١١٥.٦٤

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش ماده چگال

ترابرد الکترون بین دو نقطه کوانتومی

استاد راهنما:

دکتر محمد علی شاهزمانیان

پژوهشگر:

روح‌اله خوش‌لحنی

آبان ماه ۱۳۸۷

۱۳۸۸/۴/۲

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه و اداره

۱۱۵۰۶۴

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه اصفهان است.

پژوهه نگارش پایان نامه
رعایت شده است
تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش ماده چگال آقای روح‌اله خوش‌لحنی

تحت عنوان

ترابرد الکترونی بین دو نقطه کوانتومی

در تاریخ ۸۷/۸/۵ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمد علی شاهزمانیان با مرتبه ی علمی استاد امضا

۲- استاد داور داخل گروه دکتر غلامرضا راشدی با مرتبه ی علمی استادیار امضا

۳- استاد داور خارج از گروه دکتر قاسم انصاری پور با مرتبه ی علمی استادیار امضا

امضای مدیر گروه

گروه فیزیک
UNIV PHYSICS DEPT

با حمد و سپاس بی پایان خدای متعال که همواره الطاف بی‌پایانش یاریگر من در مقابله با مشکلات بوده است.

حال که این اثر به بار نشسته است بر خود لازم می‌دانم که از همه‌ی کسانی که به اینجانب کمک کرده‌اند سپاسگزاری نمایم. به ویژه از برادرانم و خواهرم که همواره کمک‌ها وراهنمایی‌های ایشان مایه‌ی دلگرمی من بود، قدردانی نموده و از ایشان کمال تشکررا دارم.

از همه‌ی دوستانم مخصوصاً از آقایان مجید افشاری، مهدی یزدانی، آزاد خانزادی، احسان دوهنده، مصطفی منیری، سعید گنج‌خانی، سعید پرنیان، ناصر طباطبایی ، محمدرضا ستوده، حسین علیزاده، احد صابر، امیر محسن فرقی و خانم مریم احمدنیامطلق و بقیه دوستان که مایه زحمتشان بوده‌ام ، تشکر می کنم.

از خانواده محترم حقیقت‌نژاد به ویژه آقای محمد حقیقت‌نژاد که مایه دلگرمی بنده در اصفهان بودند، سپاسگزاری می کنم.

درنهایت از استاد راهنمای محترم جناب آقای محمد علی شاهزمانیان که درطول دوران کارشناسی ارشد راهنمایی اینجانب را برعهده داشته اند و همواره راهنمایی‌های ایشان راهگشای اینجانب بوده و خواهد بود نهایت تشکر و امتنان را دارم.

تقدیم به:

پدرم و مادرم

اسوه‌های تلاش و فداکاری

چکیده

در تولید ساختارهای چند لایه‌ای از نیمه رساناها و تشکیل چاه‌های کوانتومی در فصل مشترک این چند لایه‌ها محصول جدیدی بدست می‌آید که به نقطه‌های کوانتومی معروف هستند. نقطه‌های کوانتومی از اعمال ولتاژ به دریچه‌های متصل به چندلایه‌ای‌ها حاصل می‌شوند و به علت کوچک بودن (در حد چند نانومتر) وکوانتیده بودن بار وانرژی، عنوان اتم مصنوعی به آنها اطلاق می‌گردد.

مورد دیگری که نقطه‌های کوانتومی را مورد توجه قرار داده است، قابل تنظیم بودن تعداد الکترون‌های داخل آن است که تنظیم تعداد الکترون‌های آن توسط دریچه‌های اتصال صورت می‌گیرد. از مهمترین ویژگی‌های نقطه‌های کوانتومی رسانش گرمایی و الکتریکی آنها است که در این پایان نامه رسانش الکتریکی آنها و ویژگی‌های جفت شدگی و رسانش الکتریکی نقطه‌های کوانتومی جفت شده مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبه رسانش الکتریکی نقطه‌های کوانتومی جفتیده، قله‌های تیزی را در تبهگنی انرژی نقطه‌های کوانتومی نشان می‌دهد.

کلید واژه: نقطه کوانتومی، نقطه‌های کوانتومی جفتیده

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: نیمرساناها

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ پیوند و ساختار بلوری ۲

۱-۲-۱ پیوند چهار وجهی در Si ۲

۱-۳ ساختار نواری ۳

۱-۴ نیمرساناهای Si و Ge ۴

۱-۴-۱- ساختار نواری Si_{1-x}-Ge_x ۵

۱-۵ نیمرساناهای چندلایهای ۶

۱-۵-۱ چاه های کوانتومی ۷

فصل دوم: سامانه های مزوسکوپیک

۲-۱ مقدمه ۱۰

۲-۲ معرفی برخی از مشاهدات فیزیکی ۱۱

۲-۲-۱ بیان چند مثال از تفاوت سامانههای مزوسکوپی و ماکروسکپی ۱۲

۲-۳ طول های مشخصه ۱۴

۲-۳-۱ طول موج دوبروی λ ۱۴

۲-۳-۲ مسیر آزاد میانگین، L_m، ۱۴

۲-۳-۳ طول واهلش – فاز ۱۵

۲-۴ فرمول لاندور ۱۷

۲-۴-۱ مقاومت رسانای پروازی ۱۸

عنوان صفحه

۲-۴-۲ محاسبهٔ جریان ۱۹

۲-۴-۳ نتایج آزمایشگاهی ۲۱

۲-۴-۴ افت ولتاژ کجا اتفاق می افتد؟ ۲۱

۲-۴-۵ فرمول لاندور ۲۲

۲-۵ اختلال هایی که در اندازه گیری مقاومت مزوسکوپی وارد می شوند ۲۴

۲-۶ فورمول بوتیکر (Buttiker) ۲۶

فصل سوم: نقطه های کوانتومی

۳-۱ مقدمه ۲۸

۳-۲ ساختار و تولید نقطه‌های کوانتومی ۲۹

۳-۲-۱ حکاکی ۲۹

۳-۲-۲ میدان الکتریکی تعدیل یافته ۳۱

۳-۲-۳ میکرو بلورهای نیمرسانا ۳۲

۳-۲-۴ رشد گزینشی ۳۳

۳-۲-۵ رشد خود سازمان یافته ۳۴

۳-۳ چگالی حالت ها ۳۵

۳-۴ محبوس سازی جانبی ۳۶

۳-۵ ترازهای انرژی فوک- داروین ۳۷

۳-۶- بینابنمایی ظرفیتی ۴۱

۳-۶-۱- اندازه گیری بوسیله بیناب نمای ظرفیتی ۴۲

۳-۷- توصیف نقطه کوانتومی با در نظر گرفتن برهمکنش اسپین - مدار ۴۵

۳-۷-۱- نقطه کوانتومی در غیاب میدان مغناطیسی ۴۶

عنوان صفحه

۳-۷-۲- نقطه کوانتومی تحت میدان مغناطیسی..... ۴۸

۳-۸- نقطه کوانتومی به عنوان ساختار مزوسکوپی و خواص ترابردی آن..... ۴۹

۳-۸-۱ رسانش در سامانه‌های مزوسکوپیک وفورمول لانداور ۵۰

فصل چهارم نقطه‌های کوانتمی جفت شده

۴-۲- نقطه های کوانتمی جفت شدهٔ الکتروستاتیکی..... ۶۳

۴-۳- نقطه های کوانتمی جفت شده تونلی ۶۴

۴-۳-۱- نتایج آزمایشگاهی انجام شده روی آرایه های نقطه ای..... ۶۵

۴-۳-۲- مکان قله های رسانش در رسانندگی خطی هنگامی که $G_b \langle\langle \frac{e^2}{h}$ ۷۱

۴-۳-۳- مکان قله های رسانش در رسانندگی خطی برای $G_b < \frac{e^2}{h}$ ۷۳

۴-۴-رسانش سامانه دونقطه ای متقارن در تونلزنی ضعیف بین نقطه ای ۷۵

۴-۵ تونلزنی در سامانه نامتقارن و جفت شدگی ضعیف ۸۰

منابع و مآخذ..... ۸۴

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل (۱-۱): پیوند چهار وجهی در بلور Si... ۲

شکل(۱-۲)سطوح انرژی ... ۵

شکل(۱-۳)تولید یک چاه کوانتومی... ۶

شکل(۲-۱)آزمایش تداخل پرتوهای الکترونی... ۱۵

شکل(۲-۲): یک رسانای پروازی... ۱۸

شکل (۲-۳) کوانتیده بودن رسانندگی رسانای پروازی ... ۲۱

شکل(۲-۴) رسانای پروازی بین دو سیم رابط... ۲۲

شکل(۲-۵)پیکربندی چهار جستجوگر... ۲۵

شکل(۲- ۶)پیکربندی متفاوتی از چهار جستجوگر... ۲۶

شکل (۳-۱) فرایند حکاکی نقطه کوانتومی... ۳۰

شکل (۳-۲) پیکربندی لایه‌ها در یک نقطه کوانتومی... ۳۱

شکل(۳-۳) نقطه کوانتومی استفاده شده توسط فالک... ۳۲

شکل(۳-۴)نقطه کوانتومی تولید شده به روش MOCVD... ۳۴

شکل(۳-۵) نقطه‌های کوانتومی خود سازمان یافته... ۳۵

شکل(۳-۶) چگالی حالت‌ها ... ۳۶

شکل(۳-۷) تحول ترازهای انرژی فوک-داروین در میدان مغناطیسی... ۴۰

شکل(۳-۸) بیناب نمایی ظرفیتی نقطه کوانتومی... ۴۳

شکل(۳-۹) بیناب نمایی ظرفیتی نقطه کوانتومی در میدان مغناطیسی... ۴۴

شکل(۳-۱۰)تحول میدان مغناطیسی پتانسیل‌های V_G... ۴۴

شکل(۳-۱۱) تصویر طرحواری از حصر کولنی... ۵۵

شکل(۴-۱) تصویرAFC از نقطه کوانتومی... ۶۴

شکل(۴-۲) آرایه نقطه‌های کوانتومی جفت‌شده... ۶۶

شکل(۴-۳) رسانش سامانه دو نقطه‌ای... ۶۹

شکل(۴-۴) شکافتگی نسبی دو نقطه‌ای... ۷۰

شکل(۴-۵)مدار معادل الکتروستاتیک برای یک ابزار سامانه دو نقطه‌ای... ۷۱

فصل اول

نیم رساناها

۱-۱ مقدمه

نیم‌رساناها از جالب ترین و مفیدترین گروه جامدات هستند. این مواد طیف وسیعی از پدیده‌ها، از خواص کاملاً فلزی تا خواص عایق‌ها، را نشان می‌دهند.

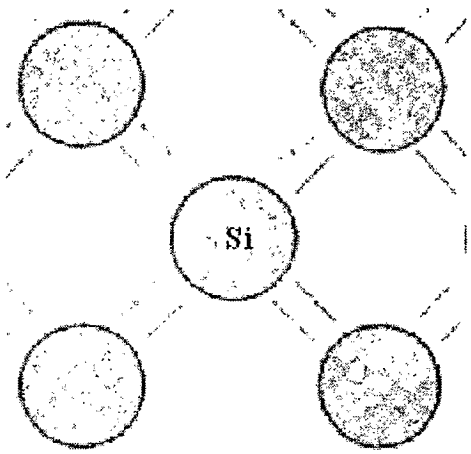
گرچه از سالهای ۱۹۲۰ و به مدت طولانی نیم‌رساناها مورد مطالعه قرار گرفته بودند، در واقع بعد از اواخر دهه ۱۹۴۰ که شاکلی، باردین و براتین ترانزیستور را اختراع کردند نیم‌رساناها جایگاه واقعی خود را یافتند. مهمترین خواص نیم‌رساناها رسانایی الکتریکی آنها است. از خاصیت دیگر نیم‌رساناها خاصیت اپتیکی آنها و ارتباط بین ساختار نواری آنها می‌باشد[۱].

در این فصل به توصیف پیوند ساختار بلوری و نواری نیمرساناها یی مانند Si ، Ge_xSi_{1-x} ،Ge پرداخته ونیمرساناهای چندلایه‌ای را نیز بررسی می کنیم

۱-۲ پیوند و ساختار بلوری

معروف‌ترین طبقه، نیم‌رساناهای گروه IV هستند. C (لماس) Si Ge نیم‌رساناهایی هستند که همه در ستون چهارم جدول تناوبی قرار دارند که Si و Ge کاربردهای بسیاری در قطعات الکترونیکی دارند.

نیم‌رساناها همه به صورت ساختار الماس متبلور می‌شوند. ساختار الماسی شبکه fcc دارند که پایه آنها از دو اتم مشابه تشکیل شده‌اند به طوری که هر اتم توسط چهار اتم همسایه احاطه شده است و یک چهار وجهی منظم را تشکیل می‌دهند. که در شکل(۱-۱)تصویر چهار وجهی بلور Si را در یک صفحه نشان داده شده است



شکل(۱-۱) پیوند چهار وجهی در بلور Si

۱-۲-۱ پیوند چهار وجهی در Si

نیم‌رساناهای گروه IV بلورهای کووالان هستند. یعنی اتم‌های آنها توسط پیوندهای کووالان در کنار هم قرار گرفته‌اند. تصویری که از یک بلور کووالان ارائه می‌گردد بدین گونه است که مغزهای یونی مثبت در جایگاه شبکه‌ای قرار می‌گیرند و توسط تعدادی از پیوندهای کووالان به یکدیگر ارتباط می‌یابند. بار کل هر اتم صفر است، زیرا بار یونی هر اتم توسط الکترون‌های کووالان جبران می‌شود.

گروه مهم دیگر نیم‌رساناها، گروه ترکیبات III-V است. این تشکیل نامگذاری به خاطر این است که هر کدام از این نیمرساناها از دو عنصر تشکیل یافته‌اند که یکی در ستون سوم ودیگری در ستون پنجم جدول تناوبی جای دارند. معروف‌ترین اعضای این گروه Ga As و In Sb هستند.

در ترکیبات III-V نیز پیوندها اساساً کووالان هستند. هشت الکترون لازم برای پیوندهای کووالان چهار وجهی توسط دو نوع از اتمها تامین می‌گردد. اتم سه ظرفیتی، سه الکترون و اتم پنج ظرفیتی، پنج الکترون خود را به اشتراک می‌گذارد. از آنجا که پیوند چهار وجهی معمولاً مربوط به پیوند کووالان است، می‌توان انتظار داشت نوع پیوند در این مواد به دلیل ساختار بلوری از نوع پیوند کووالان باشد.

پیوند در گروه III-V کاملاً کووالان نیست. از آنجا که عناصر تشکیل دهنده پیوند متفاوت هستند، توزیع الکترون در امتداد پیوند نیست بلکه به طرف یکی از اتم‌ها جابجا شده است. در نتیجه یکی از اتمها یک بار خالص دارد که چنین پیوندی چند قطب نامیده می‌شود.

۱-۳ ساختار نواری

نیم‌رساناها را به عنوان جامداتی تعریف می‌کنیم که در آنها بالاترین نوار انرژی اشغال شده (نوار ظرفیت) در دمای $T=0^{\circ}k$ کاملاً پر است. ولی شکاف بالای این نوار کوچک است به طوری که در دمای اتاق هم ممکن است الکترون‌ها به طور حرارتی از نوار ظرفیت به نوار بالاتر بعدی که نوار رسانش نام دارد برانگیخته شوند.

به بیان کلی هنگامی که گاف انرژی E_g کمتر از ۲ ev باشد، در دمای اتاق تعداد الکترون‌های برانگیخته قابل ملاحظه خواهد بود و ماده به عنوان نیمرسانا طبقه بندی می‌شود. ولی وقتی گاف انرژی بزرگ باشد، تعداد الکترون‌ها قابل چشم‌پوشی و ماده عایق محسوب می‌شود.

ما فقط به نوارهای رسانش و ظرفیت علاقه‌مندیم زیرا فقط این دو نوار در ایجاد جریان الکتریکی سهیم هستند. نوارهای پایین‌تر از نوار ظرفیت کاملاً پر و نوارهای بالای نوار رسانش کاملاً خالی هستند و برای تعیین مشخصه‌های نیم‌رساناها فقط به نوارهای رسانش و ظرفیت نیاز داریم.

انرژی نوار رسانش با رابطه زیر بیان می‌شود

$$E_c(k) = E_g + \frac{h^2k^2}{2m_e^*} \qquad (۱-۱)$$

که k بردار موج و m_e^* جرم موثر الکترون است. انرژی E_g نمایانگر انرژی گاف است. تراز انرژی صفر در بالای نوار ظرفیت قرار گرفته است.

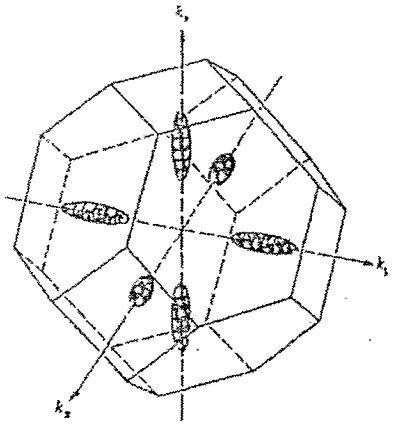
همواره از یک شکل استاندارد نوار برای توصیف نوار رسانش استفاده نشده است. در درجه اول به محدوده انرژی نزدیک پایین نوار علاقه‌مندیم چون اکثر الکترون‌ها در این محدوده قرار دارند انرژی نوار ظرفیت را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E_v(k) = -\frac{h^2 k^2}{2m_h^*} \qquad (۲-۱)$$

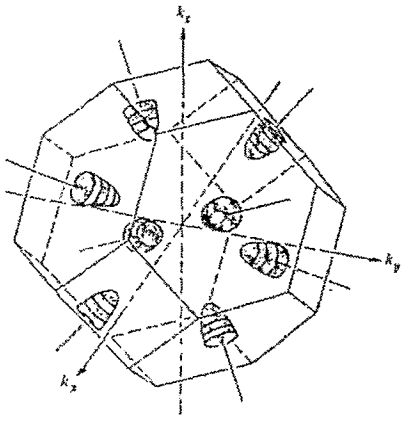
که m_h^* جرم موثر حفره است ، به خاطر شکل وارونه نوار ظرفیت جرم موثر الکترون در نوار ظرفیت منفی و مساوی $-m_h^*$ ولی جرم حفره مثبت است.

۱-۴ نیم‌رساناهای Si و Ge

سیلیکان و ژرمانیوم هر دو از عناصر گروه چهارم و دارای ساختار الماسی هستند. منطقه اول بریلوئن در هر دو تای این ساختارها ، مطابق شکل (۱-۲)یک هشت وجهی ناقص است که معادل با شبکه براوه مکعبی سطح مرکز دار (fcc) هست. ثابت شبکه‌ای a_0 در سیلیکان Å ۵٫۴۳۱ و در ژرمانیوم Å۵٫۶۵۷ است [۲]. به این ترتیب عدم تطبیق شبکه‌ای در این دو ساختار به اندازه ۴٫۲٪ است. ابتدا نیم‌رسانای Ge در اوایل دهه ۱۹۶۰ در ترانزیستورها و دیودها به کار گرفته شد.



(الف)



(ب)

شکل(۱-۲)سطوح انرژی بیضوی شکل در (الف)**Si** در جهت< ۱۰۰ > و در (ب) ودر **Ge** در جهت< ۱۱۱ > [۳]

به علت گاف نواری کوچک ژرمانیوم و جریان نشتی بالای آن، سیلیکان با گاف نواری بزرگ‌تر مورد توجه قرار گرفت. از طرفی Si را می‌توان در طبیعت به صورت سیلیکا و سیلیکات به وفور یافت. امروزه سیلیکان در یکسوسازها، ترانزیستورها و مدارهای مجتمع کاربرد فراوانی دارد.

۱-۴-۱- ساختار نواری $Si_{1-x}-Ge_x$

سیلیکان و ژرمانیوم تنها عناصر گروه چهارم هستند که می‌توانند، یعنی در یک سری کامل به صورت آلیاژ $Si_{1-x}-Ge_x$ با تغییر x از صفر تا یک، با هم ترکیب شوند. روشن است که با تغییر x به تدریج خواص آن‌ها نیز تغییر می‌کند. آلیاژ $Si_{1-x}-Ge_x$ مانند سیلیکان و ژرمانیوم با شبکه الماسی متبلور می گردد و ثابت شبکه آن به طور خطی با x بزرگ می شود.[۴]

بیشترین عدم انطباق شبکه‌ای بین سیلیکان خالص و ژرمانیوم خالص است. گاف نواری این آلیاژ مانند عناصر سازنده‌اش غیر مستقیم است و با تغییر مقدار x، تغییر می‌کند. به طوری که با زیاد شدن مقدار Ge ، در دمای ۴٫۲ کلوین، گاف نواری از ۱٫۱۷ تا ۰٫۷۴ الکترون ولت کوچک می‌شود.[۲]

می‌توان گفت با زیاد شدن Ge در ساختار $Si_{1-x}Ge_x$، کمینه نوار رسانش از جهت <۱۰۰> به جهت <۱۱۱> منتقل می‌شود.[۵].

۱-۵ نیم‌رساناهای چندلایه‌ای

با پیشرفت صنایع الکترونیک به قطعاتی نیاز است که قادر به واکنش سریع در برابر تغییر جهت جریان و پاسخ گویی در بسامدهای بالا باشند. حدود ۲۵ سال پیش،اختراع ساختارهای چندلایه‌ای با لایه‌های نازک در حد چند نانومتر میسر گردید[۶]. امروزه در ساخت ابررساناها، صفحات نمایش، ابر شبکه‌ها، قطعات میکروالکترونیک و حافظه‌های مغناطیسی از ساختارهای چندلایه‌ای بهره گرفته می‌شود. برای بالا بردن تمرکز مدارهای مجتمع، تکنولوژی ساخت لایه‌های نازک اهمیت بسیاری دارد. دیودها و ترانزیستورها اولین وسایل جهت به کارگیری لایه های نازک بودند.

ترانزیستورهای اثر میدانی FET[1] یکی از مهم‌ترین گروه‌های دستگاهی‌اند که شامل ساختار چندلایه‌ای فلزات، عایق‌ها و نیم‌رساناها هستند. این ترانزیستورها انواع مختلفی دارند که یکی از پرکاربردترین آنها، ترانزیستور با تحرک الکترونی زیاد HEMT[2] یا ترانزیستور اثر میدانی آلاییده مدوله شده MODFET[3] است این ساختارهای چند لایه‌ای دارای یک لایه کانال هستند که رسانندگی در آن رخ می هد.

---

[1] Field Effect Transistor
[2] High Electron Mobility Transistor
3 Modulation Doped Field Effect Transistor

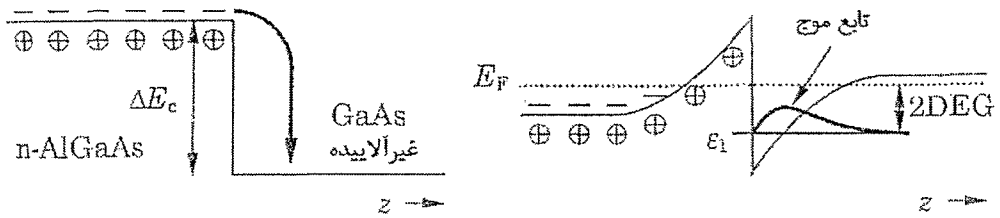
رسانایی کانال باید تا حد ممکن زیاد باشد. بدیهی است که رسانایی را می‌توان با افزایش آلاییدگی توسط ناخالصی‌ها در کانال بالا برد. در عین حال، افزایش ناخالصی منجر به افزایش پراکندگی توسط ناخالصی‌های یونیزه شده می‌شود که تحرک حامل‌ها را کاهش می‌دهد. پس لازم است به روشی غیر از افزودن ناخالصی، تراکم الکترونی زیادی را در کانال به وجود آوریم. یک روش هوشمندانه برای رسیدن به این هدف رشد یک چاه نازک و خالص است که توسط یک یا دو سد دارای ناخالصی و شکاف نواری پهن‌تر احاطه شده باشد.

معمولاً با رشد یک لایه که به لایه جداگر معروف است، حامل‌های درون چاه را از اتم‌های دهنده آن‌ها دور می‌کنند که باعث کاهش پراکندگی ناشی از ناخالصی یونیزه شده می‌شود و تحرک پذیری حامل‌ها را بالا می‌برد. در واقع تحریک‌پذیری حامل‌ها تقریباً به طور کامل توسط پراکندگی شبکه‌ای (فونون‌ها) کنترل می‌شود. این اثر به ویژه در دماهای پایین که پراکندگی فونونی نیز کم است، قابل توجه است. از طرفی اثر استتار مربوط به چگالی بسیار زیاد حامل دو بعدی نیز این پراکندگی را بیشتر کاهش می‌دهد.

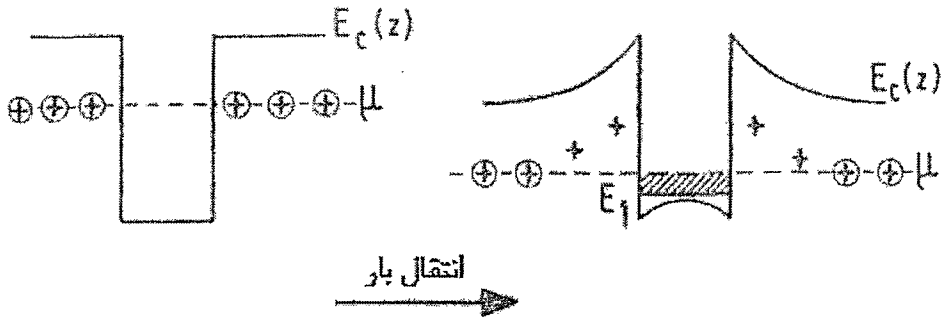
در رشد ساختارهای چندلایه‌ای، الزامات اصولی نظیر تطبیق ثابت‌های شبکه‌ای لایه‌ها و دست‌یابی به یک بستر مناسب برای رشد یک لایه کانال یکنواخت و خالص، از محدودیت‌هایی است که باید در نظر گرفت. در ابتدا سامانه‌های GaAs/AlGaAs با ثابت شبکه‌ای منطبق مورد توجه قرار گرفت. هر چند در ساختارهای GaAs/AlGaAs تحرک الکترونی بیشتر است و قابلیت کار در دماهای بالاتر و بنابراین سطوح با توان بیشتر امکان‌پذیر است، اما مشکلاتی نظیر رشد لایه نشانی، شکل‌گیری ترازهای غیر هم‌فاز و پایداری دستگاه‌ها باعث شد تا سامانه‌های $Si / Si_{1-x}Ge_x$ مورد توجه واقع شوند. اما این لایه‌ها ثابت شبکه‌ای برابری ندارند. کار پیشگامانه فرانک و وندر در اواخر دهه ۱۹۴۰، احتمال رشد بلور تک لایه فاقد تطبیق شبکه‌ای را بنا نهاد این موضوع با تحلیل کامل رشد لایه‌های فاقد تطبیق شبکه‌ای که به وسیله ماتوس و بلیکزلی انجام شد، ادامه یافت[۷]. آنها نشان دادند که رشد دقیق یک لایه رونشستی که ثابت شبکه‌اش نزدیک ولی متفاوت با ثابت شبکه زیرلایه است، می‌تواند به یک کشش همدوس که به عنوان کرنش معروف است، منجر شود. به این ترتیب می‌توان لایه‌های خیلی نازکی از مواد با عدم تطبیق شبکه‌ای ناچیز را رشد داد تا HEMT هایی شبه هم ریخت تشکیل شوند.

۱-۵-۱ چاه های کوانتومی

در یک پیوند ناهمگون دو ماده با گاف نواری متفاوت را بر روی هم رشد می‌دهند. هنگامی که در پیوند ناهمگون، ناپیوستگی در نوار رسانش یا در نوار ظرفیت وجود داشته باشد، یک چاه کوانتومی در محل پیوند تشکیل می‌شود. در نتیجه، حامل‌ها از یک لایه به لایه دیگر رفته و به علت سد پتانسیلی که در عقب آنها قرار گرفته است، قادر به بازگشت نیستند. در موقع هم‌سطح شدن تراز فرمی در این لایه‌ها، در حالت تعادل، ناپیوستگی در نوارها منجر به خمش نوار رسانش و نوار ظرفیت در پیوند ناهمگون می‌شود و تولید یک چاه کوانتومی شبه مثلثی می‌کند که در شکل(۱-۳-الف) نشان داده شده است. وقتی این ناپیوستگی از دو طرف به یک لایه اعمال شود حامل‌ها از آن دو لایه به لایه مورد نظر رفته و طبق شکل (۱-۳-ب) تولید یک چاه شبه مستطیلی می‌کنند که باعث به وجود آمدن چگالی بار سطحی بالایی می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل(۱-۳)(الف)تولید یک چاه کوانتومی مثلثی شکل (ب) تولید تولید یک چاه کوانتومی مستطیلی شکل در پیوندناهمگون[۸]

با توجه به پیشرفت روش‌های رشد لایه‌های نازک، امکان رشد لایه‌های بسیار نازکی از نیم رساناها با ضخامتی کمتر از ۱۰۰ Å امکان پذیر شده است. اگر ضخامت این چاه‌ها خیلی کم باشد، اثرات کوانتومی خود را نشان داده

ترازهای انرژی کوانتیده می‌شوند. به همین دلیل به آن‌ها چاه کوانتومی اطلاق می‌شود. حرکت حامل‌ها در این چاه‌ها در راستای رشد محدود شده است و در نتیجه، یک گاز حامل دو بعدی تشکیل می‌شود. بسته به این که این چاه در نوار رسانش یا در نوار ظرفیت باشد، نوع حامل‌ها شامل الکترون‌ها یا حفره‌ها خواهد بود.

در ساختارهای چند لایه‌ای به کار رفته در سامانه‌های واقعی، به منظور بالا بردن چگالی حامل‌های سطحی، چندین چاه کوانتومی را بر روی هم رشد می‌دهند.