بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فیزیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

فیزیک حالت جامد

مطالعه‌ی نظری گذار فلز – عایق در گاز حامل در چاه‌های کوانتومی با رهیافت سه بعدی

استاد راهنما: **دکتر محمدعلی صادق‌زاده**

استاد مشاور: **دکتر محمد اعتصامی**

پژوهش و نگارش: **زینب نیسیانی**

اسفند ۱۳۸۹

تقدیم به...

مادرم و پدرم

که همواره شمع وجودشان روشنی‌بخش مسیر زندگیم بوده است.

چکیده

آزمایشات نشان می‌دهد که وقتی چگالی گاز حامل کم باشد سیستم رفتار عایق‌گونه از خود نشان می‌دهد(با افزایش دما رسانندگی افزایش می‌یابد) و وقتی چگالی گاز حامل بیشتر از مقدار بحرانی باشد رفتار فلز گونه مشاهده می‌شود. چگالی بحرانی (n_c) ، مرز گذار فلز - عایق را مشخص می‌کند.

در رهیافت‌های متفاوتی که تاکنون در مطالعه‌ی این پدیده‌ی فیزیکی استفاده شده است کل گاز حامل شبه‌دوبعدی با تقریب یک سیستم دو بعدی درنظر گرفته شده است ولی گاز الکترونی یا حفره‌ای موجود در آن‌ها در ضخامتی حدود آنگستروم توزیع شده است. در این پایان نامه، گاز حامل بار را به صورت شبه‌دو بعدی (حرکت حامل‌ها در جهت محور رشد محدود، در حالی‌که در صفحه رشد حرکت آزاد است) در نظر گرفتیم. در چاه‌های کوانتومی GaAs و Si ماسفت، با ارزیابی پهنای تابع موج حامل‌ها در چاه کوانتومی، تغییرات فاصله‌ی حامل‌ها بر حسب چگالی دوبعدی آنها محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که چگالی بحرانی در گذار، متناسب با چگالی ناخالصی‌های زمینه است و فاصله حامل‌های گاز، از مرتبه فاصله ناخالصی‌های زمینه و مستقل از نوع حامل و چاه کوانتومی می‌باشد.

در بررسی ساختار $n-GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs$، با در نظر گرفتن گاز الکترونی به صورت لایه‌های نازک با ضخامت ۲ nm و انجام محاسبات، پراکندگی توسط ناخالصی‌های زمینه مهم‌ترین عامل محدودیت تحرک‌پذیری است. همچنین در بررسی گاز حامل به صورت سه بعدی (حرکت آزاد حامل‌ها در هر سه جهت) در مقایسه با حالت سه بعدی مشاهده شد که برازش نقاط نظری و تجربی در گستره کمتری از چگالی حامل انجام می‌گیرد. افزایش ضخامت لایه‌های گاز حامل در محدوده گذار اثری در تحرک‌پذیری کل ندارد و در این حالت، رهیافت شبه دو بعدی معادل با رهیافت دوبعدی است. در غیاب میدان مغناطیسی و در دمای $T \le 0.1T_f$ نتایج حاصل از برازش در وابستگی دمایی رسانندگی گاز الکترون دوبعدی در ساختار دورآلاییده مذکور، نقش اصلی استتار در محدوده گذار را نشان می‌دهد.

عنوان

فصل اول: ساختارهای دورآلاییده

مقدمه ۲

۱-۱ نیم‌رساناها ۳

۱-۲ چگالی حالت‌های انرژی ۵

۱-۳ چاه کوانتومی ۶

۱-۴ آلایش ۷

۱-۴-۱ آلایش کپه‌ای ۷

۱-۴-۲ آلایش دورآلاییدگی (مدوله‌شده) ۸

۱-۴-۳ ساختارهای دوبعدی ۸

۱-۴-۴ گاز الکترونی دوبعدی ۸

۱-۴-۵ گاز حفره‌ای دوبعدی ۹

۱-۴-۶ ساختار دورآلاییده در دمای پایین ۱۰

۱-۴-۷ مزیت ساختار دورآلاییده ۱۰

۱-۵ توزیع حالت‌های انرژی الکترون‌ها در چاه کوانتومی ۱۰

۱-۶ انواع ساختارهای دورآلاییده ۱۱

۱-۶-۱ انواع ساختارهای دورآلاییده بر اساس ترتیب رشد لایه‌ها ۱۲

۱-۶-۱-۱ ساختار دورآلاییده عادی: ۱۲

۱-۶-۱-۲ ساختار دورآلاییده معکوس ۱۲

۱-۶-۱-۳ ساختار دوگانه ۱۲

۱-۶-۲ انواع ساختارهای دورآلاییده بر اساس نوع آلایش(n یا p) ۱۳

۱-۶-۳ انواع ساختارهای دورآلاییده دریچه‌دار ۱۴

۱-۷ کاربرد ساختارهای دورآلاییده ۱۵
۱-۸ مادفت و ماسفت ۱۵
۱-۸-۱ مادفت ۱۶
۱-۸-۲ ماسفت ۱۷
۱-۹ ساختار دورآلاییده معکوس p-Si/SiGe/Si ۱۹
۱-۱۰ ساختار نوار ظرفیت ساختار دورآلاییده معکوس p-Si/SiGe/Si ۲۰
۱-۱۲ محاسبات خودسازگار چگالی سطحی حامل‌ها در چاه کوانتومی ۲۴
۱-۱۳ اثر بارهای پوششی بر انتقال بار گاز حفرهای دوبعدی ۲۴
۱-۱۴ روش‌های کنترل چگالی سطحی حامل‌ها ۲۵
۱-۱۵ ساختار دورآلاییده معکوس p-Si/SiGe/Si با دریچه بالا ۲۶
۱-۱۶ انتقال بار در ساختارهای دورآلاییده معکوس با دریچه بالا ۲۶
۱-۱۷ انتقال بار در ساختارهای دورآلاییده دریچه‌دار n-AlGaAs/GaAs/AlGaAs ۲۷
۱-۱۷-۱ تشکیل 2DEG در طرفین چاه کوانتومی ۲۷
۱-۱۸ ملاحظات تابع موج ۳۰
۱-۱۸-۱ وابستگی z_{av} به چگالی سطحی حامل‌ها در ساختارهای بدون دریچه ۳۱
۱-۱۸-۲ وابستگی z_{av} به چگالی سطحی حامل‌ها در ساختارهای دریچه‌دار ۳۱
۱-۱۹ رسانش الکتریکی گاز الکترونی شبه دوبعدی ۳۱
۱-۱۹-۱ رسانش استاتیک گاز الکترونی شبه دوبعدی ۳۲
۱-۱۹-۲ رسانش الکتریکی در محدوده کوانتوم الکتریکی ۳۵
۱-۲۰ استتار در یک گاز الکترونی شبه دوبعدی ۳۶
۱-۲۱ تابع دی‌الکتریک ۳۹
۱-۲۲ محدودیت تحرک‌پذیری به وسیله پراکندگی کولنی ۴۱
۱-۲۳ پراکندگی کولنی به وسیله ناخالصی‌های یونیده در لایه آلاییده ۴۳

۱-۲۴ پراکندگی ناخالصی یونیده بواسطه بارهای زمینه در لایه کانال ۴۵

فصل دوم: گذار فلز-عایق

مقدمه ۴۸

۲-۱ فلزات و غیر فلزات در تقریب الکترون تقریباً آزاد ۴۸

۲-۲ گذار فلز-عایق به علت روی‌هم افتادگی نوارها در جامدات کپه‌ای ۴۹

۲-۳ عایق اندرسون ۵۱

۲-۴ عایق مات ۵۱

۲-۵ نیم‌رسانای جبران‌نشده ۵۱

۲-۶ نیم‌رسانای جبران‌شده ۵۱

۲-۷ مسافت آزاد میانگین ۵۲

۲-۷-۱ معادله‌ی بولتزمن ۵۲

۲-۷-۲ فرمول بندی کوبو-گرین وود ۵۳

۲-۷-۳ وضعیت $l = a$ (شرط آیوف-رگال) ۵۴

۲-۸ جایگزیدگی ضعیف، رفتار برگمن ۵۵

۲-۹ رسانندگی جهشی ۵۷

۲-۱۰ دستگاه‌های بی‌نظم، جایگزیدگی، گذار اندرسون و مات ۵۷

۲-۱۱ نظریه مقیاس ۶۰

۲-۱۲ رسانندگی زیر $\sigma_{\min}$ و نزدیک گذار فلز-عایق اندرسون ۶۳

۲-۱۳ برخوردهای الکترون-الکترون ۶۳

۲-۱۴ رسانش ناخالصی، گذارهای فلز-عایق در نوارهای ناخالصی ۶۴

۲-۱۵ رفتار یک نیم‌رسانای آلاییده نزدیک گذار فلز-عایق ۶۶

۲-۱۶ اثر برهم‌کنش بر چگالی حالت‌ها و رسانندگی ۶۷

۲-۱۷ رفتار $T^{1/3}$ رسانندگی نزدیک گذار ۶۸

۲-۱۸ وابستگی دمایی رسانندگی در ساختار دوبعدی ۶۹
۲-۱۹ پارامتر بی‌نظمی ۶۹
۲-۲۰ پارامتر برهم‌کنش(شعاع ویگنرسایتز مصطلح) ۷۱
۲-۲۱ یافته‌های نظری رفتار فلزی و گذار فلز-عایق ۷۳
۲-۲۲ چگالی بحرانی ۷۵
۲-۲۳ فاز عایق و فاز فلزی ۷۵
۲-۲۴ توضیح کیفی از رفتار فلزی دو بعدی(r_s, t, q_0): ۷۶
۲-۲۵ یافته‌های آزمایشی ۸۰
۲-۲۵-۱ نمونه‌ها ۸۰
۲-۲۵-۲ رفتار عایق و فلزی: مدرکی برای گذار فلز-عایق ۸۱
۲-۲۵-۳ مقیاس تجربی ۸۸
۲-۲۵-۴ وابستگی دمایی و چگالی مقاومت ۹۲
۲-۲۶-۵ اثرات غیرخطی ۹۲

فصل سوم: محاسبات گذار فلز-عایق گازهای الکترونی و حفره‌ای دوبعدی

مقدمه ۹۶
۳-۱ ساختارهای مورد مطالعه ۹۸
۳-۲ محاسبات فاصله متوسط حامل‌ها و ناخالصی‌ها در آستانه گذار ۹۹
۳-۳ محاسبات تأثیر پراکندگی کولنی بر تحرک‌پذیری الکترون‌ها در ساختار دورآلاییده دریچه دار $n-GaAs/AlGa_{}As/GaAs$ ۱۰۳
۳-۴ بررسی ساختار $n-GaAs/AlGa_{}As/GaAs$ به صورت سه‌بعدی ۱۰۷
۳-۵ برازش وابستگی دمایی رسانندگی در چگالی‌های کم ۱۰۸
۳-۶ بحث و برداشت ۱۱۵
مراجع ۱۱۸

فصل اول

ساختارهای دورآلاییده

مقدمه

نیم‌رساناها گروهی از مواد هستند که از نظر توانایی هدایت الکتریکی، بین رساناها و عایق‌ها قرار دارند. ویژگی جالب توجه نیم‌رساناها این است که هدایت الکتریکی آن‌ها تحت تأثیر عواملی چون تحریک نوری، افزایش دما و همچنین تغییر میزان ناخالصی به نحو قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. ترانزیستورها نیز بر اساس ویژگی نیم‌رساناها کار می‌کنند. امروزه قطعات جدیدی طراحی شده‌اند که از لایه‌های نازک متوالی نیم‌رساناهای مختلف تشکیل می‌شوند. هر لایه دارای ضخامت مشخصی است که به دقت مورد بازبینی قرار می‌گیرد و از مرتبه ۱۰ نانومتر است. این‌ها ساختارهای ناهمگون نامیده شده‌اند. خواص الکترونی لایه‌های بسیار نازک به برخی از اصول فیزیک کوانتومی مربوط می‌شود. با پیشرفت روش‌های رونشانی مانند رونشانی پرتومولکولی (MBE)، امکان رشد لایه های نامتجانس و چاه های کوانتومی فراهم شده است به طوری‌که یک گاز الکترونی یا حفره‌ای شبه دوبعدی در یک لایه از ساختار تشکیل می شود. مطالعه‌ی نظری و تجربی ترابرد الکتریکی و مغناطیسی این گازها در دماهای بسیار پایین، در چند دهه‌ی اخیر از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. در چنین دستگاه‌هایی، الکترون‌ها و یا حفره‌ها دارای ترازهای انرژی کوانتیده در یک بعد فضا می‌باشند و حرکت آن‌ها در آن بعد محدود است. اما در دوبعد دیگر آزادی حرکت دارند. در مکانیک کوانتومی نیمه کلاسیک، دستگاه فیزیکی الکترون‌ها با توابع موج آن‌ها مشخص می‌شود. کوانتیده‌شدن انرژی در دستگاه‌های دوبعدی موجب تغییر چگالی حالت‌ها می‌شود. چگالی حالت‌ها کمیت مهمی برای محاسبه خواص ترابرد دستگاه‌های دوبعدی از جمله زمان واهلش و تحرک‌پذیری الکترون‌ها می‌باشد.

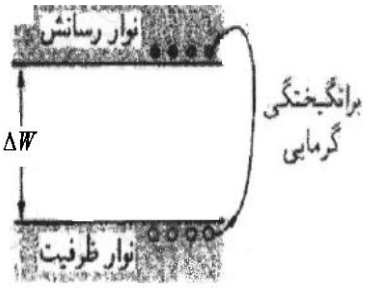
پراکندگی یک موضوع کلی است اما در دماهای پایین پراکندگی کولنی از اهمیت خاصی برخوردار است. در ساختارهای دورآلاییده به دلیل وجود لایه جداگر و جدایی حامل‌های بار از آلاینده‌های یونیده، پراکندگی کولنی نسبت به حالت کپه‌ای کاهش یافته و درنتیجه میزان تحرک-پذیری افزایش می‌یابد. اما وجود ناخالصی‌های باردار موجود در لایه آلاییده، همچنین ناخالصی‌های موجود در کانال و فصل مشترک، پراکندگی‌های کولنی را موجب می‌شوند که تحرک‌پذیری حامل-

ها را تحت تأثیر قرار می-دهند. تاکنون ساز و کارهای پراکندگی کولنی به روش‌های گوناگون توسط آندو[1] [۱۷و۱۹]، لی[2] و همکارانش[۳۹]، املیوس[3] و همکارانش[۱۴]، گلد[4] [۴۰و۴۱] و ... بررسی شده است. روش به کار گرفته‌شده در این فصل روش بستارد[۴۲] است.

در این فصل ابتدا با تعریف مختصری از نیم‌رساناها، به بحث درمورد روش‌های آلایش، چاه کوانتومی، ساختارهای دورآلاییده و انواع آن‌ها و کاربرد این‌گونه ساختارها در طراحی و ساخت ترانزیستورهای اثر میدانی پرداخته و انتقال بار در این ساختارها را مورد بررسی قرار می‌دهیم و در پایان ساز و کار پراکندگی کولنی به روش بستارد را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱-۱ نیم‌رساناها

نیم‌رساناها در دمای صفر کلوین یک نوار الکترونی کاملاً پر دارند که با یک گاف کوچک انرژی ($\approx 1eV$ یا کمتر) از یک نوار خالی جدا شده است. چون این الکترون‌ها نمی‌توانند در میدان‌های الکتریکی ضعیف، حالت انرژیشان را تغییر بدهند، هیچ رسانش الکتریکی پدید نخواهد آمد. اما در دماهای بالاتر آنقدر فعال سازی گرمایی وجود دارد که برخی از الکترون‌ها بتوانند از نوار پایینی (نوار ظرفیت) به نوار بالایی (نوار رسانش) برانگیخته شوند.



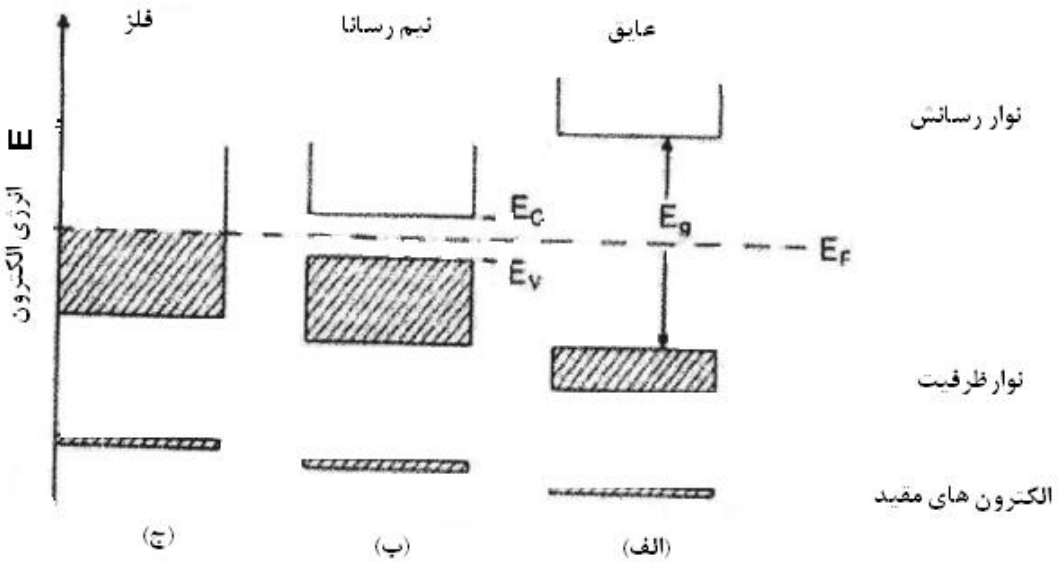
شکل (۱-۱): آرایش نوارهای الکترونی در نیم‌رسانا. برانگیختگی گرمایی از نوار ظرفیت به نوار رسانش در عرض گاف ΔW رخ می‌دهد. در اثر این برانگیختگی حفره‌های متحرک در نوار ظرفیت و الکترون-های متحرک در نوار رسانش ایجاد می‌شوند [۱].

[1] T. Ando
[2] K. Lee
[3] C. G. Emeleus
[4] A. Gold

در این حال میدان الکتریکی خارجی می‌تواند بر حالت‌های الکترونی در هر دو نوار تأثیر بگذارد و جریان عبور کند. با افزایش دما الکترون‌های بیشتری به نوار رسانش برانگیخته می‌شوند و درنتیجه رسانندگی افزایش می‌یابد در حالی‌که رسانندگی در فلزات با افزایش دما کاهش می‌یابد[۱] . نیم‌رساناهای اولیه شاخص، Ge و Si هستند. بررسی جدول تناوبی عناصر نشان می‌دهد که این مواد به گروه چهارم تعلق دارند. اکثر پیشرفت‌های اساسی و تکنولوژی اولیه روی Si و Ge انجام شده‌اند و مطالعات ما نیز بر روی آن‌ها متمرکز خواهد بود. از مهم‌ترین نیم‌رساناهای ترکیبی، GaAs را می‌توان نام برد که در زمینه ساخت قطعات مایکروویو و فرکانس بالا و قطعات پرکاربرد در الکترونیک نوری استفاده می‌شود.

در نیم‌رسانا بالاترین نوار انرژی اشغال‌شده (نوار ظرفیت)، در دمای T=0K کاملاً پر است. ولی شکاف بالای این نوار کوچک است به طوری‌که در دمای اتاق هم ممکن است کسر کوچکی از الکترون‌ها به طور گرمایی از نوار ظرفیت به نوار بالاتر بعدی که نوار رسانش نام دارد برانگیخته شوند. به بیان کلی هنگامی که گاف انرژی ΔW کمتر از ۲eV باشد ($K_BT/\Delta W > ۱/۳۸\times۱۰^{-۲۳}$)، در دمای اتاق تعداد الکترون‌های برانگیخته قابل ملاحظه خواهد بود و ماده به عنوان نیم‌رسانا طبقه بندی می‌شود. هنگامی الکترون‌ها برانگیخته می‌شوند که بتوانند از گاف انرژی بگذرند. پایین نوار رسانش از الکترون‌ها و بالای نوار ظرفیت از حفره‌ها پر می‌شود. درنتیجه هر دو نوار فقط به طور جزئی پر هستند و با میدان الکتریکی، الکترون‌ها و حفره‌ها می‌توانند جریان الکتریکی حمل کنند. ما فقط به نوارهای رسانش و ظرفیت علاقمندیم زیرا فقط این دو نوار در ایجاد جریان الکتریکی سهیم‌اند. نوارهای پایین‌تر از نوار ظرفیت کاملاً پراند و نوارهای بالای نوار رسانش کاملاً خالی هستند و هیچ کدام از آن‌ها در جریان الکتریکی سهمی ندارند. برای تعیین مشخصه‌های نیم‌رسانا فقط به نوارهای رسانش و ظرفیت نیاز داریم.

در شکل (۱-۲) فرق بین یک فلز، نیم‌رسانا و عایق به طور طرح‌وار رسم شده است.



شکل (۱-۲): نمایش طرح کلی نوارهای انرژی (الف) عایق (ب) نیم‌رسانا (ج) رسانا[۲].

۱-۲ چگالی حالت‌های انرژی

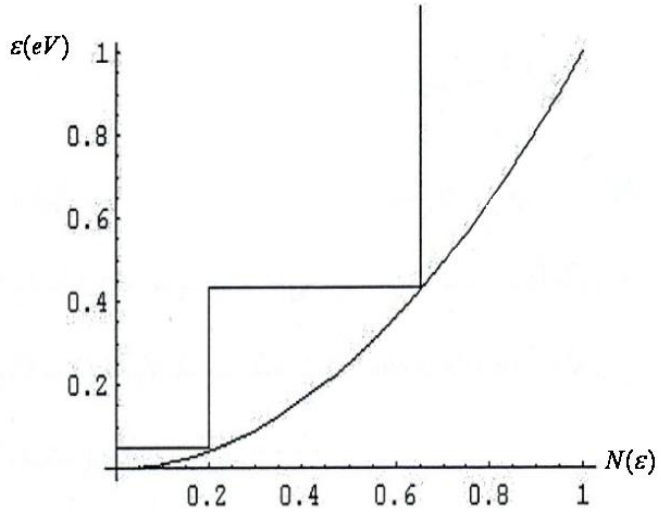
چگالی حالت‌ها، تعداد حالت‌های الکترونی قابل دسترس بر واحد حجم بر واحد انرژی حول یک انرژی E می‌باشد. اگر چگالی حالت‌ها را با N(E) نشان دهیم، تعداد حالت‌ها در فاصله‌ی انرژی dE حول انرژی E برابر با N(E)dE است. برای محاسبه این کمیت لازم است ابعاد دستگاه و رابطه انرژی بر حسب طول موج را بدانیم. می‌توان نشان داد در دوبعد چگالی حالت‌ها برای الکترون‌های غیربرهم کنشی به صورت زیر است[۳]:

$$N(\varepsilon) = \frac{m}{\pi\hbar^2}\sum_j(\varepsilon-\varepsilon_j)\theta(\varepsilon_F-\varepsilon_j) \qquad (۱-۱)$$

که در آن θ، تابع پله‌ای و ε_F انرژی فرمی و ε_j انرژی تراز j ام می‌باشد.. و چگالی حالت‌ها در سه بعد را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد[۴]:

$$N(\varepsilon) = \frac{3}{2}\frac{n}{\varepsilon_F}(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_F})^{1/2} \qquad (۱-۲)$$

پس چگالی حالت‌ها در دوبعد به صورت پله‌گونه و در سه بعد به صورت سهمی‌وار بر حسب ε افزایش می‌یابد.

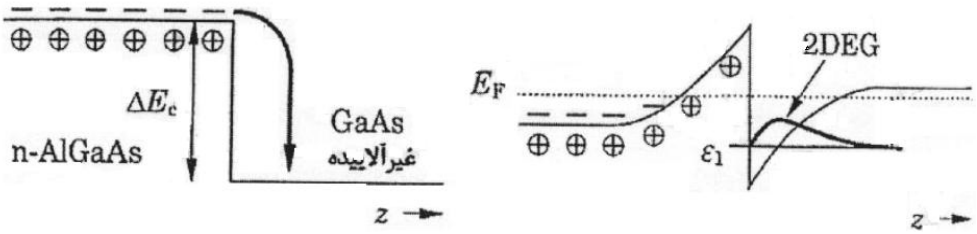


شکل (۱-۳): نمایش چگالی حالت‌ها در دو و سه بعد[۳]

چگالی حالت‌ها کمیت مفیدی برای محاسبه خواص دستگاه‌های دوبعدی از جمله زمان واهلش و تحرک‌پذیری می‌باشد.

۱-۳ چاه کوانتومی[۵]

در یک پیوند ناهمگون، دو ماده با گاف نواری متفاوت بر روی هم رشد می‌یابند. هنگامی که در این پیوند ناپیوستگی در نوار رسانش و یا ظرفیت وجود داشته باشد یک چاه کوانتومی در محل پیوند تشکیل می‌شود. درنتیجه 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 هم سطح شدن تراز فرمی در این لایه‌ها، در حالت تعادل، ناپیوستگی در نوارها موجب خمش نوار رسانش و ظرفیت در پیوند ناهمگون می‌شود و یک چاه کوانتومی شبه مثلثی تولید می‌شود(شکل۱-۴)



شکل (۱-۴): تولید یک چاه کوانتومی مثلثی در پیوند ناهمگون [۵].

[5] Quantum Well

۱-۴ آلایش[6]

با فن آوری پیشرفته آلایش نیم‌رسانا، تغییر تراز فرمی در یک نیم‌رسانای بسیار بلورین، ساده و قابل فهم است. آلایش، فرآیند جانشینی عمدی و کنترل‌شده اتم میزبان - در چند مکان شبکه بلورین - با مقادیر و انواع معینی اتم ناخالصی - شامل یک یا تعداد بیشتری و یا کمتری الکترون‌های ظرفیت از الکترون‌های ظرفیت اتم میزبان است[۶]. افزونی الکترون یا حفره توسط فرآیند آلایش موجب تغییر چگالی حالت‌ها در بلور و تغییر تراز فرمی به ترتیب به بالا یا پایین می شود. به کمک آلایش می‌توان ویژگی‌های الکتریکی نیم‌رسانا، مقاومت ویژه ماده، غلظت بارهای متحرک در نیم‌رسانا را تغییر داد. از منظر آلایش می‌توان مواد نیم‌رسانا را به دو دسته‌ی زیر تقسیم کرد:

۱ - آلایش کپه‌ای(نوع n و p)

۲ - آلایش دورآلاییده (دورآلاییده‌ی مدوله‌شده)

۱-۴-۱ آلایش کپه‌ای[7]

در این نوع آلایش، اتم‌های ناخالصی در ضمن رشد (و یا پس از رشد) به بلور میزبان افزوده می‌شوند و به عبارتی اتم‌های میزبان در سرتاسر بلور توزیع شده‌اند. در دماهای بالا، اتم‌های آلاینده(ناخالصی)، یونیده می‌شوند و تولید الکترون یا حفره‌ی آزاد می‌کنند. از آنجایی-که حامل-های آزاد و ناخالصی‌های یونیده در یک محیط و در مجاورت هم قرار دارند برهم‌کنش کولنی میان حامل‌های آزاد با آلاینده‌های یونیده باعث افزایش پراکندگی و درنتیجه کاهش تحرک‌پذیری حال-های آزاد می‌شوند. در این نوع آلایش، توزیع حامل‌ها سه‌بعدی است.

[6] Doping
[7] Bulk Doping

۱-۴-۲ آلایش دورآلاییدگی (مدوله‌شده[8])

در این حالت آلاینده‌ها در یک لایه و حامل‌های بار آزاد در لایه دیگر و با فاصله از هم تشکیل می‌شود. در این آلایش برهم‌کنش کولنی ودر نتیجه آن پراکندگی کاهش می‌یابد و این باعث افزایش تحرک‌پذیری حامل‌های بار در نیم‌رسانا می‌شود[۷]. در این نوع آلایش توزیع حامل‌ها شبه‌دوبعدی است.

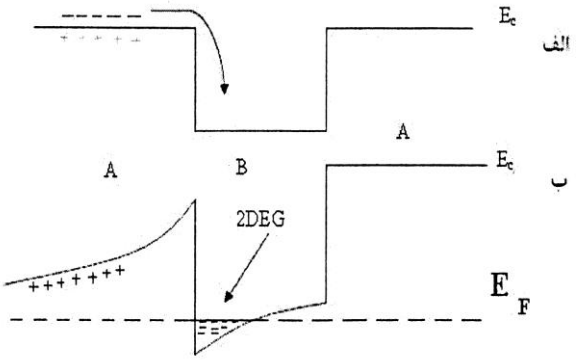
۱-۴-۳ ساختارهای دوبعدی

منظور از دوبعد آن است که دستگاه تنها در دوبعد از فضا آزادی گسترش دارد و در بعد سوم حرکت حامل محدود شده است. یک مثال مهم از دستگاه دوبعدی، گاز الکترونی یا حفره‌ای دوبعدی ($2-DEG$ یا $2-DHG$) می‌باشد که در فصل مشترک پیوند ناهمگون تشکیل می‌شود. $2-DHG$ در نوار ظرفیت و $2-DEG$ در نوار رسانش قرار دارد. گاز الکترونی یا حفره‌ای محبوس در یک پیوند ناهمگون مدوله آلاییده، مهم‌ترین دستگاه دوبعدی برای ترابرد الکترونی یا حفره‌ای می‌باشد. در چنین دستگاه‌هایی، الکترون‌ها و حفره‌ها دارای ترازهای انرژی کوانتیده شده در یک بعد فضا می‌باشند و حرکت آن‌ها در آن بعد محدود است ولی در دوبعد دیگر آزادی حرکت دارند. کوانتیده‌شدن انرژی در دستگاه‌های دوبعدی موجب تغییر چگالی حالت‌ها می‌شود.

۱-۴-۴ گاز الکترونی دوبعدی

شرط تشکیل گاز الکترونی دوبعدی(2-DEG) در ساختار نامتجانس ABA این است که در محل لایه B یک چاه کوانتومی در نوار رسانش E_c وجود داشته باشد و چنانچه بخشی از لایه (لایه‌های) مجاور مثلاً در حالت ساده (A) با ناخالصی نوع n آلاییده شده باشد الکترون‌های مربوط به ناخالصی‌های یونیده به ترازهای کم انرژی داخل چاه کوانتومی انتقال می‌یابند و گاز الکترونی دوبعدی شکل می‌گیرد(شکل (۱-۵)).

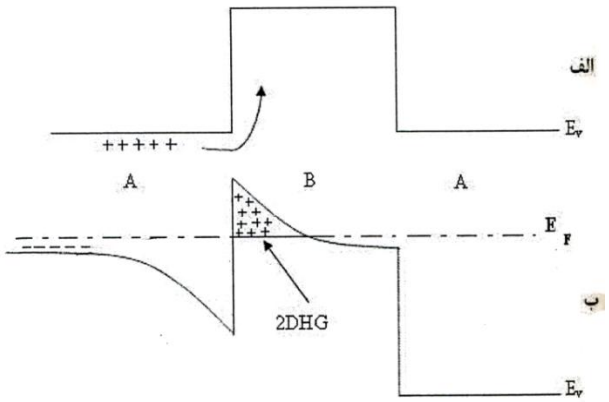
[8] Modulation doping



شکل (۱-۵): نمای نوار رسانش و تشکیل گاز الکترونی دوبعدی در چاه کوانتومی الف- آغاز مرحله انتقال الکترون‌ها به ترازهای کم انرژی داخل چاه کوانتومی ب- پایان مرحله انتقال الکترون‌ها به ترازهای کم انرژی داخل چاه کوانتومی و رسیدن به حالت تعادل الکتروستاتیکی.

۱-۴-۵ گاز حفره‌ای دوبعدی

شرط تشکیل گاز حفره‌ای دوبعدی(2-DHG) در ساختار نامتجانس ABA این‌است که در محل لایه B یک چاه کوانتومی در نوار ظرفیت E_v وجود داشته باشد و چنانچه بخشی از لایه(لایه-های) مجاور مثلاً در حالت ساده (A) با ناخالصی نوع p آلاییده شده باشد حفره‌های مربوط به ناخالصی‌های یونیده به ترازهای کم‌انرژی داخل چاه کوانتومی انتقال می‌یابند و گاز حفره‌ای دوبعدی شکل می‌گیرد(شکل (۱-۶)).



شکل (۱-۶): نمای نوار ظرفیت و تشکیل گاز حفره‌ای دوبعدی در چاه کوانتومی الف- آغاز مرحله انتقال حفره‌ها به ترازهای کم‌انرژی داخل چاه کوانتومی ب- پایان مرحله انتقال حفره‌ها به ترازهای کم‌انرژی داخل چاه کوانتومی و رسیدن به حالت تعادل الکتروستاتیکی.

۱-۴-۶ ساختار دورآلاییده در دمای پایین

در دمای اتاق همه ناخالصی‌ها در لایه آلاییده یونیزه هستند. بخشی از این حفره‌ها به درون چاه کوانتومی منتقل می‌شوند و قسمت عمده آن‌ها در لایه آلاییده وجود دارد. در این شرایط مطالعه حفره‌های درون چاه کوانتومی مشکل است و لذا با سردکردن ساختار، حفره‌های ناخالصی در لایه آلاییده، یخ زده[9] می‌شوند و لذا در دمای پایین هیچ حفره آزادی به جز حفره‌های موجود در چاه کوانتومی وجود ندارد و مقاومت طولی کاهش می‌یابد و در دماهای کمتر از K ۴ ناهنجاریهای مربوط به آثار کوانتومی رخ می‌دهد[۸].

۱-۴-۷ مزیت ساختار دورآلاییده

ویژگی بارز دستگاه‌های دورآلاییده این است که گاز حفره‌ای یا الکترونی دوبعدی حتی در دماهای پایین(نزدیک به صفر کلوین) در مقایسه با ساختارهای آلاییده کپه‌ای جایگزیده نمی‌شوند و تحرک‌پذیری حامل‌های آن‌ها نه تنها کاهش نمی‌یابد بلکه افزایش نیز می‌یابد.

۱-۵ توزیع حالت‌های انرژی الکترون‌ها در چاه کوانتومی

این مسأله مکانیک کوانتومی یک ذره در جعبه بسیار نازک است. اگر d ضخامت لایه در جهت z باشد، هامیلتونی ذره در چاه به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\hbar^2}{2m}\partial^2\psi / \partial z^2 = E_z\psi \qquad (۳-۱)$$

که در آن E_z انرژی مربوط به حرکت الکترون در عرض لایه است و از عبارت $\hbar^2k^2/2m$ به دست می‌آید.

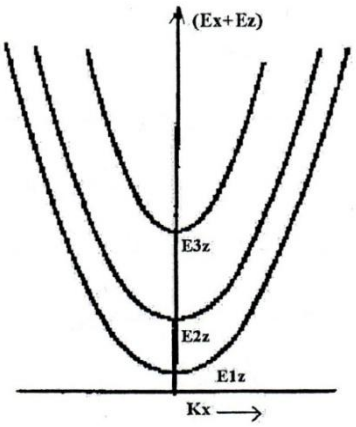
مقادیر تقریبی را می‌توان با فرض یک سد پتانسیل نامتناهی به دست آورد. مقادیر مجاز k_z برای جواب‌هایی که به شکل امواج ایستاده‌اند به‌صورت $\pi n_z / d$ است که در آن n_z اعداد صحیح‌اند. چون این ترازها گسسته‌اند و از هم فاصله زیادی دارند، فیلم (لایه وسطی) چاه کوانتومی

[9] Freez out

نامیده می‌شود. حالت‌های الکترونی به‌خاطر اسپین الکترونی تبهگنی دوگانه دارند. الکترون می‌تواند در صفحه x و y این فیلم حرکت کند و انرژی کل آن برابر است با

$$\frac{\hbar^2(k_x{}^2+k_y{}^2+k_z{}^2)}{2m} \qquad (۴-۱)$$

که در آن k_x و k_y می‌توانند مقادیر بسیار کوچکی را اختیار کنند، زیرا حرکت در این صفحه تا حدود زیادی مقید نیست. مجموعه سهمی‌ها در شکل (۱-۷) این توزیع انرژی را نشان می‌دهد. پایین‌ترین سهمی بستگی (E_x+E_z) به k_x را برای الکترون‌هایی که در پایین‌ترین تراز E_z قرار دارند را نشان می‌دهد و کمینه سهمی‌های متوالی بالاتر در مقادیر بزرگتر E_z قرار دارند (البته، برای حالت‌های k_y و E_y+E_z نیز مجموعه سهمی‌های مشابهی وجود دارد.). این منحنی-ها، زیرنوار نامیده می‌شوند.



شکل (۱-۷): منحنی‌های (E_x+E_z) بر حسب k_x، که جداشدن حالت‌ها به زیرنوارها را نشان می‌دهد. کمینه هر سهمی در یکی از مقادیر مجاز E_z واقع است[۹].

۱-۶ انواع ساختارهای دورآلاییده

ساختارهای دورآلاییده را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم‌بندی نمود:

الف - بر اساس ترتیب رشد لایه‌ها

ب - براساس نوع آلایش(n یا p)

ج - بر اساس دریچه‌دار یا بی‌دریچه‌بودن

۱-۶-۱ انواع ساختارهای دورآلاییده بر اساس ترتیب رشد لایه‌ها

در این تقسیم‌بندی ساختار دورآلاییده بر حسب ترتیب قرارگرفتن لایه جداگر و کانال به سه دسته تقسیم می‌شود:

۱-۶-۱-۱ ساختار دورآلاییده عادی[10]:

مطابق شکل (۱-۸-الف)، لایه جداگر و آلاییده فوقانی، گاز حامل بار را در قسمت بالای لایه کانال(چاه کوانتومی) تشکیل می‌دهند. این ساختار از پیچیدگی کمتری برخوردار است و هر دو لایه کانال و جداگر بدون آلایش می‌باشند.

۱-۶-۱-۲ ساختار دورآلاییده معکوس[11]

در این ساختار(شکل (۱-۸-ب))، لایه کانال روی لایه آلاییده و لایه جداگر رشد می‌یابد و حامل‌های گاز باردار در قسمت پایین چاه کوانتومی تشکیل می‌شوند. به دلیل پیچیدگی‌های روش‌های رشد در این حالت، تحرک‌پذیری نسبت به ساختار عادی کمتر است و این به خاطر افزایش پراکندگی در اثر ناخالصی‌هاست، به خصوص وقتی از روش انباشت بخارهای شیمیایی برای رشد استفاده می‌شود. همچنین به یک لایه آلاییده با کیفیت بالا نیاز است که از لحاظ عملی تهیه آن مشکل است.

۱-۶-۱-۳ ساختار دوگانه[12]

این ساختار ترکیب ساختارهای عادی و معکوس است که در آن از دولایه آلاییده برای تهیه حامل‌ها استفاده شده است و عملاً افزایشی را در چگالی بارهای سطحی نشان می‌دهد(شکل (۱-۸-ج)).

[10] Normal Structures
[11] Inverted Structure
[12] Doble Structure