بسم الله الرحمن الرحيم

١٠٤٣٧٠

مجتمع علوم
دانشکده فیزیک

پایان نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
فیزیک حالت جامد

مطالعه و بررسی گذار فلز- عایق در ساختارهای چند لایه ای AlGaAs

اساتید راهنما:
دکتر قاسم انصاری پور
دکتر محمد علی صادق زاده

استاد مشاور:
دکتر حسین مختاری

۱۳۸۷/۱۹/۲۳

پژوهش و نگارش:
امیر رحمانی

اسفند ماه ۸۶

۱۰۴۳۷۹

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

و

N. F. Mott

P. W. Anderson

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی	صورتجلسه دفاعیه پایان نامه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد	شناسه: ب/ک/۳

جلسه دفاعیه پایان نامه تحصیلی آقای/ خانم: امیر رحمانی دانشجوی کارشناسی ارشد

رشته/گرایش: فیزیک حالت جامد

تحت عنوان:

مطالعه و بررسی گذار فلز- عایق در ساختارهای چندلایه ای AlGaAs

و تعداد واحد: ۶ درتاریخ ۱۳۸۶/۱۲/۱۱ باحضور اعضای هیأت داوران (به شرح ذیل) تشکیل گردید.

پس از ارزیابی توسط هیأت داوران، پایان‌نامه با نمره: به عدد ۱۸/۳۰ به حروف هیجده و سی صدم

و درجه عالی مورد تصویب قرارگرفت.

عنوان	نام و نام خانوادگی	امضاء
استاد/ استادان راهنما:	دکتر قاسم انصاری پور دکتر محمد علی صادق زاده	
استاد/ استادان مشاور:	دکتر حسین مختاری	
متخصص وصاحبنظرداخلی:	دکتر محمد کاظم توسلی	
متخصص و صاحبنظر خارجی:	دکتر مهدی صفا	

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (ناظر)

نام ونام خانوادگی: دکتر عیسی محمودی

امضاء: ۸۶/۱۲/۱۱

چکیده

ترانزیستورهای اثر-میدان فلز-اکسید-نیمه رسانا (ماسفت)[1] و ترانزیستورهای اثر- میدان مدوله‌ی آلائیده (مادفت)[2] وسایل توانمندی در مطالعه برهم‌کنش الکترون-الکترون هستند. در این وسایل نسبت فاصله نوعی برهم‌کنش r_s[3] به شعاع موثر بور a^* می‌تواند از ۰/۷ تا ۳۰ تغییر کند. در سال‌های اخیر به خصوص از اواسط دهه ۹۰ آزمایش‌هایی بروی نمونه های خالص از ماسفت‌ها و مادفت‌ها صورت گرفته است[۵] و نتایج حاکی از وجود جنبه‌های جدیدی در نظریه فیزیک ماده چگال است. وجود حالت فلزی که که تا دهه ۹۰ هیچ احتمالی برای وجودش در دوبعد وجود نداشت، فیزیکدانان ماده چگال را بار دیگر به بررسی گاز الکترون دو بعدی معطوف کرد. این حالت از گاز الکترونی که در دمای پایین و چگالی‌های بالا حاصل میشود هنوز به طور کامل شناخته نشده است. در این پایان‌نامه به بررسی انرژی بستگی یک سیستم گاز الکترونی پرداخته شده است و تغییر رفتار آن با تغییر غلظت و برخی عامل‌های موجود در فیزیک مساله مورد بررسی قرار گرفته است. در محاسبات از روش وردشی استفاده شده است. در این پایان نامه نشان داده‌شده است که در یک سیتسم دو بعدی ساختارچند لایه‌ای GaAs/AlGaAs رفتار گذار وابسته به پهنای چاه کوانتومی است، بطوریکه با کاهش پهنای چاه امکان گذار از بین میرود. در پهنای $L=۹۰\ A^{o}$ مقدار به‌دست آمده برای غلظت بحرانی در حدود $N_c=۲\times۱۰^{۱۲}\ cm^{-۲}$ می‌باشد که با نتایج تجربی سازگاری دارد[۲۹]. همچنین اثر استتار و بی نظمی در ۳ بعد بررسی شده است و نشان داده شده است که استتار هارتری فوک نتیجه بهتری در مقایسه با استتار توماس فرمی به بار می‌آورد. وجود بی‌نظمی منجر به افزایش چگالی بحرانی میشود. برای ساختار سه بعدی GaAs/AlGaAs با استتار هارتری فوک و وجود بی‌نظمی گذار در چگالی $N_c=۱/۸۸\times۱۰^{۱۸}\ cm^{-۳}$رخ میدهد در حالی‌که در استتار توماس فرمی و با وجود نظم، گذار در چگالی $N_c=۷/۵۲\times۱۰^{۱۷}cm^{-۳}$ رخ میدهد. استتار هارتری سازگاری بهتری با تجربه دارد[۳۰-۲۹].

---

[1] Modulation-Doped Field-Effect-Transistor

[2] Metal--Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor

[3] $r_s=(\frac{۳}{۴\pi n})^{۱/۳}$, n= density of electron.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار ۱
مقدمه ۲

فصل اول فلز- عایق- نیمه رسانا

مقدمه ۶
۱-۱ - فلز و خواص آن ۶
۱-۲- عایق و خواص آن ۷
۱-۳- نیمه رسانا ۸
۱-۴ - مروری بر چند نیمه رسانای مرکب ۹

فصل دوم ساختار چند لایه ای

مقدمه ۱۵
۲-۱- ساختار چند لایه‌ای ۱۶
۲-۱-۱- آلایش مدوله شده ۱۶
۲-۱ -۲- چگالی حالت‌ها در سیستم‌های دوبعدی ۱۹
۲-۱ -۳- بررسی چگالی حالت‌ها ۲۰
۲-۱ -۴- گاز الکترون دو بعدی ۲۱
۲-۲- مادفت و ماسفت ۲۳
۲-۲-۱- مادفت ۲۳
۲-۲-۲- ماسفت ۲۵
۲-۳-ترابرد ۲۹
۲-۴- فلز و غیرفلز در تقریب الکترون تقریباً آزاد ۳۵
۲-۵- گذارفلز- عایق به علت رویهم افتادگی نوارها ۳۶
۲-۶ - میدان اطراف یک ناخالصی ۳۸
۲-۷ - مسافت آزاد میانگین ۳۸
۲-۷- ۱- فرمولبندی بولتزمن ۳۸
۲-۷-۲ - فرمولبندی کوبو – گرینوود ۴۰
۲-۸- سیستم های بی نظم و جایگزیدگی ۴۲
۲-۹- جایگزیدگی ضعیف ۴۳

۲-۱۰- نظریه مقیاس..... ۴۵
۲-۱۱- برخورد الکترون –الکترون و اثر آن بر رسانش ۴۷
۲-۱۲ - رسانش ناخالصی و گذار فلز –عایق در نوارهای ناخالصی ۴۷
۲-۱۳ - رفتار یک نیمه رسانای آلاییده نزدیک گذار فلز –عایق ۴۹
۲-۱۴ - استتار توسط گاز الکترونی ۵۰
۲-۱۵- روش وردشی ۵۳
۲-۱۶- گذار فلز- عایق در سه بعد اثر استتار و بینظمی ۵۴
۲-۱۷- گذار فلز – عایق در یک سیستم شبه دو بعدی ۵۷
۲-۱۸ - گذار فلز –عایق در یک سیستم دقیقاً ۲ بعدی..... ۵۹

فصل سوم نتایج و محاسبات

مقدمه ۶۲
۳-۱-محاسبات مربوط به وابستگی دمایی رسانندگی..... ۶۳
۳ -۲- محاسبات مربوط به گذار فلز-عایق در سه بعد(اثر استتار و بی‌نظمی)..... ۶۳
۳-۳-محاسبات مربوط به گذار فلز-عایق در یک سیستم شبه دو بعدی..... ۶۹
۳-۴ –محاسبات مربوط به گذار فلز –عایق در یک سیستم دقیقاً ۲ بعدی..... ۷۱
۳-۵- توابع استتار در دو بعد و سه بعد..... ۷۶
۳-۶- نتیجه گیری..... ۸۲
پیشنهادات..... ۸۴
ضمیمه..... ۸۵
مراجع..... ۹۹
ABSTRAC..... ۱۰۱

پیشگفتار

با ظهور کامپیوترها و کاربرد گسترده‌ی آنها در علوم، تاکید و اهمیت کارهای نظریه نیز تغییر کرده است. در گذشته نظریه پردازها تاکید بر روابطی مختصر داشتند که فرایند فیزیکی مربوطه را بطور کامل توصیف کند. اما امروزه آنچه مورد نظر است یافتن رابطه تجربی از اعداد است.

ماسفت‌ها و مادفت‌ها از یکسو اهمیت ویژه‌ای در تکنولوژی دارند و از سوی دیگر وسایل توانمندی در مطالعه برخی از جنبه‌های فیزیک ماده چگال هستند. این وسایل به علت دارا بودن فیزیک خاص منبع مناسبی برای مطالعه رفتار گاز الکترون دو بعدی در دماها وغلظت‌های مختلف هستند. وجود آزمایش‌هایی که در سال‌های اخیر روی این نمونه‌ها صورت گرفته نشان دهنده آن است که نظریه مقیاس هنوز برای رسانش وجود ندارد. همچنین هیچ توجیهی برای وجود رفتار فلزی در چگالی‌های بالا و در دمای پایین وجود ندارد. چنین جنبه‌هایی فیزیکدانان را بار دیگر به سمت مطالعه گاز الکترونی دو بعدی معطوف کرده است.

این پایان نامه تلاشی در جهت نشان دادن تعدادی از جنبه‌های مربوط به گذار فلز- عایق است که در سه فصل تنظیم شده است. در فصل اول به برخی از جنبه‌های نظریه گذار فلز- عایق پرداخته شده است. در فصل دوم انرژی بستگی سیستمی از گاز الکترونی با استفاده از روش وردشی بررسی شده است و تغییر آن نسبت به تغییر بعضی پارامترها در فصل سوم بررسی شده است. همچنین در فصل سوم پاره‌ای از نتایج نظریه با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است.

مقدمه

فینکل اشتاین[۱] [۱] اولین بار وجود حالت فلزی را در دو بعد ارائه کرد. در نظریه او اثرهای مربوط به برهم‌کنش و بی نظمی با استفاده از روش اختلال RG[۲] مطالعه شدند. متأسفانه طبق این تئوری پارامتر r_s (نسبت انرژی فرمی به انرژی کولنی ناشی از بر همکنش الکترون- الکترون)با کاهش دما و قبل از اینکه دما صفر شود مقدار بسیار بزرگی بدست می‌آمد و بنابراین نظریه چندان قابل قبول نبود. ولی به هر حال این نظریه در بی نظمی کم وبر هم کنش قوی وجود یک حالت فلزی را پیش بینی می‌کرد. این نظریه به هیچ عنوان وجود یک گذار فلز – عایق را ارائه نمی‌کرد. ولی با اعمال یک میدان مغناطیسی سیستم از خود یک رفتار عایق گونه نشان می داد.

کستلانی[۳] [۲] و همکارانش وجود رفتار فلزی را بار دیگر بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که اگر با به کار بردن باز بهنجارش مقیاس انرژی در مورد بی نظمی کم نظریه قبل قابل کنترل است. یافته‌ی آنها شامل یک وابستگی پیچیده مقاومت به دما بود که در دمای پایین یک رفتار فلزی با وابستگی نمایی دمایی نشان می‌داد. این نظریه قادر به توضیح تعدادی از مشاهدات تجربی به صورت کیفی است(نه دقیقاً نزدیک به چگالی بحرانی). وارما[۴] [۳] این نظریه را بیشتر گسترش داد و وجود گذار فلز- عایق را بدون هیچ گونه توصیفی از حالت فلزی ارائه کرد. در تصورهای RG قبلی در قابلیت چگال شدن متناسب با معکوس طول استتار (S)هیچگونه باز بهنجارشی صورت نگرفت که در چگالی های الکترونی بالا یعنی جایی که طول استتار از مسافت آزاد میانگین (ℓ) کوچکتر است معتبر است. به این صورت برای مقادیر بزرگ r_s برهمکنش در دمای پایین بدون استتار می شد و قابلیت چگال شدن از بین می رفت. وارما این را بیان داشت که در چگالی های الکترونی پایین (r_s بزرگ) انتظار می رود که $S > \ell$ و بنابراین قابلیت چگال شدن باز

---

[۱] Finkelestein
[۲] Renormalization Group
[۳] Castellani
[۴] Varma

بهنجارش خواهد شد. دوبروساولیویچ[1] [۴] و همکارانش با یک آنالیز مقیاسی نشان دادندکه در یک سیستم دو بعدی بی‌نظم الکترون‌های دارای بر هم کنش در حد دمای صفر باید یک رسانای کامل یا یک عایق کامل باشند. هم چنین آنها این نکته را بیان داشتند که حالت فلزی یک مایع فرمی نیست زیرا اگر برهم‌کنش بین الکترون‌ها خاموش شود نباید انتظار هیچ رفتار فلزی را داشته باشیم و سیستم باید یک عایق اندرسون شود.

چاکراوارتی[2] [۵] و همکارانش اثر بی نظمی را روی مدلی از یک مایع غیر فرمی دو بعدی بررسی کردند. در حالیکه ذات مایع فرمی مشخص نبود آنها نشان دادند برای برهم‌کنش های به اندازه کافی قوی یک حالت مایع غیر فرمی الکترون های دارای بر هم کنش در حضور بی نظمی یک حالت مقاوم است وبنابراین یک رسانای کامل است. در غیر این صورت، بی نظمی منجر به جایگزینی خواهد شد. گذار فلز – عایق را چاکراوارتی [۶] به گونه ای دیگر نیز توضیح داده است. حالت عایق که در $n<n_c$ (n چگالی حامل(الکترون یا حفره) و n_c چگالی بحرانی است که در آن گذار رخ میدهد) حاصل می شود ناشی از تشکیل یک جامد ویگنر بی نظم است. یک گذار عایق فلز در $n>n_c$ ناشی از ذوب شدن چنین جامد ویگنر و تبدیل آن به یک حالت مایع غیر فرمی است. این حالت در مقابل بی نظمی مقاوم است. در حد چگالی های حامل بالا، جایی که نقش نسبی برهم‌کنش کاهش می یابد، سیستم دوباره به طور ضعیفی جایگزیده می‌شود.

بعضی از تلاش‌ها در راه توضیح این پدیده دارای طبیعت‌کلاسیکی هستند. داسارما[3] [۷] $\rho(T)$ را در قسمت فلزی گذار بر اساس این فرض که n_c حاصل از تداخل با ناخالصی ها منجمد خواهد شد محاسبه کرد. طبق این مدل او گذار فلز – عایق هنگامی رخ خواهد داد که هیچ الکترونی آزاد باقی نماند. با بررسی بستگی دمایی استتار در پراکندگی از ناخالصی یک وابستگی دمایی غیریکنواخت بدست آمد ولی در این مدل در دماهای پایین تر رفتار مقاومت در ناحیه فلزی اشباع می شد.

---

[1] Dobrosavljevic
[2] Chakravarty
[3] Dassarma

هیچ کدام از مدل های کلاسیک نتوانست توضیح بدهد که چرا جایگزیدگی[1] در میدان مغناطیسی صفر وجود ندارد، اگرچه بعضی از نویسندگان این را بیان داشته اند که در دماهای پایین رفتار فلزی برای $n>n_c$ در نهایت بازگشتی به مشخصه های مقاومت جایگزیدگی ضعیف در دو بعد خواهد داشت.

[1] localization

فصل اول

فلز

عایق

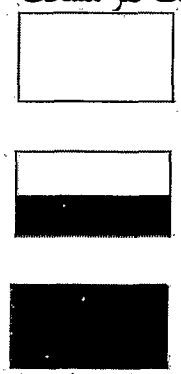
نیمه رسانا

مقدمه

آنچه باعث میشود ماده ای فلز، عایق یا نیمه رسانا نامیده شود در واقع مربـوط بـه خواصـی است که این ویژگیها را تعریف میکند. بررسی ساختار نواری نیز راه دیگری برای این تعریف اسـت. در این فصل و فصل‌های بعد بارها از این اصـطلاحات اسـتفاده میشـود. بنـابراین در ابتـدا مـروری اجمالی بر این سه نوع ماده داریم، بخصوص رسانندگی الکتریکی یا عکس آن مقاومت الکتریکی.

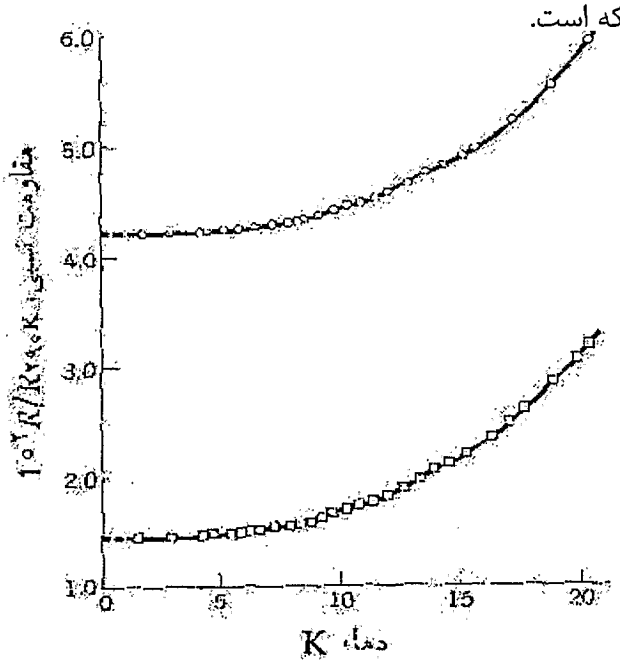
۱-۱ - فلز و خواص آن

الکترون ها داخل بلورها در نوارهای انرژی مرتب شده اند. ناحیه هایی از انرژی که برای آنها هیچ مدار الکترونی موج‌گونه وجود ندارد این نوارها را از هم جدا می‌کند. به این نواحی ممنوعه گاف انرژی یا گاف نواری می‌گویند. اگر کسری از یک یا چند نوار پر باشد بلور مانند فلز رفتار می‌کند. طرح نواری یک فلز در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. فلز با رسانندگی بالایش مشخص می‌شود. در یک فلز تعداد زیادی الکترون، معمولاً یک یا دو الکترون به ازای هر اتم، باید آزاد باشند تا به اطراف حرکت کنند. به این الکترون‌ها، الکترون‌های رسانش می گوییم. مقاومت ویژه الکتریکی یک فلز خالص در ۱K می تواند به کوچکی $۱۰^{-۱۰}\Omega.cm$ باشد. پارامتری که در تعیین فلز بودن یا نبودن مهم است رسانندگی یا برعکس آن مقاومت ویژه می باشد. در یک فلز مسافت آزاد میانگین می تواند به بزرگی ۱۰cm باشد. در فصل‌های آینده در مورد رسانندگی و عوامل موثر در آن بیشتر بحث خواهد شد. به طور اجمال مقاومت الکتریکی اکثر فلزات در دمای اتاق (۳۰۰K) عمدتاً از برخورد الکترون های رسانش با فونون‌های شبکه و در دمای هلیوم مایع (۴K)



شکل۱-۱ طرح نواری یک فلز

از برخورد این الکترون ها با اتم های ناخالصی و ناکامل های مکانیکی در شبکه ناشی می شود. وجود ناکاملی ها باعث برهم زدن نظم شبکه می شود. که این باعث افزایش مقاومت الکتریکی خواهد شد. چنین مقاومتی غالباً از دما مستقل است. در شکل ۱-۲ مقاومت پتاسیم در دماهای پایین‌تر از K ۲۰ نشان داده شده است. مقاومت با کاهش دما به مقدار ثابتی در K۰ خواهد رسید. هم چنین در دماهای پایین مقاومت از دما مستقل است. این ناحیه ای است که در آن منشأ مقاومت و جود بی نظمی در شبکه است.



شکل۱-۲: مقاومت پتاسیم در دمای پایینتر از K۲۰ که در دو نمونه پتاسیم اندازه گیری شده است. اختلاف بین مقاومت در K ۰ به دلیل تراکم های متفاوت ناخالصی ها و ناکاملی های استاتیک موجود در نمونه است[۳۷]

۱-۲- عایق و خواص آن

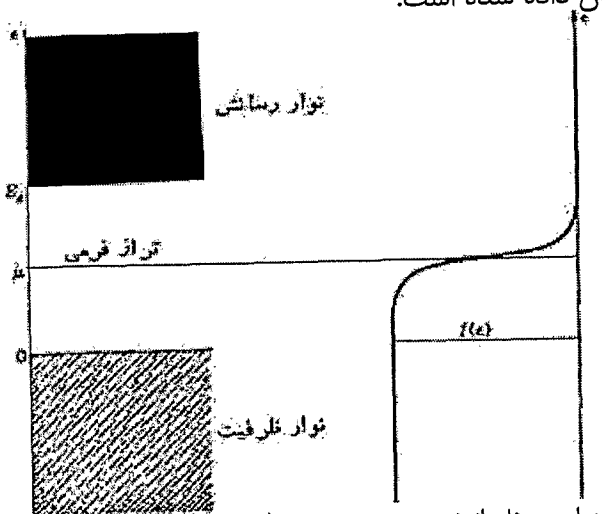
همان طور که در قسمت قبل اشاره شد الکترون ها در نوارهای انرژی واقع شده اند. اگر نوارهای انرژی مجاز پر یا خالی باشند بلور مانند یک عایق رفتار می کند زیرا هیچ الکترونی نمی-تواند در میدان الکتریکی حرکت کند. شکل ۱-۳ نوارهای انرژی یک عایق را نمایش می دهد.

مقاومت ویژه ی یک عایق خوب می تواند به بزرگی $10^{22}\ \Omega.Cm$ باشد . عامل رسانش الکترون‌هایی هستند که در نوارهای به طور جزئی پر یافت می شوند. جامداتی که به ازای هر یاخته ی بسیط دارای تعداد زوج الکترونی هستند دارای نوارهای پر یا خالی می باشند. با این وجود جامداتی که دارای این ویژگی باشند ممکن است رسانا باشند چرا که همپوشانی نوارهای انرژی می تواند حالت پایه‌ای را به وجود آورد که در آن چندین نوار به طور جزئی پر باشند.

شکل ۱-۳ : نمایش نوارهای انرژی برای یک عایق

۱-۳: نیمه رسانا

الکترون‌ها در نوارهای پر نمی‌توانند جریانی را حمل کنند و در مدل الکترون مستقل این نتیجه معیاری است برای جدا کردن فلز از یک عایق، هم چنین می توانیم یک عایق را با گاف E_g تعیین کنیم. در یک جامد با یک گاف انرژی در $T = 0$ هیچ رسانشی وجود نخواهد داشت. این واقعیت در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴: در یک عایق ناحیه ای به نام انرژی ممنوعه وجود دارد که بالاترین حالت اشغال شده را از پائین ترین حالت خالی جدا می کند[۳۷].

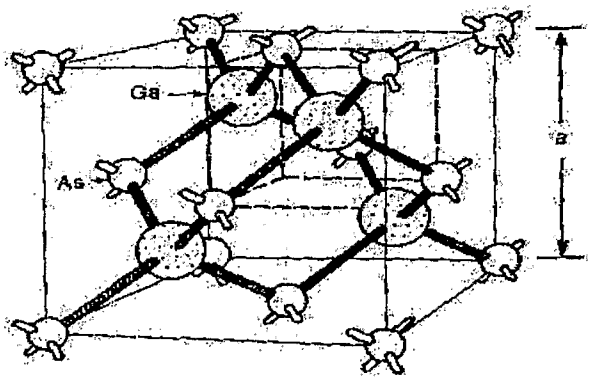
به هر حال هنگامی که دما غیر صفر است احتمال غیرصفری وجود دارد که تعدادی از الکترون‌ها به طور گرمایی برانگیخته و با گذشتن از گاف انرژی به حالت‌های پایین‌تر قسمت اشغال شده نوار بالاتر دست یابند. . به این نوار بالاتر نوار رسانش می گوییم و به نواری که الکترون آن را ترک می کند نوار ظرفیت می گوییم. اما اینکه آیا این برانگیختگی منجر به رسانش قابل توجهی می شود باید اندازه ی گاف انرژی قابل قبول باشد. این احتمال برانگیختگی متناسب است با $\exp(-\frac{E_g}{2k_BT})$. یک گاف انرژی از مرتبه ی ۴ev در دمای اتاق این عامل حدوداً 10^{-38} خواهد بود وبه طور ذاتی هیچ الکترونی برانگیخته نخواهد شد. اما اگر گاف انرژی از مرتبه ۰/۲۵ ev باشد در دمای اتاق عامل نمایی به مقدار 10^{-2} تقلیل خواهد یافت و یک رسانش قابل مشاهده رخ خواهد داد. به جامداتی که در دمای $T = 0$ عایق هستند ولی دارای اندازه ی گاف انرژی هستند که در دماهای معقول می توانند باعث ایجاد رسانش شوند به عنوان نیمه رسانا شناخته می شوند. در دمای اتاق مقاومت الکتریکی نیمه رسانا بین مقادیر تغییر می کند.

مهمترین جنبه ی نیمه رساناها آن است که مقاومت الکتریکی آنها با افزایش دما کاهش می‌یابد. انواع مختلفی از نیمه رسانا وجود دارد. نیمه رسانای عنصری و نیمه رسانای مرکب یک نوع دسته بندی برای نیمه رساناها می باشد. Ge و Si از دسته ی اول و عناصر گروه چهارم جدول تناوبی هستند. GaAs نمونه ای از یک نیمه رسانای مرکب است که از پیوند کوالانسی بین عناصر گروه III و گروه V جدول تناوبی به وجود آمده و در بخش های بعدی با این نوع از نیمه رساناها بیشتر آشنا می شویم.

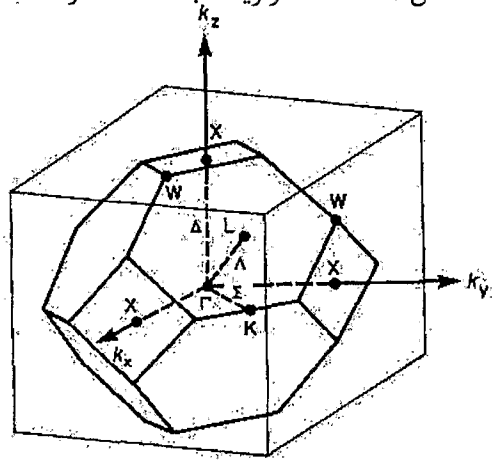
۱-۴ - مروری بر چند نیمه رسانای مرکب

گالیم آرسنایدGaAs) و آلومنیوم آرسنایدAlAs) ازنوع نیمه رساناهای مرکب هستند که دارای ساختاری زینک بلند هستند. این ساختار در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. هر دو

ساختار را می توان به صورت شبکه های fcc درنظر گرفت با دو اتم در یاخته ی بسیط. شبکه وارون به صورت bcc است. شکل ۱-۶ منطقه ی اول بریلیون این ساختار را نشان می دهد.



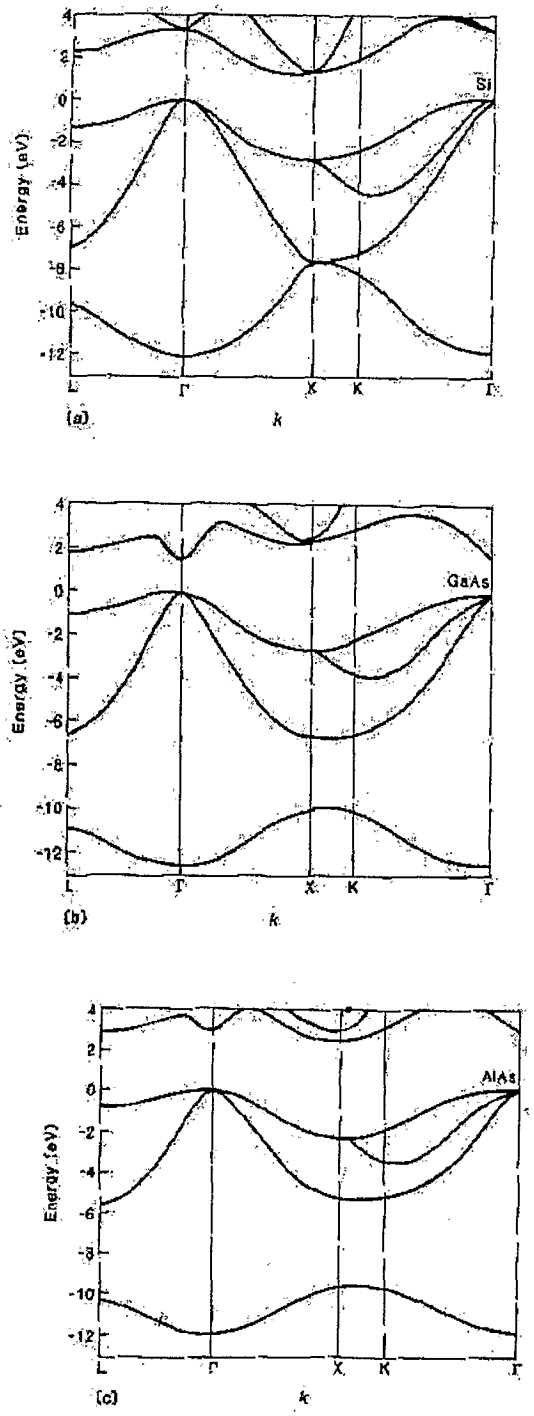
شکل ۱-۵ : ساختار زینک بلند AlAs و GaAs



شکل ۱ -۶ : منطقه ای اول بریلئون یک ساختار fcc

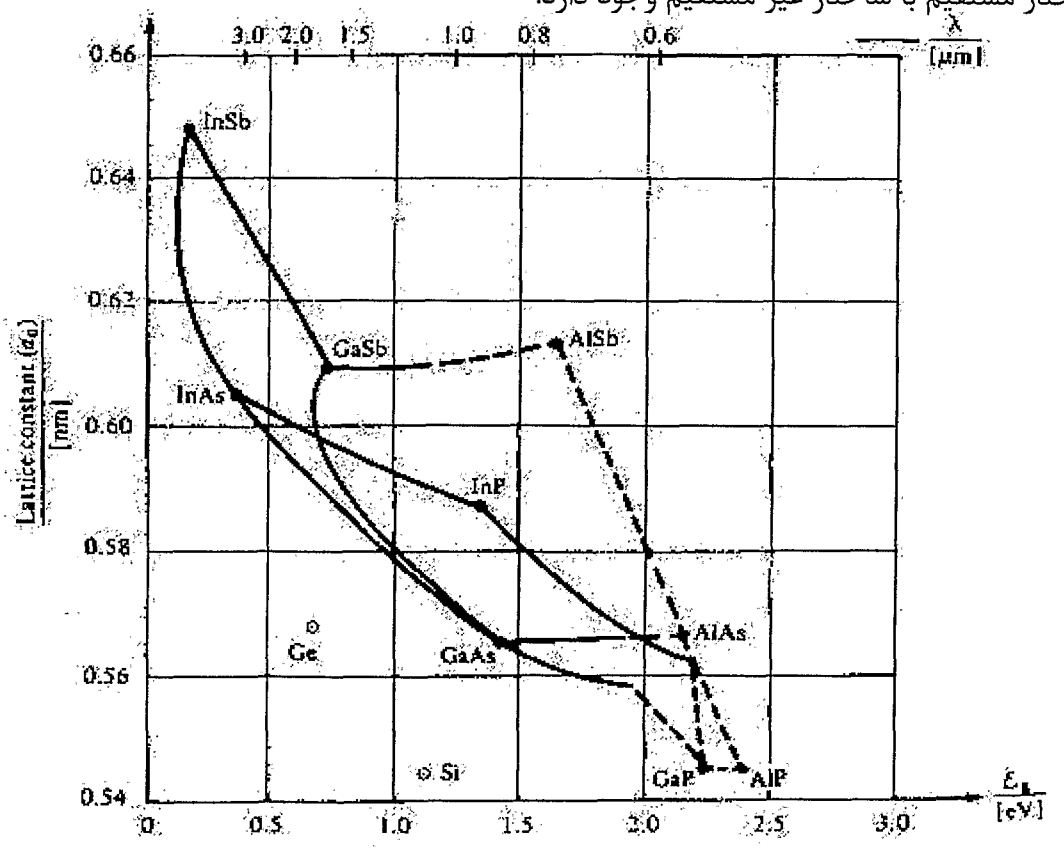
همانطور که گفته شد نقطه آغاز توصیف خصوصیات الکتریکی و اپتیکی نیمه رسانا بررسی ساختار نواری است. چنین ساختارهایی نواری در شکل ۱-۷ برای سه نوع نیمه رسانا نمایش داده شده است. با ۸ الکترون رسانش موجود در یک یاخته بسیط هر ۳ نیمه رسانای نمایش داده شده ۴ نوار کاملاً پر خواهند داشت. تبهگنی اسپینی برای هردو حالت الکترونی دو خواهد بود. گاف انرژی برای GaAs و AlAs به ترتیب عبارت است از ۱/۴۲ ev و ۲/۲۳ ev در دمای اتاق. کمترین انرژی در نوار رسانش در GaAs در نقطه Γ رخ می دهد در حالیکه در AlAs در نقطه ی x رخ

می دهد. GaAs نیمه رسانایی با گاف غیر مستقیم است و بنابراین هنگام گذار الکترون در GaAs بقای انداز حرکت k به طور خود کار رخ می دهد و نیاز به فرآیند اضافه ای نیست.

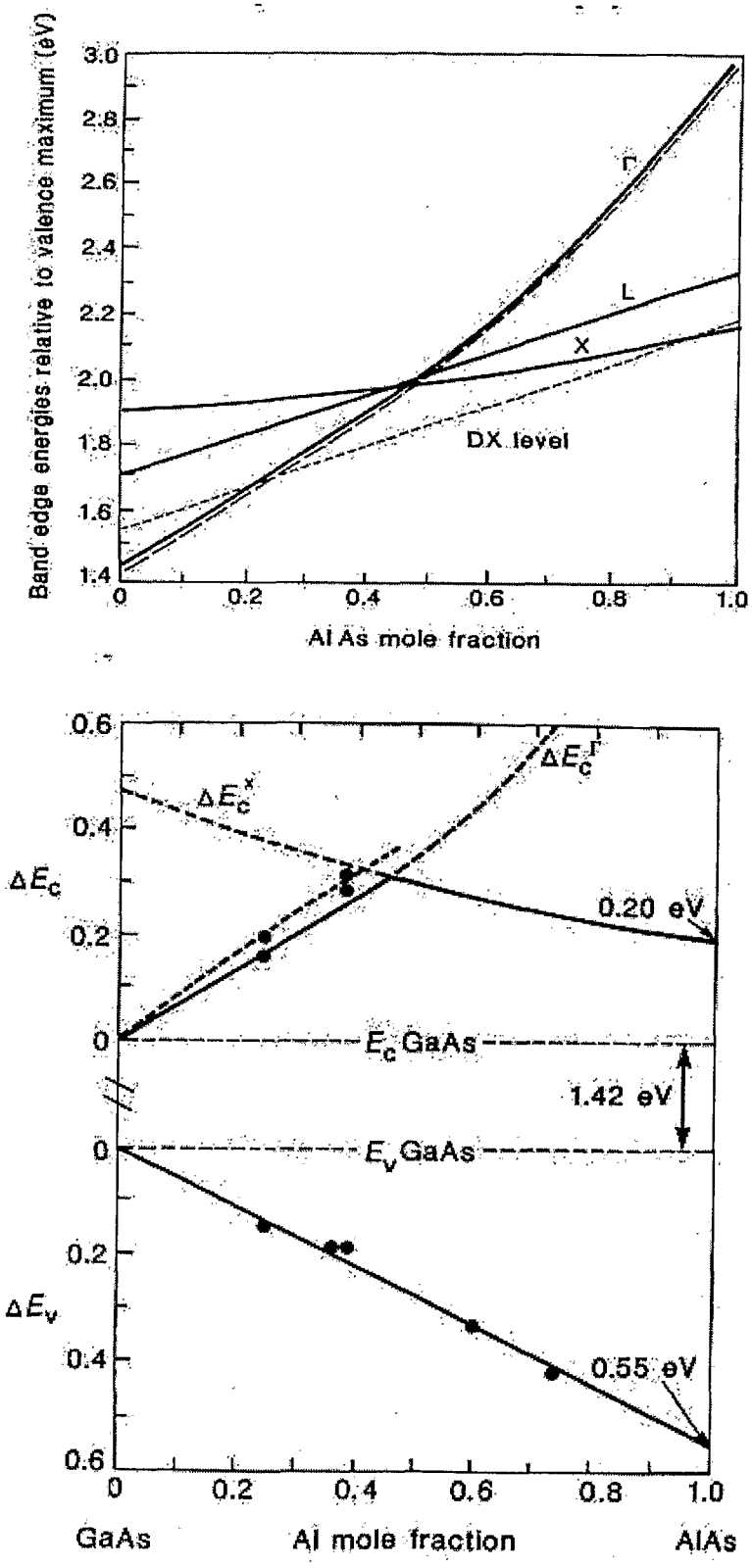


شکل ۱-۷: ساختار نواری سه نوع نیمه رسانا(سیلیکان-گالیم آرسناید-آلومینیم آرسناید)

شکل ۱-۸ نیمه رساناهای مختلف را براساس ثابت شبکه و گاف انرژی نشان می دهدGaAs و AlAs تفاوت بسیار کمی در ثابت شبکه با یکدیگر دارند. از ترکیب آنها می توان جامدی به صورت $Al_xGa_{1-x}As$ با $0 \leq x \leq 1$ به دست آورد. این به این معناست که می توان لایه های نیمه رسانایی با کیفیت بالا با مقادیر مختلف x به وجود آورد. شکل ۹-۱ نشان دهنده ی بسیاری از جنبه های مهم $Al_xGa_{1-x}As$ است . در $x = 0$ (GaAs) یک نیمه رساناهای مستقیم با گاف انرژی ۱/۴۲ev است (در دمای اتاق) با اضافه کردن Al به جای Ga گاف انرژی شروع به افزایش‌می‌کندودر$X = 1$ (AlAs) یک نیمه رسانا با گاف غیر مستقیم داریم. در جایی نزدیک $x = 0/45$ یک گذار از ساختار مستقیم با ساختار غیر مستقیم وجود دارد.



شکل ۱-۸: نمایشی از مقادیر ثابت شبکه و گاف انرژی چند نیمه‌رسانای مهم



شکل۹-۱:تغییرات حاصل شده در گاف انرژی و ساختار نواری AlGaAs در اثر افزایش نسبت مولی آلومینیم