

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه دامغان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد
فیزیک (گرایش حالت جامد)

پمپاژ کوانتومی آدیاباتیک و
غیرآدیاباتیک اسپین و بار در نانو
نوارهای گرافین فرومغناطیس

توسط:

فاطمه پاشا

استاد راهنما:

دکتر حسین چراغچی

خرداد ماه ۱۳۹۳

به نام خدا

پمپاژ کوانتومی آدیاباتیک و غیر آدیاباتیک اسپین و بار در نانو نوارهای گرافین فرومغناطیس

توسط:

فاطمه پاشا

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم
برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته

فیزیک (گرایش حالت جامد)

از دانشگاه دامغان

ارزیابی و تأیید شده توسط کمیته پایان‌نامه با درجه: درجه اعطاشده از سوی کمیته داوری

دکتر . . . استادیار دانشگاه دامغان (استاد راهنما)

دکتر . . . استادیار دانشگاه . . . (داور اول)

دکتر . . . دانشیار دانشگاه . . . (داور دوم)

دکتر ... استادیار دانشگاه دامغان (نماینده تحصیلات تکمیلی)

خرداد ماه ۱۳۹۳

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم
به پاس قلب‌های پر مهرشان که
در لحظه لحظه زندگی دعای خیرشان بخشی عظیم از موهبت الهی است.

سپاسگزاری

سپاسگزاری می‌کنم از
همه عزیزان و بزرگوارانی که مرا در پیمودن این مسیر همراهی نمودند.

چکیده

پمپاژ کوانتومی آدیاباتیک و غیر آدیاباتیک اسپین و بار در نانو نوارهای گرافین فرومغناطیس

به وسیله‌ی:

فاطمه پاشا

در این پروژه فرآیندهای پمپاژ کوانتومی آدیاباتیک و غیر آدیاباتیک در سیستم‌های یک‌بعدی و شبه یک‌بعدی (نانو نوارهای گرافین) با بکارگیری تئوری پراکندگی فلوکوئنت، مورد بحث قرار گرفته است. براین اساس ابتدا پمپاژ جریان‌های بار و اسپینی، در یک پمپ کوانتومی یک‌بعدی شامل زنجیره‌ی اتمی و در گام بعدی در پمپ کوانتومی شامل نانو نوارهای گرافینی زیگزاگ و دسته‌مبلی، با ساختار سد دو گانه بر حسب پارامترهای مختلف دینامیک و استاتیک سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترها شامل: دامنه، فرکانس و اختلاف فاز پتانسیل متناوب با زمان، انرژی فرمی و قدرت جفت شدگی بین سیستم مرکزی و الکترودها می‌باشند. در پمپ کوانتومی اسپینی با جایگذاری یک لایه عایق فرومغناطیس بر روی سیستم مرکزی، جداشدگی اسپینی در سیستم مرکزی رخ می‌دهد. جریان پمپ شده بر حسب انرژی فرمی در سیستم‌های یک‌بعدی و نانو نوارهای گرافین دارای مقادیر میکرو و آمپر می‌باشد، که قابل اندازه‌گیری با تکنولوژی امروزه می‌باشد. رفتار جریان پمپ شده بر حسب اختلاف فاز در نانو نوارهای گرافینی دسته‌مبلی و زیگزاگ بیانگر تفاوت دیگری بین این دو سیستم می‌باشد. در نوارهای زیگزاگ زوج جریان پمپ شده در فرکانس‌های بالا در اختلاف فاز $0, 2\pi$ غیر صفر است، در حالیکه در نانو نوار دسته‌مبلی در اختلاف فازهای $0, \pi, 2\pi$ مشابه با سیستم یک‌بعدی برابر با صفر است. همچنین وابستگی مجذوری جریان مستقیم به دامنه‌ی پمپاژ در سیستم‌های یک‌بعدی، نانو نوارهای زیگزاگ و نیز دسته‌مبلی مورد بررسی قرار گرفته است. همه‌ی انواع جریان‌های اسپینی و بار در سیستم‌های یک‌بعدی و نیز نانو نوارهای گرافینی بر حسب فرکانس، در فرکانس‌های کوچک (رژیم آدیاباتیک) دارای رفتار خطی هستند.

فهرست مطالب

ه	فهرست مطالب
ز	فهرست شکل‌ها
۳	۱ پیشینه پژوهش و تعاریف مقدماتی
۳	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ پمپ کوانتومی
۴	۳-۱ پمپاژ کوانتومی آدیاباتیک
۵	۴-۱ پمپاژ کوانتومی غیر آدیاباتیک
۶	۵-۱ فرمالیسم بروئر
۸	۶-۱ مروری بر کارهای انجام شده
۳۷	۲ رویکرد فلوکوئنت
۳۷	۱-۲ مقدمه
۳۸	۲-۲ نگاه کوتاهی بر نظریه‌های بلاخ و فلوکوئنت
۳۹	۳-۲ حل معادله شرودینگر وابسته به زمان توسط یک هامیلتونی متناوب با زمان
۴۰	۴-۲ مفاهیم پایه
	۵-۲ رویکرد فلوکوئنت برای مسئله ترابرد در سیستم‌های تحت تأثیر پارامتر خارجی متناوب
۴۳	با زمان
۴۸	۶-۲ عناصر و ویژگی‌های فلوکوئنت

۴۹	۷-۲	تقارن ها
۵۳	۳	بررسی ترابرد و پمپاژ الکترون در سیستم یک بعدی
۵۳	۱-۳	مقدمه
۵۳	۲-۳	حل تحلیلی هامیلتونی فلوکوئت
۵۵	۳-۳	احتمال عبور بر حسب انرژی در یک سیستم مستقل از زمان
۶۰	۴-۳	ترابرد الکترونی در پمپ‌های کوانتومی
۶۹	۵-۳	پمپاژ بار و اسپین در سیستم یک بعدی فرومغناطیسی
۷۷	۴	پمپاژ کوانتومی اسپین و بار در نانو نوارهای گرافین
۷۷	۱-۴	مقدمه
۷۹	۲-۴	پمپ کوانتومی گرافینی
۷۹	۳-۴	پمپاژ جریان در نانو نوار گرافینی زیگزاگ
۸۷	۴-۴	پمپاژ جریان در نانو نوار گرافینی دسته مبلی
۹۲	۵-۴	جریان اسپینی و بار در نانو نوارهای گرافین فرومغناطیس
۱۰۶	۶-۴	نتیجه گیری و بحث
۱۰۷	۷-۴	پیشنهادات
۱۰۸		مراجع

فهرست شکل‌ها

- ۱-۱ نقطه کوانتومی با دو اتصال ۷
- ۲-۱ نمایش نتایج آزمایش سوئیچکز و طرح شماتیکی از دستگاه میکروگراف ۱۰
- ۳-۱ جریان بر حسب فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ ۱۰
- ۴-۱ دیاگرام فاینمن ۱۱
- ۵-۱ جریان پمپ بر حسب فرکانس ۱۲
- ۶-۱ تغییر جریان پمپ شده بر حسب فرکانس ۱۳
- ۷-۱ بار پمپ شده بر حسب انرژی فرمی ۱۴
- ۸-۱ بار پمپ شده بر حسب فرکانس ۱۵
- ۹-۱ بار پمپ شده بر حسب فرکانس ۱۶
- ۱۰-۱ نمودار نوسانات مزوسکوپیک پمپاژ به علاوه‌ی جداشدگی زیمن ۱۷
- ۱۱-۱ نمودار احتمال عبور و چگالی حالت الکترودهای چپ و راست ۱۸
- ۱۲-۱ نمودار احتمال عبور برای $V = 0, \delta = \frac{\pi}{4}$ ۱۹
- ۱۳-۱ جریان پمپ شده بر حسب پتانسیل الکتروشیمیایی ۱۹
- ۱۴-۱ جریان پمپ شده بر حسب اختلاف فاز ۲۰
- ۱۵-۱ جریان پمپ شده بر حسب انتگرال جفت شدگی ۲۱
- ۱۶-۱ جریان پمپ شده بر حسب فرکانس پتانسیل نوسانی ۲۱
- ۱۷-۱ جریان پمپ شده بر حسب دامنه‌ی پتانسیل متناوب با زمان ۲۲
- ۱۸-۱ نمایش پمپ‌های تک پارامتری و دو پارامتری ۲۳
- ۱۹-۱ نمایش هامیلتونی بستگی قوی پمپ‌های تک پارامتری و دو پارامتری ۲۳

- ۲۵-۱ طرح شماتیکی از سیستم ۲۵
- ۲۱-۱ جریان‌های اسپینی و بار بر حسب اختلاف فاز در رژیم پمپاژ ضعیف ۲۶
- ۲۲-۱ جریان‌های اسپینی و بار بر حسب اختلاف فاز در رژیم پمپاژ قوی ۲۶
- ۲۳-۱ جریان‌های اسپینی بر حسب انرژی ۲۷
- ۲۴-۱ جریان‌های اسپینی بر حسب فرکانس نوسانی ۲۷
- ۲۵-۱ جریان‌های اسپینی و بار بر حسب قدرت جفت شدگی ۲۸
- ۲۶-۱ ساختار شماتیکی از نانو نوار گرافین زیگزاگ یکنواخت ۲۹
- ۲۷-۱ جریان پمپ شده بر حسب فرکانس ۲۹
- ۲۸-۱ جریان پمپ شده بر حسب فرکانس و اختلاف فاز پتانسیل متناوب با زمان ۳۰
- ۲۹-۱ طرحی از پمپ جریان اسپینی گرافین ۳۱
- ۳۰-۱ جریان پمپ شده بر حسب انرژی فرمی ۳۱
- ۳۱-۱ جریان پمپ شده بر حسب انرژی فرمی ۳۲
- ۳۲-۱ نانو نوار های گرافینی تحت هدایت پتانسیل های متناوب با زمان ۳۳
- ۳۳-۱ جریان مستقیم در نانو نوار دسته میلی ۳۴
- ۳۴-۱ جریان مستقیم در نانو نوار زیگزاگ ۳۵
- ۱-۲ تصویری از سیم کوانتومی تحت تأثیر پارامتر متناوب زمانی ۴۲
- ۲-۲ نمودار تقارن برگشت زمانی ۵۰
- ۳-۲ نمودار تقارن برگشت زمانی پاریده ۵۱
- ۴-۲ نمودار تقارن برگشت زمانی تعمیم یافته ۵۲
- ۱-۳ طرح شماتیکی از زنجیره‌ی یک بعدی در اتصال به الکترودها ۵۶
- ۲-۳ احتمال عبور مستقل از زمان بر حسب انرژی برای زنجیره‌ی ده اتمی ۵۷
- ۳-۳ چگالی حالت‌های کل برای زنجیره‌ی ده اتمی ۵۸
- ۴-۳ احتمال عبور وابسته به زمان بر حسب انرژی برای زنجیره‌ی ده اتمی ۵۹
- ۵-۳ احتمال عبور وابسته به زمان بر حسب انرژی برای زنجیره‌ی ده اتمی ۶۰
- ۶-۳ طرحی از زنجیره‌ی اتمی یک بعدی با ساختار سد دو گانه ۶۲
- ۷-۳ نمودار احتمال عبور و چگالی های حالت کل ۶۲
- ۸-۳ احتمال عبور الکترون از چپ به راست و بر عکس و احتمال عبور ناشی از پمپاژ بار،
برای زنجیره‌ی اتمی ۶۳
- ۹-۳ جریان پمپ بر حسب انرژی فرمی ۶۵

- ۶۶ ۱۰-۳ جریان پمپ به عنوان تابعی از اختلاف فاز برای زنجیره
- ۶۷ ۱۱-۳ جریان پمپ به عنوان تابعی از قدرت جفت شدگی برای زنجیره ده اتمی
- ۶۸ ۱۲-۳ جریان پمپ به عنوان تابعی از فرکانس نوسانی در زنجیره ی ده اتمی
- ۶۸ ۱۳-۳ جریان پمپ به عنوان تابعی از دامنه‌ی پتانسیل نوسانی
- ۶۹ ۱۴-۳ طرحی از پمپ جریان اسپینی در سیستم یک بعدی
- ۷۰ ۱۵-۳ جریان اسپینی و بار در زنجیره‌ی ده اتمی به عنوان تابعی از انرژی فرمی
- ۷۱ ۱۶-۳ جریان اسپینی و بار در زنجیره‌ی ده اتمی به عنوان تابعی از فرکانس نوسانی
- ۷۲ ۱۷-۳ جریان اسپینی و بار در زنجیره‌ی ده اتمی به عنوان تابعی از دامنه‌ی ولتاژ متناوب با زمان
- ۷۳ ۱۸-۳ جریان اسپینی و بار در زنجیره‌ی ده اتمی بر حسب میدان مغناطیسی القایی
- ۷۴ ۱۹-۳ جریان اسپینی و بار بر حسب قدرت جفت شدگی بین زنجیره و الکترودها
- ۷۵ ۲۰-۳ جریان اسپینی و بار بر حسب اختلاف فاز در زنجیره‌ی اتمی
- ۷۸ ۱-۴ طرح شماتیکی از گرافین
- ۷۸ ۲-۴ یک صفحه‌ی نمایش لمسی انعطاف پذیر
- ۷۹ ۳-۴ طرحی شماتیک از پمپ گرافینی
- ۷۹ ۴-۴ طرحی از نانونوار زیگزاگ
- ۸۱ ۵-۴ احتمال عبور و چگالی حالت کل برای نانو نوار گرافینی زیگزاگ $ZGNR(۶, ۴)$
- ۸۲ ۶-۴ جریان پمپ به عنوان تابعی از انرژی فرمی برای $ZGNR(۶, ۴)$
- ۸۴ ۷-۴ جریان پمپ به عنوان تابعی از اختلاف فاز در $ZGNR(۶, ۴)$
- ۸۴ ۸-۴ جریان پمپ به عنوان تابعی از قدرت جفت شدگی بین ناحیه‌ی پراکندگی و الکترودها در $ZGNR(۶, ۴)$
- ۸۵ ۹-۴ جریان پمپ به عنوان تابعی از فرکانس نوسانی در $ZGNR(۶, ۴)$
- ۸۶ ۱۰-۴ جریان پمپ به عنوان تابعی از دامنه‌ی ولتاژ در $ZGNR(۶, ۴)$
- ۸۷ ۱۱-۴ طرحی از نانو نوار دسته مبلی
- ۸۸ ۱۲-۴ احتمال عبور و چگالی حالت کل برای نانو نوار گرافینی دسته مبلی $AGNR(۸, ۸)$
- ۸۹ ۱۳-۴ جریان پمپ بر حسب انرژی فرمی $AGNR(۸, ۸)$
- ۸۹ ۱۴-۴ جریان پمپ به عنوان تابعی از اختلاف فاز در $AGNR(۸, ۸)$
- ۹۰ ۱۵-۴ جریان پمپ به عنوان تابعی از جفت شدگی بین نوار مرکزی و الکترودها در $AGNR(۸, ۸)$
- ۹۱ ۱۶-۴ جریان پمپ به عنوان تابعی از فرکانس نوسانی در $AGNR(۸, ۸)$
- ۹۱ ۱۷-۴ جریان پمپ به عنوان تابعی از دامنه‌ی ولتاژ در $AGNR(۸, ۸)$

- ۹۲ ۱۸-۴ تصویری از پمپ جریان اسپینی در نانو نوار گرافین
- ۹۳ ۱۹-۴ جریان اسپینی و بار بر حسب انرژی فرمی $ZGNR(۶, ۴)$
- ۹۴ ۲۰-۴ جریان اسپینی و بار به عنوان تابعی از اختلاف فاز در $ZGNR(۶, ۴)$
- ۲۱-۴ جریان اسپینی و بار بر حسب جفت‌شدگی بین نوار مرکزی و الکترودها در $ZGNR(۶, ۴)$
- ۹۶
- ۹۷ ۲۲-۴ جریان اسپینی و بار بر حسب فرکانس نوسانی در $ZGNR(۶, ۴)$
- ۹۸ ۲۳-۴ جریان اسپینی و بار به عنوان تابعی از دامنه‌ی ولتاژ در $ZGNR(۶, ۴)$
- ۹۹ ۲۴-۴ جریان اسپینی و بار بر حسب شدت میدان مغناطیسی القایی در $ZGNR(۶, ۴)$
- ۱۰۰ ۲۵-۴ جریان اسپینی و بار بر حسب انرژی فرمی $AGNR(۸, ۸)$
- ۱۰۱ ۲۶-۴ جریان اسپینی و بار به عنوان تابعی از اختلاف فاز در $AGNR(۸, ۸)$
- ۲۷-۴ جریان اسپینی و بار بر حسب جفت‌شدگی بین نوار مرکزی و الکترودها در $AGNR(۸, ۸)$
- ۱۰۲
- ۱۰۳ ۲۸-۴ جریان اسپینی و بار بر حسب شدت میدان مغناطیسی القایی در $AGNR(۸, ۸)$
- ۱۰۴ ۲۹-۴ جریان اسپینی و بار بر حسب دامنه‌ی پتانسیل متناوب با زمان در $AGNR(۸, ۸)$
- ۱۰۵ ۳۰-۴ جریان اسپینی و بار بر حسب فرکانس پتانسیل متناوب با زمان در $AGNR(۸, ۸)$

پیشگفتار

ولتاژهای ورودی وابسته به زمان یا لیزر منجر به پدیده‌های تراپردی جدیدی فراتر از قلمرو میدان‌های استاتیک می‌شوند. در اثر چنین تحریکاتی سیستم متحمل پدیده‌هایی مثل: تونل زنی به کمک فوتون، پمپاژ بار کوانتومی شامل: پمپاژ آدیباتیک و پمپاژ غیر آدیباتیک می‌شود. روند مهم در این پدیده‌ها تعامل بین تداخل کوانتومی و فرآیند فوتون کمک‌کننده می‌باشد. پمپاژ بارکوانتومی و دستگاه تولیدکننده‌ی آن پمپ کوانتومی، از ابتدا توجهات نظری و تجربی زیادی را به دلیل کاربرد در نانو الکترونیک به خود جلب کرده اند. پمپ کوانتومی دستگاهی است که در بایاس خارجی صفر جریان مستقیم تولید می‌کند. برای تحلیل و بررسی پمپاژ کوانتومی روش‌های تئوری مختلفی مانند فرمالیسم بروئر، نظریه‌ی فلوکوئت و ... بکار می‌روند. اغلب بررسی‌های انجام شده در زمینه‌ی پمپاژ بر اساس فرمالیسم بروئر و رژیم آدیباتیک انجام شده است، در مقابل فرمالیسم فلوکوئت به دلیل پیچیدگی و سنگینی محاسبات کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، در حالیکه نتایج دقیق و مفیدتری ارائه می‌دهد. از زمان کشف گرافین در سال ۲۰۰۴، این ماده به طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته است و پتانسیل‌های جدیدی برای الکترونیک مبتنی بر کربن ارائه می‌دهد. برهمکنش ضعیف اسپین-مدار در گرافین منجر به عدم پراکندگی همراه با وارونی اسپینی در این ماده می‌شود. بنابراین با توجه به طول هم‌دوسی بالای گرافین، این ماده قابلیت کاربرد به عنوان قطعه‌ی اسپینترونیک قوی را خواهد داشت. اما کنترل جداشدگی اسپینی در گرافین مشکل است. به همین دلیل پمپ کوانتومی اسپینی شامل نانو نوار گرافینی را پیشنهاد می‌کنیم که در آن جداشدگی اسپینی توسط میدان مغناطیس القایی انجام خواهد شد. در این تحقیق در فصل اول مروری بر برخی از کارهای انجام شده در زمینه‌ی پمپاژ انجام خواهد شد. این بررسی شامل نمونه‌های تجربی از پمپ کوانتومی معمولی و اسپینی و همچنین مطالعات تئوری انجام شده در زمینه پمپاژ کوانتومی آدیباتیک و غیر آدیباتیک خواهد بود. در فصل دوم فرمالیسم فلوکوئت و ویژگی‌های آن بررسی خواهد شد، همچنین با بکارگیری این فرمالیسم، هامیلتونی

فلوکوئت، تابع گرین فلوکوئت، احتمال عبور وابسته به زمان و متوسط زمانی جریان بیان خواهند شد. در فصل سوم پمپ کوانتومی معمولی و اسپینی شامل زنجیره‌ی یک بعدی دارای ساختار سد دو گانه، با بکارگیری فرمالیسم فلوکوئت بررسی خواهد شد. همچنین رفتار انواع جریان‌های پمپ شده بر حسب پارامترهای مختلف پمپاژ بررسی خواهد شد. در فصل چهارم پمپ کوانتومی اسپینی و غیر اسپینی شامل نانو نوارهای گرافین زیگزاگ و دسته مبلی معرفی خواهد شد. در این فصل رفتار انواع جریان‌های پمپ شده در دو نوار بر حسب پارامترهای مختلف دامنه، فرکانس و اختلاف فاز پتانسیل متناوب با زمان، انرژی فرمی، قدرت جفت شدگی و شدت میدان مغناطیسی القایی تحلیل خواهد شد.

فصل ۱

پیشینه پژوهش و تعاریف مقدماتی

۱-۱ مقدمه

میدان‌های وابسته به زمان (ولتاژ گیت وابسته به زمان یا لیزر) اجازه می‌دهند، پدیده ترابرد الکترونی فراتر از قلمرو میدان‌های استاتیک باشد. یک سوال خاص که در این زمینه مطرح می‌شود، تأثیر تحریک میدان‌های الکترومغناطیسی و ولتاژ گیت در انتقال الکترون است. در اثر چنین تحریکاتی سیستم متحمل پدیده‌های جالبی مثل: تونل زنی به کمک فوتون، پمپاژ بار کوانتومی و... می‌شود. در کاربردهای عملی اثرات وابسته به زمان را می‌توان برای کنترل و هدایت جریان رسانا مورد استفاده قرار داد. پمپاژ بار کوانتومی و دستگاه تولیدکننده‌ی آن پمپ کوانتومی، از ابتدا توجهات نظری و تجربی زیادی را به دلیل کاربرد در نانو الکترونیک به خود جلب کرده است. برای تحلیل و بررسی پمپاژ کوانتومی روش‌های تئوری مختلفی مانند فرمالیسم بروئر، نظریه‌ی فلوکوئت و ... بکار می‌روند. در این فصل مطالب زیر بیان می‌شوند: در قسمت اول پمپ کوانتومی، سپس انواع پمپاژ و روش‌های محاسباتی مربوط به هر یک و در نهایت مروری بر کارهای انجام شده بیان خواهند شد.

۲-۱ پمپ کوانتومی

اغلب این طور تصور می‌شود که برای تولید جریان بار، بایاس غیر صفر مورد نیاز است. یک سیستم مزوسکوپیک همدوس تحت اثر دو پارامتر اختلالی متناوب حتی در بایاس صفر نیز می‌تواند جریان مستقیم تولید کند. این اثر کوانتومی همدوس، پمپاژ بار کوانتومی و دستگاهی که قادر است آن را ارائه نماید، پمپ کوانتومی نامیده می‌شود. پمپاژ کوانتومی همدوس نتیجه‌ی تداخل بین مسیرهای پیمایش

مختلفی است که توسط یک پراکنده‌ی نوسانی ایجاد می‌شود. نسبت دوره‌ی تناوب پتانسیل متناوب با زمان τ به مدت زمان T که الکترون در نمونه پیمایش می‌کند، رژیم عملیاتی پمپ را تعیین می‌نماید. اگر $T \gg \tau$ پمپ اصطلاحاً در رژیم آدیاباتیکی و در مقابل در شرایط $T \ll \tau$ پمپ در رژیم غیر آدیاباتیکی عمل می‌کند.

۳-۱ پمپاژ کوانتومی آدیاباتیکی

تولید جریان مستقیم از طریق یک سیستم مزوسکوپیکی غالباً توسط بایاس ولتاژی که بین اتصالات سیستم با دنیای بیرونی برقرار می‌شود، نشان داده می‌شود. قابل توجه است، ترابرد اسپین و بار حتی در عدم حضور بایاس خارجی، توسط تنظیم دوره‌ای بعضی از پارامترهای سیستم حاصل می‌شود. اگر دوره‌ی تناوب پارامترها در مقایسه با زمانی که الکترون در سیستم سپری می‌کند کند باشد، این مکانیزم ترابرد پمپاژ آدیاباتیکی نامیده می‌شود.

ایده‌ی اصلی، برای تولید جریان مستقیم با استفاده از پمپ کوانتومی در ابتدا توسط تالس^۱ [۱] پیشنهاد شد. تالس سیستم را تحت انتقال یک موج پتانسیل عبوری در نظر گرفت و چنین فرض کرد که، تغییر شکل پتانسیل‌های محدود یک سیستم مزوسکوپیکی در مقایسه با تغییرات تناوبی تابع موج، آرام است و انرژی‌های الکترونی دارای تابع توزیع تعادلی می‌باشند. در این سیستم‌ها منابع الکترونی بزرگ توسط الکترودهای باز که دارای یک یا چند مد عرضی هستند حمایت می‌شوند. تابع موج به سوی الکترودها گسترانیده شده و این تغییرات آدیاباتیکی می‌تواند الکترون را به درون یا خارج از الکترودها انتقال دهد. در این شرایط تغییر شکل تناوبی وابسته به یک پارامتر نمی‌تواند سبب انتقال الکترون در شبکه شود، زیرا هر باری که طی نیم دور اول شارش می‌یابد، در نیم دور دوم به عقب شارش خواهد کرد. از طرف دیگر تغییراتی که مربوط به دو یا چند پارامتر تغییر در یک روش دوره ای است می‌تواند این تقارن را بشکند و به طور کلی یک جریان انتقال فراهم نماید. اولین نمونه آزمایشگاهی این پدیده توسط سوئیتکز^۲ انجام شد. سوئیتکز و همکاران [۲] در آزمایشی پمپاژ بارکوانتومی را در یک نقطه کوانتومی باز، که توسط دو ولتاژ متناوب هدایت می‌شوند، بررسی نمودند.

لازم به ذکر است، نقطه کوانتومی یک فلزکوچک یا جزیره نیم‌رسانا است، که توسط گیت‌ها محدود می‌شود و عمدتاً اتصال ضعیفی به الکترودها دارد. در سیستم کوانتومی باز، جفت شدگی به الکترودها توسط نقاط اتصال بالستیک انجام می‌گیرد. در سیستم بسته، جفت شدگی به الکترودها از طریق تونل زنی نقطه‌ی اتصال انجام می‌گیرد و بار درون نقطه کوانتومی گسسته می‌شود. در سیستم‌های بسته، تعداد

^۱Thouless

^۲Switkes

صحیح بار الکترونیکی می‌تواند به وسیله‌ی تغییرات متوالی از سدها انتقال یابد. در حالی که در سیستم‌های باز پمپاژ الکترونی توسط تغییر شکل آدیاباتیکی در پتانسیل‌های محدود کننده یا سایر پارامترهایی که در طرح تداخلی الکترون‌ها مؤثرند، هدایت می‌شود.

سیستم‌های بسته دارای رژیم عملیاتی بلوکه کلونی می‌باشند و تعداد صحیح بار الکترونی توسط تغییرات پی در پی سدها هدایت می‌شوند. بار منتقل شده پس از یک دوره تغییر شکل آدیاباتیکی به پیکربندی ابتدایی بر می‌گردد. اما تابع موج ممکن است دارای اختلاف فاز نسبت به تابع موج اولیه باشد، این فاز اصطلاحاً فاز بری^۳ نامیده می‌شود (هر برداری که به صورت موازی یک مسیر بسته را طی می‌کند تا به مکان اولیه اش برگردد، ممکن است نسبت به جهت اولیه اختلاف زاویه ای پیدا کند، این زاویه یک خاصیت هندسی است). این فاز اضافی معادل با الکترون‌هایی است که از نقطه کوانتومی عبور می‌کنند (یعنی بار پمپ شده).

ایده اصلی بار پمپ شده توسط اسپیواک و همکاران^۴ [۳] مطرح شد و در این بررسی مشخص شد، در شرایطی که ولتاژهای ورودی $U_1(t), U_2(t)$ دارای تابع تناوبی دلخواه با تناوب یکسان و اختلاف فاز اولیه می‌باشند و ناحیه محصور شده توسط مسیر پیکربندی فضایی $U_1(t), U_2(t)$ مخالف صفر است، جریان به طور خطی با فرکانس موجود متناسب است. در همان زمان بروئر^۵ [۴] روش ساده و شهودی را برای بررسی پمپ کوانتومی آدیاباتیکی با استفاده از روش ماتریس پراکندگی آدیاباتیکی پیشنهاد داد، که می‌تواند بسیاری از جنبه‌های نتایج آزمایش انجام شده توسط سوئیترز و همکاران را توضیح دهد. از آن زمان پمپاژ کوانتومی آدیاباتیکی توجهات قابل ملاحظه‌ای را در تحقیقات به خود جلب کرده است.

۴-۱ پمپاژ کوانتومی غیر آدیاباتیکی

در رژیم غیر آدیاباتیکی نسبت دوره‌ی تناوب پتانسیل اعمالی τ و مدت زمانی که الکترون در نمونه انتقال می‌یابد T ، برابر با $T \ll \tau$ است. برای فراتر رفتن از تقریب آدیاباتیکی و پرداختن به رژیم غیر آدیاباتیکی باید از فرمالیسم فلوکوئت بهره‌مند شویم. این فرمالیسم به تفصیل در فصل ۲ شرح داده خواهد شد. در فرمالیسم فلوکوئت پمپ کوانتومی به عنوان سیستم پراکندگی وابسته به زمان در نظر گرفته می‌شود. روش فلوکوئت اجازه می‌دهد، مسائل متناوب با زمان به طور دقیق حل شوند. از نقطه نظر فیزیکی، یک پتانسیل نوسان‌کننده می‌تواند، الکترون وارد شده با انرژی E را به ترازهای جانبی فلوکوئت در انرژی $E + n\hbar\omega$ انتقال دهد، که در آن n یک عدد صحیح و ω فرکانس زاویه‌ای نوسان

^۳ Berry's phase

^۴ Spivak and et al

^۵ Brouwer

است. ماتریس پراکندگی برای سیستم متناوب با زمان را می‌توان از تعامل این نوارهای جانبی ساخت. شرایط برای محاسبه‌ی جریان پمپ شده‌ی غیر صفر در رژیم غیرآدیباتیک در مقایسه با آدیباتیک نسبتاً پیچیده‌تر است. کاربرد فرمالیسم فلوکوئت برای مسائل واقعی مانند نقطه کوانتومی دو بعدی نسبتاً مشکل است زیرا، باید ترازهای جانبی زیادی برای هر کانال پراکندگی در نظر گرفت. با این حال مفاهیم مهم فیزیکی پمپ کوانتومی را، با به کارگیری مدل‌های نسبتاً ساده تر نیز می‌توان بررسی کرد. پمپاژ آدیباتیک هیچ مشابه کلاسیکی ندارد، زیرا که بعضی موارد در آن با فاز بری انجام می‌شود، به عبارت دیگر این پدیده کاملاً مکانیک کوانتومی است. مفهوم فاز بری در رژیم غیرآدیباتیک نامحسوس‌تر است. به این ترتیب فرمالیسم فلوکوئت می‌تواند نقش مهمی در فهم پدیده‌های ناشی از اختلالاتی با میانگین جریان صفر مانند چرخنده‌های کوانتومی^۶، یکسوکننده‌های بالستیک کوانتومی^۷ و شاتل‌های کوانتومی^۸ بازی کند، زیرا به ما اجازه می‌دهد از حد آدیباتیک فراتر برویم. [۴]

۵-۱ فرمالیسم بروئر

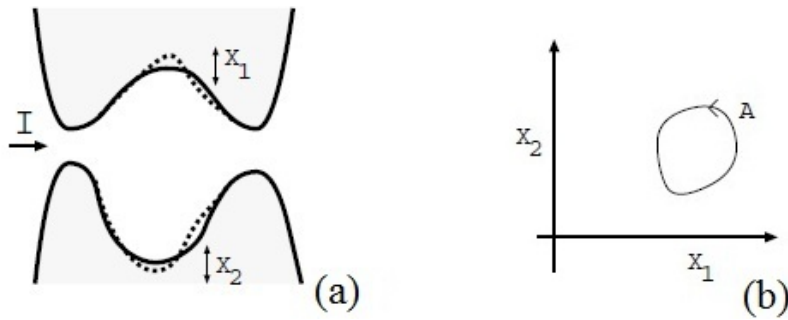
در سال ۱۹۹۸ بروئر [۵]، برای پمپاژ آدیباتیک فرمالیسمی براساس ماتریس پراکندگی بوتیکر^۹ مربوط به ترابرد متناوب با زمان در رژیم کم فرکانس ارائه داد. در این فرمالیسم، جریان پمپ شده در پاسخ به تغییر دوره‌های مجموعه پارامترهای کنترلی $\{X_j\}$ سیستم شارش می‌یابد. پارامترها در عبارات ماتریس پراکندگی $S\{X_j\}$ بیان می‌شوند. این تئوری پمپاژ پارامتری، در رژیم کم فرکانس $\omega < \tau^{-1}$ و تا مرتبه اول فرکانس معتبر است. بار پمپ شده در طول چرخه، متناسب با ناحیه محصور شده توسط پارامترهای فضایی ماتریس پراکندگی است (شکل (۱-۱)). بنابراین برای داشتن یک جریان مخالف صفر، حداقل دو پارامتر وابسته به زمان که با فرکانس ω و اختلاف فاز φ نوسان می‌کنند، لازم است. در شکل (۱-۱) قسمت الف، تغییر شکل نقطه کوانتومی در حضور دو پارامتر متناوب زمانی نشان داده می‌شود. با تغییر تناوبی دو پارامتر، جریان مستقیم تولید می‌شود. در قسمت ب، مسیر بسته‌ی ایجاد شده توسط پارامترهای متناوب با زمان را نشان می‌دهد. به این ترتیب پارامترهای $X_1(t)$ ، $X_2(t)$ مسیر بسته‌ای در فضای پارامتری را دنبال می‌کنند. در ادامه فرمالیسم بروئر را بیان می‌کنیم. او در رویکرد پراکندگی، پمپ الکترونی پارامتری، را از میان یک سیستم کوانتومی باز با دو پارامتر $X_1(t)$ ، $X_2(t)$ و ماتریس پراکندگی $S(X_1, X_2)$ در نظری می‌گیرد. تناوب زمانی $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$ باید بزرگتر از زمانی باشد که

^۶quantum ratchets

^۷quantum ballistic rectifiers

^۸quantum shuttles

^۹Buttiker



شکل ۱-۱: الف. تغییر شکل نقطه‌ی کوانتومی تحت تأثیر دو اتصال را نشان می‌دهد. ب. در یک تناوب پارامترها مسیر بسته در فضای پارامتر را دنبال می‌کند.

ذرات در نقطه‌ی کوانتومی می‌گذرانند. همان‌طور که در شکل (۱-۱) می‌بینیم، سیستم مورد بررسی نقطه کوانتومی متصل به دو الکتروود با نقطه اتصال بالستیک است، همچنین الکتروودها دارای ولتاژ یکسان می‌باشند. دو پارامتر خارجی $X_1(t), X_2(t)$ نقطه کوانتومی، به طور متناوب تغییر می‌کنند. پارامترهای خارجی می‌توانند پارامترهای مشخص شده در شکل یا یک میدان مغناطیسی باشند. دو نقطه اتصال، که هرکدام دارای N کانال در تراز انرژی فرمی می‌باشند، با شماره های ۱ و ۲ برچسب خورده‌اند. ماتریس پراکندگی S دارای ابعاد $2N \times 2N$ و پارامترهای آن X_1, X_2 می‌باشد. به دلیل اتصال خوب سیستم با الکتروودها، اصل بلوکه شدن کولنی کنار گذاشته می‌شود و می‌توان از تصویر الکترون غیر برهم کنش‌گر استفاده کرد. در رژیم کم فرکانس می‌توان فرض کرد که تعادل در روند پمپاژ حفظ می‌شود، و در فرمول ماتریس پراکندگی ω^2 (یا مرتبه‌های بالاتر) دیده نمی‌شود، که نشان دهنده‌ی توزیع غیرتعادلی درون نقطه کوانتومی می‌باشد. نقطه شروع تئوری پروثر از رابطه بوتیکر [۶] منشأ می‌گیرد. این رابطه مربوط به جریان حاصل از تغییرات بسیار کوچک پارامتر X در اتصالات ۱ و ۲ است. برای تغییرات نوسانی کوچک $X(t) = X_0 + \delta X_\omega e^{i\omega t}$ ، بار $\delta Q(m)$ که از طریق اتصال $m (m = 1, 2)$ وارد سیستم می‌شود، عبارت است از:

$$\delta Q(m, \omega) = e \frac{dn(m)}{dX} \delta X_\omega \quad (1.1)$$

که در آن،

$$\frac{dn(m)}{dX} = \frac{1}{2\pi} \sum_{\beta} \sum_{\alpha \in m} \text{Im} \frac{\partial S_{\alpha\beta}}{\partial X} S_{\alpha\beta}^* \quad (2.1)$$

اندیس α برای اتصال ۱، از ۱ تا N و برای اتصال ۲ از $N + 1$ تا $2N$ جمع زده می‌شود. $n(m)$ چگالی بار است و کمیت $\frac{dn(m)}{dX}$ بیانگر نشر در اتصال m ام است، که برای مراتب اول فرکانس ω معتبر است. به این ترتیب تبدیل فوریه رابطه‌ی (۱-۱) عبارت است از:

$$\delta Q(m, t) = e \frac{dn(m)}{dX} \delta X(t) \quad (3.1)$$

بار کل گسیل شده از نقطه کوانتومی از طریق کانال m ام در دوره تناوب $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$ توسط انتگرال گیری بر حسب X_1, X_2 عبارت است از:

$$Q(m, \tau) = e \int_0^\tau dt \left(\frac{dn(m)}{dX_1} \frac{dX_1}{dt} + \frac{dn(m)}{dX_2} \frac{dX_2}{dt} \right) \quad (4.1)$$

بارکل خارج شده از نقطه کوانتومی از طریق اتصال m به صورت انتگرال گیری روی مسیر بسته A محصور شده در فضای پارامتر، با استفاده از قضیه گرین باز نویسی می شود:

$$Q(m, \tau) = e \int_A dX_1 dX_2 \left(\frac{\partial}{\partial X_1} \frac{dn(m)}{dX_2} - \frac{\partial}{\partial X_2} \frac{dn(m)}{dX_1} \right) \quad (5.1)$$

در یک دوره تناوب پارامترهای X_1, X_2 مسیر بسته A (شکل ۱-۱) را در فضای پارامتری (X_1, X_2) دنبال می کنند. اگر این دو پارامتر دارای اختلاف فاز $\pi, 0$ باشند، مساحت سطح بسته و بار انتقال یافته صفر می شوند. اما در صورتی که دو پارامتر دارای اختلاف فاز $\frac{\pi}{4}$ باشند، مساحت سطح بیشینه می شود. با جایگذاری رابطه (۱-۲) در (۱-۵)، بار گسیل شده عبارت است از:

$$Q(m, \tau) = \frac{e}{\pi} \int_A dX_1 dX_2 \Sigma_\beta \Sigma_{\alpha\epsilon m} I_m \frac{\partial S_{\alpha\beta}^*}{\partial X_1} \frac{\partial S_{\alpha\beta}}{\partial X_2} \quad (6.1)$$

از این رو جریان I_m از طریق اتصال m ام عبارت است از:

$$I_m = \frac{i\omega e}{4\pi^2} \Sigma_{\alpha\epsilon m} \int_A dX_1 dX_2 [R_x, R_{X_2}]_{\alpha\alpha} \quad (7.1)$$

$$R_X = -i \frac{\partial S}{\partial X} S^\dagger \quad (8.1)$$

نتایج به دست آمده از رابطه (۸-۱) عبارت است از: ۱- در سیستم همدوس کوانتومی تغییر هر جفت پارامتر مستقل از هم، منجر به جریان مستقیم از مرتبه ω می شود. ۲- جریان گسسته نیست، برخلاف پمپ های الکترونی که در رژیم بلوکه کولنی عمل می کنند.

۶-۱ مروری بر کارهای انجام شده

۱-۶-۱ نمونه ی تجربی پمپ کوانتومی آدیاباتیکی

در سیستم های باز، پمپاژ کوانتومی آدیاباتیکی نیازمند دو ولتاژ متناوب می باشد و پاسخ سیستم بر حسب فرکانس پتانسیل متناوب، خطی است. با این حال به دلیل اینکه سیستم به سمت الکترودها باز است، بلوکه شدن کولنی حضور ندارد و پاسخ پمپاژ گسسته نیست. در این آزمایش پمپاژ کوانتومی توسط تغییر