندر کنش بوسیله الکترونهای پوسته داخلی استتار می‌شود، الکترونهای خارجی نامتمرکز هستند. یعنی تابع موج آنها در تمامی شبکه بلور گسترده شده است. که طیف انرژی آنها از یک مجموعه ترازهای انرژی خیلی نزدیک به هم که به آن

«نوارهای انرژی»<sup>۱</sup> می‌گوییم تشکیل شده اند این نوارهای انرژی بوسیله ، «گافهای انرژی»<sup>۲</sup> از یکدیگر جدا می‌شوند . تشکیل نوارهای انرژی در یک بلور نیمرسانا به صورت زیر می‌باشد.

هر بلور نیمرسانا از  $N$  اتم تشکیل شده ، هرچه اتمها به یکدیگر نزدیکتر باشند ، پتانسیل اندرکنش قویتری در نتیجه شکافتگی ترازها در هر تراز  $N$  تایی بزرگتر خواهد بود زیرا الکترونها پسته داخلی به هسته قویاً پیوند خورده‌اند ، اما الکترونها پسته خارجی پیوند ضعیفی با هسته دارند ، بنابراین شکافتگی ترازهای پسته خارجی از ترازهای پسته داخلی بزرگتر است ، در نتیجه هر تراز انرژی اتمی به  $N$  زیر تراز جداگانه تقسیم می‌شود. مجموعه این زیر ترازها را می‌توان بصورت یک «نوار انرژی» در نظر گرفت. مشخصه‌های جذب و تابش نور بطور خیلی اساسی توسط ساختار نواری ماده معین می‌شود.

## ۲-۵: گاف انرژی در یک نیمرسانا

مناطق انرژی بین نوارهای انرژی ، گافهای انرژی هستند که هیچ تراز انرژی مجازی در گافهای انرژی وجود ندارند. در یک بلور نیمرسانا به لحاظ انرژی بالاترین نواری که کاملاً توسط الکترونها اشغال شده است را «نوار ظرفیت»<sup>۳</sup> و اولین نوار بالای نوار ظرفیت که بطور جزئی و یا به طور کامل خالی باشد را «نوار رسانش»<sup>۴</sup> می‌گویند. اختلاف انرژی بین نوار رسانش و نوار ظرفیت را گاف انرژی می‌گویند.

## ۲-۶: فرآیند جذب در نیمرسانا

این فرآیند به انهدام یک کوانتوم نور (فوتون) و بطور همزمان ارتقای یک الکترون از نوار ظرفیت به

---

1 – Energy Bands

2 – Energy Gaps

3 – Valence Band

4 – Conduction Band

یک نوار رسانش مربوط می‌شده و در حقیقت هنگامی اتفاق می‌افتد که فوتون‌هایی با انرژی بیشتر از گاف انرژی به نیمرسانا بتابد، در این صورت این فوتون جذب می‌شود و در نتیجه الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش گذار می‌کند. این پدیده به فوتو رسانش مشهور است.

در نتیجه با کندن الکترون، توسط فوتون، حفره ای در نوار ظرفیت و یک الکترون در نوار رسانش ایجاد خواهد شد، این فرآیند را جذب فوتون و ایجاد یک زوج الکترون - حفره می‌نامیم.

## ۲-۷: بلور شفاف در نیمرسانا

وقتی به یک نیمرسانا نور می‌تابد، در صورتی که انرژی فوتون‌های فرودی از گاف انرژی نیمرسانا کمتر باشد این فوتون‌ها نمی‌توانند الکترون‌ها را از نوار ظرفیت به نوار رسانش منتقل کنند در نتیجه نور از نیمرسانا عبور می‌کند. به چنین نیمرسانایی، در مقابل نور فرودی، شفاف می‌گویند [۲].

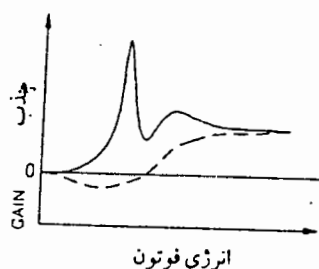
## ۲-۸: تعریف طیف جذبی خطی یک نیمرسانا

هرگاه نور سفید را از بخار یک نیمرسانا عبور دهیم و نور خروجی را بوسیله منشور تجزیه نماییم بر روی پرده طیف پیوسته‌ای با خط‌های تاریک مشاهده می‌گردد. این طیف نور سفید را که بعضی از خط‌های آن با طول موج‌های معین جذب شده باشد را طیف جذبی می‌گویند.

نیمرساناها در مقابل نور تحریک کننده آنها، رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهد. یعنی ثابت جذب و ضریب انکسار در ماده ثابت نبوده و بصورت تابعی از شدت نور تحریک کننده تغییر می‌کند. بطور کلی، تغییرات طیف جذبی نیمرسانا را که در نتیجه تحریک نوری توسط یک باریکه قوی صورت می‌گیرد به عنوان «خواص غیر خطی نوری جذبی»<sup>۱</sup> می‌شناسیم.

جذب نوری در واقع معادل تولید یک زوج الکترون حفره است ، در نتیجه جذب پرتوی قوی نور باعث می شود که زوجهای الکترون - حفره بسیاری ایجاد شود و بر هم کنش بین این حاملهای تولید شده به خواص غیر خطی منجر می شود ( شکل ۱-۲) .

الکترون - حفره ها در نیمرسانا از قوانین مکانیک کوانتومی تبعیت می کنند و باید از این قوانین برای تحلیل ویژگیهای آنها استفاده کنیم .



شکل (۱-۲): طیف جذبی نوعی نیمرسانا در غیاب باریکه قوی (منحنی خط پر) و در حضور باریکه ، قوی (منحنی خط چین) [۲]

پدیده پر شدن حالتها در واقع دلیل واضحی بر طبیعت مکانیک کوانتومی الکترونها و حفرههاست . لذا این ذرات به عنوان ذرات فرمی (فرمیونها)<sup>۲</sup> می توانند هر حالت کوانتومی را تنها با یک ذره اشغال کنند. اگر این حالت کوانتومی قبلا پر شده باشد ، جذب بیشتری صورت می گیرد و در این حالت می گوئیم که این کانال جذب «مسدود» شده یا جذب رنگ باخته است . بعضی از امکانات جالب کاربرد نیمرساناها برای استفاده در پروژههای نوری و الکترونیکی بر این حقیقت استوار است که می توان رشد این مواد را به گونه ای دستکاری کرد که مجموعه ای از مواد تازه با ابعاد بسیار کوچک و خواص قابل

1 - State Filling

2 - Fermi Particles



پیش بینی به دست آیند.

پیشرفتهای اخیر در روشهای رشد بلور باعث شده است که بتوان بلورهایی با ابعاد نانومتری رشد داد. بخاطر کوچکی ابعاد، خواص نوری و الکترونیکی آنها، در مقایسه با حالت بلوری کپه‌ای آنها، بسیار متفاوت هستند.

در این ساختارهای نانومتری، توابع موج مکانیک کوانتومی الکترونها و حفره‌ها در داخل ماده محبوس بوده و موجب ظاهر شدن اثرهایی به نام اثرهای محدودیت کوانتومی<sup>۱</sup> می‌شوند. رایجترین این ساختارهای نیمرسانایی نانومتری چاههای کوانتومی<sup>۲</sup> هستند، که در آن الکترونها در یک بعد از فضا محبوس می‌شوند.

چاههای کوانتومی نیمرسانا را می‌توان، مثلاً با استفاده از فن آوری مبتنی بر GaAs، با روشهای مختلف مانند روش رو آراستی پرتو مولکولی<sup>۳</sup> بدست آورد.

در این روش چندین لایه از GaAs در میان لایه‌هایی از نیمرسانای باگاف انرژی پهنتر مانند  $Ga_xAl_{1-x}As$  با غلظت آلومینیوم آلائیده در آن حدود  $0 < x < 1$  رشد داده می‌شود. اگر این آرایش را در چندین مرحله تکرار کنیم «چاه پتانسیل چند تایی» یا {MQW} بوجود می‌آید. طرح یک چاه کوانتومی در شکل (۲-۲) نمایش داده شده است [۲].

علاوه بر حبس حامل در یک بعد فضایی مانند ساختارهای چاه کوانتومی، محبس قویتر نیز امکان پذیر است. اگر حبس دو بعدی را در نظر بگیریم این ساختار «سیم کوانتومی» نامیده می‌شود. و اگر محبس کوانتومی در هر سه بعد فضایی وجود داشته باشد آن وقت ساختار نقاط کوانتومی را در اختیار خواهیم داشت. این ساختارها در شکل (۳-۲) به طور طرحواره نمایش داده شده اند و با ساختارهای

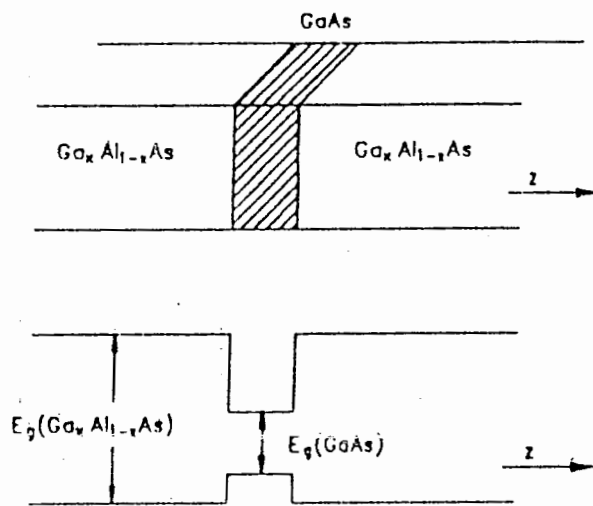
---

1 – Quantum Confinement

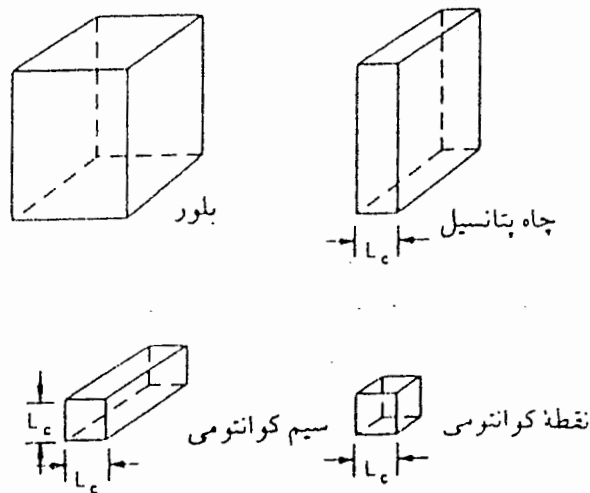
2 – Quantum Well

3 – Molecular Beam Epitaxy

کپه‌ای چاه کوانتومی مقایسه شده‌اند.



شکل (۲-۲): طرحواره چاه پتانسیل که در آن ماده، رشد پتانسیل و چاه پتانسیل و همچنین تغییرات انرژی گاف دیده می‌شوند [۲].



شکل (۲-۳): نمایش طرحواره ماده کپه‌ای و یک چاه پتانسیل، یک سیم کوانتومی و یک نقطه کوانتومی طول محبس از ثابت شبکه اتمی بلور بزرگتر است، اما به اندازه کافی، برای این که اثرهای حبس کوانتومی اهمیت یابند کوچک است [۲].

## ۹-۲: فرآیند پراکندگی میان نواری

گذارهای الکترونی که در یک نوار انرژی صورت می‌گیرد به فرآیندهای پراکندگی میان نواری مشهور است.

## ۱۰-۲: فرآیند گذار میان نواری

گذارهای الکترونی که بین نوارهای مجزا صورت می‌گیرد به گذارهای میان نواری مشهور است.

## ۱۱-۲: آمار سیستمهای غیر قابل تشخیص

ذرات غیر قابل تشخیص را باید به دو دسته تقسیم کرد: یک دسته (مانند الکترونها) که دارای اسپین نیم درست اند و در نتیجه اصل طرد پاولی در مورد آنها صادق است و از آمار فرمی-دیراک پیروی می‌کنند و به آنها فرمیون می‌گویند [۳].

$$f_{FD} = \left[ \exp \left\{ \frac{E - E_F}{KT} \right\} + 1 \right]^{-1} \quad (1-2)$$

در اینجا  $E_F$  پارامتری به نام انرژی فرمی است.

دسته دیگر ذرات مانند فوتونها، فونونها یا هسته‌های اتم H که اسپین صفر یا درست دارند و به آنها

بوزون می‌گویند بر رفتار این ذرات آمار بوز-انیشتن حاکم است:

$$f_{BE} = \left[ \exp \left\{ \frac{E - \alpha}{KT} \right\} - 1 \right]^{-1} \quad (2-2)$$

البته در حد انرژیهای بالا  $f_{FD}$  و  $f_{BE}$  هر دو به  $f_{MB}$  یعنی آمار ماکسول بولتزمن میل می‌کند؛ از این

تقریب غالباً برای ساده کردن محاسبات استفاده می‌شود.

کمیت‌های  $\alpha$ ،  $E_F$  پارامترهای بهنجار کننده‌اند، یعنی مقدار آنها طوری تنظیم می‌شود که برای هر ذره در سیستم قابل حصول باشد و وقتی هر تابع روی تمام حالت‌های انرژی جمع‌زده می‌شود حاصل با مجموع مقادیر تعداد کل ذرات برابر شود. هرگاه تابع  $f_{BE}$  را در مورد سیستمی متشکل از فوتونها یا فونونها به کار بریم که تعداد «ذرات» آنها در طول زمان ثابت نیست، برای پارامتر  $\alpha$  مقدار صفر قرار داده می‌شود.

## ۲-۱۲: انرژی فرمی در نیمرسانا

انرژی فرمی عبارتست از انرژی حالتی که احتمال اشغال آن  $\frac{1}{2}$  است. مقدار انرژی فرمی نصف گاف انرژی است.  $(E_f = \frac{1}{2}E_g)$ . این موضوع تنها هنگامی صحیح است که چگالی حالتها،  $g(E)$  در قله نوار ظرفیت و ته نوار رسانش دقیقاً یکسان باشند [۶].  
در غیر اینصورت  $E_f$  اندکی با دما  $T$  تغییر می‌کند. اما  $E_f$  را می‌توان برای اکثر مقاصد در وسط گاف در نظر گرفت.

## ۲-۱۳: گسیل تابش در نیمرساناها

این فرآیندها هنگامی رخ می‌دهد که یک الکترون آزاد با یک حفره آزاد در فرآیند مستقیم باز ترکیب شود و به این ترتیب الکترون از نوار رسانش به نوار ظرفیت بازگردد. در اینصورت تابش الکترو مغناطیسی می‌تواند، تحت شرایط معینی گسیل شود.  
برای اینکه این پدیده مشاهده شود باید جمعیت الکترونها در نوار رسانش افزایش یابد و از مقدار آن در حالت ترازمندی گرمایی بیشتر شود. در این صورت تعداد الکترونهايي که به نوار ظرفیت فرو می‌افتند و تابش گسیل می‌کنند بیشتر از تعداد الکترونهايي است که آن را جذب می‌کنند و به نوار

رسانش برانگیخته می‌شوند.

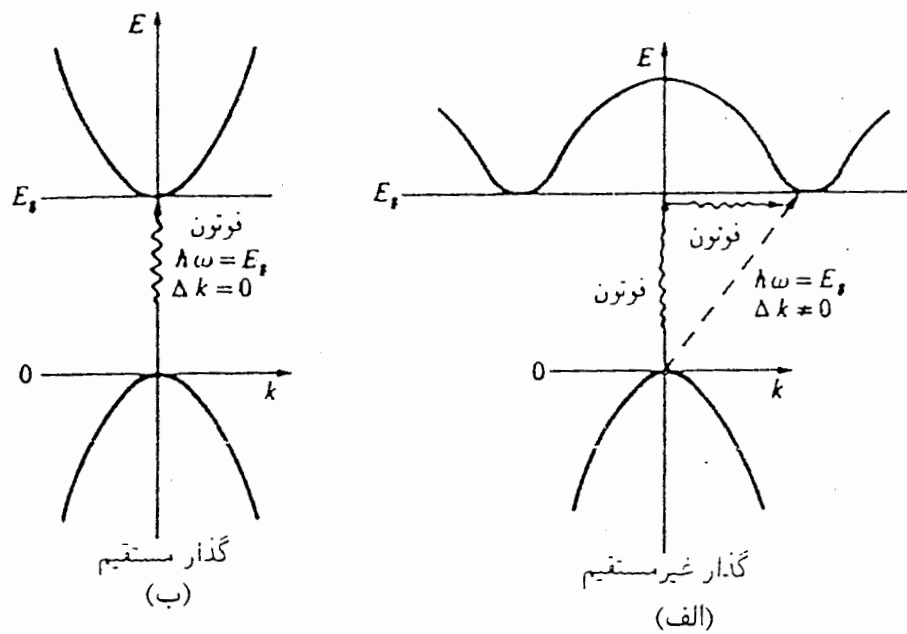
بنابراین نور با استفاده از مواد مناسب می‌تواند گسیل شود. البته تابش فقط از موادی می‌تواند گسیل شود که در آنها گذارهای مستقیم می‌تواند صورت گیرد. حضور ترازهای ناخالصی از دقت این قید می‌کاهد.

دیوهای نور گسیلی که در بازار یافت می‌شود غالباً از GaP ساخته می‌شوند، که ساختار نواری غیرمستقیم دارد و در این قطعات تابش در اثر گذار بین ترازهای ناخالصی گسیل می‌شود.

## ۲-۱۴: برانگیختگی مستقیم و غیرمستقیم

در تولید زوج الکترون - حفره دوفراآیند متفاوت برای دو دسته نیمرسانای متفاوت روی می‌دهد که آنها را گذار مستقیم و غیرمستقیم می‌نامیم. در گذار مستقیم تابشی با بسامد  $\omega$  بر نیمرسانا می‌تابد بطوریکه اگر کوانتوم انرژی آن  $\hbar\omega$  بزرگتر از گاف نواری  $E_g$  باشد، در نتیجه یک جفت الکترون - حفره بوجود می‌آید، اگر تکانه (بردار موج) الکترون برانگیخته به نوار رسانش با بردار موج حفره ایجادشده در نوار ظرفیت برابر باشد، این فرآیند را گذار مستقیم می‌گوییم همانند گذار در گالیوم آرسناید (GaAs) شکل (۲-۴-الف).

اما اگر برهم‌کنش برای پایستگی تکانه احتیاج به یک فرمول اضافی داشته باشد، آنرا گذار غیرمستقیم می‌گویند، نظیر Si, Ge، شکل (۲-۴-ب).



شکل (۴-۲): (الف) فرآیند مستقیم (ب) فرآیند غیر مستقیم [۶].

## ۲-۱۵: تعریف تحرک $\mu$

معیاری است از میزان سهولتی که حاملها می توانند تحت تأثیر میدان الکتریکی حرکت کنند.

این کمیت باعکس احتمال پراکندگی متناسب است.

$$\mu = \frac{\sigma}{eN} = \frac{1}{\rho eN} \quad (۴-۲)$$

که در این رابطه  $\mu$  تحرک و  $\sigma$  رسانندگی و  $\rho$  مقاومت ویژه و  $N$  تعداد حاملها و  $e$  بار الکترون است [۶].

## ۲-۱۶: باز ترکیب و به دام اندازی

عمر الکترونها و حفرهها پس از برانگیختگی محدود است. زیرا، در هنگام سوق با الکترونها و

حفرههای دیگر روبرو و سپس باز ترکیب می شوند. ولی باز ترکیب مستقیم حفره و الکترون نامحتمل

است. زیرا آنها هر دو با سرعت زیاد در حال حرکتند و برای اینکه باز ترکیب رخ دهد آنها باید هر دو در زمان و مکان یکسانی باشند. فرآیند نامستقیم که متمم «به دام اندازی» یک الکترون (یا یک حفره) توسط اتمهای ناخالص معینی است، محتملتر است. آنها در یک محل میخکوب می‌شوند. تا یک حفره (یا یک الکترون) از آن حوالی بگذرد و آنگاه آن دو می‌توانند باز ترکیب شوند. به نظر می‌رسد ساز و کار به دام اندازی که به دنبال آن باز ترکیب رخ می‌دهد، از فرآیند مستقیم مؤثرتر است. حتی در این صورت نیز عمر حاملها نسبتاً طولانی است.

## ۲-۱۷: گذارهای میان نواری الکترونی

این امر که طیف نمایی اپتیکی در تعیین ساختار نواری به صورت یک ابزار مهم تجربی درآمد شگفت‌آور بود. این شگفتی به دو دلیل بود:

۱- نوارهای جذب و بازتاب بلورها پهن اند و ظاهراً، هنگامی که انرژی فوتون از گاف نواری بیشتر باشد، به صورت توابعی بی شکل از انرژی فوتون هستند.

۲- جذب میان نواری مستقیم یک فوتون  $\hbar\omega$  در تمام نقاطی در داخل منطقه بریلوین روی می‌دهد که برای آنها انرژی پایسته باشد.

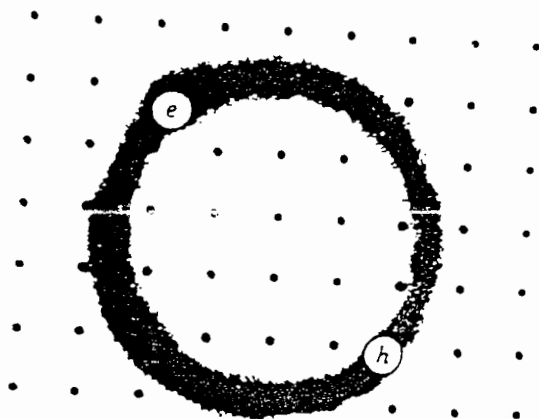
$$\hbar\omega = \varepsilon_c(\mathbf{k}) - \varepsilon_v(\mathbf{k}) \quad (۵-۲)$$

که در آن C یک نوار خالی و V یک نوار پر است. در یک  $\omega$  معلوم، جذب کل برابر با انتگرالی است بر روی تمام گذارهایی در داخل منطقه که (۵-۲) را ارضا می‌کنند. از این رو انتظار نمی‌رفت که طیف نمایی فوتونی کلیدی برای ساختار نواری باشد.

## ۲-۱۸: اکسیتونها

طیفهای جذب و بازتابش برای انرژیهای فوتونی که درست در زیر گاف انرژی قرار دارند، یعنی در جایی که انتظار می رود بلور شفاف باشد، غالباً دارای یک ساختارند. این ساختار به دلیل جذب یک فوتون همراه با ایجاد یک اکسیتون، در یک فرآیند مستقیم یا غیر مستقیم، بوجود می آید و درست همان گونه که الکترون به پروتون مقید می شود، الکترون و حفره نیز می توانند با برهم کنش الکترواستاتیکی جاذب خود به یکدیگر مقید شوند.

الکترون - حفره مقید اکسیتون نامیده می شود (شکل ۵-۲) اکسیتون می تواند درون بلور حرکت و انرژی برانگیختگی را منتقل کند، ولی از نظر الکتریکی خنثی است. اکسیتونها میتوانند در هر بلور عایقی تشکیل شوند، گرچه بعضی از انواع اکسیتونها نسبت به واپاشی به یک الکترون آزاد و یک حفره آزاد ذاتاً ناپایدارند، تمام اکسیتونها نسبت به فرآیند نهایی باز ترکیب که در آن الکترون به داخل حفره می افتد ناپایدارند [۹].



شکل (۲-۵): اکسیتون یک زوج الکترون - حفره مقید است که معمولاً همراه یکدیگر آزادانه درون بلور حرکت کنند اکسیتون از بعضی لحاظ شبیه به اتم پوزیترونیم است که از یک پوزیترون و یک الکترون تشکیل می شود، اکسیتون نشان داده شده یک اکسیتون مات است: به طور ضعیف مقید است و فاصله متوسط الکترون - حفره در مقایسه با ثابت شبکه بزرگ است [۵].



انرژی بستگی اکسیتون را می‌توان به ۳ روش اندازه گرفت:

- ۱- در گذرهای اپتیکی از نوار ظرفیت با تفاضل بین انرژی لازم برای ایجاد یک اکسیتون و انرژی لازم برای ایجاد یک الکترون آزاد و یک حفره آزاد.
- ۲- در لیان باز ترکیب، با مقایسه انرژی خط باز ترکیب الکترون حفره آزاد با انرژی خط باز ترکیب اکسیتون.

۳- از طریق فوتوایونش اکسیتونها، برای تشکیل حاملهای آزاد.

## ۲-۱۹: اکسیتونهای فرنکل

در اکسیتون قویاً مقید، برانگیختگی به طور موضعی بر روی یک تک اتم یا نزدیک آن قرار دارد. معمولاً حفره بر روی همان اتمی است که الکترون قرار دارد، ولی زوج الکترون حفره می‌تواند در هر جای بلور قرار گیرد.

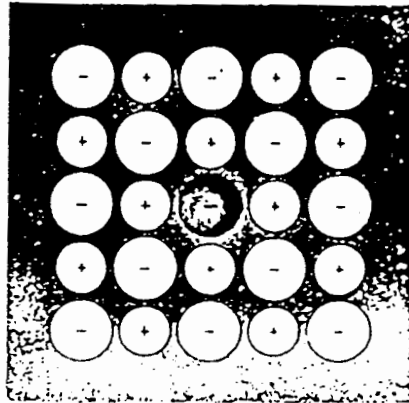
اکسیتون فرنکل اساساً یک حالت برانگیخته تک اتم است، ولی این برانگیختگی می‌تواند در اثر جفت شدگی بین همسایه‌ها از یک اتم به اتم دیگر پرش کند. این موج برانگیختگی درون بلور حرکت می‌کند گازهایی بی اثر بلورین دارای اکسیتونهایی هستند که در حالت پایه خود با مدل فرنکل مطابقت دارد.

## ۲-۲۰: اکسیتونهای به طور ضعیف مقید

الکترونی را در نوار رسانش و حفره ای را در نوار ظرفیت در نظر بگیرید. این الکترون و حفره یکدیگر را با پتانسیل کولنی زیر جذب می‌کنند [۹].

$$U(r) = -\frac{p^2}{\epsilon r} \quad (۲-۶)$$

که در آن  $r$  فاصله بین ذرات و  $\epsilon$  ثابت دی الکتریک مناسب است. (اگر بسامد حرکت اکسیتون از بسامد فونونهای اپتیکی بیشتر باشد، سهم قطبیدگی شبکه در ثابت دی الکتریک را نباید به حساب آورد).



شکل (۲-۶): یک اکسیتون قویاً مقید یا اکسیتون فرنکل نشان داده شده است که بطور موضعی بر روی یک اتم در یک بلور هالوژنید قلیایی قرار دارد اکسیتون فرنکل ایده آل مانند یک موج در سرتاسر بلور حرکت می کند ولی الکترون همواره نزدیک به حفره باقی می ماند [۵].

این دستگاه اکسیتون حالت های مقیدی خواهد داشت که انرژی کل آنها از انرژی ته نوار رسانش پایین تر خواهد بود. اگر سطوح انرژی برای الکترون و حفره کروی و ناواگن باشند، در این صورت ترازهای انرژی نسبت به بالای نوار ظرفیت با معادله اصلاح شده ریذبرگ داده می شوند. [۵].

$$E_n = E_g - \frac{\mu e^4}{2\hbar^2 \epsilon^2 n^2} \quad (۷-۲)$$

در اینجا  $n$  عدد کوانتومی اصلی و  $\mu$  جرم کاهش یافته است.

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h} \quad (۸-۲)$$

که از جرمهای مؤثر الکترون و حفره  $m_h, m_e$  تشکیل شده است.

انرژی حالت پایه اکسیتون با قرار دادن  $n=1$  در  $(2-8)$  به دست می‌آید، که انرژی یونش اکسیتون است.

## ۲-۲۱: چگالیده شدن اکسیتونها به صورت قطره‌های الکترون - حفره (EHD)

هنگامی که به Ge و Si در دمای پایین نور تابیده شود، یک فاز چگالیده پلاسما الکترون - حفره به وجود می‌آید. در تشکیل یک قطره الکترون - حفره (EHD) در Ge، رویدادهای زیر به وقوع می‌پیوندند:

۱- با جذب یک فوتون با انرژی  $h\omega > E_g$  یک الکترون آزاد و یک حفره آزاد با بازدهی زیاد تولید

می‌شود.

۲- این دو سریعاً، شاید در  $1ns$ ، با یکدیگر ترکیب شوند و یک اکسیتون تشکیل دهند.

۳- این اکسیتون ممکن است با نابودی زوج e-h با طول عمر  $8\mu s$  و پاشیده شوند.

۴- اگر تراکم اکسیتونها به اندازه کافی بالا باشد (بالاتر از  $10^{13}/cm^3$  در  $2k$ ) اغلب اکسیتونها به صورت

یک قطره چگالیده می‌شوند. طول عمر هر قطره  $40\mu s$  است، ولی در Ge کرنش یافته این طول عمر

ممکن است به  $60\mu s$  برسد [۱۰].

۵- اکسیتونها در درون قطره به یک گاز فرمی واگن از الکترونها و حفره‌ها با ویژگیهای فلزی تجزیه

می‌شوند! این حالت توسط کلدیش پیش بینی شد.

## ۲-۲۲: تعریف لومینسانس اکسیتون

عمر یک اکسیتون در بلور محدود است به دلیل اینکه اکسیتون می‌تواند، به یک زوج الکترون - حفره

آزاد تجزیه شود. اما اگر اکسیتون با الکترونی که به نوار ظرفیت و به داخل حفره باز می‌گردد ترکیب شود،

این عمل ممکن است با گسیل یک فوتون همراه باشد که به آن لومینسانس گفته می‌شود. مطالعات و اندازه‌گیری‌های لومینسانس روش جالب توجهی برای بررسی چندین خاصیت بلوری مانند اثرهای اکسیتونی و ساختار نواری مهیا می‌کند و همچنین به ارزیابی کیفیت بلور نیز کمک می‌کند.

خطوط قوی لومینسانس با طول موج‌های مشخصه، امکان تعیین غلظت و طبیعت، ناخالصیهایی که به صورت اتمهای جانشین در بلور وجود دارند را حتی با تعداد بسیار ناچیز میسر می‌سازند. این خطوط در اکثر کاربردهای نوری مانند عمل لیزر، بهره نوری و قطعات فعال نوری و کنترل درجه خلوص بلوری تعیین کننده هستند.

## **۲-۲۳: لومینسانس اکسیتون آزاد**

در یک بلور خالص با چشم پوشی از اثر هر گونه ناخالصی، اگر اکسیتونی در نتیجه بازترکیب یک الکترون با یک حفره در نوار ظرفیت، بوجود آید و این فرآیند همراه با گسیل یک فوتون باشد به آن لومینسانس ذاتی می‌گویند، و اغلب لومینسانس اکسیتون آزاد نیز گفته می‌شود.

## **۲-۲۴: دواکسیتونها**

در صورت افزایش شدت برانگیختگی اکسیتونها، چگالی اکسیتونها افزایش می‌یابد در نتیجه آنها می‌توانند به یکدیگر پیوند خورده و مولکول اکسیتونی تشکیل دهند که به آنها دواکسیتونی می‌گویند.

این فرآیند مشابه موردی است که مولکولهای هیدروژن شکل می‌گیرند. تشکیل دو اکسیژن‌ها در نتیجه جفت شدگی یک زوج اکسیژن و تشابه آن با مولکولهای هیدروژن به طور تجربی مورد تأیید قرار گرفته است. هر مولکول اکسیژنی مشابه یک مولکول هیدروژن در حالت پایه است که در آن دو حفره با اسپینهای مخالف با دو الکترون که آنها نیز دارای اسپینهای مخالف هستند به اشتراک می‌گذارند.

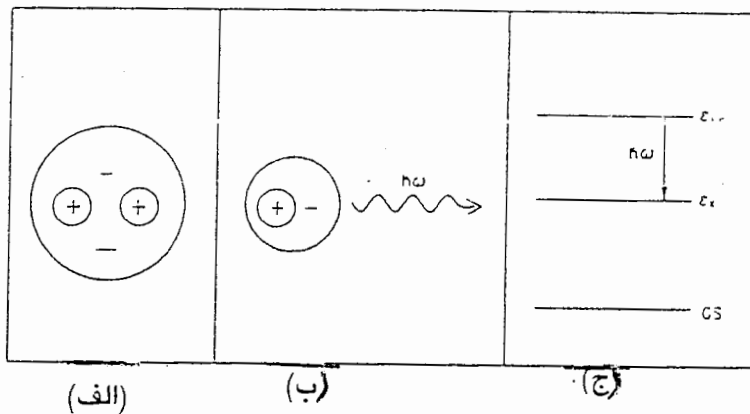
انرژی یک دو اکسیژن توسط رابطه زیر داده می‌شود [۱۱].

$$\epsilon_{xx} = 2\epsilon_x^{(0)} - E_{Bxx} + \frac{\hbar^2 k_{xx}^2}{2M_{xx}} = \epsilon_{xx}^{(0)} + \frac{\hbar^2 k_{xx}^2}{2M_{xx}} \quad (9-2)$$

که در آن  $2\epsilon_x^{(0)} = 2(E_g - E_B)$  انرژی داخلی دو اکسیژنی است که با یکدیگر اندک کششی ندارند و در بردار موج صفر قرار دارند.  $\epsilon_{xx}^{(0)}$  انرژی دو اکسیژن در بردار موج صفر،  $E_{Bxx}$  انرژی پیوندی دو اکسیژن  $M_{xx}, K_{xx}$  به ترتیب بردار موج مرکز جرم دو اکسیژن و جرم آن هستند. جرم دو اکسیژن دو برابر جرم اکسیژن است  $M_{xx} = 2M$  هنگامی که یک دو اکسیژن به یک اکسیژن آزاد و یک فوتون تجزیه می‌شود. قوانین بقای انرژی و اندازه حرکت که حاکم بر این فرآیند واپاش هستند عبارتند از:

$$\epsilon_{xx}(K_{xx}) = \hbar\omega + \epsilon_x(k_x) \quad (10-2)$$

شکل زیر یک مرحله بنیادی در فرآیند واپاشی تابشی دو اکسیژن را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۲): فرآیند بنیادی که به لیانی دو اکسیژن منتهی می‌شود (الف) یک دو اکسیژن قبل از باز ترکیب تابشی (ب) حالت دستگاه پس از باز ترکیب تابشی (ج) طرحواره تابش انرژی دخیل در گذار ایتیکی که به لیانی دو اکسیژن منتهی می‌شود [۱۱].

## فصل سوم: آشنایی با نانو تکنولوژی

### ۳-۱: مقدمه

به معنی رسمی و صریح دنیای نانو تکنولوژی، جایی است که در آنجا ابعاد و تغییرات آن در حدود ۱۰۰ نانومتر (0.1 میکرومتر) تا ۱/۱۰ نانومتر می باشد. نانو تکنولوژی ساخت در سطح مولکول است. ساخت اشیاء از مولکول یا اجزاء در مقیاس نانومتری می باشد. یک نانومتر یک میلیاردم یک متر است که تقریباً ۱۰ مرتبه بزرگتر از اندازه اتم هیدروژن است و حدود  $\frac{1}{800000}$  قطر موی انسان است [۱۲]. یک تعریف مفیدتر از نانو تکنولوژی، را می توان بدین صورت بیان کرد که کاربرد علم به منظور توسعه فرآیندها و مواد جدید توسط اتمها و مولکولهای سازنده می باشد. این تعریف یک اصطلاح جامع برای یک مجموعه از تکنولوژی ها، تکنیکها و فرایندهایی است که به طور نسبی یک ناحیه مشخص از علم یا مهندسی می باشد.

هدف نانو تکنولوژی قرار دادن با تدبیر مولکول با مولکول بعدی است. همانطور که وسایل مکانیکی به ما اجازه می دهند که چیزی فراتر از نیروی فیزیکی خود به دست آوریم؛ علم نانویی و تولید در مقیاس نانو هم سبب می شود تا ما بتوانیم پا را فراتر از محدودیتهای اندازه ای که به طور طبیعی موجود است بگذاریم و درست روی واحدهای ساختاری مواد کار کنیم جایی که خاصیت مواد مشخص می شود و با تغییر در آن واحدها می توان تغییرات خواص را ایجاد کرد. برای کنترل ساختار مواد باید یک سیستم کامل و ارزان قیمت در اختیار داشته باشیم. فرض اصلی در نانو تکنولوژی این است که تقریباً همه

ساختارهای باثبات شیمیایی که از نظر قوانین فیزیک رد نشوند را می توان ساخت.

نانوتکنولوژی اتحاد ساختارهای نانویی در جهت ایجاد ساختارهای بزرگتر را که می توانند در صنعت پزشکی و حفاظت محیط زیست استفاده شود را شامل می شوند.

دانشمندان اخیرا این توانایی را پیدا کرده اند که بتوانند اتمها را به طور مستقیم مشاهده کرده و دستکاری کنند ولی این تنها بخش کوچکی از تکنیکهایی است که در علم نانویی و همچنین فناوری به دست آمده است. هنوز چند دهه به توانایی تولید محصولات تجاری باقی است ولی مدلهای نظری کامپیوتری و محاسباتی نشان می دهند که دستیابی به سیستمهای تولید مولکولی امکان پذیر است. چراکه این مدلها قوانین فیزیک کنونی را نقض نمی کنند.

با مطالعه بر روی پیامدهای نانوتکنولوژی می توان دریافت که این نوع فن آوری ما را به سمت پیشرفت در راه رسیدن به سیستمهای بهتر، سریعتر، مستحکمتر، کوچکتر و ارزان تر سوق می دهد.

### ۲-۳: تعریف نانوتکنولوژی

پیوند علم مواد، شیمی و علوم مهندسی نانوتکنولوژی نامیده می شود عرصه ای را ایجاد می کند که ماشین آلات خود تکثیر کننده محصولات خود مجتمع از اتمهای اولیه ارزان ساخته شوند [۱۳]. نانوتکنولوژی به زبان ساده، تکنولوژی تولید مولکولی یعنی ساخت اشیاء اتم به اتم، مولکول به مولکول، توسط بازوهای ربات برنامه ریزی شده در مقیاس نانومتریک است و نانوتکنولوژی ساخت ابزارهای نوین مولکولی منحصر به فرد را با بکارگیری خواص شیمیایی کاملا شناخته شده اتمها و مولکولها (نحوه پیوند آنها به یکدیگر) ارائه می دهد. مهارت مطروحه در این تکنولوژی، دستکاری اتمها به طور جداگانه و جای دادن دقیق آنها در مکانی است که برای رسیدن به ساختار دلخواه و ایده آل مورد نیاز می باشد. این قابلیت تقریبا حاصل شده است. بازدهی که از تسلط بر تکنولوژی نانو ساختار حاصل

می شود، بسیار فراتر از موفقیت‌هایی است که تاکنون انسانها به آن نائل شده‌اند.

قابلیت‌های محتمل تکنیکی نانو تکنولوژی عبارتند از:

۱- محصولات خودآرا<sup>۱</sup>

۲- دستیابی به تحصیلات عالی برای همه بچه‌های جهان.

۳- رایانه‌های با سرعت میلیاردها برابر رایانه‌های امروزی.

۴- اختراعات بسیار جدید (که امروزه ناممکن است)

۵- احیای مجدد بسیاری از حیوانات و گیاهانی که منقرض شده‌اند.

۶- سفرهای فضایی امن و مقرون به صرفه.

۷- احیاء و سازماندهی اراضی.

### ۳-۳: پیشگامان نانو تکنولوژی

چهل و چهار سال پیش ریچارد فاینمن<sup>۲</sup>، متخصص کوانتوم نظری و دارنده جایز نوبل، در سخنرانی معروف خود در سال ۱۹۵۹ باعنوان « آن پایین فضای بسیاری هست» به بررسی بعد رشد نیافته علم مواد پرداخت. وی در آن زمان اظهار داشت: « اصولاً فیزیک، تا آنجایی که من توانایی فهمش را دارم، برخلاف امکان ساختن اتم به اتم چیزها حرفی نمی‌زند». او فرض را بر این قرارداد که اگر دانشمندان فراگرفته‌اند که چگونه ترانزیستورها و دیگر سازه‌ها را با مقیاسهای کوچک، بسازند پس ما خواهیم توانست که آنها را کوچک و کوچکتر کنیم. در واقع آنها به مرزهای حقیقی شان در لبه های نامعلوم کوانتوم نزدیک خواهند شد و فقط هنگامی این کوچک شدن متوقف شود که خود اتمها تا حد زیادی

---

1 - Self-Assemble

2 - Richard Feynman



ناپایدار شده و غیر قابل فهم گردند. فاینمن فرض کرد وقتی زبان یا سبک خاص اتمها کشف گردد، طراحی دقیق مولکولها امکان پذیر خواهد بود به طوری که یک اتم را در مقابل دیگری به گونه ای قرار دهیم که بتوانیم کوچکترین محصول مصنوع ممکن را ایجاد کنیم.

با استفاده از نانو تکنولوژی چه وسایلی را می توانیم ایجاد کنیم؟ فاینمن در ذهن خود یک « دکتر مولکولی» تصور کرد که صدها بار از یک سلول منحصر به فرد کوچکتر است و می تواند به بدن انسان تزریق شود و درون بدن برای انجام کاری یا مطالعه و تایید سلامتی سلولها و یا انجام اعمال ترمیمی و به طور کلی برای نگهداری بدن در سلامت کامل به سیر پردازد. ماروین مینسکی<sup>۱</sup> تفکرات بسیار پرباری داشت که می توانست به اندیشه های فاینمن قوت بخشد. مینسکی پدر یابنده هوشهای مصنوعی - جهان را در تفکراتی که مربوط به آینده می شد، رهبری می کرد. در اواسط دهه ۷۰، اریک درکسلر<sup>۲</sup>، که دانشجوی فارغ التحصیل بود، مینسکی را به عنوان استاد راهنما جهت تکمیل پایان نامه اش انتخاب کرد و او نیز این مسئولیت را بر عهده گرفت. در کسلر در اوایل دهه ۸۰، درجه استادی خود را در رشته علوم رایانه دریافت کرده بود و تعدادی از دانشجویان را به صورت گروهی به دور خود جمع نموده بود. او افکار جوانترها را با یک سری ایده ها که خودش «نانو تکنولوژی» نامگذاری کرده بود مشغول می کرد. در کسلر تنها درجه دکتری در نانو تکنولوژی را در سال ۱۹۹۱ از دانشگاه MIT دریافت داشت. او یک پیشرو در طرح نانو تکنولوژی است و هم اکنون به عنوان محقق و رئیس انیستیتو فرسایت<sup>۳</sup> می باشد [۱۶].

---

1 - Marvin Minsky

2 - Eric Drexler

3 - Foresight

### ۳-۴: نانوتکنولوژی و همگرایی علمی

نانوتکنولوژی به سه شاخه جدا و در عین حال مرتبط با یکدیگر تقسیم می‌شود که به صورت ساختارهای زیر تعریف می‌شوند: [۱۵]

**۱- نانوتکنولوژی مرطوب** این شاخه به مطالعه سیستم‌های زیست محیطی که اساساً در محیط‌های آبی پیرامون وجود دارند؛ می‌پردازد و چگونگی مقیاس نانومتری ساختمان مواد ژنتیکی غشاءها و سایر ترکیبات سلولی را مورد مطالعه قرار می‌دهد. این شاخه در برگیرنده علوم پزشکی؛ دارویی زیست محیطی و کلا علوم مرتبط به Bio می‌باشد.

**۲- نانوتکنولوژی خشک** از علوم پایه شیمی و فیزیک مشتق می‌شود و به تمرکز روی تشکیل ساختمانهای کربنی سیلیکون و دیگر مواد غیر آلی می‌پردازد. قابل تامل است که فن آوری خشک - مرطوب استفاده از مواد نیمرساناها را نیز می‌پذیرد. الکترونها خصوصیات فیزیکی فراهم می‌کنند که ساختارهای خشک از آنها در الکترونیک، مغناطیس و ابزارهای نوری استفاده می‌کنند. اثر دیگر که باعث پیشرفت ساختارهای خشک می‌شود این است که قسمت‌های خود تکثیر شبیه به ساختارهای مرطوب را دارا می‌باشد.

**۳- نانوتکنولوژی تخمینی (محاسبه‌ای)** به مطالعه مدلسازی و ساختن ظاهر ساختمانهای پیچیده در مقیاس نانویی توجه دارد. توانایی پیش بینی و تجزیه و تحلیل محاسبه ای در موفقیت نانوتکنولوژی بحرانی است، زیرا طبیعت میلیونها سال وقت لازم دارد که نانوتکنولوژی مرطوب را به صورت کاربردی در آورد. شناختی که بوسیله محاسبه بدست می‌آید به ما اجازه می‌دهد که زمان پیشرفت نانوتکنولوژی خشک را به چند دهه کاهش دهیم که این تاثیر مهمی در نانوتکنولوژی مرطوب دارد. نانوتکنولوژی تخمینی، پلی برای ارتباط بین علوم مهندسی، محاسباتی، رایانه و فن آوری جدید است.

### ۳-۵: مدل سازی مولکولی و مونتاژگر

با توجه به کاربرد گسترده معادلات شرودینگر، چه در حال و در آینده، هدف عبارت از توسعه ماشینهای مولکولی است به طوری که با توجه به یافته‌های فیزیکی قابل درک و عملی باشد. مدل سازی مولکولی برای امتحان سیستم‌هایی که تاکنون ساخته شده‌اند، قابل استفاده است [۱۵]. برای سرعت بخشیدن به مدل سازی ماشینهای مولکولی، تصور می‌شود یک مونتاژگر امکان‌کپی برداری از خود را دارد، بنابراین امکان دستیابی به قیمت کمتر نزدیک شود و می‌تواند برای ساختن تعداد زیادی از چیزهای مفید برنامه‌ریزی شود. برای رسیدن به این هدف، سعی می‌شود که ساده‌ترین مجتمع‌ها را بسازیم که از خودش کپی برداری کند و توانایی ساخت مقادیر زیادی از هیدروکربنها و... را داشته باشد. ماشینهای مولکولی و مدل‌های دینامیکی برای تحلیل رفتارهای اجزای مکانیکی استفاده خواهد شد، با توجه به اینکه از مدل‌های شیمیایی برای تحلیل واکنشهای شیمیایی استفاده خواهد شد، برخی از توابع پتانسیل، توانایی مدل‌سازی زنجیره‌ها و شکستن آنها را دارد. مثلاً جداسازی هیدروژن با روشهای مدل دینامیک مولکولی و غیره که مدل‌سازی شده است نظریه پیشرفت از پائین به بالا جستجوی مولکولی نانویی سودمند را تأیید می‌کند.

این مولکولها بوسیله طراحی و ساخت بازوهای روباتی یا وسایل دیگر ساخته می‌شوند که قادر به برداشتن اتمها و مولکولها قرار دادن آنها در یک جای مناسب هستند، قسمت عمده مشکل کار (ساختار مولکولی) جایی است که باید مولکولها در کنار هم قرار گیرند و قطعات پیچیده را تولید کنند. ماشینی داریم که در هر قسمت آن بازوهای روباتی موجود است، بازوها توسط رایانه کنترل می‌شود. این بازوها وسیله‌ای برای تجمع مولکولی است. این بازوها شبیه به ساختارهای پروتیین عمل می‌کنند. به طوریکه اتمها یا مولکولها از نوک بازو جدا شده و جای آنها مولکولها و اتمهای جدید

جایگزین می‌شوند.

درون بازوها لوله‌هایی است که ابزار کهنه و فرسوده در انتهای آن جمع می‌شود و جای آنها ابزارهای جدید جایگزین می‌شود. در داخل لوله‌ها هرج و مرج مولکولی است.

دیواره لوله‌ها، مرز بین مولکولهای آزاد و مولکولهای تحت کنترل می‌باشد در داخل لوله سوراخهای چاه ماندی در اندازه‌های مختلف وجود دارد که مولکولها در صورت لزوم، از آنها عبور می‌کنند و روی تسمه نقاله‌ها قرار می‌گیرند، و در نهایت با توجه به محصول مورد نظر طی یک فرایند شیمی - میکائیک روی هم سوار می‌شوند و در پایان بلوکها را می‌سازند.

اساس کار جمع‌کننده‌های مولکولی، ساخت و شکستن پیوندهاست. پس از ساخته شدن بلوکها، آنها در قسمت بعدی جمع می‌شوند. در این قسمت هزاران بلوک از نوعهای مختلف موجود است که طی فرایندهایی شبیه به آنچه که در مرحله قبلی، بیان شد، نانو رایانه‌ها را می‌سازند و این روند تا تولید محصول مورد نظر ادامه دارد. بنابراین می‌توان گفت جمع‌کننده‌های مولکولی، بلوکها را می‌سازند، جمع‌کننده بلوکها نانو رایانه‌ها را می‌سازند، و نانو رایانه‌ها هم نانو سیستم‌ها را ایجاد میکند.

اگر ماشینها با هزاران قطعه روباتی ساخته و ایجاد شده باشند، هر قطعه خود از جمع شدن روباتهای کوچکتر تشکیل شده است؛ به این صورت می‌توان در ده مرحله فرایند تجمع، یک ماشین مولکولی را به مولکولهای مجزا تبدیل کرد. این همان معنی پیش رفتن از بالا به پایین است.

### ۳-۶: کربن واحد جدید اندازه گیری طول

استفاده تکنولوژیستها از واحدهای متداول اندازه گیری طول در تحقیقات و محاسبات خود به سبب بزرگی آنها در برابر مقیاس اتمی تاثیر نامطلوبی بر عملکرد آنها داشته است. نانو تکنولوژیستها در پی

یک تقریب فوری در این مورد سبب جلب توجه محققان و دانشمندان به سمت کربن و انواع آن شد و همین عامل سبب طرح یک تیوب<sup>۱</sup> و فولرین<sup>۲</sup> به عنوان خط کش برای اندازه گیری نانوایی شد. نانوتیوبهای کربنی، فولرینها، نانو قطعات و کربنهای متخلل انواع مواد کربنی هستند که ابزارهای پیشرو نانو تکنولوژی هستند [۱۵].

### ۳-۶-۱: نانوتیوبها

نانوتیوبها یا لوله های کربنی در گذشته ساخته می شدند اما به صورت مجموعه ای از لوله های درهم که اندازه قطر آنها متفاوت و از کنترل دست بشر خارج بود اما گروه اسمالی<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۷ موفق به ساختن مجموعه ای منظم و با قطرهای مشابه از نانوتیوبها شدند و این پیشرفت همچنان ادامه دارد.

### ۳-۶-۲: فولرینها

نوع خاصی از پلیمرهای کربن به صورت مولکولهای بسته هستند که انواع بسیار دارند. با اضافه کردن پتاسیم به این ترکیبات می توان ابر رسانا ساخت.

### ۳-۶-۳: نانوفیبرهای کربنی

با استفاده از گاز استیلن می توان صفحات کربنی متخلخلی ساخت. جذب انتخابی مواد، غربال مولکولی، حمایت های کاتالیزوری و ساخت الکترودها از کاربردهای این مواد هستند.

---

1 - Tube

2 - Fulleren

3 - Smally

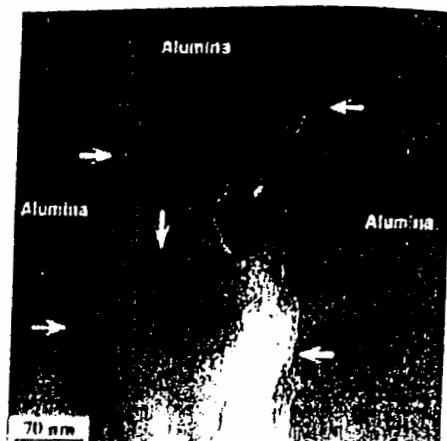
### ۳-۶-۴: نانو قطعات

اینها در واقع ترکیباتی از ساختارهای کربنی مذکور، با یکدیگر یا با سایر عناصر هستند و در زمینه‌های مختلف از جمله ساخت موتورهای مولکولی که در درمانهای نانویی و داروسازی نانویی بکار می‌روند، بصورت برجسته ای ایفای نقش می‌کنند و در واقع نانو قطعات ساختارهای شکل یافته برای مقاصد صنعتی و عملی نانو تکنولوژی خواهند بود.

### ۳-۷: افزایش کارایی سرامیکها توسط نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی تک دیواره موجب افزایش هدایت الکتریکی الومینامی شود [۱۶]. با انتخاب نمونه‌ای از آلومینا که سرامیکی عایق است و تبدیل آن به کامپوزیتی مقاوم در برابر شکست، رسانایی این ماده افزایش می‌یابد. برای مخلوط کردن نانولوله‌ها با سرامیک، ابتدا سوسپانسیونی از نانولوله-تانول را به مدت ۲۴ ساعت با آلومینا مخلوط کرده، سپس از روش پخت پلاسمای جرقه‌ای<sup>۱</sup> برای درگیر کردن اجزای کامپوزیت با یکدیگر استفاده نمودند. این روش بر خلاف دیگر روش‌های پخت، موجب یکنواختی مخلوط در دماهای بسیار پایین شده و بنابراین موجب تخریب ساختار نانولوله‌ها نخواهد شد.

محققین دریافتند که هدایت الکتریکی این مخلوط با افزایش درصد نانولوله‌ها و دما افزایش می‌یابد شکل (۳-۱) تصاویر TEM از میکروساختارهای نهایی این روش، بیانگر این موضوع است که نانولوله‌ها توسط نیروهای واندروالس به صورت کلافه‌هایی در می‌آیند.



شکل (۱-۳): کلافهای نانو لوله ای (فلشها) درون آلومینا [۱۶].

افزایش هدایت حرارتی کامپوزیتها، بدین علت است که این کلافها بصورت مسیرهای الکتریکی پیوسته ای درون کامپوزیت در می آیند. این کلافها همچنین موجب تقویت ساختار و مقاومت نمونه ها در برابر خوردگی می شوند. چنین موادی به طور گسترده در اجزای اتومبیل، صنایع هوافضا و صنایع نظامی مورد استفاده قرار می گیرند. از دیگر کاربردهای این مواد می توان به میکرو و نانوالکترونیک و ادوات پزشکی متنوعی همچون اعضای پیوندی اشاره نمود.

### ۳-۸: برخی از اصطلاحات مرسوم در نانوتکنولوژی

#### ۳-۸-۱: نانوتکنولوژی بیومولکولی<sup>۱</sup>

این نانوتکنولوژی مربوط به سیستمهای زنده است. این تکنولوژی، نتیجه توانایی ما برای به کارگیری بیومولکولها بعنوان اجزای نانوتکنولوژی می باشد [۱۲].

### ۳-۸-۲: روش پایین به بالا<sup>۱</sup>

در این روش ساخت، چیزهای بزرگ از اجزای ساختمانهای کوچکتر ساخته می‌شود. نانوتکنولوژی به دنبال این است که اتمها و مولکولها را به عنوان اجزای ساختمانی به کار گیرد. مزیت آن این است که پیوندهای کووالانسی که در یک مولکول وجود دارد، بسیار قویتر از پیوندهای شیمیایی ضعیفی است که مولکولها را بهم پیوند می‌دهد.

### ۳-۸-۳: پرتو الکترونی<sup>۲</sup>

جریانی از الکترونها است که با سرعت یکسان در یک جهت حرکت می‌کند می‌توان باشتاب و هم جهت کردن الکترونها بین یک کاتد و یک آند که بین آنها خلاء می‌باشد، یک پرتو الکترونی را تولید نمود. شاید بیشترین پرتو الکترونی موجود، همانهایی باشند که در لوله‌های پرتو کاتدی موجود در دستگاه تلویزیون ایجاد می‌شوند. پرتوهای الکترونی مبنای تصویر برداری میکروسکوپی الکترونی<sup>۳</sup> و چاپ الکترونی می‌باشند.

### ۳-۸-۴: چاپ الکترونی

روشی برای ساختن سطوح نانومتری بوسیله قراردادن سطوح حساس الکتریکی در مسیر یک پرتو الکترونی است این روش، شبیه چاپ نوری است، اما الکترونها را بیشتر از فوتونها به کار می‌برد، از آنجا که طول موج الکترون، خیلی کمتر از فوتون است، لذا شکست نور، مانعی برای شفافیت نیست. هر چند چاپ الکترونی خیلی گرانتر از چاپ نوری می‌باشد و قابل رقابت با آن نیست، اما شفافیت آن بالاتر بوده و

---

1 - Bottom Up

2 - Electron Beam

3 - Scanning electron microscopy



اخیراً برای ساخت ماسک‌های لیتوگرافی به کار می‌رود.<sup>۱</sup>

### ۳-۸-۵: سیستم‌های میکروالکترونی

سیستم‌های میکروالکترونی (که اغلب با نام میکروسیستم‌ها شناخته می‌شوند) الکترونیک را با وسایل مکانیکی میکرومتری ترکیب کرده و ماشین آلات میکروسکوپی را بوجود می‌آورند. سیستم‌های نانو الکترونی به لحاظ کوچکتر بودن، مهمتر بوده و یکی از اهداف نانو تکنولوژی می‌باشند.

### ۳-۸-۶: ساخت مولکولی

ساخت با ماشین آلات مولکولی و کنترل مولکول به مولکول تولید از طریق آنالیز شیمیایی مکانی می‌باشد.

### ۳-۸-۷: نانو الکترونیک

الکترونیک در مقیاس نانومتری، چه بوسیله روش‌های معمولی ایجاد شده باشد، چه توسط نانو تکنولوژی که شامل الکترونیک، مولکولی و وسایل با مقیاس نانو باشد، مانند وسایل نیم‌رسانای امروزی.

### ۳-۸-۸: نانو لوله

یک ساختار تک بعدی با شکل استوانه‌ای (یک شبکه محدب از اتم‌ها که فقط شکل‌های ۵ یا ۶ وجهی دارند) نانو لوله‌های کربنی بر حسب جهتی که لوله شوند، ممکن است به صورت رسانا یا نیم‌رسانا عمل کند.

### ۳-۹: چشم انداز آینده نانو تکنولوژی

مقیاس نانو تجربه جدیدی می باشد، اما تبدیل کشفیات تازه به تکنولوژی هنوز هم به روش سنتی آن انجام می گیرد.

فرض کنید یک میلیارد مرتبه کوچکتر شوید و بتوانید در محیط گازی، مایع، جامد شنا کنید. در این سفر چیزهایی که شما با آن مواجه می شوید مد نظر ما نیست، بلکه عدم پیوستگی (گسستگی) اتمها و مولکولهایی که ارکان طبیعت را تشکیل می دهند، اهمیت دارد [۱۵].

بیش از ۴۴ سال پیش ریچارد فاینمن، تکنولوژی را تجسم کرد که با استفاده از جعبه ابزار، طبیعت اجسام را اتم به اتم، یا مولکول به مولکول می ساخت. در دو دهه اخیر شاهد اولین جرقه های این تجسم بوده ایم و برخی نوآوری ها و کشفیات کلیدی در این مدت مشاهده شده اند.

همچنین مقیاسهای نانومتری اندازه مولکول های بیولوژیکی نظیر DNA و پروتیین و مواد غیر آلی شامل نیم رساناها، سرامیکها و فلزات نانو ساختاری را پوشش می دهد. این هم پوشانی اخیرا تشکیل مواد هیبریدی نانومتری را که خواص و عملکردهای منحصر به فردی دارند را امکان پذیر ساخته است.

### برخی از کاربردهای نانو تکنولوژی:

۱- افزایش نانو ذرات اکسید آلومینیوم به آلومینیوم فلزی، که باعث تولید ماده ای با مقاومت فرسایشی بهترین نوع فولاد یا تاقانی شده است.

۲- خواص نوری جدید نانو بلورهای نیم رسانا، وسیله ای به منظور برچسب گذاری و رهگیری فرآیندهای مولکولی در سلولهای زنده می باشد.

۳- مواد لایه ای نانومتری که ۴ برابر مغناطیس‌های دائمی مرسوم، کارایی دارند.

۴- ساختمانهای چاه کوانتومی لایه‌ای برای تولید منابع نوری و سلولهای فتوولتایی بسیار کارا و کم

مصرف.

۵- تایید خواص شیمیایی نانوبلورها به عنوان فتوکاتالیستها برای شکستن سریعتر مولکولهای

سمی پسابها.

۶- میزبانهای معدنی نیمه متخلخل با تک لایه‌های آلی خودچیدمان، برای به دام انداختن و حذف

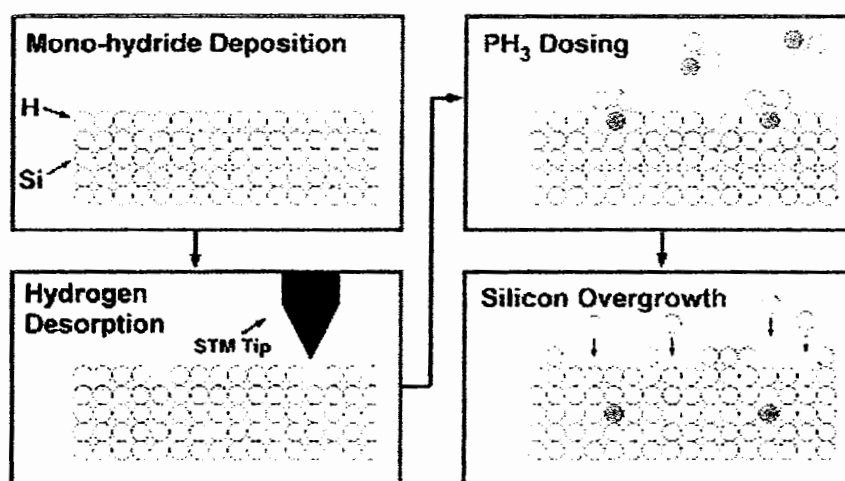
فلزات سنگین از محیط زیست.

### ۳-۱۰: سازماندهی اتمها برای ساخت یک تراشه کوانتومی

ساخت تراشه‌های کامپیوتر کوانتومی، خیلی شبیه به فرآیند نیمرساناهاست. برای به کنترل

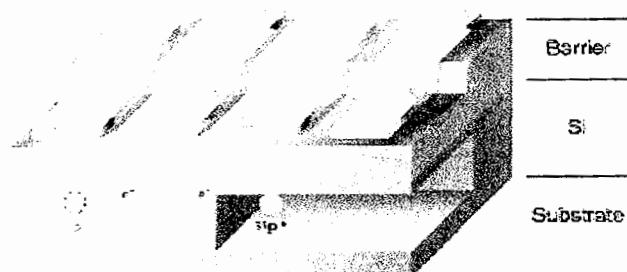
درآوردن بیت‌های کوانتومی، اتمهای منفرد فسفر را در بازه‌های مشخصی روی یک سطح سیلیسیوم

مستقر می‌کنند. شکل (۲-۳) این موضوع را به ما نشان می‌دهد [۱۶].



شکل (۲-۳): مراحل ساخت یک تراشه کوانتومی [۱۶].

در حالت عادی اتمهای فسفر خود را به سیلیسیوم متصل می‌کنند به طوری که روی یک خط مرتب می‌شوند و حرکت آنها روی سیلیسیوم غیر ممکن می‌شود. لذا محققین از یک نوع لیتوگرافی هیدروژنی استفاده کرده‌اند که در آن از یک لایه هیدروژن بعنوان مقاومت الکتریکی استفاده می‌شود.



شکل (۳-۳): یک تراشه کوانتومی [۱۶].

آنها با استفاده از تیرک STM (میکروسکوپ تونلی روبشی) در فواصل مشخصی اتمهای منفرد هیدروژن را برداشتند. صفحه سیلیسیوم - که توسط هیدروژن پوشیده شده است در معرض گاز فسفین (PH) قرار می‌گیرد. گاز فسفین خود را به صفحه سیلیسیوم می‌چسباند. به طوری که هر مولکول آن درون سوراخی روی صفحه قرار می‌گیرد. بنابراین اتمهای فسفر در چهار بازه یک نانومتری مرتب می‌شوند هر نانومتر برابر طول ده اتم هیدروژن است. در قدم بعد مولکولهای فسفین با لایه ای از سیلیسیوم پوشانده می‌شوند.

برای کنترل و خواندن حالت کوانتومی اتمها، در لایه سیلیسیوم فوقانی، در بالای هر اتم یک اتصال فلزی گذاشته می‌شود. واکنش کوانتومی بین دو اتم نیز می‌تواند با یک تماس فلزی دیگر کنترل شود.

### ۱۱-۳: شبیه سازی کوانتومی

هدف از این کار، کنار گذاشتن ابر رایانه‌ها در شبیه سازی و جایگزینی آنها با اولین رایانه‌های کوانتومی دنیا می‌باشند [۱۷].

در سطوح اتمی، فیزیک نیوتنی کنار گذاشته می‌شود و قوانین فیزیک کوانتومی مطرح می‌گردد و نتیجه‌ای که غیرممکن به نظر می‌رسد، شبیه سازی اسپین الکترون در خلاف مسیر هدایت شده خود است.

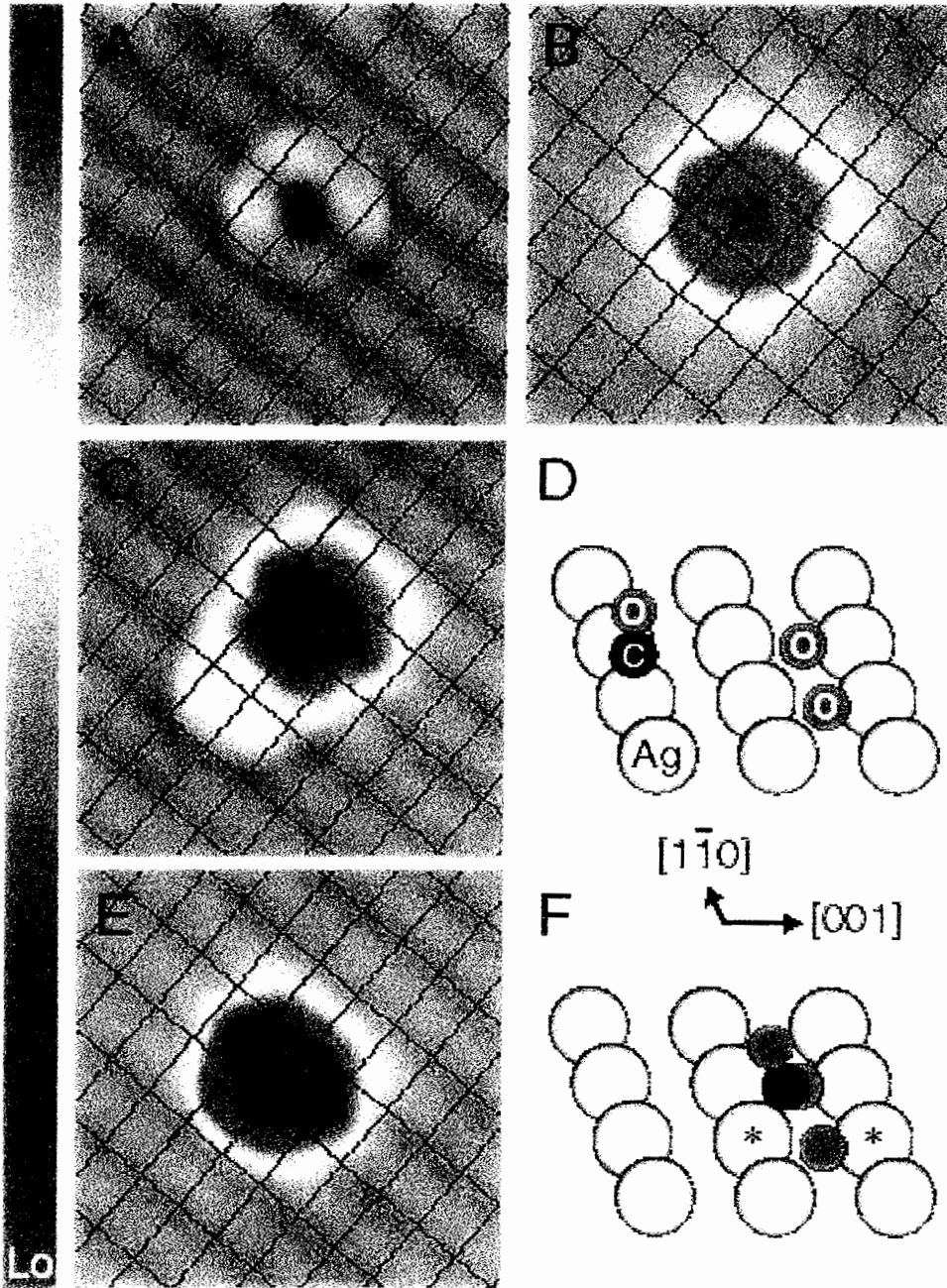
این مساله، نهایتاً مدل سازی رفتار گروهی از اتمها را با مشکل مواجه می‌کند. زیرا یک مدل باید تمام احتمالات ممکن را در برداشته باشد. شبیه سازی یک مدل با حداقل ۱۰۰ اتم فراتر از قدرت محاسباتی همه رایانه‌های موجود در روی زمین می‌باشد، زیرا یک تصویر از حالت کوانتومی این تعداد اتم به ۲ بایت نیاز دارد و تصویری از ۳۰۰ اتم، به ۲ بایت نیاز دارد که برابر تعداد تمام ذرات موجود در جهان هستی است. لیودگوید: «این موضوع از نظرفناوری یک مشکل محسوب می‌شود.» لیود<sup>۱</sup> و دیودکاری<sup>۲</sup> استاد مهندسی هسته ای دانشگاه MIT راجع به این مساله، نظریه آتش، آتش راسوزاند یا کوانتا با کوانتا شمارش می‌شود را ارائه کردند. لیود و دیود کاری، به طور آزمایشگاهی از رایانه‌های کوانتومی برای تولید بی نظمی کوانتومی یا حساسیت پدیده کوانتوم به تغییرات کوچک در سیستم، استفاده کرد و این کار احتمالاً به پیشرفتهایی در طراحی مواد جدید منجر خواهد شد.

شکل (۳-۴) تولد مولکول CO<sub>2</sub> را با استفاده از علم نانو تکنولوژی نشان می‌دهد.

---

<sup>1</sup>-Liud

<sup>2</sup>-Diod Cary



شکل (۳-۴): تولد یک مولکول  $\text{CO}_2$  [۱۸].

### ۳-۱۲: ساخت کپسولهای در حد اتم

یکی از اساتید ارشد موسسه فیزیک کاربردی و ابزار دقیق، به نام لیام مک دونل در حال تحقیق بر روی ساخت کپسولی است که اندازه آن در حد میکرو (به اندازه سلولهای خون) باشد و سپس بتواند آن را به حد نانو تبدیل کند. این کپسول را می توان به خون تزریق کرد، تا در آن حل شده و دارو را آزاد کند [۲۱].

یا می توان آن را به عضو خاصی از بدن نشانه گیری کرد.

تیم او، از فناوری ساخت نوری برای ساخت این کپسول استفاده کرده است. در این تکنیک، با تابش طول موج مشخصی از نور به مایع - با ایجاد یک ساختار سه بعدی - می توان مایع را به جامد تبدیل کرد. این کپسول را می توان در اشکال مختلف تولید کرد، ولی باید به حدی کوچک باشد که بتوانند بدون اینکه باعث لخته شدن خون شوند، از مویرگها عبور کنند. مک دونل گوید: «هدف ما تولید این کپسولها به اندازه یک پنجم سلولهای خون می باشد» هنگام ساخت این کپسولها، می توان مواد و داروهای مورد نظر را درون آنها قرار داد. تا پس از اینکه به خون تزریق شد، در خون حل شده و دارو را آزاد کند.

روش تزریق مستقیم کپسول به عضو مصدوم بدن را می توان از طریق تکنیکهای پیوندی معمولی انجام داد. بدین نحو، پادتنی که کار آن دفاع از بدن در مقابل آنتی ژنها (از قبیل سموم و مواد خارجی) می باشد، بعنوان روکشی روی کپسول قرار گرفته و سپس به بدن تزریق می شود. از آنجا که این پادتن یک نوع آنتی ژن را در بدن تشخیص می دهد، با این روش کاملاً اطمینان حاصل می شود که دارو به قسمت مورد نظر بدن انتقال یافته است. دکتر مک دونل می گوید: «توانایی ساخت این نوع کپسولها با این فناوری، بسیار وسیع است.»

محققین سعی می کنند فرآیند و ابزارهای تولید را توسعه دهند تا این اشیاء را در حد نانو بسازند. ولی مشکل کوچکتر نمودن آنها به حد نانو است. صنعت تولید دارو در حد نانومتر، فرآیندی است که شامل

دو روش « بالا به پایین» و « پایین به بالا » میشود. در روش پایین به بالا ، چیده شدن و ساخت آنها بصورت اتوماتیک است، مانند بشر که در بدو تولد از جزء به کل تبدیل می‌شود ولی در روش بالا به پایین محصولات در اندازه‌های بزرگ تولید شده سپس کوچک می‌شوند.

### ۳-۱۳ جانداران میکروسکوپی دریایی راهی به سوی نانو چیننده ها

یک شکل تک سلولی میکروسکوپی از یک جلبک ممکن است در یافتن پاسخی برای یک سوال قدیمی و پایدار در تحقیقات نانو تکنولوژی کمک مؤثر بنماید و آن سؤال اینست که چگونه می‌توان مولکولها را وادار به خود چیدمانی نمود ، بطوریکه ساختار مورد نظر ما را بسازند ؟ جواب به این سوال می‌تواند به تولید نانوچیننده‌ها منجر ، که عبارتند از وسایلی که می‌توانند اشیاء را به طور مولکول به مولکول بسازند منجر شود. دستیابی به نانوچیننده‌ها تحولی خواهد بود که می‌تواند فرآیند ساخت مواد را دگرگون سازد . دانشمندان درمورد موجودات ریز آغازین به دیاتومه‌ها مطالعه می‌کنند ، تا ببینند این موجودات ریز چگونه مولکولهای سیلیس را گرفته و آنها را به ساختارهای سلولی تبدیل می‌کنند [۱۸].

دیاتومه‌ها بخش اعظم پلانکتونهای موجود در آب تازه و آب نمک را تشکیل می‌دهند و ساختارهای ریز و بسیار پیچیده‌ای از سیلیس را با دقت مولکولی می‌سازند. آخرین تحقیقات در این زمینه نشان می‌دهد که دیاتومه‌ها از دو پروتئین برای کاتالیز نمودن سیلیکات استفاده کرده و آن را به شکل‌های مختلفی مترکم می‌کنند. دو پرتو نوری بر روی یک پلیمر حساس به نور که با پتیدپوشش داده شده است ، تابانده می‌شود . این پتیدها توسط دیاتومه‌ها و به منظور ایجاد ساختار سیلیسی

---

1-Nano Assemblers

2- Diato



مورد استفاده قرار می‌گیرند پرتوها به هم برخورد می‌کنند و باعث ایجاد بریدگیها یا شبکه‌هایی بر روی سطح پلیمر می‌شوند.

تیم دکتر استون، کار خود را بر مبنای یک فرآیند پلیمریزاسیون دو فوتونی قرار داده است. برای تولید MEMS و وسایل ذخیره نوری از فرآیند تک فوتونی استفاده می‌شود. اما آنها با بکارگیری فرآیند دو فوتونی این امکان را یافتند که پتیدها را بدون اینکه آسیبی ببینند، درون یک شبکه جمع‌آوری نمایند.

سپس پلیمرهای پوشیده شده با پتید را در معرض اسید سیلیسیک قرار داده و مجموعه‌ای از کره‌های نانومتری سیلیسی (نانوکرات) را درون شبکه‌ها بوجود آورند. نانوکرات، دارای قابلیت کاربردی فراوانی هستند. دکتر استون می‌گوید، که از نانوکرات بعنوان ماده پرکننده جهت محکم کردن محصولاتی چون تایر اتومبیل می‌توان استفاده نمود، همچنین می‌توان آنها را بعنوان عایق در میکرو الکترونیک بکار برد. پلیمرهای نانوکروی پوشش دار را می‌توان برای ساخت وسایل نوری ذخیره اطلاعات با کارایی بالا و نیز در سایر مواد فوتونیک بکار برد. محققین دریافتند که پلیمرهای با پوشش سیلیسی دارای کیفیت شکست نوری معادل ۵۰ برابر پلیمرهای بدون پوشش می‌باشند. اما دکتر استون می‌گوید: «تحول عظیم این است که این امر عملی بودن ساخت و تولید نانومتری را نشان می‌دهد و این کار به معنی بکارگیری توانایی طبیعت در این نوع از تولید یعنی تولید» پایین به بالاست».

رسیدن به نانو چیننده‌ها، هدف نهایی تحقیقات نانو تکنولوژی است. رویای نانوتکنولوژی، تولید چیننده‌هایی است که اشیاء را از اتمها و اجزای مولکولی آنها بسازند. نانو چیننده‌های کاربردهای دیگری همچون در زمینه پزشکی و نظامی دارد. دکتر استون می‌گوید که آنها یک فرآیند مشابه را به منظور شکل دهی سایر پروتئین‌ها روی یک پلیمر بکار برده‌اند. این پروتئین‌ها ممکن است شامل آنتی بادی مورد استفاده در ساخت بیوسنسورها نیز باشد. این بیوسنسورها می‌توانند در زمینه پزشکی

برای تشخیص انواع مختلفی از امراض یا حالات پزشکی مورد استفاده واقع شوند. در زمینه نظامی نیز می‌توان از آنها برای تشخیص عوامل جنگ بیولوژیکی یا شیمیایی بهره گرفت. شرکتهای مختلف علاقه مندند این فناوری را در جهت ساخت یک وسیله تبدیل سیگنالی که محققین را قادر می‌سازد تا فعالیت پروتئین را به تصویر بکشند، استفاده کنند. بنابراین آنچه ماسعی می‌کنیم انجام دهیم، اینست که دریافت کننده‌های محرکهای بیولوژیکی را درون یک وسیله خاص جمع آوری کنیم تا آن وسیله فعالیت یک پروتئین را حس کرده و سیگنال الکتریکی و یا نوری تولید نماید، بطوریکه ما بتوانیم آن سیگنال را اندازه گیری کرده و ثبت نماییم.

### ۳-۱۴: دستگاههای الکترونیکی با مقیاس نانو

تحقیقات برای نشان دادن محصولات آزمایشگاهی در سطح بالا و پرسرو صدا است. اما سود دهی دستگاههایی که دارای اندازه حدود ۱۰ «نانو هستند از نظر دور مانده است» [۱۸]. اگر چه ابتدا تعداد این دستگاهها بسیار کم بوده اما اخیراً بطور وسیعی چند برابر شده است. عنوان روزنامه‌ها، مقالات، مجلات و حتی آگهی‌های بازرگانی تلویزیون، این مکالمات سنگین و بزرگ را درباره نانو می‌بینیم و به نظر می‌رسد که هر هفته سازمانهایی هستند که اطلاعاتی درباره آن رد و بدل می‌کنند و مشاوره‌هایی در آن مورد دارند.

دلیل این همه جنجال این است که: چون در سالهای اخیر که دانشمندان روی مقیاس نانو شروع به کار کرده اند فهمیده اند که این مهارت‌ها می‌تواند برای ساختن مواد جدید با خاصیت‌های مفید و منحصر به فرد بکار رود و حتی شاید به یک رشته تقاضاهایی در مورد مسایل تجاری و مالی و دیگر زمینه‌ها منجر شود. از نتایج موثر آزمایشگاههایی که بر مبنای نانو آزمایش می‌کنند، کارآیی این روش در خبر گزاریهای علمی بطور گسترده ای گزارش شده است و این مساله توجه دانشمندان، شرکتهای و

محققان تکنولوژی را به خود جذب کرده است.

نانو الکترونیک میدان وسیعی است که در آن اجزاء با اندازه بسیار کوچک نانو، شدت جریان ایجاد می‌شود و این موضوع بسیار جالبی است که علاقه و توجه بسیاری از محافل علمی را به خود جلب کرده است. پژوهشگران به کشف این زمینه توجه بسیار نشان داده‌اند زیرا کوچکتر شدن مدارهای الکتریکی به سریعتر و بهتر شدن کیفیت و قابل انتقال تر شدن دستگاهها کمک می‌کند. هنوز بسیاری معتقدند که در حدود یک دهه، جریانهایی براساس قطعات سیلیکونی تا حدی که امکان دارد کوچکتر شود ایجاد خواهند کرد و هنوز پژوهش برای مواد دیگری که بتوان از آن مدارهایی بر مبنای این واحد ساخت ادامه دارد.

به همین منظور بوسیله چندین گروه تحقیقاتی روی ساخت تیوپها و سیم‌های نانو از موادی چون گالیم آرسناید بررسی می‌شود. دیگر محققان که کارشان اغلب بعنوان «الکترونیک مولکولی(اتی)» نامیده می‌شود روی عکس‌العمل‌های الکتریکی مولکولهای تکی یا تعداد کمی از مولکولها متمرکز شده دانشمندانی که در این زمینه کار می‌کنند، هدفشان طراحی و ساخت انواع جدیدی از رایانه است که مدار و جریان منطقی آن در حقیقت با دستگاههایی بر مبنای نانو اندازه‌گیری می‌شود. منتقدان می‌گویند در این طرحها اغراق بسیاری شده است و گزارش‌ها درباره فواید آن زیاده روی کرده‌اند اما محققان دنیا مشغول بررسیهای بیشتری در زمینه نانو هستند و مرتباً مطالب علمی جدید را منتشر کنند. یکی از محققان می‌گوید روزها و لحظات بزرگ و حساسی هستند، هنگامی که عنوانهایی چون الکترونیک و مولکول همزمان و در کنار هم مورد بررسی قرار گیرند. او می‌گوید: آزمایشهای بسیار جالبی این روزها گزارش شده و این همه شور و شوق بجا و به مورد است زیرا پس از اینکه مدت سی سال از نوشته‌های پرفسور شیمی دانشگاه وسترن شمالی<sup>۱</sup> که از آنها به عنوان آغاز تحقیقات در زمینه

---

1-North Western

الکترونیک اتمی نام برده می‌شود، می‌گذرد در هنگام آن تحقیقات رتنر<sup>۱</sup> و آریرم<sup>۲</sup> که دانشجویان دکتری بودند، مطرح کردند که تحت شرایط خاص، مولکول‌های تشکیل شده تکی می‌توانند مانند دیود پیوندگامی p-n عمل کنند.

این دستگاه‌های ساده الکترونیکی عموماً در فاصله بین قطب مثبت (نوع p) و قطب منفی (نوع n) نیم‌رساناها تشکیل می‌شوند و می‌توانند به عنوان تنظیم‌کننده‌هایی برای تبدیل جریان AC به DC بکار روند.

رتنر می‌گوید: تا زمانی که میکروسکوپها تا اواخر سال ۱۹۸۰ کاملتر و دقیق تر نشده بود، پیشرفتهای بسیار کمی در زمینه الکترونیک مولکولی ایجاد شده بود.

اما ابزار جدید این فرصت را در اختیار آنها قرار داد تا بتوانند تمام محدوده این پدیده را مشاهده کنند و این شامل نوعی که رتنر در سال ۱۹۸۰ مطرح کرده بود نیز می‌شد. او اضافه می‌کند که پیشرفت در زمینه‌های دیگر مثلاً روش‌هایی برای آماده کردن مولکولهایی که خود به خود یک لایه در اطراف خود تشکیل می‌دهند، هم کارایی داشته است که در شروع به کار دستگاه‌ها با مقیاس نانو این اتفاق افتاده است.

و حالا پیشرفتهای سریع و بزرگتری می‌شود این کلمات به خوبی سرعت عمل را در فعالیتهای انجام شده که روی تیوپ کربن نانو انجام شده، بیان می‌کند. وسایل سبک ساخته شده از کربن با قطر نانو، دارای خصوصیات خوبی هستند که آنها را برای استفاده در زمینه‌های گوناگون می‌توان برگزید. تیوپ‌های نانو، بر اساس نوع خود می‌تواند فلزی یا نیم‌رسانا باشند.

اووریس<sup>۳</sup> می‌گوید: بخاطر استحکام شیمیایی و ظرفیت بالای آنان مواد در حرارت بالا، مقاومت

---

1 - Rutner

2 - Ariram

3 - Avorris

مکانیکی و شیمیایی خوبی دارند و به علاوه تیوپ‌های کربن می‌توانند رساناهای خوبی باشند و در عین حال قطر کم و بلندی و ساختمان بدون نقص آنان را برای بکار رفتن در سیستم یک بعدی بسیار ایده آل ساخته است.

چهار سال پیش گروه تحقیقاتی اووریس و دانشمندان مستقل دیگر و یک پرفسور فیزیک در دانشگاه دلف یونیر نشان دادند که ترانزیستورهایی با تاثیر میدانی (FET) می‌توانند از تیوپهای کربن نانو ساخته شوند).

FET یک نوع کلید است که یک کانال نیمرسانا بین دو الکتروود پل می‌زند. جریانی بین این دو الکتروود برقرار می‌شود و بوسیله الکتروود سومی که رابط *gate* نامیده می‌شود کنترل می‌شود. بوسیله دادن یک ولتاژ به دروازه، نیمرسانا می‌تواند بر عکس عمل کند و به هادی (رسانا) تبدیل شود و این عمل به وسیله خاصیت کلیدزنی ترانزیستور انجام می‌شود. و در اکثر شبکه‌هایی که ساخته می‌شود کانال رابط بین دو الکتروود از سیلیکون ساخته شده در دستگاههای نانو، کانال رابط تنها یک تیوپ کربن واحد است.

در میکرو پردازش‌های جدید، سازندگان، صدها میلیون ترانزیستور کوچک را در قطعات ظریف رایانه ای به اندازه یک تمبر پستی قرار داده اند. به این دلیل گروه تحقیقاتی IBM و دیگران روی خصوصیات تیوپ‌های نانوشبکه پیشرفت کاری خوبی داشته اند. بسیاری از کارهای آنان روی تحقیق و کنترل رسانایی الکترونیکی از طریق تیوپ‌های کوچک متمرکز شده، در ساختن اجزاء برای این جریان از تیوپ‌ها مشکلاتی وجود دارد و محققان به راحتی نمی‌توانند تیوپ‌های فلزی را از نیمرسانا جدا کنند. در ترکیب یک جریان معمولی، مخلوطی شبیه اسپاگیتی از رشته‌های نانو ایجاد می‌شود که نمی‌توان آنرا در نیمرسانا بکار برد و غیر قابل استفاده است. زیرا دارای هر دو نوع تیوپ رسانا و نیمرسانا است.

بعد از تشکیل الکترودهای اطراف مجموعه تیوپهای کربن، گروه دانشمندان، با روشهای مخصوصی توانستند ولتاژ مخصوصی به الکترودهای دروازه بدهد و تیوپ رسانی را به عایق مبدل کند. گروه IBM با دادن ولتاژ بالا به مدار سبب اکسید شدن تیوپ های فلزی شد و این سبب شکستن و جدا شدن آن گردید بدون روی آنکه نیمرسانا ها تاثیر بگذارد.

این گروه از دانشمندان این روش را به کار بردند تا از رشته تیوپ های نانو که یک جداره دارند. بتوانند شبکه آماده کنند و تیوپ های چند جداره را لایه لایه جدا کنند.

چند ماه بعد محققان IBM نشان دادند که مدارهای شناخته شده قبلی که به عنوان رابطهای منطقی نامیده می شوند و از ترکیبات شبکه تشکیل شده اند، می توانند تنها از یک دسته تیوپ نانو ساخته شوند.

مدت کوتاهی پس از آنکه یکی از دانشمندان بنام دلفت دکر<sup>1</sup> از پیشرفتهای دیگری در همین زمینه خبر داد که ترکیب پیچیده ای از رابطه منطقی AND و OR و NOT، هسته مرکزی پردازنده های عددی را می سازند.

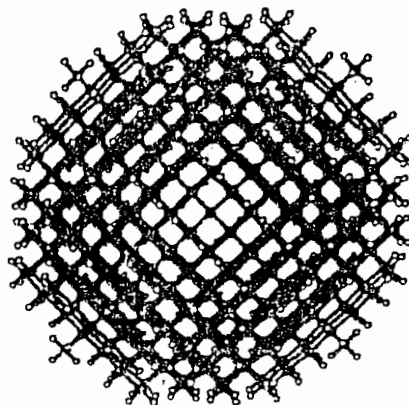
برای ساختن دروازه NOT از تیوپ نانو استفاده می شود و این دانشمندان کمک کردند که این طرح به موفقیت برسد و تیوپهای نوع N ساخته شود. دروازه NOT به هر دو نوع ترانزیستور احتیاج دارند، اما در روش های ترکیبی که در گذشته انجام می شد فقط تیوپ نوع P تولید می شد. اما آروش و همکارانش در IBM فهمیدند که نوع P مثبت، هم می تواند به آسانی به N (منفی) تبدیل شود و این عمل به وسیله گرما دادن در خلاء انجام می شود. در حالیکه گروه به روش جدید مجهز شده بودند، ترانزیستورهای نوع P و N را از هم جدا کردند و یک دروازه NOT ساختند.

---

1 - Delft Dekkeir

### ۳-۱۵: نانو بلورهای سیلیسیوم

نانو بلورهای سیلیسیوم، را نقاط کوانتومی نیز می‌گویند و کاربردهای خیلی زیادی در زمینه افزایش خواص اپتیکی، از خود نشان می‌دهند که در فصل ۵ بطور مفصل در مورد آن بحث خواهد شد.



شکل (۳-۵): ساختار اتمی از یک نقطه کوانتومی سیلیسیوم با ترکیبات توپهای سیاه و سفید به ترتیب  $H_{276} Si_{525}$  هستند [۲۰].

تصاویر نانو بلورهای Si که در مواد کوارتزی ثابت نگه داشته شده اند نشان داده خواهد شد. همانند نیمرساناهای حجیم که بر حسب ساختار نوارهای ظرفیت و نوارهای رسانش به بلور مستقیم یا غیر مستقیم طبقه‌بندی می‌شوند نیمرسانای نانو بلوری نیز این چنین هستند. نیمرساناهای نانو بلوری مستقیم همچون (CdSe, CdS) بر حسب داشتن حداقل انرژی انتقال برای سوق دادن یک الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش بدون تغییر در اندازه حرکت مشخص می‌گردند. (این انرژی تفکیک به عنوان گاف نواری شناخته می‌شود) برای نیمرساناهای غیر مستقیم هر چند، تحریک در گاف نواری انرژی باید همراه با تغییر در اندازه حرکت الکترونها باشد. (که توسط یک فونون تغذیه می‌شود) [۲۰].

در حالی که هر دو نوع نیمرساناهای مستقیم و غیر مستقیم جذب کننده‌های نور کار آمدی هستند،

در این بین فقط نیمرساناهای مستقیم هستند که می‌توانند به عنوان یک منبع نور برتری کافی را برای استفاده داشته باشند. مثلاً از لیزرهای GaAs بعنوان لیزرهای کوانتومی و یا از CdSe به عنوان فلورسنتی می‌توان استفاده نمود. کشف سیلیکون خلل و فرج‌دار به عنوان یک ماده پرتوافکن کارآمد، تحول عظیمی را بصورت یک کاندیدای آینده جهت فشرده‌سازی مدارهای اپتوالکترونیک پدید آورد.

نانوبلورهای سیلیکونی، بلوری در اندازه‌های نانومتری توسط چندین شیوه شامل قطع لیزری، تبخیر گاز و لایه‌نشانی بطریق کندوپاش و غیر از Si خلل و فرج‌دار تولید شده‌اند. ساختار بلوری این ذرات توسط میکروسکوپ الکترونی تایید شده است. در این کار نانوبلورهای تولید شده از Si خلل و فرج‌دار مطالعه شده است.



شکل (۳-۶): نانوبلورهای Si [۲۰].



## فصل چهارم:

# روشهای ساخت و رشد بلورهای نیم رسانای نانو ساختار

### ۴-۱: مقدمه

نانو تکنولوژی عبارت از دسترسی به روشهای جدید ساخت مواد مصنوعی می باشد. دو روش برای رسیدن به مقیاس نانو وجود دارد: ساخت از بالا به پایین و رشد دادن از پایین به بالا.

هر دو راه جهت رسیدن به ساختارهای ایجاد شده در علوم پایه است که ساخت آنها را ممکن می سازد و اساساً با یکدیگر تفاوت دارند. روش بالا به پایین، متضمن کاهش اندازه از کوچکترین ساختار یک ماده به سمت مقیاس نانو می باشد.

این روش متضمن کنده کاری مواد بزرگتر، جهت رسیدن به ساختارهای نانو می باشد. نانو تکنولوژی بالا به پایین در نخستین وهله بیشتر در قلمرو، نانو الکترونیک، و نانو مهندسی کاربرد دارد. یک کاربرد اولیه از این روش در توسعه از نانوفوتونیک، پیوند از الکترونیک و فوتونیک در مقیاس نانو می تواند باشد. تکنیکهایی که روش بالا به پایین را گسترش می دهد، برای مثال لیتوگرافی پرتوالکترونیکی می باشد که از میکروالکتروشیمیایی جهت خلق سیستمهای میکرو الکتروشیمیایی<sup>۱</sup> اقتباس شده است.

محدودیتهایی فیزیکی در روش ساخت از پایین به بالا<sup>۲</sup> وجود دارد، همانطور که سعی می شود مولکولهای انفرادی با تدبیر در کنار هم قرار گیرند، نیروها و برهم کنش بین مولکولهای

---

1 - MEMS = Microelectro Mechanical Systems.

2 - Bottom - Up

انفرادی نیز اهمیت پیدا می‌کنند زیرا در اثر این کار نمونه‌های جدیدی با خواص جدیدی ظاهر می‌شود. تکنیکهای پایین به بالا در برگیرنده مولکولها و اتمهای انفرادی است که با تدبیر در کنار هم قرار می‌گیرند نانو پایین به بالا، معمولاً در برگیرنده خود مجموعه‌هایی از اتمها یا مولکولهاست که به سمت ساختار نانو، کنترل یا هدایت شده‌اند.

تکنیک پایین به بالا، بیشتر شبیه به فرآیندهایی از بیولوژی و شیمی می‌باشد، که اتمها و مولکولها در کنار هم قرار گرفته و ساختارهایی همچون بلورها و سلولهای زنده را ایجاد می‌کند.

در حقیقت ساخت یک سلول زنده یا یک دانه برف، نانو تکنولوژی خود طبیعت باشد.

همانطور که گفته شد نقش تکنیکهای روش از بالا به پایین از میکروالکترونیک گرفته شده است این فنون ساختمان میکرو، کاملاً از ساخت نانویی می‌باشد که از فنون فرآیند سیلیکون و ترکیب در داخل یک دیگر ساخته شده‌اند. ساخت میکرو آسان تر و قابل فهم تر می‌باشد.

اما تکنیکهای ساخت از پایین به بالا می‌تواند روی تولید مواد دارویی و ارزش افزوده مواد شیمیایی تاثیر بگذارد. نانو تکنولوژی مربوط به رشته‌های مختلف علمی است. ذات روشهای از بالا به پایین و از پایین به بالا بر طبیعت چندین رشته مختلف علمی تاکید دارد.

در روش ساخت از پایین به بالا، از تکنیکهای خود چیدمانی استفاده می‌شود که برای ایجاد اندک اجزای مولکولی به صورت یک مولکول حلقوی بزرگ با ابعاد چندین نانومتری تلفیق می‌شود، اما وسایلی مانند سنسورها، موتورها و بسیاری موارد دیگر امروزه با روش «بالا به پایین» ساخته می‌شوند.

مثلاً در صنعت میکروالکترونیک از تکنیکهای لیتوگرافیک برای حک کردن بلور سیلیکون برای ایجاد در مدارات میکرومتری استفاده می‌شود. این تکنیکها اخیراً تا حدی پیشرفت کرده است، که

اشکالی با ابعاد نانومتری را نیز می‌توان ساخت. هر ۱۸ تا ۲۴ ماه که ابزارها ریزتر می‌شود تعدادی از آن را که می‌توان در یک تراشه جا داد به دو برابر افزایش می‌یابد.

نانوتکنولوژی، یک راه حل ارزان قیمت «پایین به بالا» را در الکترونیک و دیگر وسایل ساخته شده از اجزای ساده تر مثل مولکولها و نانو ساختارهای دیگر را به ما مژده دهد. این روش مشابه عمل طبیعت در ایجاد ساختمانهای زیستی پیچیده است.

نمونه‌ای از روش ساخت پایین به بالا، ساخت رایانه‌ای از پایین به بالا، است چیزی که آن را نانورایانه الکترونی با چیدمان شیمیایی می‌نامند. این ساخت شامل به نخ کشیدن سوئیچ مولکولی و نانوسیم به صورت مدارات منطقی و مدارات حافظه و «فراهم آوری امکان گفتگوی آنها» است سوئیچ‌های مولکولی شامل زنجیره‌ها [۲۶] و تسبیح‌ها [۲۷] و شبه تسبیح‌هایی است که در آزمایشگاهها ایجاد شده اند. ساده ترین مثال این قبیل سوئیچ ها، یک حلقه مولکولی است که به صورت مکانیکی به یک حلقه متفاوت دیگر زنجیره شده (تا یک زنجیره را تشکیل دهد) یا روی یک مولکولی به بند کشیده شده است. (تا یک تسبیح یا شبه تسبیح را شکل دهد) در هر کدام از این ساختارها حلقه مزبور میتواند دو موقعیت متفاوت که بیانگر «۰» و «۱» دیجیتالی است داشته باشد، و به کمک اعمال ولتاژهای متفاوت بین این دو حالت سوئیچ کند. برای اتصال دادن سوئیچ‌های مولکولی از نانو سیمهای سیلیکونی و نانو لوله‌های کربنی که در شبکه ای مثل یک صفحه ساعت قرار دارد استفاده می‌شود.

این معماری مشتق شده از معماری رایانه منحصر به فرد سیلیکونی Teramac است.

در هر بند این شبکه، نانوسیمها باتک لایه‌ای از سوئیچهای مولکولی متصل شده‌اند.

با سوئیچهای مولکولی زنجیره‌ای می‌توان با پیکربندی مجدد بارها بین حالت روشن و خاموش سوئیچ نمود. اگر چه تفاوت حالات «روشن و خاموش» از نظر مقاومت الکتریکی بسیار کمتر از حدی است که برای مدارات منطقی مفید باشد، اما این سوئیچها برای حافظه مناسب هستند.

تک لایه‌ای از «زنجیره‌ها» که بین دو صفحه الکتروود محدود شده به عنوان سوئیچ مولکولی عمل می‌کند، با بکار بردن این سوئیچها در مدارات منطقی و حافظه و وارد گفتگو کردن این سوئیچها با هم می‌توانیم صاحب یک رایانه شویم.

ساخت از پایین به بالا ساختن چیزهای بزرگ از اجزای ساختمانی کوچکتر است. نانو تکنولوژی به دنبال اینست که اتمها و مولکولها را بعنوان اجزای ساختمانی بکار گیرد. مزیت طراحی پایین به بالا اینست که پیوندهای کووالانسی که در یک مولکول وجود دارد، بسیار قویتر از پیوندهای شیمیایی ضعیفی است که مولکولها را بهم پیوند دهد.

سیستمهای میکروالکترونی که اغلب به نام میکروسیستمها شناخته می‌شود الکترونیک را با وسایل مکانیکی میکرومتری ترکیب کرده و ماشین آلات میکروسکوپی را بوجود می‌آورند. به لحاظ کوچک بودن سیستمهای نانو الکترونی و داشتن خواص بیشتر مهمتر بوده. و یکی از اهداف برنامه‌های نانو تکنولوژی می‌باشد. تحقیقات نانو تکنولوژی در ابتدا بر روی مصنوعات مولکولی ساخت ابزارها، مواد و ماشینهایی متمرکز شده بود که ما را قادر می‌سازد از موانع سخت طبیعت به آسانی و با هزینه کم با استفاده از قانونهای مجاز فیزیک عبور کنیم.

روش بالا به پایین بوسیله تکنیکهای چاپ و حکاکی کردن و لیتوگرافی انجام می‌شود که هر کدام از آنها را به طور مفصل شرح خواهیم داد.

## ۴-۲: لیتوگرافی و حکاکی<sup>۱</sup>

در این روش رشد و ساخت بلورهای نیمرسانای نانو ساختار، الگوهای از اشکال هندسی واقع بر یک

---

1 - Etching

نقاب بر روی یک لایه نازک از ماده ای حساس (بنام فوتورزیست<sup>۱</sup>)، منتقل شده و سطح پولک نیمرسانای نانو ساختار را می پوشاند، این انتقال الگوها مناطق مختلفی را در بلور نیمرسانا همچون کاشت، پنجره های اتصال و سطوح نواحی اتصال تعیین می کنند. انتقال الگوها بوسیله روش حکاکی، انجام می شود که بطور گزینشی قسمتهای غیر مستور لایه را از بین می برد.

### ۴-۳: لیتوگرافی نوری

وسیعترین ابزار لیتوگرافی برای ساخت بلورهای نیمرسانای نانو ساختار، ابزار نوری است که از نور ماورای بنفش استفاده می شود.

موارد دخیل در روند لیتوگرافی، محیط لیتوگرافی، نقابها و نورمقاومهای مورد استفاده می باشد، در ابتدا محیط لیتوگرافی که محیط تمیز نامیده می شود را بررسی می کنیم.

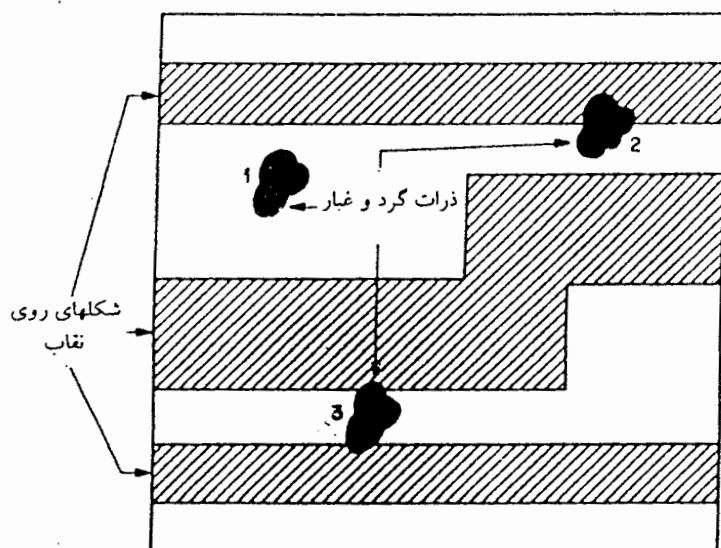
### ۴-۳-۱: اتاق تمیز

برای ساخت نانو بلورها، محیط بخصوص در سطح مورد استفاده برای لیتوگرافی باید کاملاً تمیز باشد. زیرا هنگامی که ذرات گرد و غبار روی سطح نیمرسانای نانو بلور قرار می گیرد موجب کاستیهایی در آن و خرابی آن می شود. مثلاً اگر ذره گرد و غبار روی سطح نیمرسانا قرار گیرد در رشد تک بلور یک لایه روآراستی اخلال ایجاد می کند و موجب تشکیل در رفتگیها می شود، همچنین ذره گرد و غباری که در داخل اکسید دروازه جای می گیرد سبب رسانندگی افزوده می شود و به دلیل ایجاد ولتاژ شکست پایین موجب خرابی آن می شود. این وضعیت در سطح لیتوگرافی بحرانی تر است. وقتی ذرات گرد و غبار به سطح نقاب نوری می چسبند روی نقاب به صورت الگوی کدر رفتار می کنند، و این الگوها همراه با

---

1 - photoresist

نقشهای مداری روی نقاب به صورت الگوی کدر رفتار کرده و به لایه‌های زیرین منتقل خواهند شد. شکل (۱-۴) سه ذره گرد و غبار را در روی نقاب نوری نشان می‌دهد، ذره ۱ به تشکیل روزنه کوچکی در لایه زیرین می‌تواند منتقل شود، ذره ۲ نزدیک لبه الگو قرار گرفته است و می‌تواند موجب انقباض فشار جریان در کفشک<sup>۱</sup> فلزی گردد. ذره ۳ می‌تواند منجر به اتصال کوتاه بین دو ناحیه رسانا شود و مدار را بی‌فایده کند. در یک اتاق تمیز، تعداد کل ذرات گرد و غبار در واحد حجم باید به همراه دما و رطوبت به شدت کنترل شود.



شکل (۱-۴): راه‌های گوناگونی که بدان وسیله ذرات گرد و غبار می‌توانند با الگوهای نقاب نوری تداخل کنند [۴].

### ۲-۳-۴: لیتوگرافی نوری

روند انتقال الگو روی پولک‌های نیم‌رسانای نانو بلور، با استفاده از ابزار نوردهی لیتوگرافی انجام می‌شود. بازده ابزار نور دهی بوسیله سه پارامتر: تفکیک، ثبت و توان عملیاتی مشخص می‌شوند. توان

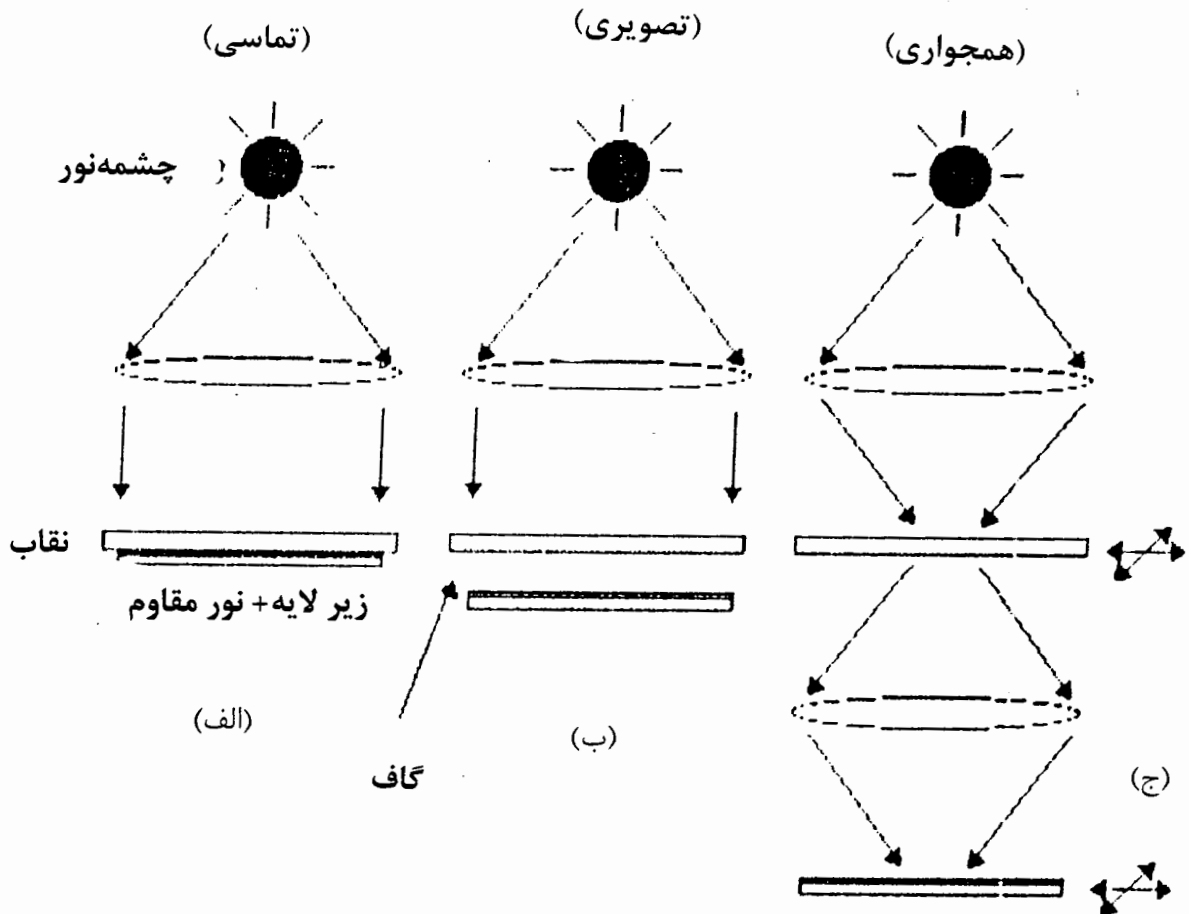
عملیاتی تعداد پولک‌هایی است که در یک ساعت برای سطح نقابی معین می‌توان تحت تابش قرارداد؛ ثبت معیار جایگذاری الگوها روی نقابهای متوالی نسبت به الگوهای از قبل تعیین شده روی پولک می‌باشد؛ و تفکیک کمینه، ابعاد شکلی است که می‌توان با اطمینان زیاد به لایه نازک، زیست روی پولک نیم‌سانای نانو بلور منتقل نمود. [۴].

دو روش اساسی لیتوگرافی نوری وجود دارد: ۱- چاپ سایه (تماسی و همجوار) ۲- چاپ تصویری در چاپ سایه ممکن است نقاب و پولک مانند چاپ تماسی، در تماس مستقیم با یکدیگر باشند، یا مانند چاپ همجوار، در مجاورت یکدیگر باشند. شکل (۴-۲ الف و ب) چاپ تماسی و همجوار را به ما نشان می‌دهد. در چاپ تماسی پولک پوشیده از نورمقاوم در تماس فیزیکی با نقاب قرار داده می‌شود و نورمقاوم از طریق پشت نقاب، برای مدتی معین در معرض تابش پرتو نور ماورای بنفش تقریباً موازی قرار می‌گیرد. تماس کامل بین نورمقاوم و نقاب، تفکیک خیلی بالایی حدود (۱۰۰nm) را ایجاد می‌کند.

در این حالت ذره گرد و غبار یا ذره ای از پودر سیلیسیوم واقع بر روی پولک نیم‌سانای نانو بلور می‌تواند در پولک غوطه ور شود. این ذره سبب آسیب دائمی در نقاب و هر نوردهی از آن موجب کاستیهای در پولک می‌شود. برای جلوگیری از این آسیب، از روش نوردهی همجوار استفاده می‌شود در این روش که با روش چاپ تماسی مشابه می‌باشد، درحین نوردهی شکاف کوچکی حدود ۵ تا ۱۰nm بین پولک و نقاب در نظر می‌گیرند. این شکاف کوچک، سبب پراش نوری در لبه‌های شکل، روی نقاب نوری می‌شود. (یعنی وقتی نور از لبه‌های شکل نقاب گذر عبور می‌کند.) فریزهایی تشکیل می‌شوند، و مقداری از نور به داخل ناحیه سایه نفوذ می‌کند و تفکیک به ناحیه حدود چند نانومتر کاهش می‌یابد. در چاپ سایه، کمینه پهنای خطی که می‌توان چاپ نمود تقریباً برابر است با:

$$L_m \cong \sqrt{\lambda g} \quad (1-4)$$

که در آن  $\lambda$  طول موج و  $\theta$  زاویه پرتو نور دهی و  $g$  گاف بین پولک و نقاب می باشد و شامل ضخامت نورمقاوم می باشد [۴]. برای فاصله معین  $\lambda$  هر ذره گرد و غبار با قطر بزرگتر از  $g$  بطور بالقوه می تواند موجب آسیب نقاب شود.



شکل (۲-۴): طرحی از تکنیکهای چاپ سایه نوری (الف) چاپ تماسی (ب) چاپ همجواری (ج) چاپ تصویری [۱۹].

برای جلوگیری از مشکل آسیب نقاب مربوط به چاپ سایه، ابزارهای نوردهی چاپ تصویری تکامل یافته اند. تا بتوان تصویر الگوهای نقاب را بر روی پولک پوشیده از نورمقاوم واقع در فاصله چندین سانتی متری از نقاب تصویر نمود. برای افزایش تفکیک در هر زمان فقط بخش کوچکی از نقاب تحت تابش قرار می گیرد. شکل (۲-۴) (ج) این طرح را نشان می دهد.



#### ۴-۳-۳: نقابها

اولین گام برای ایجاد الگوهای قطعات منفرد نیمرساناهای نانو بلور یا مدارهای مجتمع کوچک تا مدارهای مجتمع مقیاس متوسط عبارتست از این که طرح مرکب بزرگی از مجموعه نقاب رسم کنیم. طرح مرکب به ترازهای نقابی تقسیم می‌شود که برای هر تراز نقاب ساز، نقشی هنری رسم می‌شود. نقش هنری با استفاده از دوربین کوچک کننده، کوچک می‌شود.

برای اندازه‌های شکلی از مرتبه چند nm یا بزرگتر، نقابها را از تیغه شیشه ای پوشیده از ماده‌ای با سطح نرم نظیر محلول امولاسیون می‌سازند. برای اندازه‌های شکلی کوچکتر، نقابها را از شیشه ای پوشیده با مواد سخت سطح مانند اکسید آهن یا کروم می‌سازند. یکی از بزرگترین مشکلات در ساخت نقابها چگالی کاستی است. کاستیهای نقاب ممکن است یا در هنگام ساخت نقاب یا در هنگام روند لیتوگرافی بعدی ایجاد شوند.

چگالی کوچک کاستی نقاب اثر عمیقی در بهره نهایی نیمرسانای نانو بلور دارد. بهره به صورت نسبت تراشه‌های خوب در پولک به تعداد کل تراشه‌های پولک تعریف‌شود. به عنوان تقریب مرتبه اول بهره لایبرای تراز نقاب ساز معینی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$Y = e^{-DA} \quad (2-4)$$

که در آن  $D$  تعداد متوسط کاستیهای «مخرب» در واحد مساحت است و  $A$  مساحت یک تراشه نیمرسانای نانو بلور می‌باشد. اگر  $D$  برای تمام ترازهای نقاب یکسان بماند (مثلاً تراز  $N = 10$ )، بهره نهایی چنین می‌شود.

$$Y = e^{-NDA} \quad (3-4)$$

#### ۴-۳-۴: نور مقاوم

نور مقاوم ماده ای مرکب حساس به تشعشع می باشد. با توجه به پاسخ آنها به تشعشع به دو دسته مثبت و منفی تقسیم می شوند. در نور مقاوم های مثبت، ناحیه های در معرض تابش بیشتر قابل حل هستند بنابراین در روند ظهور بطور آسانتری از بین روند، در نتیجه الگوهای نور مقاوم مثبت، همانند الگوهای روی نقاب می باشند.

برای نور مقاوم های منفی، ناحیه های در معرض تابش، کمتر قابل حل هستند و الگوهای تشکیل شده در نور مقاوم منفی معکوس الگوهای نقاب می باشد شکل (۴-۳) نور مقاوم های مثبت و منفی را به ما نشان می دهند.

نور مقاوم های نوری مثبت از ۳ جزء: ماده مرکب حساس به فوتون، صمغ پایه و حلال آلی تشکیل می شوند.

ماده مرکب حساس به فوتون بعد از آن که در معرض تابش قرار گرفت در سطح الگوی در معرض نور، تشعشع را جذب می کند و ساختار شیمیایی آن تغییر می کند، و در محلول ظهور حل می شود. بنابراین ظهور سطوح در معرض نور را از بین می برد.

نور مقاوم های نوری منفی پلیمرهایی هستند که با ماده مرکب حساس به فوتون ترکیب می شوند. بعد از نوردن ماده مرکب، حساس به فوتون انرژی نوری جذب می کند و آنرا به انرژی شیمیایی تبدیل می کند تا واکنش زنجیری را شروع کند این واکنش سبب به هم پیوستن مولکولهای پلیمر می شود. با توجه به اینکه پلیمر به هم پیوسته دارای وزن مولکولی بالاتری است در نتیجه در محلول ظهور غیر قابل حل می شود.

در نتیجه ظهور، سطوح نور ندیده را از بین می برند، عمده ترین اشکال نور مقاوم نوری منفی آن است که در روند ظهور تمام جرم نور مقاوم با جذب حلال ظهور، حجم آن افزایش می یابد، این افزایش حجم،

تفکیک نور مقاوم نوری را محدود می‌کند.

شکل (۳-۴ الف و ب) منحنی پاسخ نور دهی نوعی و سطح مقطع تصویر را برای نور مقاوم مثبت و

منفی نشان می‌دهد. [۲۴]

منحنی برای نور مقاوم مثبت پاسخ درصد نور مقاوم باقیمانده را بعد از نوردهی و ظهور را بر حسب انرژی نوردهی توصیف می‌کند. قبل از تابش نور به آن حلالیت محدودی دارد اما بعد از تابش نور، آن حلالیت به تدریج افزایش می‌یابد، تا اینکه در انرژی آستانه  $E_T$  نور مقاوم به طور کامل حل می‌شود. حساسیت نور مقاوم مثبت به صورت انرژی لازم برای ایجاد حلالیت کامل در ناحیه تحت تابش تعریف می‌شود. بدین ترتیب  $E_T$  به حساسیت مربوط است، علاوه بر  $E_T$  پارامتر  $\gamma$  یعنی نسبت تباین، برای توصیف نور مقاوم تعریف می‌شود:

$$\gamma = [\text{Ln}(\frac{E_T}{E_I})]^{-1} \quad (۴-۴)$$

در شکل رسم شده  $E_I$ ، انرژی حاصله از رسم مماس بر منحنی در  $E_T$  برای رسیدن به ۱۰۰٪ ضخامت نور مقاوم می‌باشد. مقادیر بزرگ  $\gamma$  بر حلالیت سریعتر نور مقاوم با افزایش نحوه انرژی نوردهی دلالت می‌کند. و به تصاویر بارزتری منجر می‌شود.

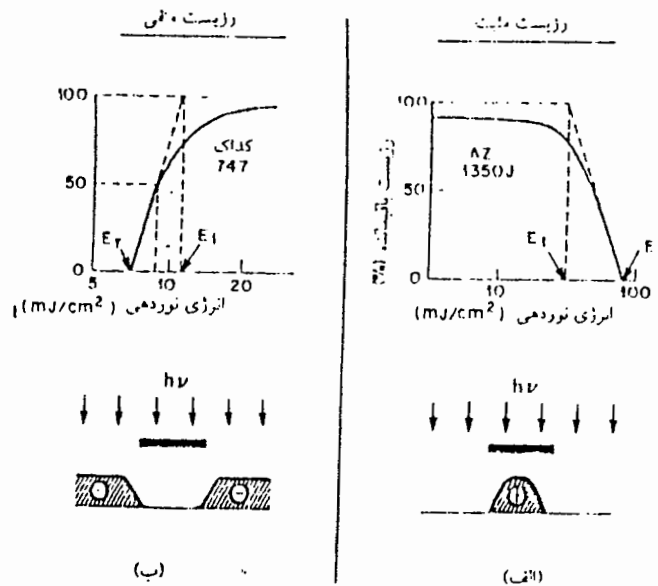
نور مقاوم‌های منفی در برابر انرژیهای نوردهی کمتر از انرژی آستانه  $E$ ، کاملاً در محلول ظهور قابل حل هستند و برای انرژیهای بالاتر از انرژی آستانه  $E$  بیشتر لایه نازک نور مقاوم بعد از ظهور باقی می‌ماند. و برای انرژیهای دو برابر انرژی آستانه، لایه نازک نور مقاوم اساساً در محلول ظهور غیر قابل حل می‌شود. حساسیت نور مقاوم منفی به صورت انرژی لازم برای نگاه داشتن ۵۰٪ ضخامت اصلی لایه نازک نور مقاوم در ناحیه تحت نوردهی تعریف می‌شود. پارامتر یعنی نسبت تباین، برای توصیف نور مقاوم منفی با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma = [\text{Ln}(\frac{E_I}{E_T})]^{-1} \quad (۵-۴)$$

شکل (۴-۳) برای نور مقاوم منفی سطح مقطع تصویر تحت نفوذ پراش را نیز نشان می‌دهد در جدول

[۱] فهرست چند نورمقاوم نوری شامل لیتوگرافی و پرتوالکترونی و پرتو X مثبت و منفی که از نظر

تجاری قابل دسترس می‌باشد، ارائه شده است.



شکل (۴-۳): منحنی پاسخ نوردهی و سطح مقطع تصویر نورمقاوم را بعد از ظهور

(الف) نورمقاوم نوری مثبت (ب) نورمقاوم نوری منفی [۴].

نورمقاوم‌های منفی معمولاً بعد از عمل ظهور متورم می‌شود اما نورمقاوم‌های مثبت متورم نمی‌شوند بطوریکه بوسیله آن می‌توان تفکیک بهتری را به دست آورد. اما بدلیل انرژی نوردهی خیلی بزرگتر آنها، زمان نوردهی طولانی‌تر لازم دارند، بنابراین توان عملیاتی کوچکتری حاصل می‌شود. جهت اصلاح تفکیک تصویر، از نورمقاوم‌های لایه‌های نازکتر استفاده می‌شود.

#### ۴-۳-۴: انتقال الگو برای نورمقاوم‌های مثبت و منفی

شکل (۴-۴) مراحل انتقال الگو را از نقاب به پولک نیم‌رسانای نانو ساختار نشان دهد که دارای لایه

عایق تشکیل شده بر روی سطح خود می‌باشد. ابتدا پولک را در اتاق تمیز قرار داده سپس تحت تابش نور زرد قرار می‌دهیم، زیرا نور مقاوم‌های نوری به طول موج بزرگ حساس نمی‌باشد. بعد از آن، پولک روی دوک خلا نصب می‌شود و حدود یک سانتی متر مکعب از نور مقاوم مایع به مرکز پولک اعمال می‌شود. سپس پولک به سرعت شتابدار می‌شود، تا به سرعت دورانی ثابتی برسد، بعد از مرحله دوران به پولک از  $80^{\circ}\text{C}$  تا  $100^{\circ}\text{C}$  حرارت داده می‌شود تا حلال از لایه نازک نور مقاوم نوری زدوده شود و نور مقاوم چسبیده به پولک اصلاح گردد. در دستگاه لیتوگرافی نوری پولک نسبت به نقاب هم تراز می‌شود و مطابق شکل (۴-۴ الف)، نور مقاوم در معرض تابش نور UV قرار می‌گیرد. در مورد نور مقاوم مثبت در شکل (۴-۴ ب) سمت چپ، نور مقاوم در معرض نور قرار گرفته و در محلول ظهور حل می‌شود. عمل ظهور نور مقاوم نوری معمولاً با پاشیدن محلول ظهور بر روی پولک انجام می‌گیرد. سپس پولک را شستشو داده و خشک می‌کنند. به منظور افزایش چسبندگی نور مقاوم به نمونه، حرارت دادن بعدی از  $100^{\circ}\text{C}$  تا  $180^{\circ}\text{C}$  لازم می‌باشد بعد از این کار، با توجه به شکل (۴-۴ د)، پولک در محیطی (نظیر اسید فلئوئوریک بافری<sup>۱</sup> که یک حک کننده نوعی  $\text{SiO}_2$  است) گذاشته می‌شود تا لایه عایق در معرض نور حک شود اما به نور مقاوم اثر نکند، در آخر نور مقاوم (مثلاً با استفاده از حلال یا اکسایش پلاسما) کنده کاری می‌شود و یک تصویر عایق (یا الگو) بجای می‌گذارد، که همان تصویر کدر روی نقاب است. شکل (۴-۴ هـ) •

روش شرح داده شده برای نور مقاوم مثبت، برای منفی هم قابل استفاده است. فقط سطوح نور ندیده در این حالت زدوده می‌شوند. تصویر عایق نهایی در سمت راست شکل (۴-۴ هـ) معکوس تصویر کدر روی نقاب می‌باشد.

از تصویر عایق می‌توان به عنوان نقاب برای فرآوری بعدی استفاده نمود. مدار کامل با هم تراز کردن

1 - Buffered hydrofluoric acid.

نقاب بعدی به دنبال الگوی قبلی و تکرار روند انتقال لیتوگرافی ساخته می شود. روند انتقال الگوی مربوط عبارتست از تکنیک پرتاب<sup>۱</sup>، که در (شکل ۴-۵) نشان داده شده است.

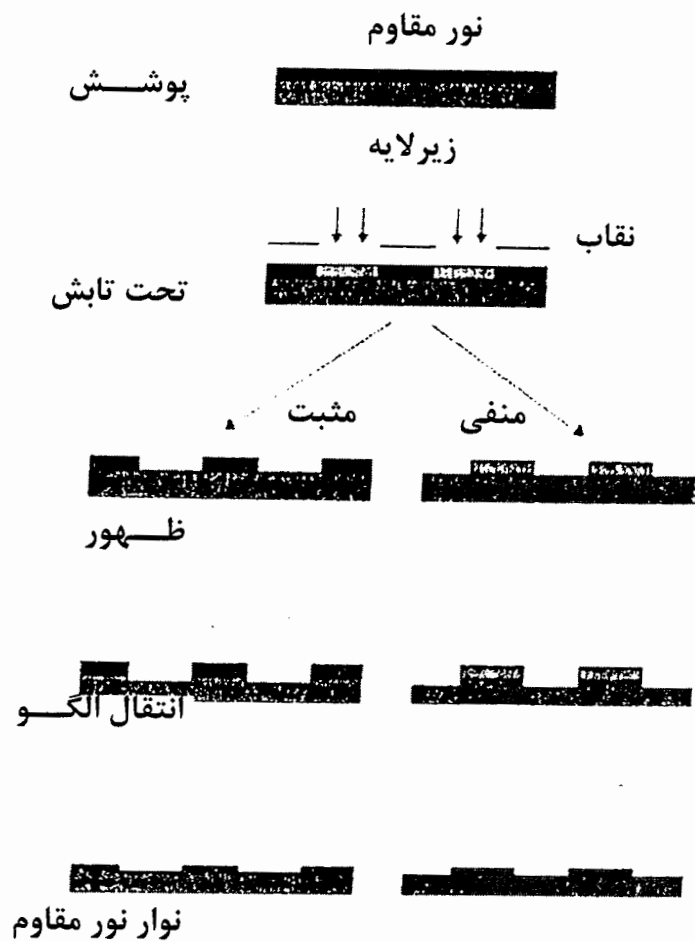
PMMA*	e-beam	600 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ (+)	+ and -
SNR	e-beam, DUV	140 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	-
HSQ (FOX-12)	e-beam	500 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	-
SAL 603	e-beam	3-5 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	-
NEB 22-2A	e-beam	18 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	-
HPR	NUV	50-100 $\text{mJ}/\text{cm}^2$	+
AZ	NUV	50-100 $\text{mJ}/\text{cm}^2$	+
AZ, HPR image reversal	NUV	50-100 $\text{mJ}/\text{cm}^2$	-

\* broad range of products

#### Mask writing

PBS	e-beam	36 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	+
SAL 605	e-beam	7 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	-

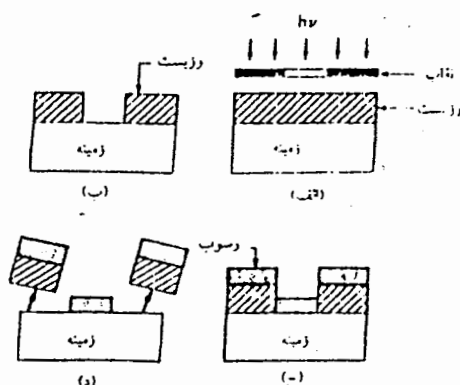
جدول ۱- نورمقاوم‌های منفی و مثبت [۲۲]



شکل (۴-۴): جزییات روند انتقال لیتوگرافی نوری [۲۲].

از نورمقاوم مثبت برای تشکیل الگوی نورمقاوم، روی زمینه شکل (۴-۵ الف و ب) استفاده می شود. لایه نازکی (مثلاً آلومینیوم) در روی نورمقاوم و زمینه رسوب می کند (شکل ۴-۵ ج)، ضخامت این لایه نازک باید کمتر از ضخامت نورمقاوم باشد، بخش هایی از لایه نازک روی نورمقاوم توسط حل گزینشی لایه نورمقاوم درحکاک مایع مناسبی زدوده می شوند بطوریکه لایه نازک واقع در روی نورمقاوم از بین می رود (شکل ۴-۵، د)، تکنیک پرتاب دارای توانایی تفکیک - بالا است و از آن بطور وسیع برای

بلورهای نیمرسانای نانو، استفاده می‌شود.



شکل (۴-۵): فرآیند پرتاب برای انتقال الگو [۴].

#### ۴-۴: لیتوگرافی‌های پرتو الکترونی، پرتو X و پرتو یونی

شکل (۴-۶) انواع گوناگون لیتوگرافی‌های پیشرفته برای ساخت نیمرسانای نانو بلور را نشان می‌دهد، در بیشتر نوردهی نیمرساناهای نانوبلور، دستگاه‌های نوری استفاده کننده آنها نور ماورای بنفش هستند (شکل ۴-۶ الف) از لیتوگرافی پرتو الکترونی که در شکل (۴-۶ ب) نشان داده شده، اصولاً برای تولید نقابهای فوتونی استفاده می‌شود، بعبارت دیگر نورمقاوم بدون هیچ نقابی مستقیماً در معرض پرتو الکترونی قرار می‌گیرد.

لیتوگرافی پرتو X در شکل (۴-۶ ج) نشان داده شده، لیتوگرافی پرتو یونی در شکل (۴-۶ د) نشان داده شده، که توان آرایش، نقش بندی و تفکیک خیلی بالایی حدود  $10\text{ nm}$  را ارائه می‌دهد. [۲۵]

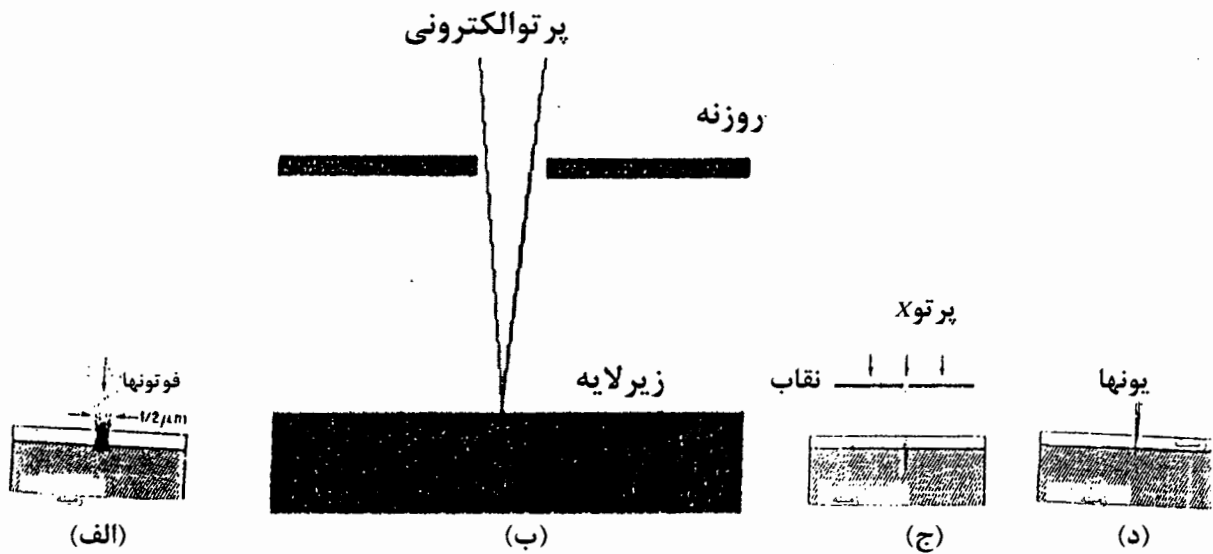
#### ۴-۴-۱: لیتوگرافی پرتو الکترونی

شکل (۴-۷) طرح دستگاه لیتوگرافی پرتو الکترونی را نشان می‌دهد. در بالای این دستگاه توپ الکترونی قرار دارد که می‌تواند پرتوی الکترونی با چگالی جریان مناسبی ایجاد کند. می‌توان از کاتد



تنگستن گرما یونی یا از لانتانیوم بوراید، برای توپ الکترونی استفاده نمود.

از عدسیهای متراکم کننده، برای کانونی کردن پرتو الکترونی استفاده می‌شود. در این دستگاه تیغه‌های فاصله انداز - پرتو ( برای این که پرتو الکترونی را روشن و خاموش کنند) و همچنین سیم پیچهایی منحرف کننده - پرتو استفاده می‌شود که با رایانه کنترل می‌شود و با آهنگهای بالا بر حسب مگاهرتز عمل می‌کنند، تا پرتوی الکترونی کانونی شده را به محلی در حوزه پوشش روی زمینه هدایت کنند ، استفاده می‌شود. در انتهای این دستگاه ، یک سکوی دقیق مکانیکی برای قرار دادن زمینه‌ای که باید نقش‌بندی شود ، استفاده می‌گردد. بدلیل آنکه قطر حوزه پوشش، خیلی کمتر از قطر زمینه است.



شکل (۴-۶): انواع روشهای لیتوگرافی پیشرفته (الف) لیتوگرافی اپتیکی (ب) لیتوگرافی

پرتو الکترونی (ج) لیتوگرافی پرتو (د) لیتوگرافی پرتویونی [۱۹].

مزایای استفاده از لیتوگرافی الکترونی عبارتست از:

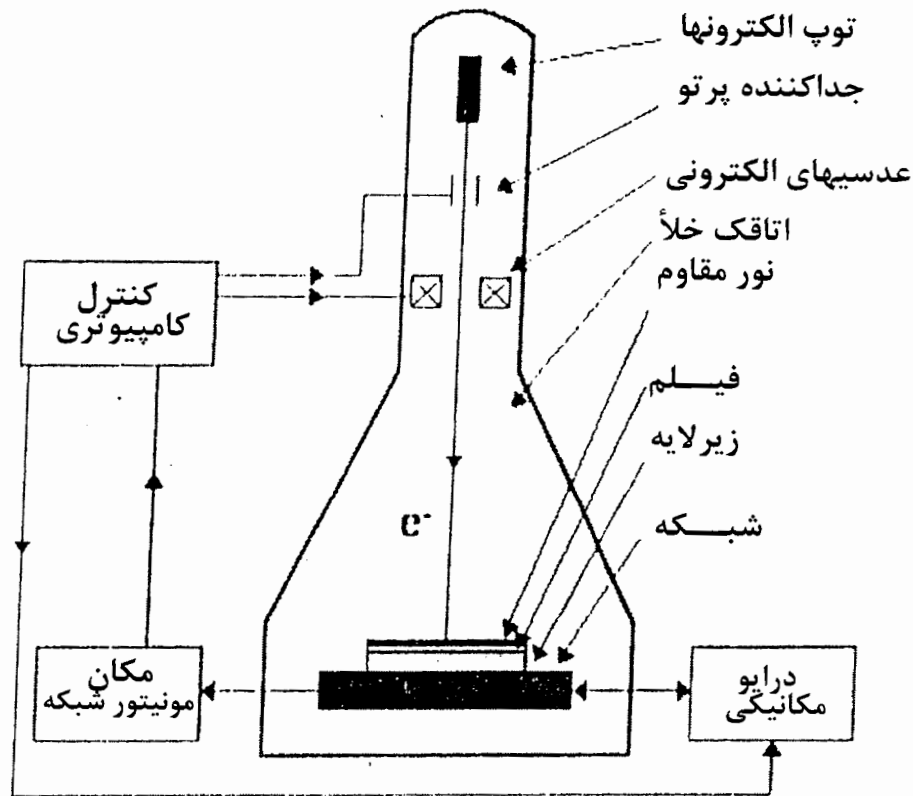
۱- ایجاد اشکال هندسی نور مقاوم میکرونی و نانویی با عملیات به شدت خودکار و به دقت کنترل شده

۲- عمق کانونی بزرگتر از آنچه که از لیتوگرافی نوری به دست می آید

۳- طرحریزی مستقیم بدون استفاده از نقاب روی پولک نیمرسانا می باشد. معایب استفاده از

ماشینهای لیتوگرافی این است که: توان عملیاتی پایینی دارند، هر ساعت حدود ۵ پولک در تفکیکی

کمتر از ۱۰۰ nm دارند.



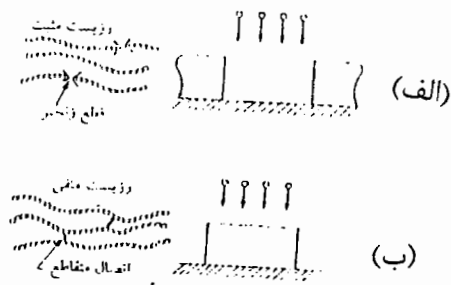
شکل (۴-۷): طرح ماشین پرتو الکترونی [۱۹].

**نورمقاوم الکترونی:** نورمقاومهای الکترونی پلیمر هستند، رفتار نورمقاوم الکترونی شبیه به

نورمقاوم نوری است، یعنی، تغییر شیمیایی یا فیزیکی در اثر تابش به نورمقاوم القا شود و این تغییر

باعث نقش بندی نورمقاوم می شود. برای نورمقاوم الکترونی مثبت، برهم کنش پلیمر- الکترون موجب

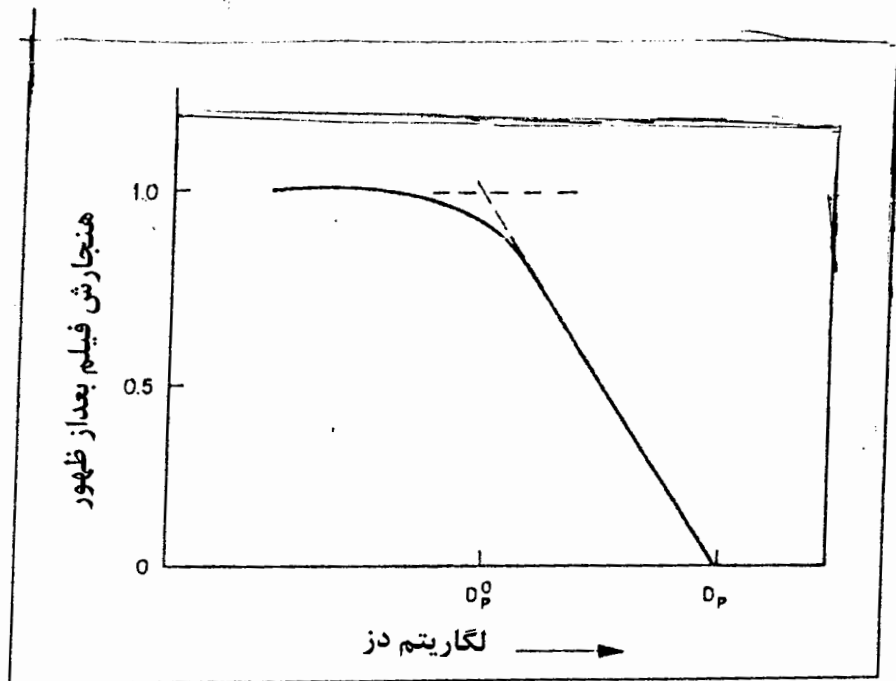
شکستن پیوندها یعنی قطع زنجیر می‌شود که در شکل (۴-۸ الف) نشان داده شده است، در نتیجه قطعات مولکولی کوتاهتری تشکیل شوند، در نتیجه وزن مولکولی در سطح تابش کاهش می‌یابد سطح تحت تابش را می‌توان در محلول ظهوری حل نمود که به ماده با وزن مولکولی کمتر حمله‌ور می‌شود. نورمقاوم‌های الکترونی مثبت متداول پلی (متیل متاکریلات) بنام PMMA و پلی (سولفان بوتان-۱) بنام Pbs هستند [۲۲] نورمقاوم‌های الکترونی مثبت دارای تفکیک‌های  $100\text{ nm}$  یا بهتر می‌باشند. مطابق شکل (۴-۸ ب) برای نورمقاوم الکترونی منفی، تابش موجب به هم پیوستن پلیمر القاشده با تابش می‌شود. در نتیجه اتصال مقاطع یک ساختار پیچیده با وزن مولکولی بالاتری از پلیمر تابش نشده به وجود می‌آورد. نورمقاوم غیر تابشی را می‌توان در محلول ظهوری حل نمود که به ماده- با وزن- مولکولی بالا حمله ور نمی‌شود. پلی (گلیسیدیل- متاکریلات- کو- استیل آکریلات) بنام CoP، یک نورمقاوم الکترونی منفی معمولی است. CoP هم نظیر نورمقاوم‌های نوری منفی، در انتهای ظهور متورم می‌شوند بطوریکه تفکیک‌ها به حدود  $100\text{ nm}$  محدود می‌شوند.



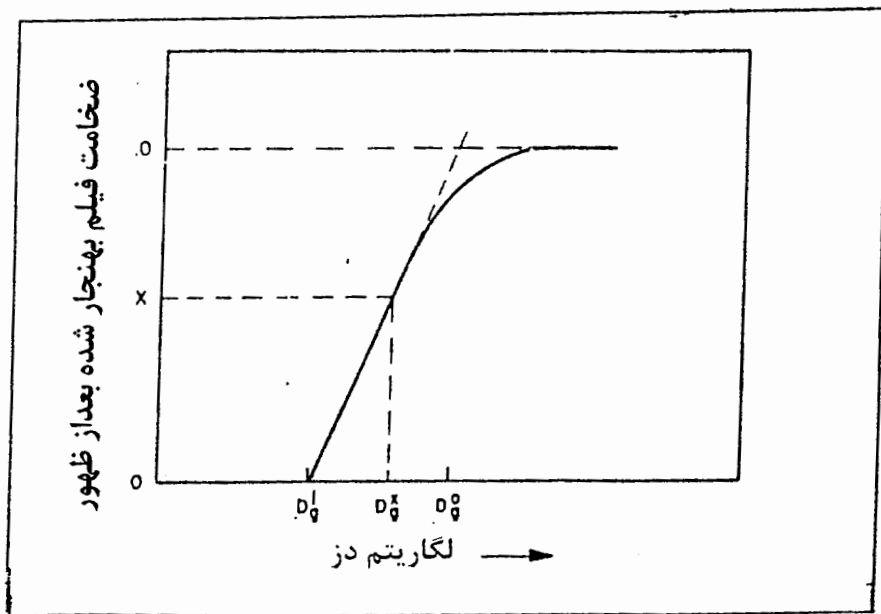
شکل (۴-۸): طرح نورمقاوم‌های مثبت و منفی مورد استفاده در لیتوگرافی پرتوی الکترونی [۴].

منحنیهای پاسخ مشخصه نورمقاوم‌های الکترونی مشابه با منحنی نورمقاوم‌های نوری هستند که

در شکل (۴-۹) نشان داده شده‌اند.



(الف)

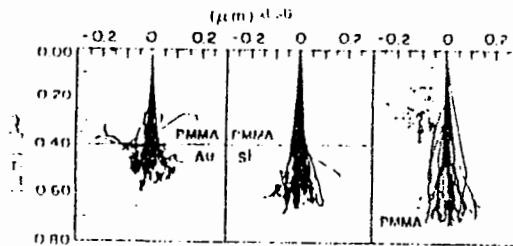


(ب)

شکل (۳-۹): منحنی مربوط به پاسخ نوردهی، الف) نورمقاوم‌های الکترونی مثبت ب) نورمقاوم‌های الکترونی منفی [۱۹].

#### ۲-۴-۴: لیتوگرافی پرتو یونی

با لیتوگرافی پرتو یونی می‌توان به تفکیک بالاتری نسبت به لیتوگرافی پرتوهای دیگر دست یافت یعنی به ابعاد حدود نانومتر، زیرا یونها دارای جرم بیشتری هستند بنابراین کمتر از الکترونها پخش می‌شوند شکل (۴-۱۰) مسیرهای شبیه سازی شده رایانه ای را برای  $50$  یون  $H^+$  کاشته شده با  $60\text{KeV}$  در داخل PMMA و زمینه‌های گوناگون نشان می‌دهد. [۲۲]. لیتوگرافی پرتو یونی هنوز در مرحله اول توسعه‌اش قرار دارد، مزیت بزرگ آن تفکیک فضایی بالا بخاطر عدم حضور اثر همجواری است. لیتوگرافی پرتو یونی وقتی اهمیت می‌یابد که کمینه ابعاد شکل به حدود  $200\text{nm}$  و پایین‌تر کاهش یابد.



شکل (۴-۱۰): مسیر یونهای  $H^+$  و  $60\text{KeV}$  که از PMMA به داخل Au, PMMA, Si رهسپار می‌شوند [۴].

#### ۳-۴-۴: لیتوگرافی پرتو X

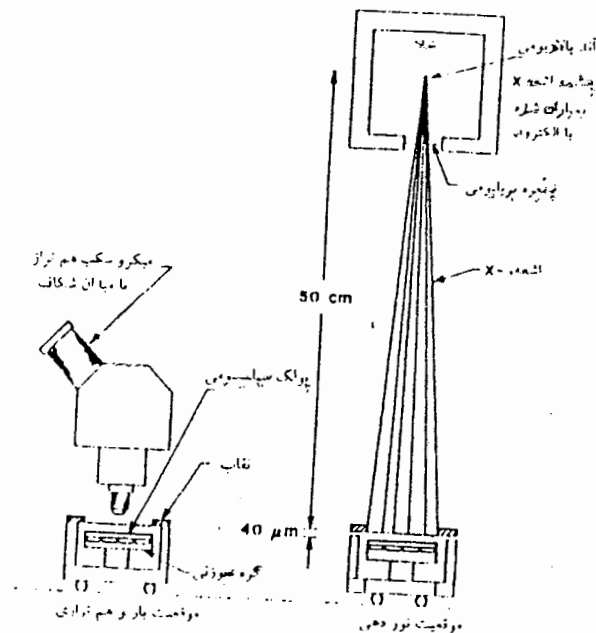
در لیتوگرافی پرتو X از روش چاپ سایه مشابه با چاپ همجواری نوری استفاده‌شود. طول موج پرتو کوچک ( $0.4$  تا  $5\text{nm}$ ) خیلی کوچکتر از طول موج نور ماورای بنفش ( $200$  تا  $400\text{nm}$ ) مورد استفاده برای لیتوگرافی نوری می‌باشد. بنابراین آثار پراش کاهش می‌یابند و می‌توان تفکیکهای بالاتری را به دست آورد.

لیتوگرافی پرتو X در مقایسه با لیتوگرافی پرتو الکترونی توان عملیاتی بالاتری دارد، زیرا در آن بر

خلاف روش نور دهی پیاپی لیتوگرافی پرتو الکترونی از نور دهی موازی استفاده می‌شود.

شکل (۴-۱۱) دستگاه پرتو X را نشان می‌دهد. پرتو الکترونی  $25\text{keV}$  و  $5\text{kw}$  ایجاد شده توسط توپ الکترونی بر روی هدف پالادیومی تابش می‌شود که از آن پرتو X با طول موج  $0.44\text{nm}$  گسیل می‌شود.

پرتو X از طریق پنجره بریلیومی داخل اتاقک پر از هلیوم به طرف نقاب و پولک رهسپار می‌شود. چون هوا جاذب قوی پرتو X است، لذا در اتاقک از هلیوم استفاده می‌شود. در سمت چپ شکل (۴-۱۱) نقاب پرتو X و پولک نیمرسانای نانو ساختار را به ما نشان می‌دهد که در ابتدا با یکدیگر هم تراز هستند، سپس مانند سمت راست شکل نشان داده شده، آنها را به محل نور دهی منتقل می‌کنند.



شکل (۴-۱۱): طرح دستگاه لیتوگرافی پرتو X [۴].

از نورمقاوم‌های الکترونی هم می‌توان به عنوان نورمقاوم‌های پرتو X استفاده کرد به دلیل اینکه

وقتی پرتو X توسط اتم جذب می‌شود، اتم با تابش یک الکترون به تراز تحریک می‌رود. اتم تحریک شده با تابش پرتو X که دارای طول موجی غیر از پرتو X است به حالت پایه اش باز می‌گردد. این پرتو X بوسیله اتم دیگری جذب می‌شود و این روند تکرار می‌شود. به خاطر اینکه تمام روندها به گسیل الکترون منجر می‌شوند، در نتیجه لایه نازک نورمقاوم تحت پرتو افکنی پرتو X با نورمقاومی معادل است که تحت تابش تعداد زیادی الکترون ثانوی ناشی از هر یک از روندها قرار داشته باشد. وقتی لایه نازک نورمقاوم تحت پرتو افکنی قرار می‌گیرد بسته به نوع نورمقاوم اتصالات متقاطع زنجیری یا گسستگی زنجیری روی خواهد داد.

مهمترین و جالبترین نورمقاوم‌های پرتو X، عبارتست از DCOPA (دی کلروپروپیل آکریلات و گلیسیدیل متا کریلات - کو- اتیل آکریلات)، زیرا دارای آستانه خیلی کوچکی است ( $10 \text{ mJ/cm}^2$ )

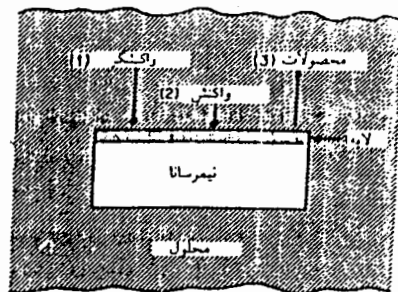
#### **۴-۴-۴: مقایسه روشهای لیتوگرافی**

هر کدام از روشهای لیتوگرافی تفکیک خاص خود را دارد. بنابراین هر روش محدودیتهای خود را دارد، آثار پراش در لیتوگرافی نوری، آثار همجواری در لیتوگرافی پرتو الکترونی پیچیدگیهای ساخت نقاب در لیتوگرافی پرتو X و مشکلات انحراف پرتو در لیتوگرافی پرتو یونی وجود دارد. روش لیتوگرافی ترکیبی برای اصلاح تفکیک و بیشینه کردن توان عملیاتی می‌تواند از هر روند لیتوگرافی مزیت منحصر به فرد ویژه ای را برگزیند.

#### **۴-۵: حکاکی شیمیایی مرطوب**

از حکاکی شیمیایی مرطوب بطور گسترده در ساخت نیمرساناهای نانو ساختار استفاده می‌شود. با شروع از پولکهای نیمرسانای نانو ساختار اره شده، از حک کننده های شیمیایی برای پرداخت و صیقلی

کردن استفاده می‌شود تا سطحی بدست آید که از نظر نوری کاملاً تخت و بدون آسیب باشد، قبل از اکسایش گرمایی یا رشد روآراستی، پولکهای نیمرسانا از نظر شیمیایی تمیز و صاف می‌شوند تا هرگونه آلودگی در اثر عوامل مختلف از بین برود، همانطور که در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده، ساز و کار حکاکی شیمیایی مرطوب شامل ۳ مرحله اساسی است: ۱- واکنشگرها به سطح واکنش کننده منتقل می‌شوند (مثلاً بوسیله پخش) ۲- واکنشهای شیمیایی در سطح روی می‌دهند. ۳- محصولات از سطح دور می‌شوند (مثلاً توسط پخش) هم اغتشاش و هم دمای محلول حک کننده بر آهنگ حک اثر می‌گذارد. در فرآوری نیمرسانای نانو ساختار بیشتر حکاکیهای شیمیایی مرطوب با تجزیه ماده در محلول یا بوسیله تبدیل ماده به ترکیب حلالی که متوالیا در محیط حک کننده تجزیه می‌شود، انجام می‌گیرد.



شکل (۴-۱۲): ساز و کار اساسی در حکاکی شیمیایی مرطوب [۴]

#### ۴-۵-۱: حکاکیهای همسانگرد

حکاکیهای شیمیایی مرطوب برای مواد نیمرسانا، بخصوص مواد نیمرسانای نانو ساختار، معمولاً توسط اکسایش انجام می‌شود که با حل اکسید توسط واکنش شیمیایی انجام می‌شود. متداولترین حکاکی مورد استفاده برای سیلیسیوم، مخلوطهای اسید نیتریک ( $HNO_3$ ) و اسید اسیتیک



(CH<sub>3</sub>CooH) و اسید هیدروفلوئوریک (HF) می‌باشند. واکنش توسط سیلیسیوم صعود کننده از

حالت اکسایش اولیه خود تا حالت اکسایش بالاتری انجام می‌شود و از رابطه زیر به دست می‌آید:



در این واکنش اکسایشی، حفره‌های (h<sup>+</sup>) لازم می‌باشند. نوع اکسید ساز اولیه در حکاکی

نیمرسانای نانو ساختار (OH<sup>-</sup>) است که توسط تجزیه آب تشکیل می‌شود:



Si<sup>2+</sup> در معادله (3-4) با OH<sup>-</sup> ترکیب می‌شود تا رابطه زیر بدست آید:



که متعاقباً هیدروژن آزاد می‌شود تا SiO<sub>2</sub> تشکیل شود:



از اسید هیدروفلوئوریک HF استفاده می‌شود تا SiO<sub>2</sub> حل گردد. واکنش عبارتست از:



که در آن H<sub>2</sub> SiF<sub>6</sub> در آب قابل حل است.

حفره‌های موجود در معادله (3-4) توسط روند خود-کاتالیزوری ایجاد می‌شود که به صورت زیر

توصیف می‌شود در حضور HNO<sub>2</sub> در محلول HNO<sub>3</sub> داریم:



حفره‌های موجود در معادله (3-4) توسط روند خود کاتالیزوری وارد واکنش با HNO<sub>3</sub> می‌شود.

بهمین ترتیب محصولات با هم واکنش می‌دهند و واکنش کلی عبارتست از:



از آب به عنوان رقیق کننده این حکاکی استفاده می شود، اما اسید سیتریک بر آب ترجیح دارد، زیرا استفاده از آن به تجزیه کمتر اسید نیتریک، منجر می شود، بنابراین تراکم بیشتر به نوع تجزیه نشده منجر می شود.

حکاکی لایه های نازک فلزی و عایقها معمولاً با همان مواد شیمیایی انجام می شود که این مواد به شکل توده را حل می کند و مستلزم تبدیل آنها به نمکهای قابل حل با کمپلکسها می باشند. بطور کلی نانو بلورها، خیلی سریعتر از مواد کپه ای آنها حک می شوند، آهنگ حک برای لایه های نازک با ساختار ریز ضعیف با تنش ایجاد شده، یا منحرف از فرمول اسمی شیمیایی. یا در معرض تابش قرار گرفته بالاتر می باشند. فهرست برخی از حکاکهای مفید برای لایه های نازک فلزی و عایق (نانو بلورها) در جدول ۲، ارائه شده است.

### Substrate Cleaning

- fuming  $\text{HNO}_3$
- $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  (piranya)
- RCA-process
  - $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2$  (metallic)
  - $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2$  (organic)

جدول ۲- حکاکهایی برای عایقها و رساناهای نانو بلور [۱۹].

### ۴-۵-۲: حکاکی وابسته به جهت گیری

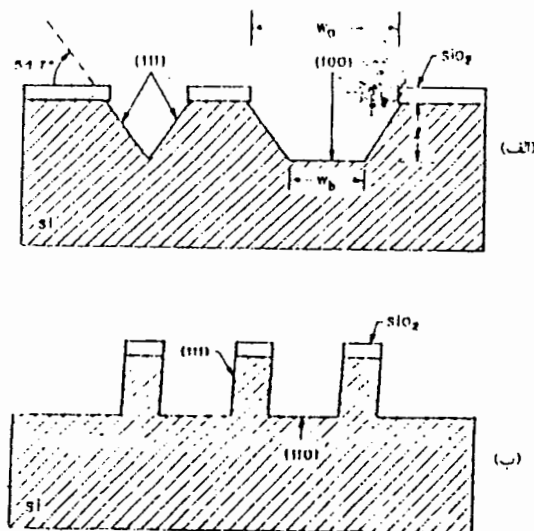
با توجه به اینکه، بعضی از حکاکها، صفحه بلوری معینی از نیمرساناهای نانوساختار را خیلی سریعتر از صفحات دیگر در خود حل میکنند؛ این امر به حکاکی وابسته به جهت گیری منجر می شود. حک

وابسته به جهت گیری که به طور متداول برای سیلیسیوم مورد استفاده قرار میگیرد شامل مخلوطی از KOH در آب و الکل ایزوپروپیل است.

حکاکیهای وابسته به جهت گیری در سیلیسیوم جهت گیری شده در  $\langle 100 \rangle$  از طریق نقاب اکسید سیلیسیوم نقش بندی شده، شیارهای V شکل دقیقی را بوجود می آورد، با توجه به شکل (۴-۱۳) در سمت چپ، لبه های صفحات (۱۱۱) می باشند که با سطح (۱۰۰) زاویه  $54.7^\circ$  می سازند. اگر پنجره در نقاب به اندازه کافی بزرگ باشد یا اگر زمان حکاکی کوتاه باشد، با توجه به سمت راست در شکل (۴-۱۳ الف) شیار V شکلی تشکیل می شود. پهنای سطح پایینی با توجه به رابطه زیر تعیین می شود:

$$W_b = W_0 - 2L \cot 54.7^\circ = W_0 - \sqrt{2}L \quad (4-11)$$

که در آن  $W_0$  پهنای پنجره در سطح پولک است و  $L$  عمق حک شده می باشد اگر از سیلیسیوم جهت گیری شده در  $\langle 110 \rangle$  استفاده شود، با توجه به شکل (۴-۱۳ ب) شیارها اساساً با دیوارهای مستقیم تشکیل می شود که ابعاد صفحه های آن (۱۱۱) می باشند. به منظور ساختن ساختارهای قطعه ای با طولهای شکلی نانو ساختاری از وابستگی شدید آهنگ حک به جهت گیری استفاده می کنیم.



(شکل ۴-۱۳): حکاکی وابسته به جهت گیری (الف) از طریق الگوهای پنجره روی سیلیسیوم جهت گیری شده  $\langle 100 \rangle$  (ب) از طریق الگوهای پنجره بر روی سیلیسیوم جهت گیری شده  $\langle 110 \rangle$  [۴].

## ۴-۶: حکاکی خشک

شکل (۴-۱۴) مراحل حکاکی خشک را به ما نشان می‌دهد، همچنین شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶)

دو مکانیزم مربوط به حکاکی خشک را به ما نشان می‌دهد.

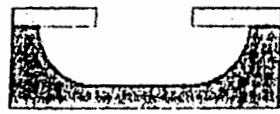
در حکاکی خشک عملیات انتقال الگو، عبارت دیگر الگوی نورمقاومی که توسط روند لیتوگرافی تعیین می‌شود به صورت نقاب برای حکاکی، لایه زیرین خود رفتار می‌کند. در حکاکی خشک بیشتر مواد لایه‌ها مانند  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Si}_3\text{N}_4$  و فلزات رسوب شده غیر بلوری یا لایه‌های نازک چند بلوری می‌باشند که در شکل (۴-۱۷ الف) نشان داده شد، اگر آنها در حکاکهای شیمیایی مرطوبی حک شوند، با توجه به شکل (۴-۱۷ ب)، آهنگ حک بطور کلی همسانگرد است (یعنی آهنگهای حک عرضی و عمودی یکسان است). اگر  $h$  ضخامت ماده لایه و  $L$  فاصله عرضی حک شده در زیر نقاب نورمقاوم باشد. درجه ناهمسانگردی  $A$  با توجه به رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۲].

$$A_F = 1 - \frac{L}{h_f} - 1 - \frac{V_t t}{V_v t} = 1 - \frac{V_t}{V_v} \quad (4-12)$$

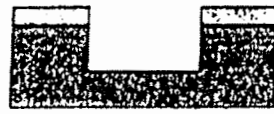
که در آن  $t$  زمان است و  $V_t$  و  $V_v$  به ترتیب آهنگهای حک عرضی و عمودی هستند برای حکاکی همسانگرد  $V_t = V_v$  و  $A_F = 0$  می‌باشد.

مهمترین زیان، ناشی از حکاکی شیمیایی مرطوب، برای انتقال الگو از دست رفتن لایه زیر نقاب است، که به کاهش تفکیک در الگوی حک شده منجر می‌شود. در عمل برای حکاکی همسانگرد ضخامت لایه باید حدود یک سوم یا کمتر از یک سوم تفکیک مورد لزوم باشد. در صورتیکه الگوهای با تفکیکهای خیلی کوچکتر در حد نانومتر لازم باشد، باید از حکاکی ناهمسانگرد (یعنی  $0 < A_F < 1$ ) استفاده شود. در عمل مقدار  $A_F$  نزدیک به واحد انتخاب می‌شود شکل (۴-۱۷ ج) حالت حدی را نشان می‌دهد که در آن  $A_F = 1$  متناظر با  $L = 0$  یا  $V_t = 0$  می‌باشد.

سطح مقطع

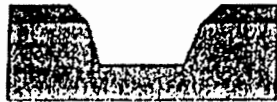


همسانگرد

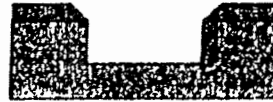


غیر همسانگرد

نقاب



غیر منتخب



منتخب

نقاب سازی میکرونی



توقف سونش

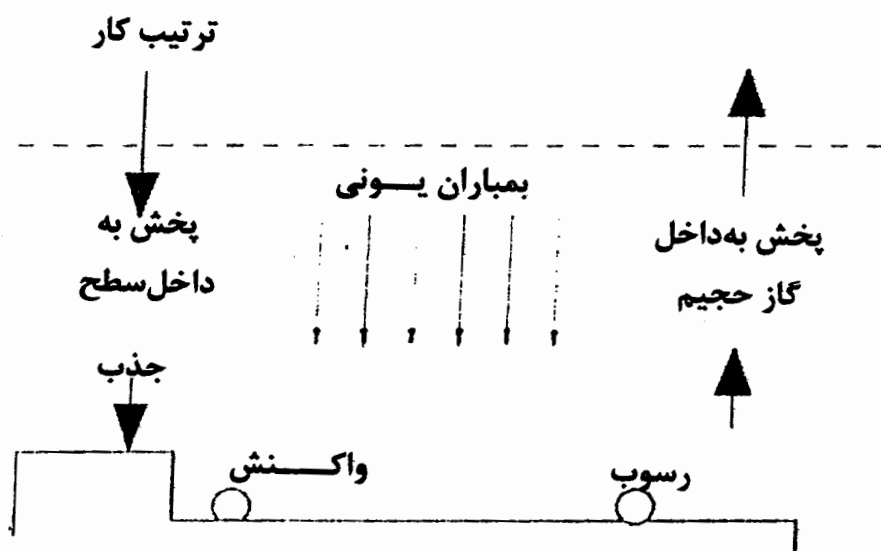
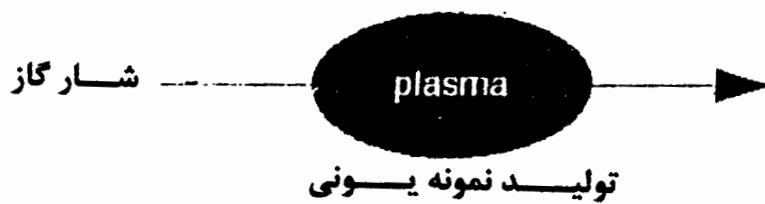


غیر منتخب

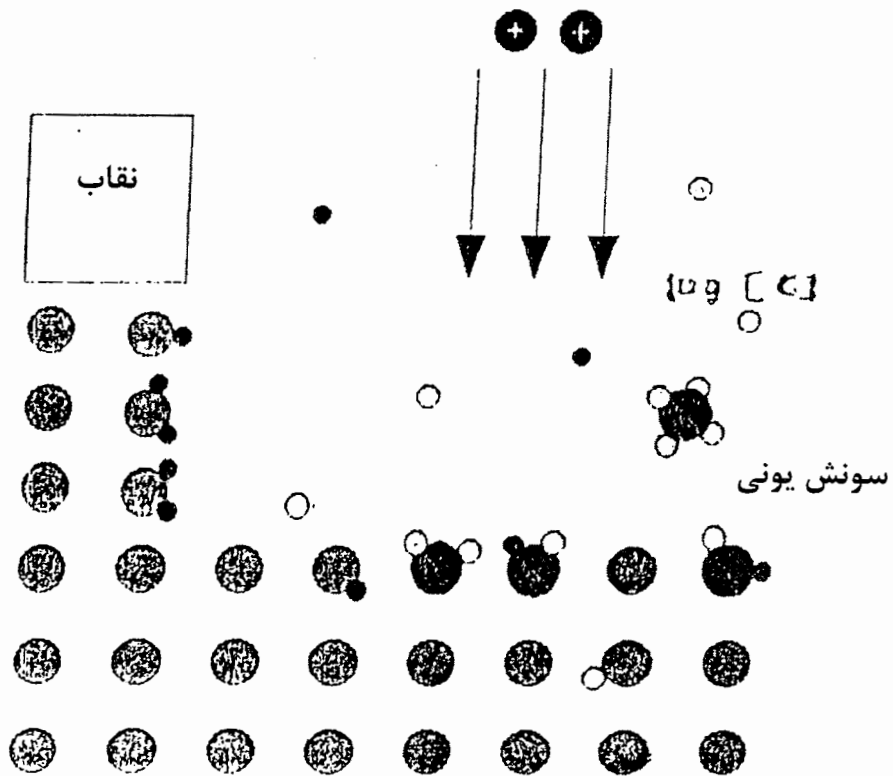


منتخب

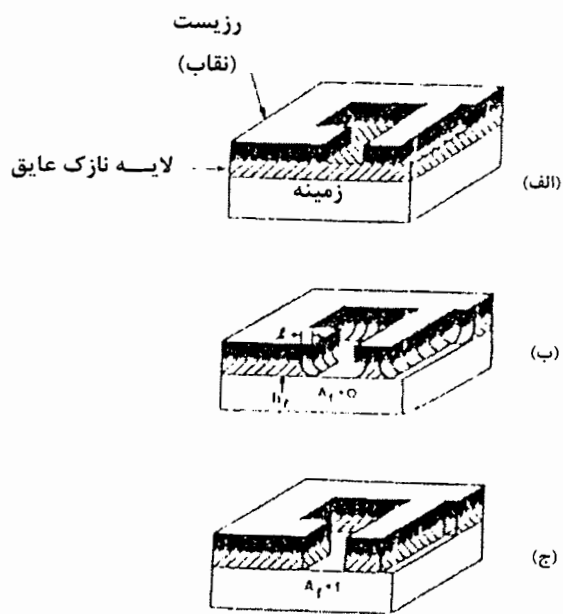
شکل (۴-۱۴): مراحل حکاکی خشک [۱۹].



شکل (۴-۱۵): مکانیزم ۱ مربوط به حکاکی خشک [۱۹].



شکل (۴-۱۶): مکانیزم ۲ مربوط به حکاکی خشک [۱۹].



شکل (۴-۱۷): مقایسه حکاکی شیمیایی مرطوب و حکاکی خشک برای انتقال الگو [۴]

#### ۴-۶-۱: تکنیکهای حکاکی به کمک پلاسما

وقتی یک میدان الکتریکی به گازی اعمال می‌شود اگر این میدان الکتریکی برای شکستن و یونیزه کردن گاز دارای شدت کافی باشد، پلاسمای گازی ایجاد می‌شود. پلاسمای گازی که بطور کامل یا جزئی یونیزه شده، مرکب از یونها، الکترونها و نوترونها می‌باشد. پلاسما با الکترونهای آزاد شروع می‌شود که با روشهایی همچون گسیل میدان از الکتروود با بایاس منفی رها می‌گردند. در اثر میدان الکتریکی، الکترونها انرژی جنبشی بدست می‌آورند.

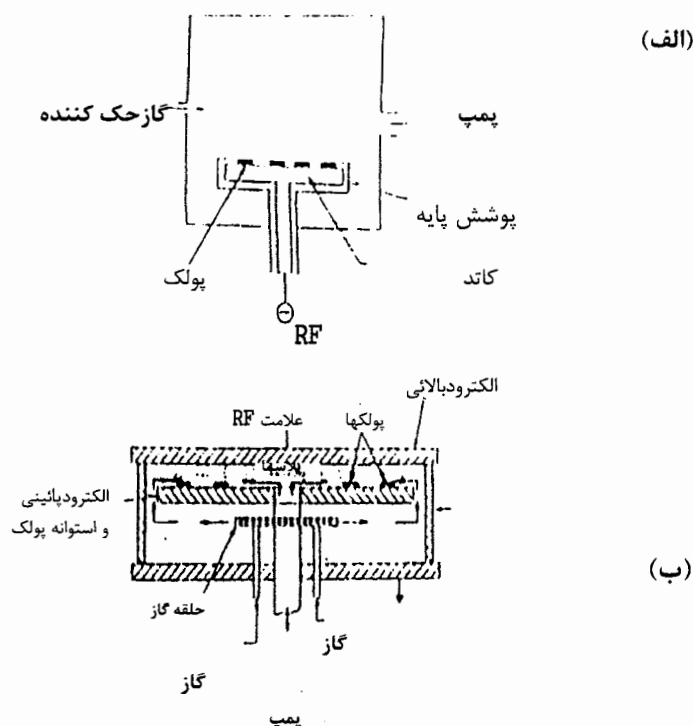
الکترونها در اثر حرکتشان با مولکولهای گاز برخورد کرده و سپس انرژی خود را از دست می‌دهند. انرژی منتقل شده در برخوردها موجب یونی شدن مولکولهای گاز می‌شوند (یعنی الکترون آزاد می‌کنند)، مجدداً الکترونهای آزاد شده از میدان انرژی جنبشی بدست می‌آورد و این روند ادامه می‌یابد. در نتیجه وقتی ولتاژ اعمال شده از پتانسیل شکست بزرگتر باشد، پلاسمای نگهداشته ای در سرتاسر اتاقک واکنش تشکیل می‌شود.

دو دستگاه حکاکی خشک در شکل‌های (۴-۱۸) نشان داده شده، که شکل (۴-۱۸ الف) دستگاه حکاکی کندو پاش است که از یونهای گاز نادر با انرژی نسبتاً بالا (بالتر از  $50.0\text{ eV}$ ) نظیر یونهای گاز آرگون ( $\text{Ar}^+$ ) استفاده می‌کنند. این روند اساساً معکوس رسوب کندوپاش است. پولکی که باید حک گردد (هدف هم نامیده می‌شود) روی الکتروود متصل به توان الکتریکی گذاشته می‌شود، و یونهای آرگون به منظور بمباران سطح هدف، بوسیله میدان اعمال شده شتابدار می‌گردند. از طریق انتقال اندازه حرکت، اتمهای نزدیک به سطح فرار و زدوده می‌شوند یا حک می‌شوند.

راستای میدان الکتریکی بر سطح هدف عمود است، بطوریکه تحت فشار عملیات، یونهای آرگون بطور غالب، عمود بر سطح وارد می‌شوند. اصولاً روی دیوارهای کناری شکل‌های حک شده، هیچ یون بمباران کننده وجود ندارد. بنابراین، آهنگ حک عرضی خیلی کمتر از حک عمودی است و در نتیجه

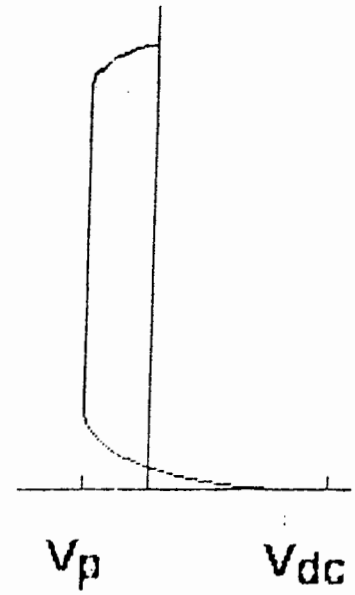
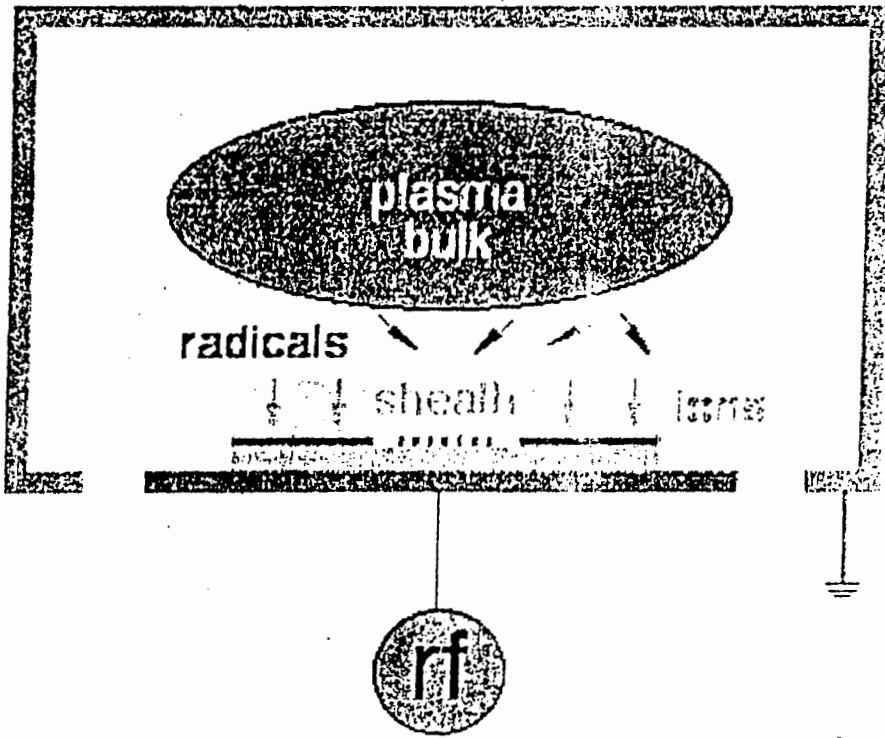


درجه بالایی از ناهمسانگردی را می‌توان به دست آورد. اما بزرگترین زیانی که در کند و پاش وجود دارد برگزینندگی ضعیف، است، بدین معنی که آهنگهای حک برای بیشتر موارد خیلی نزدیک بهم هستند، و نمی‌توانیم فقط یک لایه را حک کنیم و در ماده زیر توقف کنیم. شکل (۴-۱۸ ب) دستگاه حکاکی- پلاسما با تیغه موازی را نشان می‌دهد. پلاسما در بین دو الکتروود نزدیک به هم محصور می‌باشد. گازهای مولکولی محتوی یک یا تعداد بیشتری اتم هالوژنها مثل از طریق حلقه گاز تغذیه می‌شوند. فشار نوعی عملیات نسبتاً بالا می‌باشد.



شکل (۴-۱۸): (الف) دستگاه حکاکی کندوپاش (ب) دستگاه حکاکی پلاسما تیغه- موازی [۴].

در شکل (۴-۱۹) نیز دستگاه دیگری به نام RIE را نشان می‌دهد که شبیه به حکاکی پلاسماست، اما بجای پلاسما گاز نایاب از پلاسما گاز مولکولی استفاده می‌شود. در شرایط مناسب هم RIE و هم حکاکی پلاسما میتواند برگزینندگی بالا و درجه ناهمسانگردی بالایی ارائه دهد. شکل (۴-۱۹) کار دستگاه RIE را نشان دهد.



شکل (۴-۱۹): شکل دستگاه مربوط به RIE [۱۹].

## فصل پنجم

### خواص اپتیکی نیمرساناهای نانوساختار

#### مقدمه:

قبل از آنکه خواص اپتیکی نیمرساناهای نانوساختار را مورد بررسی قرار دهیم ابتدا نیمرساناهای شبه یک بعدی و صفر بعدی سیمهای کوانتومی<sup>۱</sup> و نقاط کوانتومی<sup>۲</sup> را معرفی می‌کنیم. اثرهایی که در چاههای پتانسیل مشاهده می‌شود باعث می‌شود که علاقه و توجه محققان به نیمرساناهایی با ابعاد بسیار کوچک و با خواص محبس کوانتومی بیشتر جلب شود. سیمهای کوانتومی برای ساختارهایی که در آنها حرکت زوج الکترون حفره در دو بعد فضایی محدود شده، به کار می‌رود. در نتیجه سیمهای کوانتومی مواد شبه یک بعدی را نشان می‌دهند. نقاط کوانتومی و یا جعبه کوانتومی<sup>۳</sup> مربوط به زیر ساختارهای نیمرسانایی است که حرکت زوج الکترون حفره ایجاد شده توسط تحریک لیزری را در تمام جهات در فضا در سه بعد محبوس می‌کنند. برای تولید سیمهای کوانتومی کوشش شده است که نوارهای نازک مواد چاه کوانتومی را مورد حکاکی قرار دهند. همچنین با استفاده از روشهای غیر مسقیم سعی شده است که حرکت حاملها را به یک بعد منحصر کنند. تعدادی از آزمایشگاهها نقاط کوانتومی را با روشهای مختلف، از قبیل: تعلیق کلئیدی ذرات نیمرسانا، لیتوگرافی نیمرسانا توسط پرتو الکترون و حبس بلورکهای نیمرسانا در زمینه‌های شیشه‌ای می‌سازند.

- 
- 1- *Quantum Wires*
  - 2- *Quantum Dots*
  - 3- *Quantum Boxes*

## ۵-۱: چکالی حالتها در نیمرساناهای یک بعدی

ساختار سیم را در راستای محور  $y$  در نظر گرفته، در نتیجه حرکت در راستای دو محور  $x$  و  $z$  کوانتیده خواهند بود. بنابراین ابعاد نیمرسانا در راستای محورهای  $x$  و  $z$  می باشد. که به ترتیب  $L_x$  و  $L_z$  در نظر می گیریم و ساختار در راستای محور  $y$  را تابعی نهایت فرض می کنیم، با توجه به معادله شرودینگر برای ذره منفرد (یا حاملهای آزاد) در این مورد داریم:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(x,y,z) = E \Psi(x,y,z) \quad (1-5)$$

و

$$\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \right) \Psi(x,y,z) = E \Psi(x,y,z) \quad (2-5)$$

که در آن  $m$  جرم موثر ذره است که می تواند یک الکترون و یا یک حفره باشد. با جدا کردن تابع موج و انرژی برای حرکت در راستای  $x$  و  $y$  و  $z$  معادله زیر را بدست می آید.

$$\Psi(x,y,z) = X(x) Y(y) Z(z) \quad (3-5)$$

از طرفی

$$E = E_x + E_y + E_z \quad (4-5)$$

جانشینی در معادله (۲-۵) و با تفکیک متغیرها، ۳ معادله حرکت در راستای  $x$  و  $y$  و  $z$  خواهیم

داشت:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} = E_x X(x) \quad (5-5)$$

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 Y(y)}{dy^2} = E_y Y(y) \quad (6-5)$$

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = E_z Z(z) \quad (7-5)$$

حرکت در راستای  $x$  و  $z$  کوانتیده بوده و توابع موج از شرایط چاه پتانسیل نامتناهی پیروی می‌کند. یعنی  $L_x$  و  $L_z$  در مرزها صفر می‌شوند. جوابهای معادله‌های (۵-۵) و (۷-۵)، جوابهای ساده را بدست می‌دهد ذره در درون یک بعد است. در صورتیکه معادله (۶-۵) یک نوار انرژی سهمی وار در راستای محور  $y$  می‌دهد. جوابهای معادلات بالا به صورت زیر است:

$$E_x = E_{j_x} = \frac{\hbar^2}{2m} \left[ \frac{j_x \pi}{L_x} \right]^2 \quad j_x = 1, 2, 3, \dots \quad (8-5)$$

$$E_z = E_{j_z} = \frac{\hbar^2}{2m} \left[ \frac{j_z \pi}{L_z} \right]^2 \quad j_z = 1, 2, 3, \dots \quad (9-5)$$

و

$$E_y = \frac{\hbar^2}{2m} k_y^2 \quad (10-5)$$

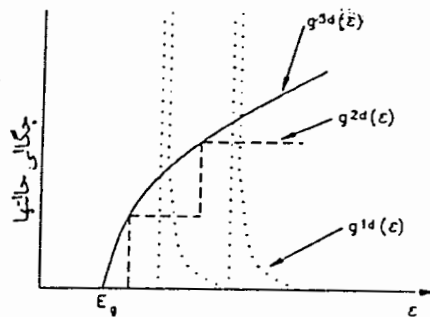
پس انرژی کل به صورت زیر خواهد بود:

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} \left[ \frac{j_x \pi}{L_x} \right]^2 + \frac{\hbar^2}{2m} \left[ \frac{j_z \pi}{L_z} \right]^2 + \frac{\hbar^2}{2m} k_y^2 \quad (11-5)$$

بدینوسیله رابطه بالا، ترازهای انرژی  $E_x$  و  $E_z$  کوانتیده بوده و  $E_y$  پیوسته است.

چگالی حالتها برای سیم کوانتومی در نمودار شکل (۱-۵) نشان داده شده است. چگالی حالتهای دو

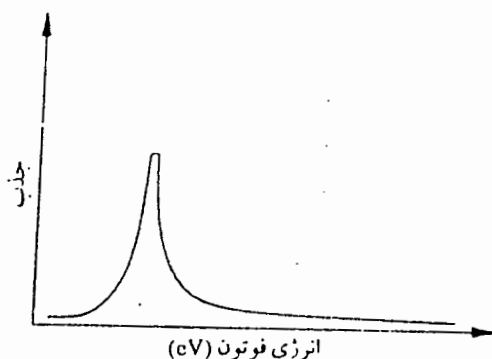
و سه بعدی به ترتیب توسط منحنی خط چین و منحنی خط پر نشان داده شده اند.



شکل (۱-۵): چگالی حالتهای مشترک در یک بعد (منحنی نقطه چین) و مقایسه آن با چگالی حالتهای دو بعدی (منحنی خط چین) و سه بعدی (منحنی خط پر) [۲].

## ۵-۲: جذب اپتیکی (نوری) در سیمهای کوانتومی

اخیرا طیف جذبی یک سیم کوانتومی شبه یک بعدی محاسبه شده است. بدلیل اینکه، نتایج بر حسب توابع مخصوص بیان شده‌اند (توابع همشار فوق هندسی هاپرژومیتریک و ویتاکو) لذا نتایج نهایی آورده نمی‌شوند. در شکل (۵-۲) یک طیف جذبی محاسبه شده برای یک مدل دو نواری منفرد یک تراز محبس کوانتومی نشان داده شده است. این نمودار نمایانگر این است که فقط یک قله تشدید اکسیتونی قوی قابل رؤیت است. اندرکنش قوی کولنی قدرت نوسانگر را به بیرون از حالت‌های پیوسته و درون قله‌های تشدید اکسیتون منتقل می‌کند. عملا تمام قدرت نوسانگر در اکسیتون حالت پایه جمع می‌شود [۲].



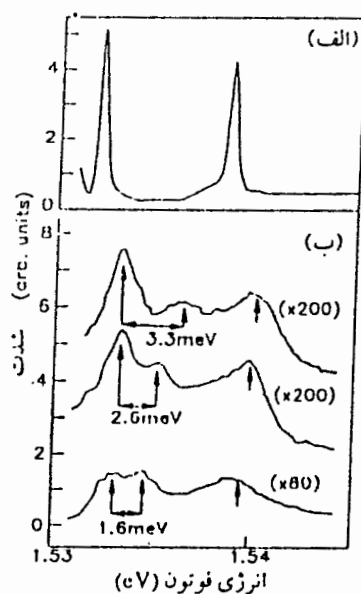
شکل (۵-۲) طیف جذبی اکسیتون محاسبه شده برای یک سیم کوانتومی شبه یک بعدی [۲].

نتایج تجربی به دست آمده برای سیمهای کوانتومی GaAs در شکل (۵-۳) نشان داده شده‌اند [۲]. طیف برانگیختگی فوتو لومینسانس به دست آمده به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی (برانگیختگی) اصولا مقدار جذب نمونه را نشان می‌دهد، بدلیل اینکه بطور مستقیم با چگالی حامل‌های برانگیخته متناسب است.

با مقایسه طیفهای سیم کوانتومی برای پهناهای مختلف سیم، با طیف ساختار چاههای کوانتومی

مرجع، یک جابجایی به طرف طول موجهای آبی مربوط به گذار اکسیتون حفره سنگین که وابسته به ضخامت ساختار سیم کوانتومی است در سیم نشان می دهد. علاوه بر این قله های تشدید در سیمها به دو قله شکافته می شوند که متناظر با دو نوار با پایین ترین انرژی هستند. این شکافتگی با کاهش پهناي سیم افزایش پیدا می کند.

بطور کلی در سیمهای کوانتومی مشکل است که جابجایی قله جذب را مستقیما به انرژی محبس کوانتومی مربوط ساخت، فقط با بررسی دقیقتر و کاملتر این اثرها می توان نظریه ها و آزمایشها را مقایسه و جابه جایی به طرف قرمز یا آبی را توجیه کرد.



شکل (۳-۵): طیفهای برانگیخته فوتولومینسانس در ۵K برای GaAs نانو ساختار (الف) چاه کوانتومی و (ب) سیمهای کوانتومی، با ضخامت مختلف  $L_x$  و  $L_y$  به ترتیب برای طیفهای قسمت (ب) از بالا به پایین برابر ۶nm، ۷nm، ۱۰nm است طیفها برای راحتی به طرف بالا جابه جا شده اند [۲].

### ۳-۵: چگالی حالتها در نیم رساناهای صفر بعدی (با بعد تقریباً صفر)

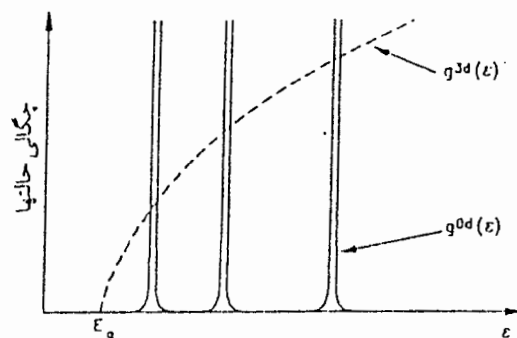
به ساختار نیم رساناهای شبه صفر بعدی که زوجهای الکترون و حفره را در هر سه بعد محبوس می کند

معمولاً « نقاط کوانتومی » یا نانو ساختار اطلاق می‌شود. نقاط کوانتومی را به شکل کروی به شعاع R در نظر می‌گیرند. شعاع یک نقطه کوانتومی معمولاً در حدود چند نانومتر است که با شعاع بوهز اکسیتون قابل قیاس است. به عنوان مثال، می‌توان بلور کهایی از نیمرسانا را در شبکه بلوری شیشه و ذرات نیمرسانا را در داخل محلول کلئید نام برد.

چگالی حالتها برای نقاط کوانتومی را می‌توان به این که حرکت ذره در هر سه بعد X و Y و Z کوانتیده است به دست آورد. اگر فرض کنیم  $r_x$ ,  $r_y$ ,  $r_z$  اعداد کوانتومی برای انرژیهای کوانتیده در سه جهت مربوط باشند و داشته باشیم  $r_x, r_y, r_z, \dots, r_3$  و ۲ و ۱ چگالی حالتها مشترک به صورت زیر درمی‌آید:

$$g^{od}(E) = 2 \sum \delta[E - E_g - E_{j_x, j_y, j_z}^c - E_{j_x, j_y, j_z}^h] \quad (12-5)$$

ضریب ۲ به سبب تبهگنی اسپین منظور شده است. معادله (۱۲-۵) بیان می‌کند که چگالی حالتها در صفر بعد یک سری از توابع  $\delta$  خواهند بود که متناظر با ترازهای انرژی کوانتیده هستند. به علت محبس کوانتومی قلههای تابع  $\delta$  در طرف انرژی زیاد لبه نوار انرژی توده نیمرسانا ظاهر می‌شوند. در نتیجه جذب حاملهای آزاد در نقاط کوانتومی، مستقیماً به چگالی حالتها مشترک مربوط است، که از قلههای تیزی در طرف انرژی زیاد گاف انرژی توده نیمرسانا تشکیل می‌شود.



شکل (۴-۵): نمایش طرحواره چگالی حاملهای صفر بعدی [۲].



## ۴-۵: جذب نوری در نقاط کوانتومی

برای محاسبه جذب نوری در نیمرساناهای شبه صفر - بعدی یا نیمرساناهای نانو ساختار فرض می‌کنیم بلورکهای کروی نیمرسانا با شعاع  $R$  و ثابت دی‌الکتریک زمینه را که در ماده دیگری با ثابت دی‌الکتریک زمینه  $\epsilon_1$  مدفون شده است، مانند مدلی در نظر می‌گیریم که در آن بلورکهای نیمرسانا درون شیشه قرار دارند.

برای بلورکهای با شعاع  $R$  در محدوده  $R \ll a_B$  که در آن  $\alpha$  ثابت شبکه نیمرسانا و  $a_B$  شعاع اکسیتون بوهر هستند خواص الکترون منفرد توسط شبکه تناوبی تعیین می‌شود. در نتیجه ساختار نقاط کوانتومی دارای یک اندازه ماکروسکوپی در مقایسه با ثابت شبکه بلوری بوده اما در قیاس با سایر اندازه‌های ماکروسکوپی کوچک است. در چنین بلورکهای میکرونی که عموماً به عنوان ساختار مزوسکوپی<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند تقریب جرم موثر به کار برده می‌شود. بنابراین جرم موثر الکترونها و حفره‌ها را به ترتیب  $m_e$  و  $m_h$  فرض می‌کنیم. زوجهای الکترون - حفره برانگیخته نوری تحت تاثیر اندازه کوچک بلورکهای میکرونی قرار می‌گیرند که منجر به اثر محبس کوانتومی می‌شود.

برای حل مساله جعبه‌های کوانتومی با پتانسیل محبس نامتناهی معادله زیر را خواهیم داشت:

$$E_y = \frac{\hbar^2}{2m} \left[ j_y \frac{\pi}{L_y} \right]^2 \quad j_y = 1, 2, 3, \dots \quad (13-5)$$

که به انرژی کل به صورت زیر منجر می‌شود:

$$E = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \left[ \left( \frac{j_x}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{j_y}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{j_z}{L_z} \right)^2 \right] \quad (14-5)$$

برای مورد نقاط کوانتومی کروی که به لحاظ تجربی بیشتر اتفاق می‌افتد، معادلات شرودینگر ذره

منفرد برای الکترون و حفره در غیاب اندرکنش کولنی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \delta_i(\mathbf{r}) = E_i \delta_i(\mathbf{r}) \quad (15-5)$$

شرط مرزی برای محبس کوانتومی ایده آل ایجاب می‌کند که:

$$\delta_i(r) = 0 \quad \text{برای } r=R \quad (16-5)$$

باشد جواب معادله شرودینگر (5-15) با استفاده از معادله (5-16) به صورت زیر است:

تابع موج الکترون در نقطه کوانتومی کروی با پتانسیل محبس کوانتومی

$$\delta_i = \sqrt{\frac{1}{4\pi R^3}} \frac{j_L[\alpha_{nL} r/R]}{j_L + 1(\alpha_{nL})} Y_l^m(\theta, \phi) \quad (17-5)$$

که در آن  $L$  و  $l$  و  $m$  مرتبه تابع بسل کروی است،  $Y_l^m(\theta, \phi)$  هماهنگهای کروی،  $\alpha_{nL}$  ریشه

$n$  امین مرتبه تابع بسل هستند. اعداد کوانتومی برای ذرات،  $n$ ،  $l$ ،  $m$  هستند. با جایگذاری

معادله (5-17) در معادله (5-15) مقادیر ویژه گسسته را به صورت زیر بدست می‌آید:

ترازهای انرژی الکترون در نقطه کوانتومی کروی پتانسیل محبس کوانتومی

$$E_i^e = \frac{\hbar^2}{2m_i} (\frac{\alpha_{nL}}{r})^2 \quad (18-5)$$

پایین ترین حالت‌های انرژی آنهایی هستند که دارای کمترین مقدار  $\alpha_{nL}$  باشند. با در نظر گرفتن صفر

انرژی در بالای نوار ظرفیت، ترازهای انرژی الکترون و حفره توسط رابطه زیر داده می‌شوند. ترازهای

انرژی الکترون حفره با بکار بردن معادله (5-18) به صورت زیر بدست می‌آیند:

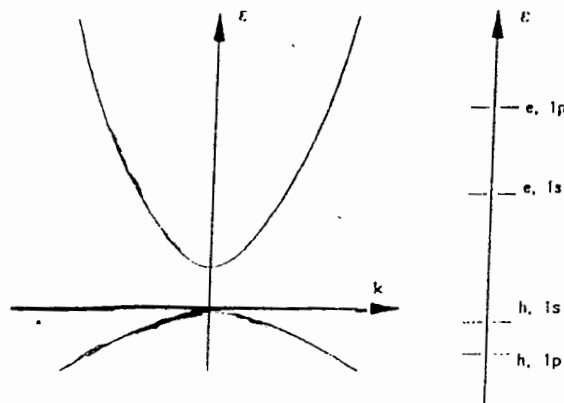
$$E^e = E_g + \frac{\hbar^2}{2m_e} \left[ \frac{\alpha_{ne} L_e}{R} \right]^2 \quad (19-5)$$

$$E^h = - \frac{\hbar^2}{2m_h} \left[ \frac{\alpha_{nh} L_h}{R} \right]^2 \quad (20-5)$$

پایین ترین دو تراز انرژی در شکل (5-5) بطور طرحواره ترسیم شده اند. از این شکل درمی‌یابیم که

ساختار نواری معمول برای حالت سه بعدی بطور اساسی تغییر شکل داده و به صورت یک سری از

حالت‌های کوانتومی ذره منفرد درآمده است.



شکل (۵-۵): نمایش طرحواره‌ای طیف انرژی ذره منفرد در نیمرسانای کپه ای (چپ) و در نقاط کوانتومی کوچک (راست) [۲].

طیف ذره منفرد متناظر با طیف جذبی نوری نخواهد بود، چون اثرهای کولنی الکترون - حفره منظور نشده اند. معادله شرودینگر برای یک زوج الکترون حفره به صورت زیر نوشته می شود.

$$\left[ \frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla_e^2 - \frac{\hbar^2}{2m_h} \nabla_h^2 + V_c \right] \phi(r) = E\phi(r) \quad (21-5)$$

این معادله دارای شرط مرزی  $\phi(r=R) = 0$  است.  $V_c$  پتانسیل کولنی است. معادله

شرودینگر (۲۱-۵) را می توان با شرایط مرزی ذکر شده در غیاب اندرکنش کولنی به صورت تحلیلی حل

کرد. که نتیجه به صورت زیر بدست می آید:

$$E = E^e + E^h = E_g + \frac{\hbar^2}{2m_e} \left[ \frac{\alpha_{ne} L_e}{R} \right]^2 + \frac{\hbar^2}{2m_h} \left[ \frac{\alpha_{nh} L_h}{R} \right]^2 \quad (22-5)$$

و

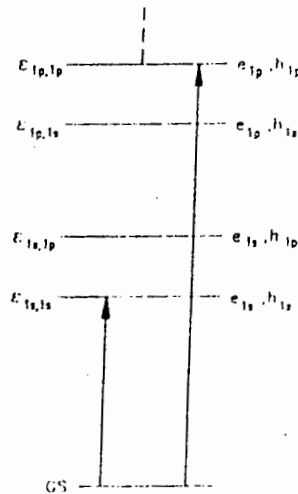
$$\phi(r_e, r_h) = \delta(r_e) \delta(r_h) \quad (23-5)$$

که در آن

$$\delta(r) = \sqrt{\frac{1}{4\pi R^3}} \frac{j_L [\alpha_{nL} r/R]}{j_L + 1\alpha_{nL}} Y_{mL}(\theta, \phi) \quad (24-5)$$

معادله (۲۲-۵) نشان می‌دهند که جذب نوری نسبت به گاف نوار ماده کپهای  $E_g$  به سمت طول موجهای آبی جابه جا شده است. این جابه جایی با اندازه بلور،  $R$  به صورت  $\frac{1}{R^2}$  تغییر می‌کند و برای اندازه کوچکتر بیشتر است. به علاوه، این معادله بیان می‌کند که طیف انرژی از یک سری خطوط که مربوط به گذارهای الکترون-حفره هستند تشکیل شده است. شکل (۵-۶) حالت‌های یک زوج الکترون-حفره را نمایش می‌دهد.

قواعد انتخاب در غیاب اندرکش کولنی برای گذارهای نوار به نوار که به لحاظ دو قطبی مجاز باشند، با  $\Delta L=0$  معین می‌شوند.



شکل (۵-۶): نمایش طرحواره‌ای گذارهای یک زوج الکترون-حفره در یک نیم رسانای نقطه کوانتومی علامت‌گذاری  $e_{1s}$  و  $h_{1p}$  و غیره به بودن الکترون در حالت  $1S$  و حفره در حالت  $1P$  غیره مربوط می‌شود [۲].

برای مثال، گذار  $\epsilon_{1s-1s}$  که در آن الکترون و حفره هر دو از نوع  $1S$  هستند مجاز است. وقتی که اندرکش کولنی وجود داشته باشد، باید این مساله را به روش عددی حل کرد [۲] مقدار

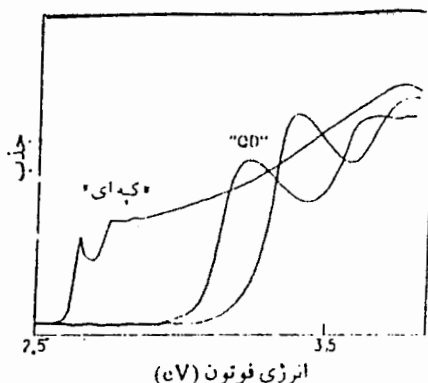
مطلق حالت‌های یک و دو زوجی به میزان خیلی ضعیفی توسط اثر کولنی جا به جا می‌شود، چون برای نقاط کوانتومی با  $R \approx a_B$  انرژی جنبشی بیشترین اثر را دارند، توابع موج الکترونی - حفره در هر صورت به اندازه کافی جهت اینکه اثرهای غیر خطی را تحت تاثیر قرار دهند، تغییر پیدا می‌کنند. قواعد انتخاب که قبلاً بیان شده‌اند، دیگر موثر نیستند و گذارها با  $\Delta l \neq 0$  به صورت ضعیفی مجاز می‌شوند.

### ۵-۵: نقاط کوانتومی نیم رساناها در شیشه

محققان، علاقه و توجه زیادی در پیدا کردن سیستمی دارند که بتواند اثرهای محبس کوانتومی را در سه بعد نشان دهد. تعدادی از آزمایشگاهها تلاش کرده‌اند که ساختار شبه - صفر بعدی را به وسیله روشهای متعددی تولید کنند. در میان این تلاشها دیده شده است که شیشه‌های بخصوص ویژه‌ای را می‌توان تهیه کرد که بلوکهای  $CdS$ ،  $CdSe$ ،  $CuCl$ ،  $CdTe$ ،  $CuBr$  را در برداشته باشند، این شیشه‌ها بطور وضوح با صراحت اثرهای محبس کوانتومی را نشان می‌دهند. بلورکهای میکرونی در این شیشه‌ها از محلول جامدی شکل می‌گیرند که از ابر اشباع شده عناصر اصلی تشکیل شده و به داخل شیشه مذاب آورده می‌شوند. این بلورکها کم و بیش در زمینه شیشه بطور کاتوره‌ای توزیع شده‌اند. گزارش شده است که رشد بلورین بلورکها از قانون رشد لیفشیتز - اسلایوزو  $R \propto t^{1/3}$  که در آن  $R$  اندازه ریز بلور و  $t$  مدت زمانی است که تحت عمل رشد قرار می‌گیرد و ریز بلور عملاً رشد پیدا می‌کند. به‌طور میانگین اندازه‌های ریز بلورهایی که به دست آمده اند تقریباً از ده آنگستروم شروع شده و تا چند صد آنگستروم ادامه دارد.

شکل (۵-۷) طیف جذبی برای  $CdS$  در دمای  $T=10K$  را نشان می‌دهد. دمای پایین‌تر، پهن‌شدگی فوتونی را کاهش می‌دهد در نتیجه گذار باریکتر می‌شود. مع‌ذلک سیمای اصلی طیف در این جا نیز حفظ می‌شود و گذارهای محبس کوانتومی با وضوح بیشتری دیده می‌شوند. در این شکل دو

نمونه با دو اندازه مختلف نقاط کوانتومی «QD» نشان داده شده اند.



شکل (۷-۵): طیفهای جذبی خطی بلورکهای CdS در شیشه در دمای  $T=10K$  دو طیفی که با «QD» علامت گذاری شده اند به دو نمونه ای که با بلورکهای کوچک و دارای اثر محبس کوانتومی هستند مربوط می شوند. نمونه ای که با «کپه» علامت گذاری شده دارای بلورهای بزرگتر بوده و در نتیجه خواص جذبی کپه CdS را نمایان می سازد [۲].

با استفاده از رهیافت ماتریس چگالی می توان اثر پذیری نوری و در نتیجه جذب نوری را محاسبه کرد.

ضریب جذب یک نقطه کوانتومی منفرد به صورت تابعی از بسامد در یک چنین محاسباتی به صورت زیر داده می شود.

$$\alpha(\omega) = \frac{4\pi\omega}{c\sqrt{\epsilon_2}} \sum_i |d_{oi}|^2 \frac{\gamma_i}{\gamma_i^2 + (\omega_i - \omega)^2} \quad (۲۵-۵)$$

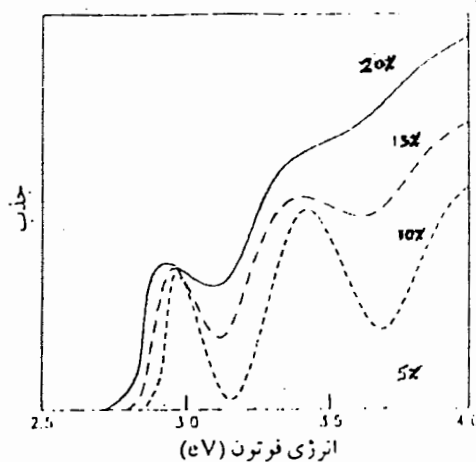
که در آن  $\epsilon_2$  ثابت دی الکتریک نیم رسانای نانو ساختار  $d_{oi}$  عنصر ماتریس مربوط به ماتریس دو قطبی گذار برای گذار  $O \rightarrow i$  است.  $O$  به حالت پایه (حالتی که هیچ زوج الکترون - حفره وجود ندارد) مربوط می شود. در حالیکه  $i$  حالت یک زوج الکترون - حفره را می رساند. مقدار ویژه انرژی گذار الکترون - حفره محبس کوانتومی،  $\epsilon_i = \hbar\omega_i$  می باشد، بنابراین  $\hbar\omega_i$  به روشنی به اندازه بلورکها  $R$  بستگی دارد. پهنای خط همگن گذار برابر با  $\gamma_i$  است. معادله (۲۵-۵) نشان می دهد که طیف جذبی یک

نقطه کوانتومی منفرد از یک سری از قله‌های لورنتزی که حول انرژیهای یک زوج الکترون حفره؛  $h\omega_i$  متمرکز شده‌اند، تشکیل می‌شود. پهن‌شدگی ناهمگن را می‌توان چنین تصور کرد که ذرات دارای یک توزیع اندازه داده شده توسط  $f(R)$  حول مقدار میانگین  $R$  هستند. در رابطه (۵-۲۵)،  $\alpha(\omega)$  ضریب جذب برای شعاع معلوم  $R$  است، بنابراین میانگین جذب برابر است با:

$$\alpha(\omega)_{average} = \int_0^{\infty} dR f(R) \alpha(\omega) |_R \quad (۲۶-۵)$$

با استفاده از توزیع گوسی برای  $f(R)$  حول شعاع متوسط  $R=2\text{nm}$  و پهنای مختلف توزیع گوسی نتایج بدست آمده برای نقاط کوانتومی CdS در شکل (۵-۸) نموده می‌شود. بدیهی است که گذارهای محبس کوانتومی با افزایش اندازه نسبی ذرات پهن شده و با توزیع ساختار پیوسته نمونه یکسان می‌شوند، طیفی که توسط خط پرستان داده شده، بر این امر دلالت می‌کند. نمونه‌های شکل (۵-۸) دارای توزیع اندازه ۲۰ تا ۵ درصد هستند.

به طور خلاصه، سیمهای کوانتومی و نقاط کوانتومی موادی با خواص الکترونیک و نوری جالب هستند. چالش اصلی در حال حاضر رشد این ساختارهای محبس کوانتومی با توزیع یکنواخت اندازه ذرات است.



شکل (۵-۸): جذب خطی برای ذره کوانتومی CdS توزیع اندازه گوسی در اطراف یک شعاع میانگین ۲nm. منحنیهای مختلف متناظر با پهنای توزیع گوسی متفاوت هستند [۲].

چنین موادی می‌توانند به فیزیک نوینی رهنمون شوند و همچنین انقلابی در ساخت قطعات جدید به وجود آورند.

## ۵-۶: غیر خطیهای اپتیکی (نوری) نیمرساناها

پارامترهای مربوط به شکست و جذب اپتیکی به شدت میدانهای اپتیکی بستگی دارند. در شدتهای برانگیزی بالا، خواص اپتیکی مواد ممکن است تغییر یابند، و با تغییر چگالی برانگیزش، پاسخ هم تغییر می‌یابد. این خواص اپتیکی وابسته به برانگیزش را معمولاً غیر خطیهای اپتیکی می‌نامند. اساساً همهٔ نیمرساناها، با برانگیزش به اندازه کافی قوی از خود، مشخصه‌های غیر خطی نمایان می‌کنند. این امر ممکن است باعث اثرهایی چون جذب و شکست وابسته به برانگیزش، آمیزش موج غیر خطی، دو پایایی اپتیکی و یا دیگر ناپایداریهای اپتیکی بشود. برخی از این اثرها، مورد توجه خاصی قرار گرفته‌اند، زیرا می‌توانند برای کاربردهای کلید زنی اپتیکی، دریچه‌های منطق اپتیکی و یا حتی در محاسبه اپتیکی، سودمند باشند. غیر خطیهای اپتیکی که به تولید حامل واقعی وابستگی دارند، هنگامی اتفاق می‌افتد که یک باریکه نور فرودی قوی طول موجش به یک ناحیه جذب بلور تنظیم شده باشد. اثرهای غیر خطی اپتیکی هم‌چون پر کردن نوار، باز بهنجارش گاف نوار و اثرهای گرمایی و پدیده پلاسما می‌باشد.

## ۵-۷: طبقه‌بندی غیر خطی‌های نوری

به طور کلی، می‌توان غیر خطیهای نوری در نیمرساناهای نانو ساختار را به دو دسته تقسیم کرد:

۱- غیر خطیهای شبه تعادلی<sup>۱</sup>

---

1 - Quasi-Equilibrium



## ۲- غیر خطیهای گذرا یا همدوسی.

غیر خطیهای شبه تعادلی به تولید حامل واقعی وابستگی دارند. آنها در مقیاسهای زمانی نسبتاً طولانی پس از آن که الکترونها و حفره‌های تولید شده زمان کافی برای بر هم کنش بین همدیگر و استقرار توزیعهای فرمی - دیراک میان یکدیگر داشته باشند، اتفاق می‌افتد. تولید حامل می‌تواند به وسیله برانگیزش لیزر تشدید در تشدید اکسیتون یا بالای گاف نوار، و یا به وسیله تولید حامل از طریق پمپاژ تزریقی صورت گیرد [۲]. غیر خطیهای حاصل را شبه تعادلی می‌نامند، به این دلیل که حاملهای مشمول برای پاسخ ماده غیر خطی در تعادل «موضعی» میان خود هستند. این بدان مفهوم است که پس از تولید حاملهای نوارهای مختلف زمان کافی برای بر هم کنش و استقرار یک دمای پلاسمائی و یک پتانسیل شیمیائی، که دو کمیت ترمودینامیکی لازم برای تعریف یک تابع توزیع فرمی برای یک چگالی معلوم هستند، داشته باشند. در شبه تعادل، دینامیک چگالی الکترون - حفره دینامیک غیرخطی را تعیین می‌کند در حالی که دینامیک برانگیزشی همانند دوام تپ لیزر و غیره، در این خاصیت نقشی ندارند.

شبه تعادل، نوعاً در یک مقیاس زمانی چندین صد فمتو ثانیه (۱ فمتو ثانیه =  $10^{-15}$  ثانیه) تا چندین پیکو ثانیه بعد از تحریک تحقق می‌یابد، به طوری که حاملان زمان کافی برای برخورد را دارند، تا الکترونها و حفره‌ها را به حالت شبه تعادل سوق دهند [۲].

دینامیک زمانی این غیر خطیها اساساً پیرو نمودار زمانی تپ لیزری برای تپهای لیزری بسیار سریع از مرتبه چندین ده فمتو ثانیه است. به طور تجربی، فرکانس لیزری برانگیزنده اغلب زیر تشدید اکسیتون در منطقه شفاف نیمرسانا نانو ساختار تنظیم می‌شود، به طوری که تولید حامل واقعی کمینه شود. در این مورد، تنها غیر خطیهای همدوس باقی می‌مانند. معذالک، تحریک تشدید همچنین یک مولفه غیر خطی همدوس نیز تولید می‌کند که با غیر خطی شدگی حامل همزیستی دارد. پاسخ

زمانی این غیر خطی شدگی همدوسی القای تشدیددی به وسیله زمان فاز زدایی تشدید الکترونی تعیین می‌شود که بسیار کوتاهتر از طول عمر حامل است.

### **۵-۸: غیر خطیهای اپتیکی در نانو ساختار نقاط کوانتومی**

طیف جذبی خطی در نقاط کوانتومی نانو ساختار متشکل از یک رشته خطوط متناظر با گذارهای میان حالت‌های محبوس کوانتومی الکترون حفره هستند. منشا غیر خطی شدگی اپتیکی در نقاط کوانتومی کوچک به طور عمده، اثر حالت پرکنی است که منجر به رنگ بری گذارهای محبوس کوانتومی می‌شود. در نقاط کوانتومی، حالت‌های انرژی که الکترون‌ها و حفره‌ها می‌توانند اشغال کنند، با فاصله انرژی نسبتاً بزرگی، کوانتیده هستند.

بدین سبب، گذارهای میان حالت‌ها، مستلزم مقدار عمده ای از انتقال انرژی هستند و بسیار نامحتمل است که تنها در نتیجه اثرهای کولنی انجام پذیرند. در نتیجه، اثر پرده پلاسما در نقاط کوانتومی کوچک اساساً غایب است. به دلیل اینکه، اصل طرد پاولی مانع اشغال یک حالت الکترونی به وسیله بیش از یک ذره همسان است، هر گاه سعی شود ذرات باردار بیشتری به درون محبسه‌های کوانتومی برانگیخته شوند، گذارهای بین آنها در معرض اشباع جذبی قرار می‌گیرند، این فرآیند حالت پرکنی، مسئول عمده در غیر خطیهای اپتیکی نقطه کوانتومی به شمار می‌رود.

### **۵-۹: جذب کننده‌های قابل اشباع بر اساس نیم رساناهای نانو بلور برای کاربردهای**

#### **کلیدزنی اپتیکی**

در سال‌های اخیر پژوهشگران در تکنولوژی کلیدزنی نوری به پیشرفتهای قابل توجهی دست یافته‌اند و طرح‌های مختلفی از کلیدزنی نوری پیشنهاد شده است، عامل مشترک در تمام آنها، استفاده

از برخی مواد نوری غیرخطی می‌باشد. بدین معنی که، هر ماده خواص نوری وابسته به حالت میدانهای الکترومغناطیسی حاضر را نشان می‌دهد.

کاربرد مهم دیگر مواد نوری غیر خطی استفاده از جذب کننده‌های حالت جامد قابل اشباع در کاربردهای لیزری مد قفل شده است. یک جذب کننده قابل اشباع، ماده‌ای است که دارای باند جذب نوری است که اندازه آن با افزایش شدت میدان کاهش می‌یابد، برای مثال:

$$\alpha(E) = \frac{\alpha_0}{1 + |E|^2/|E_{sat}|^2} \quad (27-5)$$

که در آن  $\alpha_0$  و  $E_{sat}$  ثابت‌هایی وابسته به اندازه میدان الکتریکی  $E$  هستند. اما در حالت کلی به فرکانس بستگی دارند. در کاربردهای عملی مطلوب، باید موادی را داشته باشیم که کمترین مقدار امکانپذیر را برای قدرت میدان اشباع داشته باشند. توان نوری مورد نیاز برای رسیدن به یک درجه دلخواه از اشباع متناسب با  $|E_{sat}|^2$  می‌باشد.

در سالهای اخیر امکان استفاده از مواد شفاف،<sup>۱</sup> «همانند شیشه» توسط نیمرساناهای نانوبلوری به عنوان جذب کننده‌های قابل اشباع، برای کاربردهای لیزری تقویت شده و توسط برخی از محققان مورد تأیید قرار گرفته است. نانوبلورهای PbS و PbSe در این مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنها یک تشدید جذب و با اندازه قابل تنظیم را در نزدیک طول موج مرسوم ۱۵۵۰ nm، در کاربردهای مخابراتی از خود به نمایش می‌گذارند. این مواد نسبتاً ارزان و قابل اطمینان هستند زیرا شدت اشباع در آنها نسبتاً کم است [۲۳].

## ۵-۹-۱: شیوه‌های تئوری جذب‌کننده‌های قابل اشباع برای نیمرساناهای نانو بلور برای

### کاربردهای کلید زنی اپتیکی

نقاط کوانتومی نمکهای سرب (PbS و PbSe) برای کاربردهای مخابراتی مناسبند زیرا نخستین قله جذب منتخب تارهای نوری یعنی  $1550\text{ nm}$  منطبق شوند.

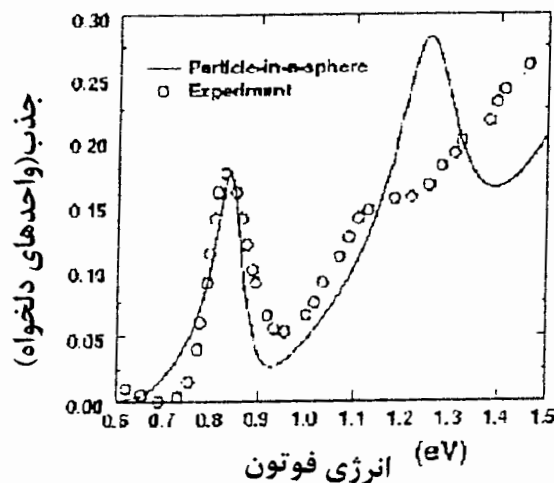
پژوهشگران ملاحظه کرده‌اند که اولین قله تشدید اکسیتون نقاط کوانتومی PbS و PbSe در اندازه‌های بین ۳ تا ۱۰ نانومتر در نزدیکی طول موج  $1550\text{ nm}$  قرار می‌گیرد. ملاحظه شده است نقاط با این اندازه‌ها در حد محبس قوی، قرار دارند، زیرا شعاع بوهر آنها یعنی  $18\text{ nm}$  برای PbS و  $46\text{ nm}$  برای PbSe خیلی بزرگتر از اندازه نانو بلور آنها می‌باشد. در حد محبس قوی انتظار می‌رود انرژی جنبشی از انرژی پتانسیل بیشتر باشد. این مدل ساده که در آن از انرژی پتانسیل چشمپوشی می‌شود مدل ذره-در-یک-کره، نامیده می‌شود.

در این مدل، الکترونها و حفره‌ها به صورت ذراتی غیر برهمکنشی محدود در نقطه کوانتومی در نظر گرفته می‌شود. این نقطه کوانتومی را به صورت کره فرض می‌کنند، در نتیجه الکترون و حفره با یک سد پتانسیل بلند مواجه هستند. توابع انرژی و موج را می‌توان با حل معادله شرودینگر تک ذره بدست آورد، که در آن جرم ذره را برابر با جرم کاهش یافته زوج الکترون حفره در نظر می‌گیرند، و برای جرم این زوج از جرمهای مؤثر لبه نوار استفاده می‌شود و نوار انرژی را به صورت نوار سهمی شکل گسترده فرض می‌کنند.

بعضی پژوهشگران دریافتند بخاطر فرض نوار سهمی شکل مدل ذره در یک کره برای توصیف ساختار الکترونی نقاط کوانتومی PbS و PbSe کافی نیست. علت این امر آن است که پائین‌تر گذارهای انرژی در PbS و PbSe در نقاط L در منطقه بریلوئن روی می‌دهند. گستردگی انرژی این نوارها بطور مشخص غیر سهمی هستند.

بنابراین کانگ و ایز پیشنهاد کردند [۲۳] که مدل ذره - در - یک - کره را می توان با تقریب چهار نوار اصلاح نمود. مع ذالک هنوز هیچ مقایسه جدی برای تأیید این پیشنهاد انجام نشده است.

به هر حال مقایسه ای بین مدل ساده ذره - در - یک - کره و اندازه گیریهای طیف حالت برانگیخته انجام شده است [۲۳]. در آن آزمایش نقاط کوانتومی با PbS و PbSe که با کیفیت عالی تهیه شده بودند قله های اکسیتون چندگانه را نشان دادند. شکل (۵-۹) طیفهای جذبی اندازه گیری شده برای چهار نمونه از نقطه های کوانتومی PbSe با اندازه های مختلف را نشان می دهد. کیفیت خیلی بالای مواد مورد آزمایش منجر به آن شد که چندین قله اکسیتون برای نمونه ای که اندازه نقطه کوانتومی آن بزرگتر از بقیه بود نمونه A بدست آید.



شکل (۵-۹): طیف جذبی اندازه گیری شده برای نقاط کوانتومی PbSe با اندازه مختلف که به طور آشکار بر اثر محبس کوانتومی دلالت دارد [۲۳].

با تمرکز روی نمونه A که شامل پیکهای چند گانه اکسیتون است، فرصتی جهت پیشگوییهای مدل های مختلف برای طیف حالت برانگیخته بوجود می آید. ابتدا مدل ساده ذره در یک کره مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۵-۹-۲: مدل ذره در یک کره

از مدل ذره در یک کره می‌توان نتیجه گرفت که انرژی‌ها و تابع موج حالت‌های الکترون - حفره (اکسیتونها) بوسیله حل معادله شرودینگر در تقریب جرم موثر سهمی شکل به دست می‌آید. پتانسیل داخل نقطه کوانتومی صفر است و خارج نقطه کوانتومی بی نهایت است این پتانسیل تحت شرایط مرزی اعمال می‌شود که تابع موج باید در سطح نقطه کوانتومی صفر شود زیرا با توجه به تقارن کروی پتانسیل، تابع موج باید به قسمتهای شعاعی و زاویه ای تفکیک شود.

$$\Psi_{nLm} = R_{nL}(r) Y_L^m(\theta, \phi) \quad (28-5)$$

$Y_L^m$  هارمونیکهای کروی می‌باشد. تابع شعاعی از معادله زیر بدست می‌آید.

$$-\frac{1}{r} \frac{d^2}{dr^2} (rR_{nL}(r)) + \left( \frac{L(L+1)}{r^2} - K^2 \right) R_{nL}(r) = 0 \quad (29-5)$$

حل این معادله با توجه به اینکه روی مرکزهای کره با شعاع  $a$  صفر است، مقدار  $R(r)$  به صورت

زیر به دست می‌آید:

$$R_{nL}(r) = \sqrt{\frac{2}{a^3}} \frac{j_L(K_{nL}r/a)}{j_{L+1}(K_{nL})} \quad (30-5)$$

که در آن  $K$  ریشه  $n$ ام از تابع بسل کروی است [۲۳]. طیف انرژی از معادله زیر بدست می‌آید.

$$E_{nL}(a) = E_g + \frac{\hbar^2}{2m_r} \left( \frac{k_{nL}}{a} \right)^2 \quad (31-5)$$

$E_g$ ، انرژی گاف نواری این حجم است.  $m_r$  جرم کاهش یافته حفره الکترون و برابر است با:

$$\frac{1}{m_r} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \quad (32-5)$$

$m_e^*$  و  $m_h^*$  به ترتیب جرم موثر الکترون و حفره نقطه  $L$  و بالاخره  $a$  شعاع نقطه کوانتومی است.

### ۵-۹-۳: رابطه میدان غیر خطی

مقدار میدان الکتریکی داخل نقطه کوانتومی به میدان در ماده زمینه توسط رابطه

غیرخطی زیر بدست می آید:

$$E_d = \frac{3\varepsilon_h}{2\varepsilon_h + \varepsilon_d(E_d)} E_h \quad (5-33)$$

که این رابطه قابل حل است [۲۳]. در این معادله بطور موقت از وابستگی تابع دی الکتریک نقطه کوانتومی به اندازه و فرکانس چشمپوشی می شود. این رابطه با فرض مقدار معلوم میدان  $E_h$  در ماده میزبان با حل مسأله مقدار مرزی الکترو استاتیکی (معادله لاپلاس) بدست می آید. با توجه به اندازه کوچک نقطه های کوانتومی طول موج نور بطور قابل ملاحظه ای بزرگتر از اندازه نقطه های کوانتومی می باشد. با این فرض معادله موج به معادله لاپلاس تبدیل می شود.

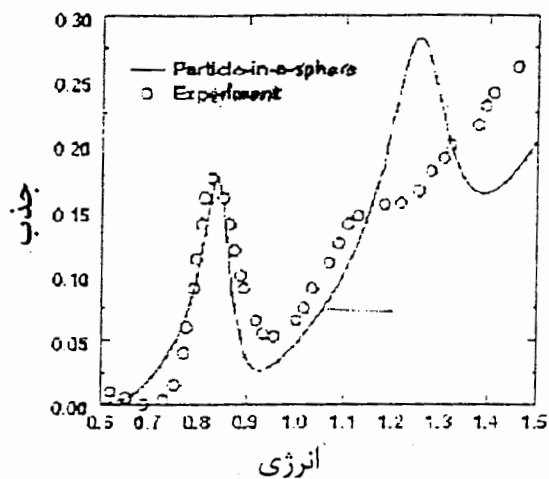
$$\nabla^2 E + \varepsilon \frac{\omega^2}{c^2} E \equiv \nabla^2 E \quad (5-34)$$

#### ۵-۹-۴: طیف جذبی PbS

طیف جذبی برای نانوبلورهای PbS در یک ماده زمینه الکل پلی ونیل در شکل (۵-۱۰) نمایش داده شده است. پارامترهای این مدل جهت دستیابی به بهترین هماهنگی با داده ها تنظیم می شود. این هماهنگی با این فرض بدست می آید که ۲۰٪ اندازه حول مرکز یک نقطه کوانتومی به شعاع  $a_0 = 4.4 \text{ nm}$  توزیع شده باشد.

مکان و شکل اولین تشدید اکسیتون، به خوبی توسط این مدل (مدل ذره در یک کره) توصیف می شود. همینطور مکان قله دوم اکسیتون نیز بخوبی توصیف می شود.

معذالک اندازه دومین قله اکسیتون، اغراق آمیز است. این مسئله بر این دلالت دارد که مدل ذره در یک کره قادر به شرح صحیح تشدیدهای انرژی مرتبه بالاتر نیست.



شکل (۵-۱۰): طیف جذبی اندازه گیری شده برای PbS که تنها با پیشگویی بوسیله مدل ذره در یک کره بدست آمده است. اندازه اولین پیک با شواهد تجربی تطبیق دارد؛ اما مقدار دومین پیک قدری اغراق آمیز است [۲۳].

### ۵-۹-۵: کاربردهای کلید زنی نوری

یکی از موارد ترغیب مطالعات اخیر مطلوب بودن نیمرساناهای نانو بلور با کیفیت بالای جدیداً گسترش یافته برای کاربردهای کلید زنی نوری است.

با قراردادن نقاط کوانتومی (یا دیگر مواد غیر خطی نوری) در یک کاواک تشدید فابری - پرو،<sup>۱</sup> ساختار نمایش خواص کلید زنی نوری را می توان از طریق کنترل دقیق پارامترهای دی الکتریکی و ساختاری بدست آورد. برای مثال یک ساختار فابری - پرو به صورت یک موجبر ساخته شده است که در شکل (۵-۱۱) نشان داده می شود

این ساختار در دانشگاهی در آلبانی و دانشگاه ایالتی نیویورک توسط حکاکی مواد، ساخته شده

1 - Fabry-Perot



است بطوریکه دو بازتاب توزیع براگ را نشان می دهد که کاواک تشدید را مشخص می کند. این ساختار به عنوان مدرک اصلی نمایشی ساخته شد، اما هنوز هیچ اندازه گیری از خواص نوری آن بدست نیامده است.

بررسیهای مقدماتی رفتار کلیدزنی در یک کاواک فابری - پرو شامل نقطه کوانتومی غیرخطی به انجام رسیده است. بررسی با فرض ساختار دی الکترونیک - چند لایه ای که به طور نامحدود در ابعاد عرفی گسترش یافته اند، ساده می شود. بدیهی است این فرض برای ساختاری همانند آنچه که شکل (۵-۱۱) نشان داده شده مناسب نیست. برای ساختار معقول یک تلاش و فعالیت بسیار پیشرفته ای با استفاده از محاسبات عددی لازم است.

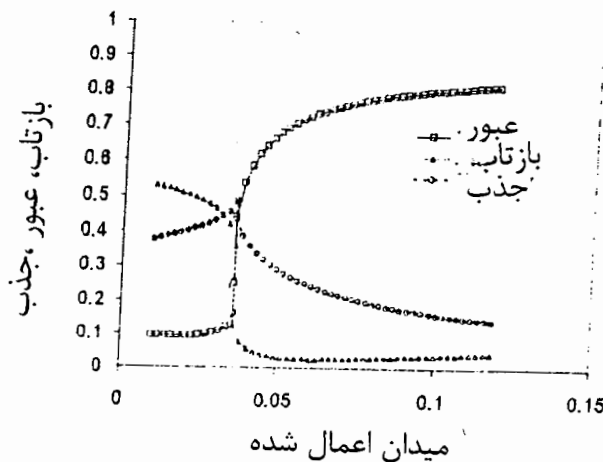


شکل (۵-۱۱): کاواک فابری پرو در یک موج بر بوسیله حکاکی مواد ساخته می شود. بطوریکه دوبازتاب براگ را که در کاواک معین شده تشکیل می دهد [۲۳].

نتایج شبیه سازی برای کلید زنی نوری فابری - پرو براساس نقطه کوانتومی در شکل (۵-۱۲) ارائه شده است. در این شبیه سازی فرض شده است که ساختار شامل نقاط کوانتومی CdS است و از روش مدل ساده ای که پیشتر شرح داده شد استفاده شده است. انتخاب این مدل برای آزمایشات باید هماهنگ باشد تا بتواند نتایج معقولی با دلایل بدست آید. مع ذلک باید توجه شود که آثار پهن شدگی نامتجانس تعریف گردیده، در نظر گرفته نشده است. به طور واضح ضمن افزایش شدت انتقال سریعاً از کم (حدود ۱۰ درصد) به زیاد (حدود ۸۰ درصد) تغییر می نماید.

متأسفانه شدت جذب بالاست. جذب را می توان با افزایش دور شدن از تشدید به قیمت کاهش

دامنه کلیدزنی (که نشان داده نشده است) کم نمود.



شکل (۵-۱۲): نتایج شبیه سازی برای ساختاری طراحی شده. برای نمایش کلید زنی نوری در این شبیه سازی فرض می شود که ساختار، شامل نقاط کوانتومی نیم رسانای CdS در یک کاواک فابری- پرو هستند. [۲۳]

## ۵-۱۰: نقاط کوانتومی بعنوان نقاط رنگی و درخشنده های اپتیکی برای فیبرها

در اینجا هدف استفاده از نانو بلورهای نیم رسانا (که به عنوان نقاط کوانتومی شناخته شده اند) بجای مولکولهای رنگی کننده، جهت تولید رنگ در فیبرها و شاید استفاده از آنها بعنوان عاملهای درخشنده های نوری در چاههای کوانتومی می باشد. در نانو بلورهای نیم رسانا، با کاهش اندازه ذرات، انرژی بالاتر می رود و ماکزیمم جذب و گسیل تغییر می یابد. چنین تغییری در بسیاری از مواد از نقاط کوانتومی شروع میشود، یعنی وقتی که اندازه ذره به کمتر از  $10\text{ nm}$  می رسد. بنابراین امکان پذیر است که ذرات با اندازه های مختلف از یک ماده منفرد با خواص اپتیکی مختلف، ساخته شوند بطوریکه کل

ناحیه مرئی از طیف الکترومغناطیسی را پوشش دهند.

در اینجا با توجه به این خواص، رنگهای نقاط کوانتومی (نانو بلورهای نیمرسانا) را برای ساخت فیبرها مورد مطالعه قرار می‌دهیم. [۲۷]

این نانو بلورها یا این نقاط کوانتومی کاملاً پایدارند، و یک نشر ضعیف و طولانی تر در مقایسه با مولکولهای رنگی شده فلئورسانتهای معمول از خود نشان می‌دهند. بنابراین امکان دارد که این نانو بلورهای نیمرسانا، جانشین کاملاً مفیدی برای درخشنده‌های اپتیکی و نوری باشند. و بطور گسترده برای ایجاد و افزایش حضور در ساختارهای رنگی مورد استفاده قرار گیرند.

رنگها معمولاً به وسیلهٔ ملکولهای رنگی مناسب برای رنگی کردن فیبرها به تاروپود آنها منتقل می‌شوند. به چنین فرآیندی برای تولید رنگ معمولاً به عنوان مخلوط کننده تاروپودها اشاره می‌شود. تعداد زیادی از اشیاء در طبیعت وجود دارند که عمدتاً بخاطر ساختار فیزیکی تار و پودشان رنگی هستند، بطوریکه ابعاد ساختارشان که مسئول تهیهٔ رنگ هستند از مرتبه طول موج نور مرئی می‌باشند.

بسیاری از زیر لایه‌های بیولوژی رنگی، مانند بالهای پروانه و روپوستهای سوسک در اثر برهم کنش با نور، رنگی را ایجاد می‌کنند که ما می‌بینیم. برخلاف رنگی که با مخلوط کردن تار و پودها بوجود می‌آیند، آن رنگهایی که به وسیلهٔ تداخل یا پراش تولید می‌شوند دقیقاً به زاویه بستگی دارند و وقتی روی یک نمودار رنگی رسم شوند کاملاً خالص هستند.

هدف اصلی این بخش، استفاده از نانو بلورهای نیمرسانا بعنوان درخشنده‌های اپتیکی پایدار و رنگی شده می‌باشد. دو روش مختلف برای رسیدن به فیبرهای رنگی بوسیله نقاط کوانتومی را می‌توان تصور کرد:

الف) نقاط کوانتومی که در این زمینه کارایی دارد می‌تواند در داخل فیبر از محلولهای آبی پخش

شود.

ب) آنها می‌توانند با گلوله‌های پلیمری مخلوط شوند و در داخل فیبرهایی که دربرگیرنده نقاط کوانتومی هستند پخش شوند. همچنین می‌توان رنگی را بوسیله داشتن مخلوط‌های رنگی شده با نقاط کوانتومی تولید نمود و یک آرایه ویژه از اثرات رنگیایی تولید نمود که نمی‌توانند با استفاده از رنگها یا تنها یک ماده رنگی بدست آیند.

در دانش امروزی هیچ کاری بهتر از استفاده از نانو بلورهای نیمرسانا بعنوان رنگها در فیبرها نمی‌باشد. اخیراً ترکیبات پلیمرهای نقطه کوانتومی ساخته شده است. به طور برجسته تغییر در خواص اپتیکی این مواد تابعی از اندازه است. همانطور که اندازه کاهش می‌یابد برانگیختگیهای الکترونیکی به انرژیهای بالاتر (طول موجهای پایینتر) بر طبق اثرات محبس کوانتومی، تغییر می‌کند و این تغییرات در خواص اپتیکی ظاهر می‌شود. وقتی اندازه نانو بلور به حدود  $10\text{ nm}$  می‌رسد، آثار خواص اپتیکی آن آغاز می‌شود. برای نانو بلورهای کمتر از  $10\text{ nm}$  گسیل تابعی از اندازه می‌شود. گسیل در مقایسه با مولکولهای رنگی شده، معمولاً کاملاً ضعیف است.

گسیل می‌تواند با استفاده از شکلهای مختلفی که برای نانو بلورها در نظر گرفته شود قابل کنترل باشد برای مثال فرض کنید جسمی داریم که مغز آن از یک ماده نیمرسانا ساخته شده است و با یک پوسته از نیمرسانای دیگر احاطه شده است. مثلاً ذراتی که مغز آنها  $\text{CdSe}$  و پوسته  $\text{ZnS}$  می‌باشد. چنین مطالعاتی نشان داده است که می‌توان مشخصه‌های گسیل از چنین نانو بلورهایی را کنترل نمود، بطوریکه می‌توان گسیل را در سراسر برد مرئی ایجاد کرد.

اخیراً از چنین ذراتی برای مطالعه نمونه‌های بیولوژیکی استفاده شده است. در این مورد، احتیاج به ساختن ذراتی قابل حل در آب بود، بطوریکه ذرات بتوانند در محلول آبی پخش شوند.

موارد زیر بعضی از مزیت‌های عرضه شده بوسیله نانو بلورهای نیمرسانا یا نقاط کوانتومی می‌باشند:

۱- کنترل اندازه گسیل

۲- کنترل شکل گسیل (ذرات-هسته - پوسته)

۳- شیمی سطح به آسانی اصلاح شده (حلالیت)

۴- اصلاح مورد استفاده در اتصال با یک مولکول رنگی متداول (مخطوط کننده تار و پود +

افزاینده).

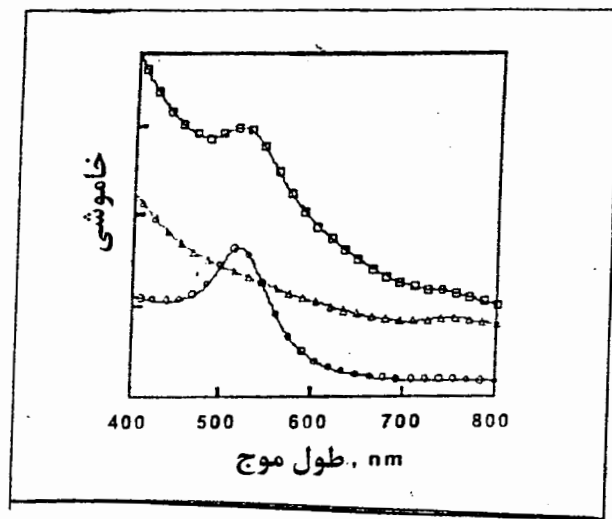
### نتایج اولیه:

مطالعات اولیه پولیمرهای رنگی با نقاط کوانتومی شامل (گسیلی) نانو بلورهای فلزی رنگی درخشان اما غیر گسیلی) هستند که با لایه‌های هیدروژل<sup>۱</sup> با ضریب شکست پایین پوشش داده شده‌اند. در حالی که چنین مواد رابطه خیلی کم غیر گسیلی با پلیمرهای بکار برده شده در صنعت نساجی دارند، اما آنها خواص خیلی سودمندی بخاطر سهولت سنتزی به هماهنگی و مشخصه‌های اپتیکی دارند.

بدین طریق، می‌توانیم خواص اپتیکی بسیاری از ترکیبات دی الکتریک / فلز از یک ترکیب کلوییدی منفرد را توضیح دهیم. بعلاوه می‌توانیم به آسانی تعداد ذرات فلز در هر کره دی الکتریک را کنترل کنیم. شاید به آسانی، اثرات غلظت ذرات رنگی، را بفهمیم. شکل (۵-۱۳) نمایش طیف خاموشی پرتو ماورای بنفش را برای ذرات طلای منفرد و ذرات پلیمری با دو غلظت طلای متفاوت (اختلاف به نسبت ۱:۲۵ است) را نشان می‌دهد. در اینجا بیان می‌شود که تمام ذرات طلا با یک کره پلیمری ارتباط دارند و هیچ ذره طلای آزاد از پلیمری کردن وجود ندارد.

اولین ذرات طلای تنها، نوار جذب نمونه‌وار پلاسمون را در حدود ۵۲nm نمایش می‌دهد و محلولی

از این ذرات رنگ قرمز تیره دارد. مع ذالک ذرات پوشیده با دی الکتریک یک زمینه پراکندگی وسیعی دارند که به طور وسیعی جذب پلاسمون طلا را می پوشانند. ضمناً در غلظت کم طلا، باند بطور کامل مرئی است.



شکل (۵-۱۳): طیف خاموشی برای ذرات کلونئیدی طلای تنها (دایره‌ها)، ذرات پلیمر با غلظت کم طلا (نمودار مثلثی، تقریباً یک ذره طلا در یک کره) و نمونه‌ای با غلظت ۲۵ مرتبه بیشتر (چهار گوشها) [۲۷].

به هر حال این طیف نمی تواند بطور دقیق نمایش مرئی نمونه‌ها را بازتاب کند.

در نمونه‌های با غلظت کم طلا، ماده صورتی رنگ است در صورتیکه با غلظتهای بالا، محلول پلیمر ارغوانی رنگ بدست می آید.

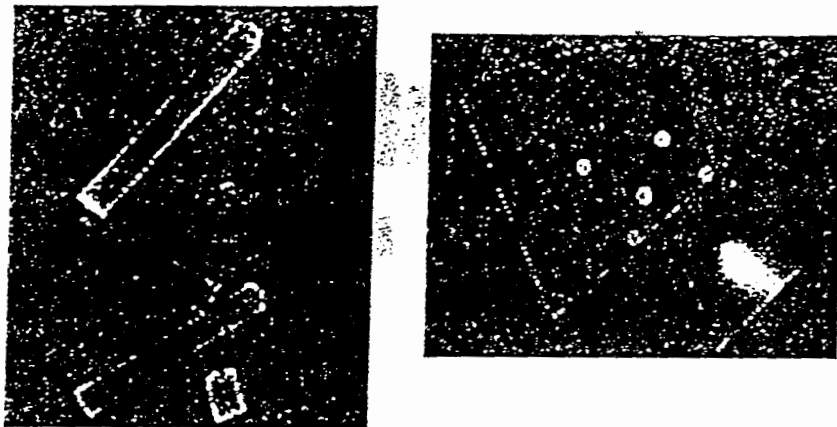
مرحله بعد در این مطالعه، استفاده از این ذرات برای مطالعه فرایندهای پخش است. برای انجام این

امر از میکروسکوپهای کانونی اسکن کننده لیزری استفاده شده است. (LSCM).

LSCM قادر به اندازه گیری یک طیف نشری کامل است. مزیت اساسی روش LSCM این است

که با آن می توان نورهای ناخواسته خارج از کانون را حذف نمود، این نورها تصویر یک میکروسکوپ

نوری معمولی و حاصل از یک جسم سه بعدی از یک جسم شفاف را محدود می کند. میکروسکوپ از نور طبیعی، تصویری در ۳ بعد از یک جسم شفاف بدست می آورد. این امر با اسکن کردن یک چشمه نور کانونی شده قوی در یک صفحه که در مقایسه با ضخامت نمونه نازک است، تکمیل می شود. توانایی تفکیک نورهای خارج از کانون بخاطر این حقیقت است که سیستم آشکارساز آن را به روشنایی متمرکز می کند، در نتیجه در هر زمان فقط یک مکان منفرد در طیف تصویر گرفته می شود. چون روزنه کانونی کننده نور را تنها از صفحه کانونی مورد توجه می پذیرد لذا به آسانی یک برش خیلی نازک (نمایش  $x-y$ ) را می توان بوسیله اسکن کردن باریکه در صفحه  $x-y$  بدست آورد. وقتی تصاویر از پخش در دو بعد (تصویر  $x-y$ ) در شکل دیجیتالی بدست می آید، چندین پخش اپتیکی متوالی می تواند به بنا کردن یک تصویر ۳ بعدی از ماده منجر شود.



شکل (۵-۱۴): میله های پلیمریک با نقاط کوانتومی برانگیخته بوسیله لامپ- جیوه در پرتو ماورای بنفش [۲۵].

برای مطالعه فرایندهای پخش اندازه گیری با استفاده از مد فلورسانس میکروسکوپ انجام می شود. برای بدست آوردن تصاویر خوب بطوریکه بتوان از آنها برای برنامه های آنالیز تصویر استفاده نمود تا

بتوان غلظت نقاط کوانتومی در داخل فیبر را استنتاج نمود.

یک مثال از فضای رنگی قابل دسترسی در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است و طرحی از یک فضای رنگی بوسیله فراهم شدن ترکیبات پلیمر-نقطه کوانتومی ارائه شده است.

## ۵-۱۱: پراکندگی و جذب اپتیکی بوسیله نانو خوشه‌های فلزی در GaAS

ترکیبات فلز-نیمرسانا با توجه به آنکه ذرات فلزی کوچک در یک نیمرسانای بلوری پخش می‌شوند، یک حوزه سودمند مطالعه بایک تنوع دامنه دار از حالت جامد و پدیده‌های اپتیکی با خواص جالب و بالقوه را از خود نشان می‌دهند [۲۴].

این مواد دارای خواص دوگانه الکترونیکی-دی‌الکتریکی و اپتیکی هستند که با کنترل کسر حجمی فلز در نیمرسانا می‌توانند متناسب باشند. مطالعات اپتیکی نیمرساناهای بی‌شکل که از فضاهای خالی و فضاهای توپر تشکیل شده، اندازه‌گیری فضای خالی در سیلیکون بی‌شکل را ممکن می‌سازد همانطور که با خاموش اپتیکی در آلیاژهای SiAg بی‌شکل می‌توان اندازه‌گیری نمود.

پیشرفتهای مهم اخیر در این زمینه موجب شده است که بتوان خواص نیمرساناهای بلوری گرداگرد فلز داخلی با کیفیت بالا را ابقاء نمود.

این عمل امکان طراحی مهندسی مواد برای کاربردهای ویژه با استفاده از خواص شناخته شده ترکیب فلز و نیمرساناها را بوجود می‌آورد.

خواص دی‌الکتریکی و اپتیکی ترکیبات فلز-نیمرسانا وجه مشترک فراوانی با خواص دی‌الکتریکی و اپتیکی فلزهای کلوئیدی دارند که در عایقهای جامد و مایع پخش می‌شوند. مقالات فراوانی درباره این موضوع وجود دارند. در حد پخش رقیق نانو خوشه‌های فلزی ذرات تقریباً بطور خطی در خاموشی مرکب شرکت می‌کنند، اما خوشه‌های فلزی کوچک انحرافهای مهمی را از رفتار فلزی حجمی از خود



نشان می‌دهند.

حالت‌های الکترونی با اندازه کوانتیده شده، بخوبی حالت‌های سطحی را بیان می‌کنند که انتظار شرکت در خواص دی‌الکتریک و الکترونیکی را دارند.

در حد مخالف در غلظت فلزی بالا، پدیده تراوش در سرتاسر خوشه‌های متصل به هم می‌توانند اثرات بحرانی روی خواص الکترونیکی ترکیب داشته باشند.

در سرتاسر کامل این برد، مطالعات اپتیکی تشخیصی و ابزارهای اسپکتروسکوپیکی مهمی برای مطالعه اثرات در خوشه‌های فلزی منفرد فراهم می‌کنند یا به صورت کاوش پاسخ دی‌الکتریکی مؤثر ماده مرکب را فراهم می‌کنند.

اخیراً توجه روی پراکندگی رقیق ذرات فلزی در داخل نیمرساناهای بلوری با کیفیت بالا متمرکز شده است.

این توجه تا اندازه‌ای بوسیله توسعه رشد در دمای پایین GaAs، بوسیله روآراستی پرتو مولکولی توسعه داده شده بود که بدان وسیله GaAs با ترکیبی منحرف از فرمولی شیمیایی با غلظت اضافی As به مقدار زیاد تا اندازه یک تا دو درصد رشد پیدا کرده بود. سپس As در طی بازپخت بعد از رشد بلوری، ته‌نشین می‌شود.

مهمترین ویژگی این ترکیب جدید فلز-نیمرسانا، کنترل حساس روی خواص فیزیکی بخش فلزی می‌باشد.

بوسیله کنترل دمای رشد، دمای بازپخت و زمان بازپخت، کنترل دقیق اندازه و چگالی رسوب آرسنیک ممکن می‌باشد.

مطالعه اپتیکی این مواد مرکب، یک نقش حیاتی در مطالعه خواص فیزیکی آنها ایفا می‌کند.

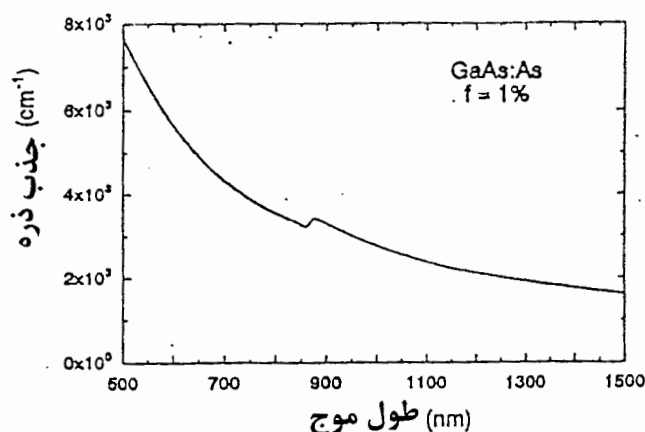
## ۵-۱۱-۱: رسوب As در GaAs

یک دسته مهم دیگر از ترکیبات فلز-نیمرسانا رشد GaAs:As می باشد که با استفاده از رو آراستی پرتو مولکولی روی زیر لایه ها در دمای کاهش یافته، انجام می یابد.

رشد دمای پایین، ترکیبی از دو درصد As اضافی در GaAs بعنوان ماده میزبان به خواص بلوری را در حد عالی حفظ می کند. بعد از رشد، ماده بازپخت می شود و رسوبات آرسنیک تشکیل می گردد. بوسیله کنترل دمای رشد و زمان بازپخت، اندازه و وسعت رسوبات آرسنیک می تواند کنترل شود.

این کنترل جزء به جزء روی رسوبات، با توجه به کیفیت بالای بلوری نیمرسانای میزبان، پایه ای از

مهندسی رسوب می باشد.



شکل (۵-۱۵): جذب ذره ای برای نانو خوشه های As در GaAs جذب مهم تا  $1/5 \mu\text{m}$  توسعه می یابد [۲۴].

رشد دمای پایین مواد، در زمان فوق العاده سریعی حدود  $100$  فمتو ثانیه صورت می گیرد، از این مواد جهت ساخت در سوئیچهای اپتوالکترونیک و آشکار سازهای نوری با سرعت بالا استفاده می شود. انتظار نمی رود خواص الکترو-اپتیک که از لبه نواری بروز می کند تحت میدانهای اعمال شده dc افزایش یابند. پاسخ نوری قابل توجهی که این مواد در زیر لبه باند جذب از خود بروز می دهند به دلیل نشر

نوری از خوشه‌های فلزی این مواد می‌باشد، در نتیجه این مواد را به آشکارساز مادون قرمز بالقوه‌ای تبدیل می‌کند.

محاسبه جذب کل از  $\text{GaAs}:\text{As}$  در شکل (۵-۱۵) (در مقایسه با جذب لبه نوار از  $\text{GaAs}$  خالص نشان داده شده است.

## ۵-۱۲: خواص اپتیکی از چاههای کوانتومی $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ بوسیله کاشت یونی

### بی نظم شده

از فوتولومینانس، برانگیختگی فوتولومینسانس و اسپکتروسکوپی اپتیکی برای مطالعه بی‌نظمی یون القاء شده در چاههای کوانتومی  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  استفاده می‌شود.

چگالی محدودی از تله‌های غیرتابشی - همراه با اتمهای  $\text{Al}$  پخش شده در چاه کوانتومی  $\text{GaAs}$  در طی فرآیند بازپخت مسئول خاموشی فوتولومینسانسی چاههای کوانتومی می‌باشند.

در این بررسی اختلاط فصل مشترک ساختار ناهمگون نیم‌رسانا با استفاده از یون کاشته شده بوسیله بازپخت گرمایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به خصوص این روش به عنوان یک راه مهم برای ساخت ساختارهای کوانتومی با ابعاد کوچکتر همچون سیمهای کوانتومی و نقاط کوانتومی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این روش شامل دو مرحله اصلی می‌باشد:

ابتدا سطحهای منتخب شده نمونه با ساختار ناهمگون با استفاده از باریکه‌های یونی کانونی شده، با یونهای پرانرژی یا به وسیله کاشت از طریق لیتوگرافی معین شده با ماسک فلزی کاشته می‌شوند.

سپس نمونه کاشته شده، تحت بازپخت گرمایی قرار می‌گیرد که در طی آن دما به سرعت افزایش می‌یابد و پخش کاشت القایی افزایش یافته فصل مشترک ساختار روی می‌دهد. این فرآیند مربوط به

کاستی‌هایی است که به وسیله یون‌هایی عبوری بوجود می‌آیند. مطالعات اخیر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری تفکیک بالا و تصویربرداری شیمیایی شبکه ساختارهای ناهمگون کاشته شده غیر بازپخت گسترش عرضی آسیب کاشت القایی را در حدود ۲ تا ۵ نانومتر در اطراف مسیر یک یون - منفرد نشان می‌دهد، که این گسترش به انرژی جنبشی یون، جرم آن و جرم اتم‌های ساختار ناهمگون بستگی دارد [۲۶].

آسیب یون القاء شده به شبکه، که به کاهش مؤثر خاصیت اپتیکی منجر می‌شود، اساساً بعد از بازپخت گرمایی اصلاح می‌شود و ساختارهای ناهمگون معمولاً کارایی اپتیکی آنها را جبران می‌کنند. نتایج حاصل از کار بعضی پژوهشگران مؤید توضیحات بالا است که در زیر به چند نمونه از آنها اشاره می‌کنیم. در شکل (۵-۱۶) طیف دما پایین فوتولومینسانس PL (خطوط نقطه چین) و برانگیختگی فوتولومینسانس PLE (خطوط متصل) چاه کوانتومی با ضخامت ۱۰ nm برای دزهای کاشت مختلف نمایش داده شده‌اند. طیف‌هایی که بطور عمودی نمایش داده شده برای نمونه‌های بدون آرایش می‌باشد.

بالای یک بسته کاشت بحرانی  $7/5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  پیکهای طیفی مشاهده شده هر دو طیف  $^1\text{PL}$  و  $^2\text{PLE}$  به سمت انرژی‌های بالاتر می‌روند و پهنایشان افزایش می‌یابد.

شکل‌های (۵-۱۷) و (۵-۱۸) وابستگی دمایی زمان نزول PL و طیف کامل شدت لومینسانس را به ترتیب برای کنترل ساختار چاه کوانتومی بدون کاشت نشان می‌دهد.

شکل (۵-۱۷) وابستگی دمایی زمان نزول PL را برای ساختار چاه کوانتومی بدون کاشت مختلف نمایش می‌دهد. هر نقطه در شکل (۵-۱۷) از یک مدل نزولی دمایی منفرد مناسب بدست آمده است و

---

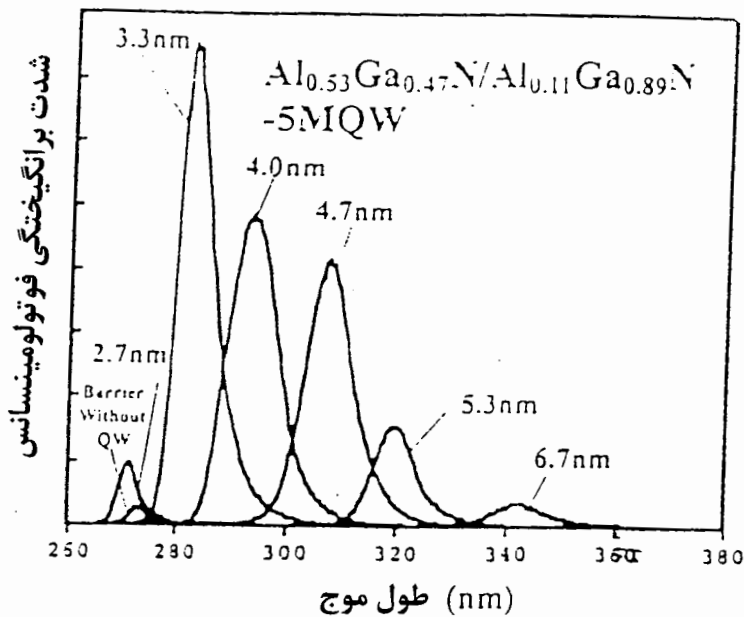
1 - PL = فوتولومینسانس

2 - PLE = برانگیختگی فوتولومینسانس

این نقاط با تابع پاسخ سیستم، از شدت اندازه‌گیری شده از علامتهای PL بعنوان تابعی از زمان، بعد از برانگیختگی ایجاد شده و درهم آمیخته شده‌اند.

شکل (۵-۱۸) طیف کامل شدت PL را بعنوان تابعی از دما برای همان ساختار چاه کوانتومی بدون کاشت نمایش می‌دهد.

هر نقطه داده شده در شکل (۵-۱۸) شدت طیفی را به طور کامل از PL بعنوان اندازه‌گیری تحت چگالی ثابت برانگیختگی موج پیوسته ارائه می‌دهد.



شکل (۵-۱۶): طیف PL اندازه‌گیری شده در ۷۷k از ساختار چاه کوانتومی ۵ لایه  $Al_{0.53}Ga_{0.47}N$  که با لیزر Ar-SHG (275nm) برانگیخته شده است برای ضخامت‌های مختلف چاه [۲۶].

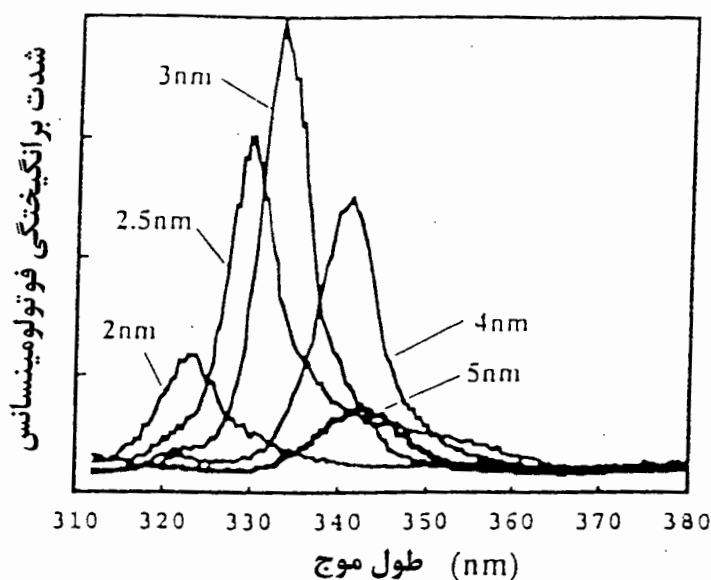
بطور وضوح دیده می‌شود که شروع از یک دمای مشخص که در آنجا پهنای چاه در حال افزایش است، فرآیندهای غیر تابشی پس گرفته می‌شود و کارایی PL به تدریج کاهش می‌یابد.

در شکل (۵-۱۹) وابستگی دمایی زمان نزول ساختارهای چاه کوانتومی با ضخامت الف) ۱۰ nm

ب)  $7\text{nm}$  را برای بسته‌های کاشت مختلف نشان می‌دهد.

برای تمام ساختارهای چاه کوانتومی کاشته شده یک روش واضح در شکل (۵-۱۹) ارائه شده است. همانطور که دزهای کاشت افزایش می‌یابند زمان نزول PL به ماکزیمم آن در یک دمای بحرانی پایین می‌رود. همانطور که دما بالاتر از دمای بحرانی وابسته به این دزهای کاشت می‌رسد، زمان نزول PL از چاه کوانتومی بدون کاشت منحرف می‌شود و به طور مستقل از دما تغییر می‌کند.

خطوط ممتد در شکل (۵-۱۹) همان مدل تئوری در شکل (۵-۱۸) و (۵-۱۷) را ارائه می‌دهد. خلاصه مطلب این است که بی‌نظمی ناشی از القای کاشت یونی از ساختارهای ناهمگون نیم‌رسانا، تغییر ساختاری در ساختار ناهمگون آنها ایجاد می‌کند این تغییرات از نظر کمی با استفاده از ابزار اپتیکی همچون اسپکتروسکوپی و PL و pLE می‌تواند تخمین زده شود [۲۶].

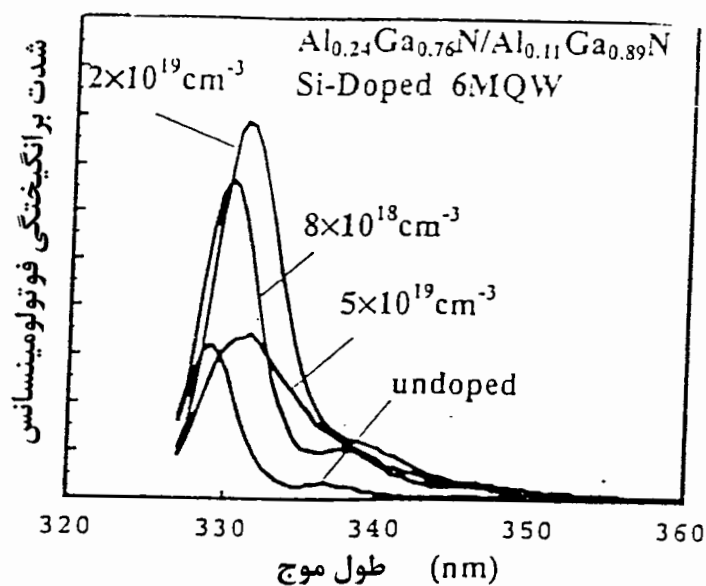


شکل (۵-۱۷): طیف PL در دمای اطلاق برای ضخامت‌های مختلف چاه که از ساختار چاه کوانتومی چند لایه با ۶ لایه  $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$  /  $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{N}$  پس از تحریک با یک لیزر XeCl بدست آمده است.

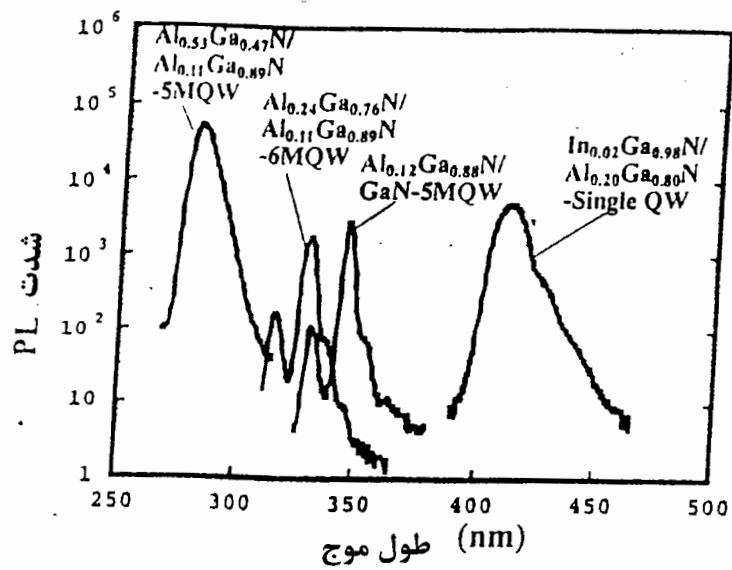
از اندازه‌گیریهای زمان تجزیه شده می‌توان نتیجه گرفت که چگالی محدودی از مرکز غیر تابشی مسئول کاهش کارایی و کوتاه کردن عمر PL نمونه‌های کاشته شده می‌باشد.

چگالی این مراکز که بقای رفتار گرمایی را ایجاد می‌کند متناسب با چگالی اتمهای Al است که به داخل چاه کوانتومی GaAs در طی فرآیند بازپخت پخش می‌شوند.

شکل (۱۹-۵) طیف گسیلی pL ساختارهای چاه کوانتومی چند لایه حاصل از  $Al_{0.12}Ga_{0.88}$  و  $Al_{0.24}Ga_{0.76}N / Al_{0.11}Ga_{0.89}N$  و  $Al_{0.53}Ga_{0.47}N / Al_{0.11}Ga_{0.89}N$  و ساختار چاه کوانتومی منفرد  $N / Al_{0.24}Ga_{0.76}N$  و  $In_{0.02}Ga_{0.98}N / In_{0.2}Ga_{0.08}N$  را نشان می‌دهد.



شکل (۱۸-۵): طیف PL اندازه‌گیری شده در دمای ۷K از Si آرایش یافته با ضخامت ۳ نانومتر و ساختار چاه کوانتومی چندگانه بدون آرایش  $Al_{0.24}Ga_{0.76}/Al_{0.1}Ga_{0.89}N$  که با یک لیزر He-Cd برانگیخته شده است.



شکل (۵-۱۹): طیف گسیلی فوتولومینوسانس از ساختار چاه کوانتومی  $Al_{0.53}Ga_{0.47}N/Al_{0.11}Ga_{0.89}N$ ،  $Al_{0.24}Ga_{0.76}N/Al_{0.11}Ga_{0.89}N$  و  $Al_{0.12}Ga_{0.88}N/GaN$  و  $In_{0.02}Ga_{0.98}N/Al_{0.20}Ga_{0.80}N$ ، ساختار چاه کوانتومی منفرد [۲۶].



## ۵-۱۳: فیلمهای نیمرسانای نانوبلور الکتروکرومیک

تزریق الکترون به فیلمهای نازک نانوبلور با اعمال یک پتانسیل الکتروشیمیایی برگشت پذیر کنترل می شود. در نتیجه تزریق الکترون به فیلمهای نانوبلور بی رنگ شدن کامل گذار داخل بانندی در ناحیه مرئی و جذب قوی بین بانندی در ناحیه مادون قرمز میانی مشاهده می شود [۲۷].

همچنین خاموش شدن فوتولومینسانس فیلم نانوبلور مشاهده می شود.

نانوبلورهای نیمرسانا بخاطر آن که خواص نوری وابسته به اندازه از خود نشان می دهند توجه زیادی جلب کرده اند و همچنین دارای کاربردهای قابل توجهی در ساخت سلول فتوولتاییک و دیوهای نوری می باشند. از جمله خواص نوری نانوبلورها تنظیم بار در آنها است که به خواص الکتروکرومیک در ناحیه مرئی و در ناحیه مادون قرمز میانی منجر می شود.

در این قسمت اثر تزریق الکترون برگشت پذیر و قابل کنترل به فیلمهای نازک نانوبلور را به وسیله روش الکتروشیمیایی و پاسخ الکتروکرومیک منتجه را بررسی می کنیم.

نانوبلور مورد نظر CdSe با پوشش اکسید تری آکتیل فسفین می باشد که بطور مناسب و مخصوص در یک سلول اسپکترو الکتروشیمیایی قرار داده شده است [۲۷].

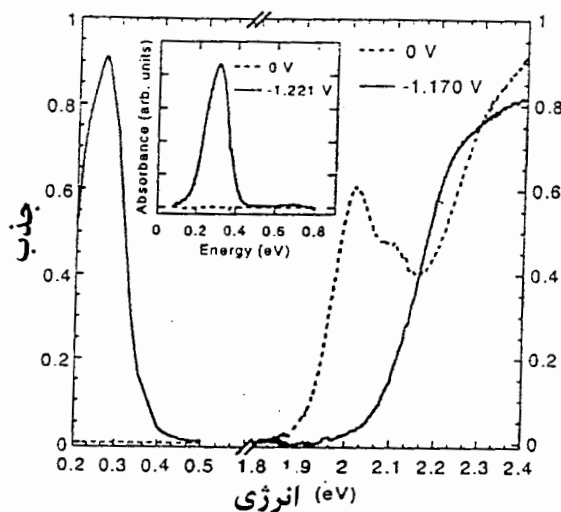
به فیلمهای نانوبلور مزبور با لیزر Ar نور تابیده می شود و فوتولومینسانس تابشی از آن با یک دوربین مجهز جفت شده به بار آشکار می شود. تمام اندازه گیری ها در دمای اطاق انجام می شود. و الکترون تزریق شده به پایین ترین اربیتال حبس کوانتومی اشغال نشده یعنی  $1S_e$  نانوبلور نیمرسانا تزریق می شود و گذار بین بانندی IR میانی را انجام می دهد. نتایج در شکلهای زیر ارائه شده اند.

شکل (۵-۲۰) طیف IR و UV/Vis یک فیلم نانوبلور CdSe به قطر  $5/8\text{nm}$  را قبل و بعد از تزریق نشان می دهد. ظهور جذب قوی IR دلیل بر آن است که الکترونها در پایین ترین محبس کوانتومی اشغال نشده نانوبلور یعنی حالت  $1S_e$  قرار گرفته اند. برای نانوبلورهای بزرگتر از  $5/4\text{nm}$  بیرنگی کامل

قله اولین تحریک در طیف UV/Vis را می‌توان بدست آورد، و این نشان می‌دهد که دو الکترون به اربیتال  $1S_e$  هر فیلم نانوبلور تزریق شده است. شکل (۵-۲۱) تغییرات در خواص IR و طیف مرئی فیلم نانوبلور CdSe به قطر  $6/8\text{nm}$  را بخاطر باردار شدن نشان می‌دهد.

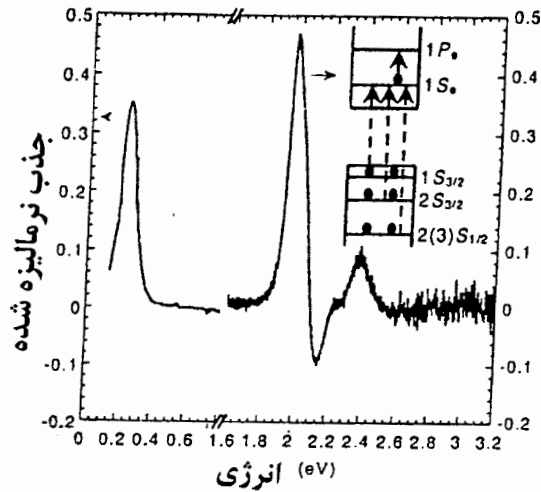
سه ویژگی سفید شدن در اختلاف طیف UV/Vis را می‌توان به شکافت باند ظرفیت CdSe به سه زیر باند: حفره - سنگین، حفره - سبک، و حفره - شکسته نشده و گذار آنها به حالت  $1S_e$  نسبت داد. این گذارها را می‌توان با مطالعه تحریک فوتولومینسانس تأیید نمود. این گذارها مترادف با گذارهای

$2S_{3/2} 1S_e - 1S_{3/2} 1S_e$  و  $2S_{3/2} 1S_e - 2S_{1/2} 1S_e$  می‌باشند که در آنها حالت‌های  $1S_{3/2}$  و  $2S_{3/2}$  و  $1S_{1/2}$  و  $2S_{3/2}$  و  $3S_{1/2} 1S_e$  می‌باشند که در آنها حالت‌های  $3S_{1/2} 1S_e - 2S_{1/2} 1S_e$  و  $2S_{3/2} 1S_e - 1S_{3/2} 1S_e$  و  $3S_{3/2}$  حالت‌های حفره‌ها می‌باشند [۲۷].

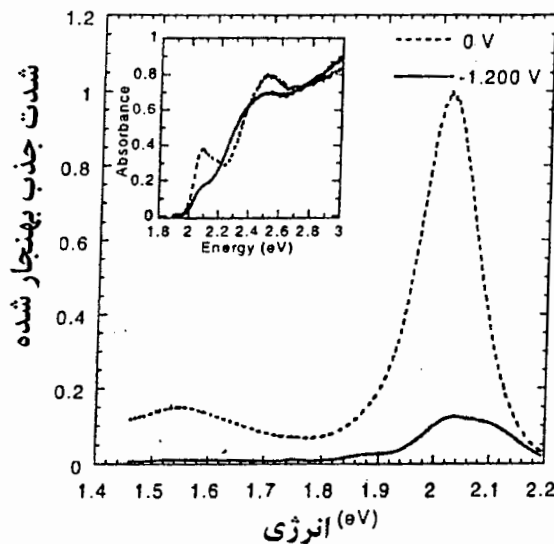


شکل (۵-۲۰): طیف IR و UV/Vis با قطر  $5/8\text{nm}$  از فیلم نانوبلور CdSe در پتانسیلهای مختلف که در بُرد انرژیهای مختلف جذب را به ما نشان می‌دهد [۲۷].

همانطور که شکل (۵-۲۲) نشان می‌دهد تغییرات در طیف مرئی و IR هر یک دیگری را بطور خیلی نزدیک تعقیب می‌کند، که دلیل بر آن است که آنها از تزریق یک نوع الکترون و یک فرآیند تزریق نتیجه شده‌اند.



شکل (۵-۲۱): طیف IR و اختلاف UV/Vis فیلم نانوبلور CdSe به قطر ۶/۸nm در پتانسیل  
 ۰/۹۶۶۷ - [۲۷].

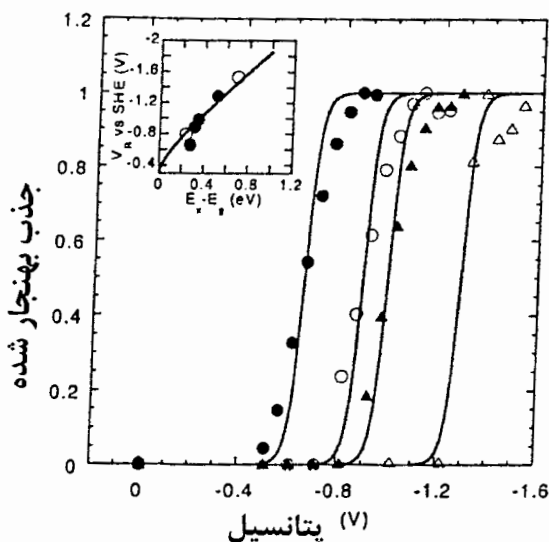


شکل (۵-۲۲): طیف IR (دایره‌های سیاه و توپور با خطهای یکنواخت) و نور مرئی (خطهای ۳ گوش با خطوط نقطه‌چین مانند) از فیلمهای نانوبلور CdSe با قطر ۶/۸nm در پتانسیلهای مختلف که این شکل جذب نرمالیزه شدن را برحسب زمان نشان می‌دهد [۲۷].

بالاخره شکل (۵-۲۳) وابستگی جذب IR به پتانسیل اعمال شده به سلول اسپکترو الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد. از این شکل پتانسیل کاهش نانو بلورها را می‌توان نتیجه گرفت، زیرا اسپکترو الکتروشیمیایی پتانسیل کاهش اتمهای ساخته شده را نشان می‌دهد.

پتانسیل کوچک شدن که به اندازه فیلمهای نانوبلور CdSe وابسته است تقریباً برابر با حاصل جمع انرژی محبس  $(E_x - E_g)$ ، انرژی باردار شدن  $E_c$  و پتانسیل کاهش CdSe کپهای است.

پتانسیلهای کاهش اندازه‌گیری شده فیلمهای نانوبلور CdSe با اندازه‌های مختلف در توافق نسبی با این تقریب ساده هستند (شکل ۵-۲۳ قسمت ضمیمه) بر این دلالت دارند که کاهش اندازه نانو بلورهای کوچکتر خیلی مشکلتر است.



شکل (۵-۲۳): وابستگی جذب IR به پتانسیل، برای فیلمهای نانوبلور CdSe با اندازه ۴/۲nm (مثلثهای سفید، ۵/۴nm (مثلثهای سیاه)، ۵/۸nm (دایره‌های سفید)، و ۶/۸nm (دایره‌های سیاه). (قسمت ضمیمه): وابستگی پتانسیلهای کوچک شدن  $(V_R)$  نانو بلورها به انرژی محبس،  $E_x$ ،  $(E_x - E_g)$  انرژی گذار اولین اکسیتون است که از طیف جذب اپتیکی اندازه‌گیری می‌شود،  $E_g$  گاف نواری ماده کپهای در دمای اطاق است.  $V_R$  نسبت به الکترو هیدروژن استاندارد سنجیده شده است. دایره‌های سیاه و سفید به ترتیب از اندازه‌گیری فیلمهای نانوبلور و محلول آن بدست آمده‌اند.

## فصل ۶:

### نتیجه گیری

#### نتایجی از خواص نوری نیمرساناهای نانوساختار

مطالعات وسیع تئوری و تجربی پژوهشگران نشان داده است که نانوبلورهای نیمرسانایی که براساس نمکهای فلزی پایه ریزی شده اند، از خود خواص اپتیکی منحصر به فردی بروز می دهند و برای کاربردهای کلیدزنی نوری بسیار مناسبند، و این نانوبلورهای نیمرسانا، مواد نوری غیرخطی اند. بدین معنی که هر ماده خواص نوری وابسته به حالت میدانهای الکترومغناطیسی حاضر را از خود نشان می دهد. کاربرد مهم دیگر این مواد نوری غیرخطی، استفاده از جذب کننده های حالت جامد قابل اشباع در کاربردهای لیزری مد قفل شده است. (یک جامد قابل اشباع، ماده ای است که دارای باند جذب نوری است که قدرت آن با افزایش شدت میدان کاهش می یابد.) در سالهای اخیر امکان استفاده از مواد شفاف، «همانند شیشه» توسط نیمرساناهای نانوبلوری به عنوان جذب کننده های قابل اشباع برای کاربردهای لیزری تقویت شده و توسط برخی از محققان مورد تأیید قرار گرفته اند.

نقاط کوانتومی نمکهای سرب  $PbS$  و  $PbSe$  برای کاربردهای مخابراتی مناسب اند. بعضی از پژوهشگران دریافتند بخاطر فرض نوار سهمی شکل، مدل ذره در یک کره برای توصیف ساختار الکترونی و طیف جذبی نقاط کوانتومی  $PbS$  و  $PbSe$  کافی نیست، علت این امر آن است که پایین ترین گذارهای انرژی در  $PbS$  و  $PbSe$  در نقطه  $L$  در منطقه بریلوئن روی می دهند. دانشمندان با تغییراتی

در این مدل، مدلی را پایه‌ریزی کردند که مناسب جهت پیشگوییهای دقیق و جزء به جزء طیف جذبی نانوبلورهای PbS و PbSe باشد.

با قرار داند نقاط کوانتومی یا دیگر مواد غیرخطی نوری در یک کاواک تشدید فابری - پرو، ساختار نمایش خواص کلیدزنی نوری را می‌توان از طریق کنترل دقیق پارامترهای دی‌الکتریک و ساختاری بدست آورد.

همچنین پژوهشگران نشان دادند ترکیبات فلز - نیمرسانا، با توجه به آن که ذرات نانوفلزی در یک نیمرسانای بلوری پخش می‌شود از خود، خواص دوگانه الکترونیکی - دی‌الکتریک و اپتیکی بروز می‌دهند که با کنترل کسر حجمی نانوخوشه‌های فلزی در نیمرسانا می‌توانند مناسب باشند و پیشرفتهای اخیر در این زمینه موجب شده است که بتوان خواص نیمرساناهای بلوری گرداگرد فلز داخلی را با کیفیت بالا ابقاء نمود. این عمل امکان طراحی مهندسی مواد برای کاربردهای ویژه با استفاده از خواص شناخته شده ترکیب فلز و نیمرساناها را بوجود آورد. یک دسته مهم از ترکیبات فلز - نیمرسانا، رشد GaAs:As می‌باشد که با استفاده از روآراستی پرتومولکولی روی زیر لایه‌ها در دمای کاهش یافته انجام می‌شود.

رشد دمای پایین، ترکیبی از دو درصد As به GaAs بعنوان ماده میزبان، خواص بلوری را در حد عالی حفظ می‌کند. رشد دمای پائین این مواد، در زمان فوق‌العاده سریعی حدود ۱۰۰ فمتوثانیه صورت می‌گیرد که از این مواد جهت ساخت در سوئیچهای اپتوالکترونیک و آشکارسازهای نوری با سرعت بالا استفاده می‌شود. پاسخ نوری قابل توجهی که این مواد در زیر لبه باند جذب از خود بروز می‌دهند به دلیل گسیل نوری از خوشه‌های فلزی این مواد می‌باشد. در نتیجه این مواد را به آشکارساز مادون قرمز بالقوه‌ای تبدیل می‌کند.

همچنین نتایج کار حاصل از تحقیق پژوهشگران نشان داد که بی‌نظمی ناشی از القای کاشت یونی از

ساختارهای ناهمگون نیمرسانا تغییر ساختاری در ساختار ناهمگون آنها ایجاد می‌کند. این تغییرات از نظر کمی با استفاده از ابزار اپتیکی همچون اسپکتروسکوپی و فوتولومینسانس و برانگیختگی فوتولومینسانس می‌تواند تخمین زده شود. اندازه‌گیریهای زمان تجزیه شده نشان می‌دهد که چگالی محدود از مراکز بقای رفتار گرمایی را ایجاد می‌کند که متناسب با چگالی اتمهای Al است که به داخل چاه کوانتومی GaAs در طی فرآیند بازپخت پخش می‌شوند.

همچنین نتایج تحقیقات پژوهشگران علم نانو نشان داد که از نانوبلورهای نیمرسانا می‌توان به جای مولکولهای رنگی کننده، جهت تولید رنگ در فیبرها و همچنین استفاده از آنها به عنوان عاملهای درخشنده‌های نوری در چاههای کوانتوم استفاده نمود. در نانوبلورهای نیمرسانا با کاهش اندازه ذرات، انرژی بالاتر می‌رود و ماکزیمم جذب و انتشار تغییر می‌یابد. چنین تغییری در بسیاری از مواد، از نقاط کوانتومی شروع می‌شود، بنابراین می‌توان ذراتی با اندازه‌های مختلف از یک ماده منفرد با خواص اپتیکی مختلف ساخت بطوری که کل ناحیه مرئی از طیف الکترومغناطیسی را پوشش می‌دهد تعداد زیادی از اشیاء در طبیعت وجود دارد که عمدتاً بخاطر ساختار فیزیکی تار و پودشان رنگی هستند بطوری که ابعاد ساختارشان که مسئول تهیه رنگ هستند از مرتبه طول موج نور مرئی می‌باشند. اخیراً ترکیبات پلیمری نقطه کوانتومی ساخته شده است، بطور برجسته تغییر در خواص اپتیکی این مواد تابعی از اندازه است. همانطور که اندازه کاهش می‌یابد برانگیختگیهای الکترونیکی به انرژیهای بالاتر (طول موجهای پایینتر) برطبق اثرات محبس کوانتومی، تغییر می‌کند و این تغییرات در خواص اپتیکی ظاهر می‌شود. وقتی اندازه نانوبلور به حدود  $10\text{ nm}$  می‌رسد آثار خواص اپتیکی ظاهر می‌شود. برای نانو بلورهای با اندازه کمتر از  $10\text{ nm}$  گسیل تابعی از اندازه می‌شود. گسیل با استفاده از شکل‌های مختلفی که برای نانوبلورها در نظر گرفته می‌شود می‌تواند قابل

کنترل باشد.

همچنین تحقیقات دانشمندان علم نانو نشان داد که تزریق الکترون به فیلمهای نازک نانوبلور با اعمال یک پتانسیل الکتروشیمیایی برگشت پذیر، کنترل می شود. در نتیجه تزریق الکترون به فیلمهای نانوبلور باعث بی رنگ شدن کامل گذار داخل بانندی در ناحیه مرئی و جذب قوی بین بانندی در ناحیه مادون قرمز میانی مشاهده می شود.

همچنین خاموش شدن فوتولومینسانس فیلم نانوبلور مشاهده می شود. از جمله خواص نوری نانوبلورها تنظیم بار در آنهاست که به خواص الکتروکرومیک در ناحیه مرئی و در ناحیه مادون قرمز منجر می شود. به فیلمهای نانوبلور مزبور با لیزر AI نور تابیده می شود فوتولومینسانس تابشی از آن با یک دوربین مجهز جفت شده به بار آشکار می شود. تمام اندازه گیریها در دمای اطاق انجام می شود و الکترون تزریق شده به پائین ترین اربیتال حبس کوانتومی اشغال نشده یعنی  $1S_e$  نانوبلور نیمرسانا تزریق می شود و گذار بین بانندی مادون قرمز را انجام می دهد.

به هر حال با توجه به آن که زمان چندانی از مطالعه روی نانوبلورها نگذاشته است، نمی توان نتایج زیادی را به دست آورد، مع ذلک علم نانوتکنولوژی افق وسیعی در برابر دیدگان پژوهشگران سرتاسر جهان گشوده است. امیدوارم به عنوان عضو کوچکی از این جامعه پژوهشگری توانسته باشم گامی هر چند کوچک برداشته باشم، و امیدوارم در آینده پژوهشگران کشور ما نیز در این زمینه موفق به پژوهشهای بسیار ارزشمند و قابل مطرحی در سطح جهانی بشوند.



## مراجع

### مراجع فارسی:

[۱] آشنایی با دانش جدید نور تألیف گرانت آر ، فائولز ترجمه غلامحسین سدیر عابدی مؤسسه چاپ و انتشار آستان قدس رضوی چاپ ۱۳۷۲.

[۲] مقدمه ای بر نور شناخت نیم رسانا ، تألیف ناصر پیغمبریان ، استفان کوچ ، آندره میزیرویچ ترجمه حمیدرضا مهاجری مقدم ، دکتر حبیب تجلی چاپ ۱۳۸۰.

[۳] کینگ - جی - دبیلیو - بیناب نمایی و ساختمان مولکولی ، نیویورک ، هولت راین هارت و ویستون ، ۱۹۶۴.

[۴] فیزیک و تکنولوژی قطعات نیمرسانا ، تألیف اس . ام .زی ترجمه غلامحسین سدیر عابدی ، ناشر دانشگاه امام رضا مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی چاپ ۱۳۷۵.

[۵] آشنایی با فیزیک حالت جامد ، تألیف چارلز کیتل ترجمه اعظم پورقازی ، مهدی صفا، جمشید عمیقان مرکز نشر دانشگاهی تهران چاپ ۱۳۶۷.

[۶] فیزیک وحالت جامد ، تألیف روزنبرگ ترجمه حسین عشقی ، حسن عزیری مرکز نشر دانشگاهی تهران . چاپ ۱۳۷۶

### مراجع انگلیسی:

[7] A.C Baynham and A.D.Boardman,( plasma effects in semiconductor.belicon and Alfren waves ), francis 1971

[8] <http://www.astronom/notes.com/light/emanim> Nature of Light.

[9] C.G kuper and G.D whitfied , eds.( Polarons and exciton, plenum,) 1963.

[10] S.Davydor, (Theory of molecular exciton MC Graw – Hill) 1962

[11] H.C.wolf , (The electronic spectra of aromatic molecular crystals , solid state physics) 1959

[12] <http://www.iran nonocom>

- [13] /<http://www.news.ucdavis.edu>
- [14] <http://www.nano-techplanet.com>
- [15] <http://www.technologyreview.com>
- [16] <http://www.news.excite.com>
- [17] <http://physicsweb.org>
- [18] <http://www.nature.com>
- [19] [http://dsa.dimes.tudelft.nl/usage/techno-intro/introduction Nano fabrication technology.htm](http://dsa.dimes.tudelft.nl/usage/techno-intro/introductionNano%20fabrication%20technology.htm)
- [20] J.R. , Chelikowsky and S.G. Louie, (optical properties of silicon nano crystals,) *Phys. Rev. Lett* 79-1770 (1997)
- [21] R.K. Wahs and J.H. Bruning (A review of fine-line Lithographic Techniques, present and future solid state) , *J. Vac. Sci. Technol.* 24, N0 S,99 (1981)
- [22] S. Iida and K. Ito (selective Etching of Gallium Arsenide crystal in  $H_2SO_4-H_2O_2-H_2O$ -system) *Electrochem. Soc.* 118 , 768 (1971)
- [23] J.E. Reynolds and M. Locasico (semiconductor nanocrystal based saturable absorbers for optical switching applications) *Appl. Phys. Lett* 76, 10(2000)
- [24] D.D. Nolte, M.R. Melloch, and J.M. Woodal, (optical scattering and absorption by metal nanoclusters in GaAs) , *Appl. Phys. Lett.* 61.1930.
- [25] M. Srinivasarao and A. Lyon (Quantum Dots as Dyes and as optical Brighteners for Fibers) National Textile Center Annual Report :November 2000
- [26] I. Shtrichman, D. Gershoni, and R. Kalish (optical properties of GaAs/ $Al_xGa_{1-x}$ As quantum wells disordered by ion implantation,) The American Physical Society 1997.
- [27] C. Wang, M. Shim ,and P. Guyot-Sionnest (Electrochromic semiconductor nano crystal Film) American Institute of physics 2002 .

# **Optical Properties of Semiconductor Nanostructures**

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is knowing the science of nanostructures materials especially the semiconductors nanocrystals and their optical properties that because of the small size of theirs are appeared. Also we have considered applications and extended properties of this new advanced technology which is known as nanotechnology .

In this thesis , at first we have discussed the electromagnetic waves , and then the optical properties of semiconductors. After that we have investigated nanostructures materials in detail , especially the optical properties of the semiconductor nanocrystals. Besides of these , we have assesed the other extended properties and applications of this new technology in different branches of the sciences. Also we have explained the some methods of the production and the growth of the semiconductors nanocrystals.

At the end of this work we have disucced the optical properties of some especial nanocrystals materials which depend on their sizes and change by changing the sizes.