دانشگاه کاشان
دانشکده علوم
گروه فیزیک

پایان نامه

جهت اخذ درجــه کارشناسی ارشد
در رشته فیزیک حالت جامد

عنوان:

بررسی اثرات ناخالصی ومحبوس شدگی بر نوسانات آهارانوف- بوهم در حلقه های کوانتومی دو گانه

استاد راهنما:
دکتر ابراهیم حیدری سمیرمی

به وسیله
نسرین ساداتی نصرآبادی
خرداد ماه ۱۳۹۰

دانشگاه کاشان

تاریخ :
شماره:
پیوست :

مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد/دکتری

نام و نام خانوادگی دانشجو :: نسرین ساداتی نصرآبادی شماره دانشجویی : ۸۷۱۳۳۳۶۰۰۳

رشته: فیزیک گرایش جامد دانشکده :علوم

عنوان پایان‌نامه :

بررسی اثرات ناخالصی ومحبوس‌شدگی بر نوسانات آهارانوف- بوهم در حلقه‌های کوانتومی دوگانه

این پایان‌نامه به مدیریت تحصیلات تکمیلی به منظور بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ **درجه کارشناسی ارشد** ارائه می‌گردد.دفاع از پایان نامه در تاریخ ۹۰/۰۳/۲۲ مورد تأیید و ارزیابی هیأت داوران قرار گرفت و با نمره به عدد: ۱۹/۶ به حروف: نوزده و شش دهم و درجه عالی به تصویب رسید.

اعضاء هیأت داوران

عنوان	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱. استاد راهنما :	دکتر ابراهیم حیدری سمیرمی	استادیار	
۲. متخصصان وصاحب نظران داخل دانشگاه:	دکتر سید احسان روزمه	استادیار	
	دکتر حمیدرضا زنگنه	استادیار	
۳. نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه :	دکتر مجید منعم زاده	استادیار	

ابراهیم نعمتی لای

مدیر تحصیلات تکمیلی

خدای را بر این توفیق سپاس گزارم

تقدیم به:

پدر ومادرم که الفبای انسانیت و پیروی از سنت و سیره رسول الله را به من آموختند.

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ماعطا فرمود. در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تمامی اساتید بزگوار بویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت و فضائل اخلاقی یاری نموده‌اند تقدیر وتشکر نمایم.

از استاد گرامی و بزگوارجناب آقای دکتر ابراهیم حیدری سمیرمی که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق ، پژوهش و نگارش این پایان‌نامه تقبل نموده‌اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم .

همچنین از تشریک مساعی آقایان دکتر سید احسان روزمه و دکتر حمید رضا زنگنه به عنوان اساتید داور داخل دانشگاه که این پایان‌نامه را مورد مطالعه قرار دادند و در جلسه دفاعیه شرکت نموده‌اند تشکرمی‌نمایم.

در پایان از جناب آقای دکتر مجید منعم زاده که به عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه قبول زحمت نموده‌اند، سپاسگزاری می‌نمایم.

چکیده

بااستفاده از روش اجزاء متناهی (FEM) به محاسبه سطوح انرژی و توابع موج حلقه های کوانتومی دو گانه هم مرکز که شار مغناطیسی آهارانوف-بوهم از درون آن می گذرد می پردازیم . دو نوع حلقه کوانتومی دو گانه هم مرکز ، با پتانسیل ثابت و پتانسیل درجه چهار را در نظر می گیریم . با تغییر شکل و ساختار هندسی از طریق پتانسیل محبوس کننده توابع موج و خواص الکترون را بررسی می کنیم . همچنین نمودار انرژی بر حسب شار را در غیاب ناخالصی و در حضور ناخالصی به دست می آوریم . در طیف انرژی آن ها نوسانات آهارانوف-بوهم مشاهده می شود . ناخالصی باعث از بین رفتن تبهگنی در سطوح انرژی می شود .

کلمات کلیدی

۱.روش اجزاء متناهی(FEM)،۲.حلقه های کوانتومی دو گانه هم مرکز،۳. شار مغناطیسی آهارانوف-بوهم، ۴.نوسانات آهارانوف-بوهم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار----------۱

فصل اول: حلقه های کوانتومی

۱-۱- مقدمه ----------۳

۱-۲- حلقه های کوانتومی ----------۵

۱-۳- انسداد کولمبی ----------۸

۱-۴- روش ساخت حلقه های کوانتومی ----------۹

۱-۵- میکروسکوپ نیروی اتمی ----------۱۴

۱-۶- اثر آهارانوف-بوهم----------۱۴

۱-۷- جریان پایا----------۱۶

فصل دوم : روش اجزاء متناهی

۲-۱- مقدمه----------۱۷

۲-۲- روش اجزاء متناهی در یک بعد---------- ۱۸

۲-۳- چندجمله ای های درون یاب----------۲۲

۲-۳-۱- چندجمله ای های درون یاب لاگرانژ----------۲۳

۲-۳-۲- چندجمله ای های درون یاب هرمیت----------۲۵

۲-۳-۳- پایین ترین مرتبهٔ چندجمله ای های درون یاب لاگرانژ ----------۲۸

۲-۳-۴- پایین ترین مرتبهٔ چندجمله ای های درون یاب هرمیت----------۲۸

۲-۴- فرمول بندی گالرکین در یک بعد----------۲۹

۲-۵- روش اجزاء متناهی در دو بعد----------۳۲

۲-۵-۱- اجزاء مربعی ----------۳۲

۲-۵-۲- اجزاء مثلثی----------۳۵

۲-۶- شبکه بندی در FEM----------۳۸

۲-۷- فرمول بندی گالرکین در دو بعد----------۴۰
۲-۸- ذخیره سازی ماتریس‌ها----------۴۵
۲-۹- اعمال شرایط مرزی ----------۴۶
۲-۱۰-کاربرد رهیافت گالرکین برای مسائل حالت مقید در مکانیک کوانتومی----------۴۹
۲-۱۰-۱-معادله شرودینگر یک بعدی----------۴۹
۲-۱۰-۲- معادله شرودینگر دو بعدی----------۵۳

فصل سوم : محاسبهٔ اثرات ناخالصی ومحبوس شدگی

۳-۱- مدل و هامیلتونی سیستم----------۵۶
۳-۱-۱-مدل یک بعدی برای سیستم بدون حضور ناخالصی----------۵۷
۳-۱-۲- مدل دو بعدی برای سیستم در حضور ناخالصی----------۵۹
۳-۱-۳- مدل اختلالی مرتبهٔ اول برای سیستم در حضور ناخالصی----------۶۲
۳-۲-نتیجه گیری----------۶۳
۳-۲-۱- حلقه های کوانتومی با پتانسیل محبوس کننده ثابت در حضور شار مغناطیسی---۶۳
۳-۲-۲- حلقه کوانتومی منزوی----------۶۵
۳-۲-۳- اثر ناخالصی بر طیف انرژی حلقه های کوانتومی با سد پتانسیل ثابت ----------۶۶
۳-۲-۴- حلقه های کوانتومی با پتانسیل درجه چهار----------۷۱
۳-۲-۴-۱- بررسی اثر محبوس شدگی برچگالی احتمال----------۷۲
۳-۲-۴-۲- بررسی اثر ارتفاع سد میانی برچگالی احتمال ----------۷۶
۳-۲-۴-۳- بررسی اثر محبوس شدگی برطیف انرژی----------۷۹
۳-۲-۴-۴- بررسی اثر ارتفاع سد میانی برطیف انرژی ----------۷۹
۳-۲-۴-۵- اثر ناخالصی بر طیف انرژی حلقه های کوانتومی با سد پتانسیلی درجه چهار-۸۰
۳-۳- نتیجه گیری----------۸۳
فهرست منابع----------۸۴

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ تصویر نقطه کوانتومی، ناحیه زرد (حول نقطه) مواد عایق ، ناحیه قرمز (دریچه ها) فلز ، ناحیه آبی روشن (منبع تغذیه) نیمه رسانا است .----------۸

شکل ۱-۲ تصویر AFM حلقه ، (ناحیه روشن) ناحیه اکسید شده و (ناحیه تاریک) ناحیه رسانا----------۹

شکل ۱-۳ فرآیند کریستال سازی از قطره های Ga با As نرخ رشد بالا $GaAs$ روی مرز قطره های Ga(ناحیهA) و درکنار ناحیه پخش شدگی (ناحیهC) نسبت به ناحیه پخش شدگی (ناحیه B) ----------۱۱

شکل ۱-۴ سه شکل نهایی از نانوساختارهای$GaAs$ (a)حلقه منزوی ، (b) حلقه های دوگانه، (C) حفره، (d)محاسبه مقدار r_c / r_{ca} به صورت تابعی از شدت فشار Asتحت دماهای مختلف ----------۱۳

شکل ۱-۵ اثر آهارانوف-بوهم----------۱۵

شکل ۲-۱ انتگرال تابع $f(x)$ به صورت جمع روی نواحی چهارگوش زیر منحنی نمایش داده شده است ----------۱۹

شکل ۲-۲ تقسیم بندی بازهٔ $[x_{\min}, x_{\max}]$به اجزاء متناهی----------۲۰

شکل ۲-۳ متغیرهای گره ای در اجزاء مجاور. مقادیر $\Psi^{1(2)}$ و $\Psi^{2(1)}$ یکسانند و باعث پیوستگی اجزاء داخلی در جواب ψ می شوند .----------۲۱

شکل ۲-۴ ماتریس کل که از ماتریس های جزء تشیل شده که هم پوشانی ماتریس ها برای یک مسأله یک بعدی با درون یاب خطی روی پنج جزء نشان داده شده----------۲۲

شکل ۲-۵ تابغ لاگرانژ برای چند جملهای خطی دو گره در هر جزء به گرهها در± 1 قرارگرفته اند- ----------۲۴

شکل ۲-۶ تابع لاگرانژ درجه دو برای یک جزء با سه گره که در نقاط ۱- و ۰ و ۱ قرار دارند----- ----------۲۴

شکل ۲-۷ توابع درون یاب مکعبی برای یک جزء با دو گره و دو درجه آزادی در هر گره ، خط چین ها شیب واحد را برای گره های قرار گرفته در ± 1 برای توابع $\bar{N}^1, \bar{N}^2$نشان می دهند----۲۶
شکل ۲-۸ توابع درون یاب چند متغیر N^1, N^2, N^3 که در نقاط گره ای $\xi = -1,0,1$ به ترتیب مقدار واحد دارند زمانی که مشتقشان در این نقاط صفر است----------۲۷
شکل ۲-۹ توابع درون یاب چند متغیره $\bar{N}^1, \bar{N}^2, \bar{N}^3$ که در نقاط $\xi = -1,0,1$ صفرند و مشتقشان در نقاط $\xi = -1,0,1$ به ترتیب مقدار واحد دارد---------- ۲۷
شکل ۲-۱۰ (a) جزء خطی مربعی با چهارگره (b)جزء مربعی درجه دو با نه گره---------۳۳
شکل۲- ۱۱جزء هرمیت مربعی چهارگرهی، درهر گره چهار درجهٔ آزادی متناظر با چهار ضریب تابع است که آن ها مشتق اول در طول دو محور عمودی و مشتق عرضی آن ها است --------۳۴
شکل ۲- ۱۲مثلث عمومی به مثلث استاندارد تبدیل شده و گره های آن شماره گذاری شده است ----------۳۵
شکل ۲-۱۳ جزء مثلثی درجه دو که شماره گره های آن برچسب خورده----------۳۷
شکل ۲-۱۴ تقسیم بندی یک ناحیه دو بعدی----------۳۹
شکل ۳-۱ تقسیم بندی ناحیه سیستم دو حلقه ای با استفاده از اجزاء مثلثی----------۶۰
شکل ۳-۲ (a) سیستم حلقه های کوانتومی هم مرکز (b) نمایش پتانسیل حلقه های کوانتومی ----------۶۴
شکل ۳-۳ سطوح انرژی به صورت تابعی از شار مغناطیسی Φ_B که در میان حلقه داخلی است ----------۶۴
شکل ۳-۴ چگالی احتمال حالت پایه الکترونی----------۶۵
شکل ۳-۵ (a) سطوح انرژی تک حلقه کوانتومی منزوی به صورت تابعی از شار مغناطیسی ϕ_B درون حلقه (b) چگالی احتمال حالت پایه الکترون در حلقه کوانتومی منزوی ----------۶۵
شکل ۳-۶ چگالی توابع موج الکترون در (a) حالت پایه (E_0), (b)دومین حالت برانگیخته (E_2) ، (c) پنجمین حالت برانگیخته (E_5), (d) نهمین حالت برانگیخته (E_9)----------۶۷
شکل ۳-۷ (a) و (b) انرژی کل E_t دومین و پنجمین حالت برانگیخته را نمایش می دهد . (c) و (d) متناظر با انرژی مقید E_b هستند که نوسان AB را به صورت تابعی از Φ_B نشان می دهند

۶۷----------
شکل ۳-۸ چگالی حالت پایه الکترونی با یک ناخالص ثابت قرار گرفته در ($r_i = 83nm, \phi_i = 0$)
در حلقه کوانتومی هم مرکز با $\delta = o.6(d), \delta = o.9(c), \delta = 0.2(b), \delta = 0.05(a)$ --------۶۹
شکل ۳-۹ طیف انرژی به صورت تابعی ازشارمغناطی Φ_B (a) یک ناخالصی به طور ثابت در $(r_i = 83nm, \phi_i = 0)$ (b) دو ناخالصی ثابت که به طور متقارن در $(r_{i1} = 83nm, \phi_{i1} = 0)$و $(r_{i2} = 83nm, \phi_{i2} = \pi)$ (c) دو ناخالصی ثابت که در $(r_{i1} = 83nm, \phi_{i1} = 0)$و $(r_{i2} = 97nm, \phi_{i2} = \pi)$و (d) دو ناخالصی به طور نامتقارن در $(r_{i1} = 83nm, \phi_{i1} = 0)$ و $(r_{i2} = 83nm, \phi_{i2} = \frac{\pi}{2})$ قرار دارند . ----------۷۰
شکل ۳-۱۰ سطوح انرژی حلقه های کوانتومی هم مرکز با پتانسیل $v1$ به صورت تابعی از Φ_B
۷۲----------
شکل ۳-۱۱ (a) پتانسیل دوحلقه هم مرکز با پتانسیل درجه چهار (b) چگالی احتمال حالت پایه الکترونی ----------۷۲
شکل۳-۱۲ (a) پتانسیل $V1$ با مقدار ثابت $\alpha = ۴/۲\times۱۰^{-۵}$ برای سه مقدار $\beta = 1\times10^{-3}, 1\times10^{5}$ 1×10, (b) چگالی احتمال حالت پایه الکترون (c) چگالی احتمال اولین حالت برانگیخته الکترون
۷۳----------
شکل۳-۱۳(a) پتانسیل $V1$ با مقدار ثابت $\alpha = ۳\times۱۰^{-۴}$ به ازای سه مقدار $\beta = 10^{-3}, 10^{-5}, 10$
(b) چگالی احتمال حالت پایه الکترون (c) چگالی احتمال اولین حالت برانگیخته ----------۷۴
شکل ۳-۱۴ (a) پتانسیل $V1$ با مقدار ثابت $\alpha = ۶\times۱۰^{-۶}$ به ازای سه مقدار $\beta = 10^{-3}, 10^{-5}, 10$
(b) چگالی احتمال حالت پایه الکترون (c) چگالی احتمال اولین حالت برانگیخته----------۷۵
شکل۳-۱۵ (a) پتانسیل $V1$ به ازای مقدار ثابت $\beta = 1\times10^{-3}$ و سه مقدار $\alpha = 4/2\times10^{-5}, 3\times10^{-4}$
6×10^{-6}, (b) چگالی احتمال حالت پایه الکترون (c) چگالی احتمال اولین حالت برانگیخته--------۷۶
شکل۳-۱۶ (a) پتانسیل $V1$ با مقدارثاب $\beta = ۱\times۱۰^{-۵}$ و سه مقدار $\alpha = 4.2\times10^{-5}, 3\times10^{-4}$
6×10^{-6}, (b)چگالی احتمال حالت پایه الکترونی (c) چگالی احتمال اولین حالت برانگیخته
۷۷----------

شکل۳-۱۷(a) نمایش پتانسیل V 1 به ازای مقدار ثابت $\beta = ۱۰$ و سه مقدار $\alpha = 4/2\times10^{-5}, 3\times10^{-4}$
6×10^{-6}, (b) چگالی احتمال حالت پایه (c) چگالی احتمال اولین حالت برانگیخته ---------۷۸
شکل ۳-۱۸ سطوح انرژی الکترون حلقه های کوانتومی دوگانه با پتانسیل درجه چهاردر
$\alpha = 4.2\times10^{-5}$ (a) $\beta = ۱۰$ (b) $\beta = ۱\times۱۰^{-۵}$ ----------۷۹
شکل ۳-۱۹ سطوح انرژی الکترون حلقه های کوانتومی دوگانه با پتانسیل درجه چهاردر
$\beta = 1\times10^{-3}$ (a) $\alpha = ۶\times۱۰^{-۶}$ (b) $\alpha = ۳\times۱۰^{-۴}$ ----------۸۰
شکل ۳-۲۰ تقسیم بندی سیستم حلقه کوانتومی دو کانه با پتانسیل درجه چهار به اجزاء مثلثی--
----------۸۱

شکل ۳-۲۱ طیف انرژی به صورت تابعی ازشارمغناطی Φ_B (a) یک ناخالصی به طور ثابت در
$(r_i = 83nm, \phi_i = 0)$ (b) دو ناخالصی ثابت که به طور متقارن در $(r_{i1} = 83nm, \phi_{i1} = 0)$و
$(r_{i2} = 83nm, \phi_{i2} = \pi)$ (c) دو ناخالصی ثابت که در $(r_{i1} = 83nm, \phi_{i1} = 0)$و $(r_{i2} = 97nm, \phi_{i2} = \pi)$و
(d) دو ناخالصی به طور نامتقارن در $(r_{i1} = 83nm, \phi_{i1} = 0)$ و $(r_{i2} = 83nm, \phi_{i2} = \frac{\pi}{2})$ قرار دارند---۸۲

فهرست جدول ها

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱) شکل توابع برای چند جمله ای های درون یاب هرمیت برای یک مثلث با ۱۸ درجه آزادی در سه رأس گرهی $\sigma = 1 - \xi - \eta$ ----------۳۸

جدول (۲-۲) آرایه های اتصال برای ناحیه دو بعدی چهارجزء شکل(۲-۱۴)----------۴۰

جدول (۲-۳) مختصات و وزن های گاوسی برای مثلث استاندارد که با توان p چند جمله ای ξ, η برچسب خورده .برای $p = 2,3,4,5,6,7$ نشان داده شده است.----------۴۳

پیشگفتار

دردهۀ ۱۹۸۰ ساختارهای حلقه ای در اندازۀ میکرومتر[۱] به منظور تحقیق در مورد اثر آهارانوف-بوهم (AB) [۲]واندازه گیری رسانندگی ساخته شدند . اولین مشاهدات اثر AB در حلقه های فلزی به وسیله وب[۳] وهمکارانش گزارش شد . در دهه های بعد ، مغناطیس شدگی توسط جریان پایا[۴] درون حلقۀ نیم رسانا مورد بررسی قرار گرفت . چیونگ سو[۵] همکارانش جریان پایا و ترازهای انرژی الکترون را در حلقه های یک بعدی مورد بررسی نظری قرار دادند . پیشرفت‌های بعدی ساخت حلقه‌هایی با شعاع نانومتر با اثرهای کوانتومی قابل مشاهده بود . حلقه‌های کوانتومی[۶] اتم ها و مولکول های مصنوعی با پوسته های پر هستند که در اندازه های نانو متری مشابه بنزن مصنوعی بوده و چون خواصی مشابه با اتم های طبیعی دارند در لیزرها [۷]، در خازن های نوری و حافظه ای که محاسبات فوتونیکی را شامل می شوند ، و برای ذخیره سازی اطلاعات کوانتومی در بیت های کوانتومی[۸] استفاده می شوند[۱] .

مولکول های مصنوعی جدید از نوع حلقه های کوانتومی جفت شده هستند که می توانند به صورت حلقه‌های کوانتومی قائم [۹]، حلقه های کوانتومی جانبی[۱۰] و حلقه های کوانتومی هم مرکز[۱۱] باشند . این حلقه‌ها با روش های متفاوتی روی یک ساختار نیم رسانا در شکل واندازه‌های متفاوت ساخته می شوند . ساختارهای الکترونیکی حلقه ها و اثرات اضافی مانند محبوس شدگی، حضور مانع، وجود ناخالصی و نفوذ میدان مغناطیسی در ناحیۀ حلقه به صورت نظری مورد بررسی قرار گرفته است .

ساختارهای حلقه ای در حضور میدان مغناطیسی که به طور عمودی اعمال می شود خواص جالبی از خود نشان می دهند . نوسانات AB مشاهده شده در طیف انرژی ، نمونه ای از این خواص است . حضور ناخالصی در سیستم باعث تغییر در طیف انرژی و از بین رفتن تبهگنی می شود . با تغییر هندسۀ بلور و میدان مغناطیسی خارجی می توان خواص الکتریکی و مغناطیسی را

---

[۱].Micrometer
[۲].Ahranov _ Bohm effect
[۳].Webb
[۴].Persistent current
[۵].Cheung
[۶].Quantum rings
[۷].Laser
[۸].Quantum bit
[۹].Vertical quantum rings
[۱۰].Lateral quantum rings
[۱۱].Concentric quantum rings

کنترل کرد . در حقیقت، این نوع مولکول های مصنوعی (حلقه های کوانتومی) به علت مزیتی که نسبت به مولکول های طبیعی دارند مورد توجه هستند، با تغییر شکل و اندازهٔ آن ها از طریق پتانسیل محدود کننده خارجی و با تغییر میدان مغناطیسی عمودی که به سیستم وارد شده می توانیم خواص الکتریکی و اپتیکی این ساختارها را به دلخواه تغییر دهیم و مولکولی با ویژگی های دلخواه به دست آوریم .

در فصل اول ، به معرفی سیستم های مزوسکوپی می پردازیم و تاریخچه برخی تلاش های نظری و تجربی در زمینهٔ حلقه های کوانتومی را می آوریم . در این فصل یکی از مهم ترین روش های ساخت حلقه ها و کنترل تعداد الکترون ها در ساختارهای حلقه ای را شرح می دهیم . از میان خواص جالبی که حلقه های کوانتومی در حضور میدان مغناطیسی نشان می دهند دو خاصیت نوسان آهارانوف-بوهم وجریان پایا را توصیف می کنیم .

در فصل دوم ، روش اجزاء متناهی (FEM) [۱] را در یک بعد و دو بعد برای حل مسائل مقدار ویژه معرفی کرده و به توصیف توابع درون یاب[۲] می پردازیم . برای حل معادله شرودینگر[۳] و به دست آوردن ویژه توابع و ویژه مقادیر انرژی ، روش گالرکین[۴] در یک بعد و دو بعد را که منجر به یک معادله مقدار ویژه می شود شرح می دهیم . در انتها مسائل حالت مقید یک بعدی و دو بعدی را با استفاده از FEM مورد بررسی قرار می دهیم .

در فصل سوم ، مدل هامیلتونی یک سیتم شامل دو حلقه کوانتومی هم مرکز با پتانسیل محبوس کننده $V(r)$ را در حضور شار مغنا طیسی بدون حضور ناخالصی با استفاده از FEM در یک بعد ، با حضور ناخالصی با استفاده از FEM در دو بعد و مدل اختلالی به دست می آوریم . سپس با قرار دادن پتانسیل محبوس کننده $V(r)$ به صورت سد میانی ثابت و پتانسیل درجه چهار، ویژه توابع و ویژه مقادیر انرژی را محاسبه می کنیم و به مقایسه خواص الکترونی در هر یک ازسیستم ها می پردازیم . اثرات تغییرات هندسی روی چگالی احتمال پایهٔ الکترونی و تاثیر حضور ناخالصی در نوسانات AB را بررسی می کنیم .

---

۱. Finite Element Method (FEM)
۲. Interpolation functions
۳. Shordinger equation
۴. Galerkin

فصل اول

حلقه های کوانتومی

۱–۱ مقدمه

فیزیک مزوسکوپی[۱] یکی از حوزه های نو ظهور در فیزیک ماده چگا ل[۲] است که در آن خواص فیزیکی ماده مستقیما تحت اثر اندازه و ابعاد هندسی آن قرار دارد . سیستم های مزوسکوپی و ماکروسکوپی هر دو شامل تعداد زیادی اتم می شوند، با این وجود در سیستم های ماکروسکوپی وقتی خواص مواد تشکیل دهنده را میانگین گیری می کنیم خواص ماکروسکوپی سیستم با استفاده از قوانین کلاسیک بیان می شود در حالی که خواص سیستم های مزوسکوپی تحت تأثیر نوسانات حول میانگین بوده و سیستم کوانتومی[۳] است[۳و۲] . به عبارت دیگر، یک سیستم مزوسکوپی وقتی دارای اندازه و ابعادی در مقیاس مزو[۴] است خواص کوانتومی ازخود نشان می دهد . به عنوان مثال ، در سطح ماکروسکوپی، رسانندگی یک سیم با قطر آن به طور پیوسته افزایش می یابد، درصورتی که در سطح مزوسکوپی رسانندگی کوانتیده شده و افزایش آن به صورت گسسته خواهد بود . در دو دهۀ اخیر ، بررسی سیستم های مزوسکوپی که در آن اثرات کوانتومی اهمیت زیادی دارند بیشتر مورد توجه قرار گرفته است . سیستم ها و ادوات مزوسکوپی به صورت آزمایشگاهی و به صورت مدل سازی نظری به شکل های عایق ، نیم رسانا ، فلز و ابررسانا ساخته شده و مورد مشاهده و بررسی قرار گرفته اند . فیزیک مزوسکوپی حوزه ای را فراهم کرده است که در آن می توانیم به طور عملی مسائل بنیادی فیزیک کوانتومی را هنگامی که یک شی ماکروسکوپی کوچک می شود بررسی کنیم . هنگامی که اندازه و ابعاد ماده به مقیاس نانو نزدیک می شود خواص آن تغییر می کند و این تغییر بستگی به درصد اتم ها در سطح نسبت به حجم دارد (برای مواد با حجم بزرگ تر از یک میکرومتر (یا میکرون) درصد اتم های سطح به نسبت اتم های حجم ناچیز است) . در رژیم مزوسکوپی ، بیشتر با ساختارهای مصنوعی فلزی یا نیم رسانا که با روش های مختلف ساخته می شوند سروکار داریم[۳و۲] .

---

۱. Mesoscopic physics
۲. Condensed matter physics
۳. Quantum mechanics
۴. Mezo

تعریف دقیق برای فیزیک مزوسکوپی وجود ندارد . رفتارهای مزوسکوپی زمانی که اندازهٔ سیستم قابل مقایسه با مقیاس های طولی زیر باشد رخ می دهد.

۱. طول موج دوبروی[۱] (بیان کننده انرژی جنبشی الکترون است)
۲. مسافت پویش آزاد میانگین الکترون ها[۲] (مقیاس طولی که الکترون می تواند طی کند بدون این که اندازه حرکت اولیهٔ آن تغییر کند)
۳. طول همدوسی فاز الکترون [۳] (مقیاس طولی که الکترون می تواند طی کند بدون این که فاز تابع موج آن تغییر کند)

این مقیاس های طولی به نوع ماده و دما بستگی دارند [۴]. سیستم های مورد مطالعه عمدتاً در محدودهٔ ۱۰۰نانومتر (اندازه ویروس) تا ۱۰۰۰ نانومتر (اندازه باکتری) است . ۱۰۰ نانومتر بالاترین حد برای نانو ذرات است [۵] . بنابراین ، نانو ساختارها و فناوری نانو زیر مجموعهٔ فیزیک مزوسکوپی است و وسایل ساخته شده در فناوری نانو مثال هایی از سیستم های مزوسکوپی می باشند . رفتار این سیستم ها به طور قابل ملاحظه ای تحت اثر تداخل های کوانتومی توابع موج الکترونی قرار دارد . از پدیده های جدید در این حوزه می توان اثر کوانتومی هال صحیح و کسری [۴]، کوانتش رسانش در اتصال نقطه ای[۵]، اثر آهارانوف -بوهم (AB) [۶]، شارژ تک الکترونی نقاط کوانتومی و اثر محبوس شدگی کوانتومی را نام برد[۶] .

در زمینهٔ محبوس شدگی کوانتومی ، الکترون ها در مواد نیم رسانا با توجه به نوع محبوس شدگی شان می توانند به شکل ساختارهای نقطه ، سیم ، حلقه و ... باشند و خواص الکترونی ، برهم کنش الکترون ها با تابش الکترومغناطیسی و سطوح انرژی الکترونی تحت اثر این محبوس شدگی تغییر می کنند . از میان این ساختارها فیزیک حلقه های کوانتومی[۷] یک زمینه تحقیقاتی عالی برای بیان ایده های بنیادی فیزیک مزوسکوپی فراهم می کند و حلقه ها در مقیاس نانو خواص جالب اپتیکی و الکترونیکی در محبوس شدگی یک بعدی نشان داده و در حضور شار مغناطیسی جریان پایا ایجاد می شود که یک اثر صرفاً کوانتومی بوده و نشانه هایی از اثر AB در انرژی و جریان دیده می شود .

---

۱. Dubroy wavelength
۲. The mean free path
۳. The phase relaxation length
۴. Integer and fractional quantum Hall effect
۵. Point contact
۶. Ahranov- Bohm effect
۷. Quantum rings

۱-۲ حلقه های کوانتومی

محبوس کردن ا لکترون های همبسته در لایه های نیم رسانا می تواند به صورت نقاط و حلقه های کوانتومی باشد . مطالعه نظری و تجربی ساختارهای حلقه های کوانتومی به دلایل زیر رشد جالب توجهی داشته است[۷] .

۱. امکان کنترل ذرات و نوسانات آن ها در حلقه ها
۲. امکان مطالعه اتم های مصنوعی و خواص آن ها که مشابه ساختار های لایه ای[۱] اتم های واقعی است .
۳. توسعه فناوری نیم رسانا که باعث تحقق آزمایشگاهی حلقه های کوانتومی است .

نقاط و حلقه های کوانتومی به دلیل وجود حفره در مرکز حلقه متفاوتند . این دو ساختار مشابه مولکول های مصنوعی بوده و خواصی مشابه با اتم های مصنوعی دارند . تحقیقات در زمینهٔ حلقه های کوانتومی منزوی[۲] دارای محتویات فیزیکی غنی بوده و بیشتر مطالعات فیزیکی روی خواص حلقه های کوانتومی منزوی متمرکز شده است . در دههٔ ۱۹۶۰ حلقه های فلزی که شار مغناطیسی را در برمی گیرند مورد مطالعه قرار گرفتند و هدایت مغناطیسی با تناوب $\Phi_0 = \frac{h}{e}$ را به دست آوردند . در سال ۱۹۸۱ جریان پایا[۳] در حلقه های یک بعدی فلزی با شار مغناطیسی با پراکندگی الاستیک [۸] و غیرالاستیک [۹] توسط باتکر[۴] و کوورکرز[۵] پیش گویی شد . در سال ۱۹۹۰ لوی[۶] ، دولان[۷] و دانس مرند باویشت[۸] [۱۰] شواهد آزمایشگاهی از جریان را یافت کردند . دراین آزمایش ها حلقه های مسی مزوسکوپی به صورت تابعی از شار مورد بررسی قرار دارند و در آزمایش هایی که روی جریان پایای مجموعه حلقه ها در سال ۱۹۹۱ انجام شد جریان و تناوب آن نسبت به شار مورد بررسی قرار گرفت . در سال ۱۹۹۳ میلی[۹] و همکارانش[۱۱] جریان پایا را در حلقه های نیم رسانا گزارش کردند [۱۲] و آزمایش های جدید روی حلقه های نیم رسانا شروع شد و رسانندگی و مغناطیس شدگی ناشی از جریان پایا پیرامون حلقه های نیم رسانا مورد بررسی قرار گرفت . پیشرفت های بعدی در زمینهٔ سیستم های چند حلقه ای بود . از جملهٔ این سیستم-

---

۱. Shell structures
۲. Single quantum ring
۳. persistent currents
۴. Buttker
۵. Co- workers
۶. Levy
۷. Dolan
۸. Dun smuirand Bouchait
۹. Mailly

ها حلقه‌های کوانتومی دوگانه هستند که مولکول های مصنوعی دو اتمی می باشد و نقش اتم های سازنده بر عهدهٔ نقاط و حلقه های کوانتومی است . این حلقه ها می توانند به صورت هم مرکز ، عمودی و جانبی جفت شوند . در این ساختار ها می توان جفت شدگی بین اتم ها (حلقه ها ، نقاط) را مورد بررسی قرار دارد .

سیستم های دو حلقه ای می توانند به صورت دو حلقه یکسان جفت شوند که مشابه با مولکولهای طبیعی بوده و به آن ها مولکولهای حلقه کوانتومی جورهسته[۱] می گویند . حالتی که حلقه ها تفاوت ناچیزی با هم داشته باشند مولکولهای حلقه های کوانتومی ناجورهسته[۲]نامیده می شوند[۱۳] . حلقه های کوانتومی جفت شده به صورت قائم ، اوربیتال های پیوندی دراین نوع ساختارها در راستای عمود بر آن ها واقع شده و هنگامی ایجاد مولکول مصنوعی ناجور هسته می کنند که دو حلقه از نظر پهنا یکسان و در عمق چاه اختلاف به اندازه δ داشته باشند . درحلقه هایی که به صورت جانبی و از پهلو جفت شده اند ، دو حلقه ممکن است ابعاد مشابه داشته باشند و جفت شدگی بین حلقه ها در صفحهٔ حلقه ها است ، در صورتی که ضخامت یک حلقه بیشتر از دیگری باشد ایجاد ساختار ناجور هسته می کند [۱۴]. اگر فاصله دو حلقه در حلقه های جفت شده به صورت جانبی و قائم را صفر قرار دهیم دو حلقه کوانتومی هم مرکز را خواهیم داشت که برخلاف دو ساختار قبلی دارای تقارن دایره ای بوده و وقتی که حجم حلقه بیرونی بیشتر از حلقه داخلی باشد مولکول ناجور هسته داریم که باعث می شود چگالی بار در حلقه های داخلی و بیرونی متفاوت باشد . پیکربندی الکترون ها در هریک از حلقه ها به وسیله سه عامل پتانسیل محبوس کننده فضایی ، نیروی گریز از مرکز[۳] و نیروی کولمبی[۴] تعیین می شود . که هرکدام در یک فاصله فاصله از حلقه داخلی رخ می دهد . در محاسباتی که ما انجام خواهیم داد دو فاکتورآخر را صرفه نظرکرده و نیروی کولنی را در حضور ناخالصی در نظر می گیریم . بررسی حلقه های کوانتومی خیلی پیچیده تر از نقاط کوانتومی است ، به گونه ای که میدان مغناطیسی در نقاط باعث کم شدن جفت شدگی شده و در حلقه ها باعث گذار تکانه زاویه ای حالتها در حلقه ها می شود [۱۵].

حلقه های کوانتومی با کیفیت بالا روی یک ساختاری که ایجاد گاز الکترونی دو بعدی را می کند ساخته می شوند . برای مطالعه حلقه های کوانتومی مناسب است که چندین پارامتر را به طور آزمایشگاهی کنترل کنیم .

---

۱. Homohvclear quantum ring molecule
۲. Hetero nuclear
۳. Centrifugal forces
۴. Coulomb forces

۱. تعداد الکترون ها در حلقه

۲. شکل و اندازه حلقه ها

مکانیسم کنترل این پارامترها در حلقه های کوانتومی مشابه با نقاط کوانتومی بوده که توسط کارلز مارکوز[۱] و لووکاونهوون[۲]بررسی شده است [۷] و برای بررسی آن باید انسداد کولمبی[۳] برای ثبات تعداد الکترون ها در حلقه منطقی را توصیف کرد که مکانیسم آن در یک مثال روی نقاط کوانتومی در بخش (۱-۳) توضیح داده می شود . روش های متفاوتی برای کنترل اندازه و شکل نانو حلقه ها در سال های گذشته استفاده شده است که می توان از آن ها رشد خودساز[۴] و پرتو مولکولی هم بافته[۵] را نام برد . مانو[۶] وهمکارانش [۱۶] تشکیل خودساز از حلقه های کوانتومی دو گانه شکل گرفته با یکنواختی و تقارن چرخشی بالا را که از تکنیک قطره های همبافته (dE)[۷] استفاده می کند را توصیف کرده که در بخش (۱-۴) توضیح داده می شود .

طیف سنجی و میکروسکوپ نیروی اتمی(AFM) [۸] از یک حلقه کوانتومی سطوح کوانتیده و حالت حالت های اوربیتالی و خواص اپتیکی و ترابردی را بیان می کنند .

خواص الکترونیکی و اپتیکی از نانو ساختارها به حالت های انرژی آن ها بستگی دارد و حالت های انرژی به وسیلهٔ مشخصات ساختاری نانو ساختارها تعیین می شود که محدودیت هندسی روی تغییر اندازه و شکل حلقه‌ها موثر بوده و حالت های الکترونی را تغییر داده‌است . حلقه های کوانتومی در حضور شار مغناطیسی خواص جالبی نشان می دهد و منجر به تناوبی شدن تمام خواص الکترونی در سیستم شده که از آن جمله نوسانات AB در سطوح انرژی و تناوب آن با دوره کوانتوم شار $\phi_0 = \frac{hc}{e}$ است .

---

۱ .Charles marcus
۲ .Leokouwen hoven
۳ .Coulomb blocked
٤ .Self –assembled growth
٥ .Molcular Beam Epilexy
٦ .Mano
۷ .Droplet –epitaxy
۸ .Atomic force microscopy