

الله
الله أكبر



دانشکده فیزیک

گروه فیزیک اتمی و مولکولی

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک (اپتیک لیزر)

عنوان

بررسی اثر هارتمن در بلورهای فوتونی حاوی شبه مواد

اساتید راهنما

دکتر حبیب تجلی

دکتر صمد روشن انتظار

پژوهشگر

چنور اسمعیلی

بهمن ۱۳۸۹

نام خانوادگی: اسمعیلی	نام: چنور
عنوان پایان نامه: بررسی اثر هارتمن در بلورهای فوتونی حاوی شبه مواد	
اساتید راهنما: دکتر حبیب تجلی - دکتر صمد روشن انتظار	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: فیزیک
گرایش: اتمی و مولکولی	دانشگاه: تبریز
دانشکده: فیزیک	تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۸۹
تعداد صفحات: ۹۹	
کلید واژه: اثر هارتمن، بلورهای فوتونی، شبه مواد، شبه مواد تک منفی، زمان فازی (تأخیر گروه) و ...	
<p>چکیده: در سال ۱۹۶۲، هارتمن در راستای مطالعات خود عبارتی تحلیلی را برای تأخیر زمان (تأخیر گروه یا زمان فازی) در تونل زنی از مانع بدست آورد این زمان عبور دارای مقدار محدود و کوتاهی بود که متناسب با فاصله‌ی انتشار اشباع می‌شد. به این معنی که برای موانع به اندازه‌ی کافی ضخیم، تأخیر زمانی مستقل از ضخامت مانع می‌شود. این اثر که بعدها اثر هارتمن نامیده شد به سرعت‌های فرانوری در داخل موانع اشاره دارد و با مشاهدات انجام شده در محیط‌های مختلف، مورد تأیید قرار گرفته است. در این پایان نامه اثر هارتمن در چندین ساختار از بلورهای فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست مثبت، منفی و بلورهای فوتونی متشکل از مواد تک منفی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بررسی با استفاده از روش ماتریس انتقال و روش فاز ایستا، تحولات میدان الکترومغناطیسی و تأخیر گروه یا زمان فازی پالس عبوری از ساختار بررسی شده است، نشان داده شده که اثر هارتمن می‌تواند متناسب با ساختارهای ارائه شده دارای مقادیر مثبت و منفی باشد. در بلورهای فوتونی یک بعدی حاوی مواد دی الکتریک معمولی اثر هارتمن مثبت است. اما در</p>	

بلورهای فوتونی حاوی مواد با ضریب شکست منفی، اثر هارتمن منفی است بعلاوه در بلورهای فوتونی متشکل از لایه‌های دارای ضریب شکست مثبت و منفی این اثر می‌تواند مثبت یا منفی باشد.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

که وجودم برای آنان همه رنج و وجودشان برای من همه مهر بود.

تشکر و قدردانی

سپاس ایزد یکتا که بی‌شک هر چه داریم از اوست. اینک که این نوشته به لطف او به پایان رسیده بر خود لازم می‌دانم که از زحمات اساتید گرانقدر، جناب آقای دکتر حبیب تجلی و دکتر صمد روشن انتظار که در تمام مراحل کار با صبر و بزرگواری فراوان مرا یاری دادند، نهایت تشکر را دارم. همچنین از تمام دوستانی که رنج این پروژه بر گردن آنان نیز بوده کمال تشکر و قدردانی را دارم و برایشان آرزوی توفیق و موفقیت را از خداوند متعال خواستارم.

فهرست مطالب

فصل اول

بررسی منابع

۱	۱-۱: مقدمه
۲	۲-۱ خلاصه‌ای از تاریخچه‌ی تونل‌زنی
۵	۳-۱ خلاصه‌ای از تاریخچه‌ی زمان تونل‌زنی
۸	۴-۱- بلورهای فوتونی
۹	۱-۴-۱ تاریخچه‌ای از بلورهای فوتونی
۱۰	۲-۴-۱ ابعاد بلورهای فوتونی
۱۱	۵-۱ مطالعه‌ای مواد بر ضریب شکست منفی
۱۴	۱-۵-۱ مطالعه و بررسی ویژگی‌های شبه‌موادها
۲۲	۲-۵-۱ فلزات و پلاسماها در فرکانس اپتیکی
۲۵	۳-۵-۱ ساختار توری سیم‌ها در زیر فرکانس پلاسمایی
۳۲	۴-۵-۱ ساختار متناوب سیم‌های نازک گسسته
۳۳	۵-۵-۱ مشددهای حلقه-شکاف
۳۵	۶-۵-۱ ساختارهایی با ضریب شکست منفی

فصل دوم

مواد و روش‌ها

۳۸	۱-۲ مقدمه
۴۱	۲-۲ انتشار امواج الکترومغناطیسی در بلورهای فوتونی

۴۱	۱-۲-۲ ماتریس انتقال در یک ساختار
۴۶	۲-۲-۲ بکارگیری ماتریس انتقال در مطالعه‌ی انتشار پالس اپتیکی از یک بلور فوتونی یک‌بعدی
۵۱	۳-۲ محاسبه‌ی زمان فازی یا تأخیر گروه
۵۱	۱-۳-۲ فاز ایستا
۵۲	۲-۳-۲ محاسبه‌ی تأخیر گروه بسته‌ی موج در عبور و بازتاب از مانع اپتیکی
۵۵	۴-۲ انتشار امواج در یک بلور فوتونی متشکل از مواد تک-منفی

فصل سوم

نتایج و بحث

۵۹	۱-۳ مقدمه
۶۱	۲-۳ نتایج مربوط به انتشار امواج در بلورهای فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست مثبت
۶۱	۱-۲-۳ نتایج مربوط به اثر هارتمن در بلورهای فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست مثبت
۶۳	۲-۲-۳ تحلیل و بررسی بیشتر انتشار موج در بلورهای فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست مثبت
۶۷	۳-۲-۳ نتایج مربوط به زمان فازی عبوری و بازتابیده از بلور فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست مثبت
۶۸	۳-۳ نتایج مربوط به انتشار امواج در بلورهای فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست منفی
۶۸	۱-۳-۳ نتایج مربوط به اثر هارتمن در بلورهای فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست منفی
۷۰	۲-۳-۳ تحلیل و بررسی بیشتر انتشار موج در بلورهای فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست منفی
۷۴	۳-۳-۳ نتایج مربوط به زمان فازی عبوری و بازتابیده از بلور فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست
۷۶	۴-۳-۳ نتایج مربوط به زمان فازی در بلورهای فوتونی حاوی لایه‌های با ضریب شکست‌های وابسته به فرکانس
۷۸	۴-۳ نتایج مربوط به بلورهای فوتونی متشکل از لایه‌های با ضریب شکست مثبت و منفی
۸۴	۵-۳ نتایج مربوط به بلورهای فوتونی متشکل از مواد تک-منفی
۸۹	۶-۳ نتیجه‌گیری کلی
۹۲	۷-۳ پیشنهادات
۹۴	منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): شماتیکی از آزمایش جدانکن در محاسبه‌ی تأخیر گروه دو فوتون ۵
- شکل (۲-۱): طرح شماتیکی از بلورهای فوتونی ۱۱
- شکل (۳-۱): طبقه بندی مواد بر پایه خواص مغناطیسی و دی الکتریکی ۱۵
- شکل (۴-۱): نمایش تابع گذردهی الکتریکی روی صفحه مختلط ۱۷
- شکل (۵-۱): بردارهای K ، H ، E در محیط‌های راستگرد و چپگرد ۱۸
- شکل (۶-۱): پدیده دوپلر در مواد راستگرد و چپگرد ۲۰
- شکل (۷-۱): الگوی تابش ۲۱
- شکل (۸-۱): تابش چرنکو در محیط‌های راستگرد و چپگرد ۲۲
- شکل (۹-۱): بخش حقیقی و موهومی تابع گذردهی الکتریکی برای پلاسمای ایده‌آل ۲۴
- شکل (۱۰-۱): آرایشی از سیم‌های نازک فلزی ۲۶
- شکل (۱۱-۱): نمایشی از انبوه سیم‌های گسسته‌ی متناوب روی صفحات مدار چاپی ۳۲
- شکل (۱۲-۱): ساختار حلقه - شکاف ۳۳
- شکل (۱۳-۱): نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس. ۳۵
- شکل (۱۴-۱): ساختار تصنعی مواد با ضریب شکست منفی ۳۵
- شکل (۱-۲): شماتیکی از ساختار متناوب ۴۱
- شکل (۲-۲): دامنه‌های وابسته به هم در لایه‌های مختلف از یک ساختار متناوب ۴۴
- شکل (۱-۳): رفتار تأخیر گروه بر حسب ضخامت مانع (اثر هارتمن) ۶۰
- شکل (۲-۳): طرح شماتیک از ساختار بلورهای فوتونی ۶۱
- شکل (۳-۳): عبوردهی بر حسب فرکانس زاویه‌ای برای بلورهای فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست مثبت ۶۲
- شکل (۴-۳): وابستگی زمان فازی عبوری، به تعداد تناوب لایه‌ها برای بلورهای فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست مثبت ۶۳

- شکل (۳-۵): جابجایی فازی عبوری از ساختار متقارن بلور فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست مثبت بر حسب فرکانس زاویه‌ای
- شکل (۳-۶): عبور میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی از طول بلور فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست مثبت بر حسب زمان
- شکل (۳-۷): بخش حقیقی و موهومی میدان الکتریکی در عبور از طول بلور فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست مثبت بر حسب زمان
- شکل (۳-۸): شدت نرمالیزه‌ی پالس عبوری، فرودی و پالس مرجع بر حسب زمان در بلور فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست مثبت
- شکل (۳-۹): زمان فازی عبوری و بازتابیده بر حسب فرکانس برای بلور فوتونی متشکل از مواد مثبت
- شکل (۳-۱۰): عبوردهی بر حسب فرکانس زاویه‌ای برای بلورهای فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست منفی
- شکل (۳-۱۱): وابستگی زمان فازی عبوری، به تعداد تناوب لایه‌ها برای بلورهای فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست منفی
- شکل (۳-۱۲): جابجایی فازی عبوری از ساختار متقارن بلور فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست منفی بر حسب فرکانس زاویه‌ای
- شکل (۳-۱۳): الف) عبور میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی از طول بلور فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست منفی بر حسب زمان
- شکل (۳-۱۴): بخش حقیقی و موهومی میدان الکتریکی در عبور از طول بلور فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست منفی بر حسب زمان
- شکل (۳-۱۵): شدت نرمالیزه‌ی پالس عبوری، فرودی و پالس مرجع بر حسب زمان در بلور فوتونی متشکل از مواد با ضریب شکست منفی
- شکل (۳-۱۶): زمان فازی عبوری و بازتابیده بر حسب فرکانس برای بلور فوتونی متشکل از مواد منفی
- شکل (۳-۱۷): ضریب شکست لایه‌های A و B بر حسب فرکانس زاویه‌ای در بلورهای فوتونی حاوی مواد پاشنده
- شکل (۳-۱۸): عبوردهی بلور فوتونی بر حسب فرکانس برای بلورهای فوتونی متشکل از لایه‌های با ضریب شکست وابسته به فرکانس
- شکل (۳-۱۹): زمان فازی بر حسب فرکانس برای ساختار متناوب متشکل از لایه‌هایی با ضریب شکست وابسته به فرکانس در تابش عمودی
- شکل (۳-۲۰): طرح شماتیکی از ساختار بلور فوتونی
- شکل (۳-۲۱): عبوردهی ساختارهای به کار رفته بر حسب فرکانس زاویه‌ای برای بلورهای فوتونی متشکل از لایه‌های با ضریب شکست مثبت و منفی

- شکل (۳-۲۲): زمان فازی پالس عبوری بر حسب فرکانس زاویه‌ای. برای بلورهای فوتونی متشکل از لایه‌های با ضریب شکست مثبت و منفی ۸۰
- شکل (۳-۲۳): بخش‌های حقیقی و موهومی میدان الکتریکی را بر حسب مکان و زمان برای بلورهای فوتونی متشکل از لایه‌های با ضریب شکست مثبت و منفی ۸۱
- شکل (۳-۲۴): شدت نرمالیزه‌ی پالس گاوسی عبوری از خلأ برای بلورهای فوتونی متشکل از لایه‌های با ضریب شکست مثبت و منفی بر حسب زمان تأخیر ۸۲
- شکل (۳-۲۵): زمان فازی بر حسب تعداد پریودهای در بلورهای فوتونی متشکل از لایه‌های با ضریب شکست مثبت و منفی ۸۳
- شکل (۳-۲۶): جابجایی فازی عبوری از ساختار متقارن بلور فوتونی متشکل از مواد تک‌منفی بر حسب فرکانس زاویه‌ای ۸۴
- شکل (۳-۲۷): زمان فازی بر حسب فرکانس زاویه‌ای برای بلور فوتونی متشکل از مواد تک‌منفی ۸۶
- شکل (۳-۲۸): بخش‌های حقیقی میدان الکتریکی و مغناطیسی را بر حسب مکان و فرکانس زاویه‌ای برای بلور فوتونی متشکل از مواد تک‌منفی ۸۷
- شکل (۳-۲۹): وابستگی زمان فازی عبوری، به تعداد تناوب لایه‌ها برای بلورهای فوتونی متشکل از مواد تک-منفی به ازای فرکانس مرکزی گاف براگ ۸۸
- شکل (۳-۳۰): وابستگی زمان فازی عبوری، به تعداد تناوب لایه‌ها برای بلورهای فوتونی متشکل از مواد تک-منفی به ازای فرکانس بحرانی گاف فاز صفر ۹۰

فصل اول

مقدمه و بررسی منابع

۱-۱: مقدمه

تونل‌زنی از مبهم‌ترین پدیده‌های مکانیک کوانتوم و از جمله فرایندهای مهم و اساسی در طبیعت است. این پدیده در ابتدایی‌ترین مرحله‌ی واکنش‌های هسته‌ای « $p + p \rightarrow d + e + \bar{\nu}_e$ » در خورشید وجود دارد. در این پدیده ملاحظه می‌شود که یک ذره در برخورد با یک مانع پتانسیلی می‌تواند در ناحیه‌ی ممنوعه‌ی کلاسیکی نفوذ کند [۱]. اثر جوزفسون^۱ در فیزیک حالت جامد، همجواری در فیزیک هسته‌ای و اینستانتون^۲ در فیزیک انرژی‌های بالا همگی از این پدیده تأثیر گرفته‌اند. مباحث بسیاری در مکانیک کوانتوم با محاسبه‌ی احتمالات تونل‌زنی مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۲]. احتمال اینکه یک ذره از مانع تونل‌زنی انجام دهد در کتاب‌های مقدماتی مکانیک کوانتوم محاسبه شده است. امروزه تونل‌زنی علاوه بر اینکه در بسیاری از محیط‌ها مشاهده شده است، اساس ساخت بسیاری از وسایل مفید نیز می‌باشد. از جمله مسائلی که در راستای مطالعه‌ی تونل‌زنی همچنان ذهن فیزیکدان‌ها را بخود مشغول کرده، این است که "چه مدت زمان طول می‌کشد که ذره از میان مانع تونل‌زنی انجام دهد؟" این سوال هنوز موضوع بسیاری از بحث‌هاست و تا کنون نیز نظریه‌های بسیاری در پیش‌بینی زمان تونل‌زنی یکدیگر را نقض کرده‌اند. بعضی از نظریه‌های مطرح شده، زمان تونل‌زنی را فرانوری معرفی می‌کنند [۱]. در این پایان‌نامه، زمان تونل‌زنی، در ساختارهای دی‌الکتریکی

¹ Josephson

² Instanton

متناوبی مطالعه می‌شود. این ساختارهای متناوب که بلورهای فوتونی خوانده می‌شوند از کنار هم قرار دادن لایه‌های دی‌الکتریک با ضرایب شکست متفاوت بصورت متناوب حاصل می‌شوند.

۱-۲ خلاصه‌ای از تاریخچه‌ی تونل‌زنی

بعد از ظهور معادلات شرودینگر، هوند^۱ «نقل از منبع شماره‌ی ۱» در محاسبه‌ی شکافت حالت پایه، در چاه پتانسیل دوگانه^۲ی تشکیل شده از مولکول‌های آمونیاک در میز آمونیاک، متوجه پدیده‌ی تونل‌زنی شد. و احتمال رخداد این پدیده را که بعدها نفوذپذیری مانع تعریف شد، مطالعه کرد. در دنباله‌ی کار هوند با توجه به کشف معادلات شرودینگر، نوردهایم^۳ «نقل از منبع شماره‌ی ۱» ضریب بازتاب یک الکترون را برای یک چاه پتانسیل مربعی محاسبه کرد. نوردهایم عنوان کرد که از دیدگاه کلاسیکی اگر الکترونی دارای انرژی کافی برای عبور از مانع نباشد در برخورد با مانع از سطح مانع بازتاب می‌شود در حالیکه از دیدگاه کوانتومی این الکترون از مانع تونل‌زنی انجام می‌دهد. بنابراین نوردهایم تونل‌زنی میان حالت‌های مرزی تعریف شده بوسیله‌ی هوند را به تونل‌زنی میان حالت‌های پیوسته بسط داد. در دنباله‌ی مطالعه‌ی سلسله پیشرفت‌هایی که در این زمینه انجام شد در ۱۹۲۸، تونل‌زنی کوانتومی برای فیزیک هسته‌ای و فیزیک حالت جامد در تعریف واپاشی هسته‌ای رادیواکتیو α و میدان گسیلی ناشی از الکترون‌ها از سطح فلز بکار گرفته شد [۱]. به عنوان یک پیش درآمد، در مطالعه‌ی پیشرفت‌های انجام شده در این زمینه، اپنهایمر^۴ «نقل از منبع شماره‌ی ۱» نرخ یونیزاسیون اتم هیدروژن را بوسیله‌ی میدان خارجی محاسبه کرد. در پی آن گامو^۵، و بعدها نیز گارنی^۶ و کاندون^۷ «نقل از منبع شماره‌ی ۱» پدیده‌ی تونل‌زنی را برای بازه‌ی وسیعی از نرخ واپاشی α برای هسته-

¹ Hund

² Double-well potensial

³ Nordheim

⁴ Oppenheimer

⁵ Gamow

⁶ Gurney

⁷ Condon

های رادیواکتیو بکار گرفتند. در فیزیک حالت جامد، فاولر^۱ و نوردهایم «نقل از منبع شماره ۱» از تونل‌زنی برای محاسبه‌ی نرخ گسیل الکترون‌ها به خلأ استفاده کردند که نتیجه‌ی آن، تابش یک میدان الکتریکی قوی از سطح فلز بود که این تابش گسیل میدان تعریف می‌شود. در ۱۹۳۴ زنر^۲ «نقل از منبع شماره ۱» از این نظریه استفاده کرده و دیودهای زنر را ایجاد کرد.

بعد از جنگ جهانی دوم پدیده‌ی تونل‌زنی بسیار مورد توجه قرار گرفت و با استناد به این پدیده اختراعات جدیدی انجام شد. در ۱۹۵۷ ایساکي^۳ «نقل از منبع شماره ۱» دیودهای تونلی^۴ را اختراع کرد. در این دیودها، تونل‌زنی الکترون‌ها و حفره‌ها بدلیل میدان داخلی گسیلی در عرض یک لایه‌ی سدی نازک در پیوند p-n ژرمانیوم بشدت آلاینده شده، سبب می‌شود منحنی مشخصه‌ی I-V در عرض پیوند، رفتار غیر عادی از خود نشان دهد به این شکل که ناحیه‌ای با مقاومت منفی در منحنی I-V پدیدار می‌شود. بدلیل جدائی بارهای با علامت‌های مخالف در طرف مقابل پیوند، که ناشی از خمیدگی نوارهای رسانش و ظرفیت نیم‌رساناها در ناحیه‌ی سدی است میدان الکتریکی داخلی بزرگی در عرض پیوند ایجاد می‌شود. اگر ولتاژ بیاس در عرض پیوند از صفر شروع به رشد کند تونل زنی الکترون‌ها و حفره‌ها در عرض این ناحیه متناسب با افزایش جریان خواهد بود. افزایش ولتاژ در حالی که اندازه‌ی آن قابل مقایسه با گاف باند ژرمانیوم است، جریان تونل زنی را کاهش می‌دهد. که این کاهش جریان بعلت کاهش چگالی حالت‌های مجاز نهایی برای الکترون‌ها و حفره‌ها در داخل گاف‌باند می‌باشد و نتیجه‌ی بازتاب براگ الکترون‌ها و حفره‌ها از شبکه‌ی متناوب ژرمانیوم است که تکانه‌ی آنها به تکانه‌ی شبکه نزدیک شده است. به این ترتیب ناحیه‌ی مقاومت منفی بالایی در منحنی I-V ایجاد شده که منجر به ساخت نوسانگرهای فرکانس بالا بر اساس دیود تونلی می‌شود [۱].

¹ Fowler

² Zener

³ Esaki

⁴ Tunnel diode

در ۱۹۶۲ جوزفسون^۱ «نقل از منبع شماره ۱» حضور یک ابر جریان تونل‌زننده را از عرض گافی که دو ابرسانا را از هم جدا می‌کند پیش‌بینی کرد. این اثر تونل‌زنی ابرسانایی، توسط گیاور^۲ «نقل از منبع شماره ۱» در پیوند جوزفسونی که لایه‌های نازکی از ابرساناها بوسیله‌ی یک مانع اکسیدی نازک از هم جدا شده‌اند در آزمایشگاه تأیید شد. در ۱۹۸۲ بینینگ^۳ و روهرر^۴ «نقل از منبع شماره ۱» از تونل‌زنی الکترون برای اختراع میکروسکوپ‌های تونل‌زنی اسکنی^۵ استفاده کردند.

در دهه‌های اخیر، دیدگاه‌های متفاوتی در مطالعه‌ی زمان تونل‌زنی مطرح شده و مقالات بسیاری نیز در این زمینه چاپ شده است. این سوال که چه مدت زمان طول می‌کشد تا یک ذره از مانع پتانسیلی، تونل‌زنی انجام دهد برای مدت‌ها ذهن فیزیکدان‌ها را مشغول کرده بود. در جستجو برای یافتن جواب این سوال تعریف‌های زیادی برای زمان تونل‌زنی پدیدار شد که بعضی از آنها این فرآیند را یک پدیده‌ی فرانوری (بزرگتر از سرعت نور در خلأ) معرفی کرده بودند [۳]. آزمایش‌هایی که در این راستا صورت گرفت بر اساس آزمایش‌های جدانکن^۶ می‌باشد. به این ترتیب که فرض می‌شود یک ذره‌ی مادر (یک فوتون)، مانند واپاشی رادیواکتیو، به دو ذره‌ی دختر (دو فوتون) واپاشیده می‌شود که ذرات دختر دارای سرعت‌های یکسانی در خلأ می‌باشند و به همین خاطر بصورت هم‌زمان بوسیله‌ی دو آشکارگر که در فاصله‌های یکسانی از مکان واپاشی قرار دارند آشکارسازی می‌شوند. در مسیر یکی از فوتون‌های واپاشیده مانعی قرار داده می‌شود در حالیکه فوتون دیگر در همان مسیر اولیه‌اش (خلأ) منتشر می‌شود. تفاوت زمانی میان رسیدن دو ذره‌ی دختر بوسیله‌ی تفاوت زمانی کلیک روی دو آشکارگر تعریف می‌شود. حال این سوال مطرح می‌شود "فوتونی که از عرض مانع عبور می‌کند زودتر از فوتونی که از خلأ عبور می‌کند روی آشکارگرها کلیک می‌کند یا دیرتر؟" [۱].

¹ Josephson

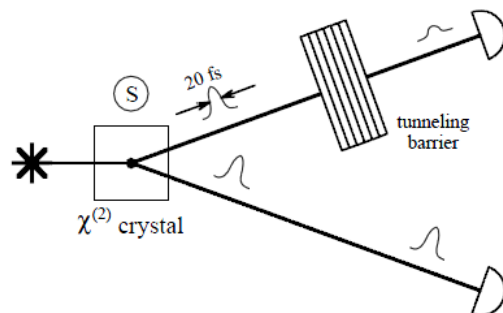
² Giaever

³ Binnig

⁴ Rohrer

⁵ scanning tunneling microscope

⁶ Gedankenexperiment



شکل (۱-۱): شمانیکی از آزمایش جدانکن در محاسبه‌ی تأخیر گروه دو فوتون، همزمان تابیده شده از منبع (در مسیر یکی از این فوتون‌ها یک مانع پتانسیلی قرار داده گرفته است) [۱].

۳-۱ خلاصه‌ای از تاریخچه‌ی زمان تونل‌زنی

پس از کشف پدیده‌ی تونل‌زنی در مکانیک کوانتوم در سال ۱۹۳۰ کاندون^۱ [۴] سوالی در مورد سرعت انجام فرآیند تونل‌زنی مطرح کرد و در سال ۱۹۳۱ برای حل این مسئله راه‌حلی را پیشنهاد داد. سال بعد مک‌کل^۲ [۵] با مطالعاتی که روی بسته‌ی موج فرودی بر مانع پتانسیلی انجام داد دریافت که تأخیر قابل ملاحظه‌ای در عبور بسته‌ی موج از مانع وجود ندارد. این مسأله برای مدت سی سال به صورت ساکن باقی ماند. تا اینکه هارتمن در ۱۹۶۲ [۶،۳] در راستای مطالعه روی محدودیت‌های فرکانسی در ساندویچ فلز - نارسانا - فلز، به این سوال برخورد کرد. او با استفاده از روش فاز ایستا، که توسط ایسنبود^۳، بوهم^۴ و ویگنر^۵ در مسائل پراکندگی استفاده شده بود عبارتی تحلیلی را برای تأخیر زمان (تأخیر گروه یا زمان فازی) در تونل‌زنی از مانع بدست آورد و زمان عبور محدود اما کوتاهی را که متناسب با فاصله‌ی انتشار اشباع می‌شد پیشنهاد داد.

^۱ E. U. Condon

^۲ L. A. Mac Coll

^۳ Eisenbud

^۴ bohm

^۵ wigner

در اوایل ۱۹۹۰، آزمایش‌های الکترومغناطیسی، اپتیکی و آکوستیکی بسیاری برای تعریف زمان تونل‌زنی انجام گرفت [۳]. از جمله‌ی این آزمایش‌ها کار اندرس^۱ و نیمتز^۲ [۸،۷] در سال ۱۹۹۲ بود. آنها اندازه‌گیری‌هایی را بر زمان عبور امواج میکروویو، از موجبرهای کوچکتر از حد معمول انجام دادند و برای این کار از موجبرهای فلزی مستطیلی با ناحیه‌ای باریک استفاده کردند که امواج در این ناحیه، میرا می‌شدند. اندازه و فاز ضریب عبور را به عنوان تابعی از فرکانس برای موانع با طول‌های ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بدست آوردند و دریافتند که جابجایی فازی عبوری برای نواحی قطع در موجبر، در توافق با اثر هارتمن و مستقل از طول مانع است. آنها برای هر ۴ مانع، تأخیر گروه یکسانی بدست آوردند. و به این ترتیب نتیجه گرفتند که سرعت عبور پالس از موجبر فرانوری می‌باشد.

اولین آزمایش در اندازه‌گیری زمان تونل‌زنی در فرکانس‌های اپتیکی، کار کلاسیکی استینبرگ^۳ و همکارانش [۲] در سال ۱۹۹۳ بود. آنها سرعت گروه یک تک فوتون^۴ را در تونل‌زنی از مانع حدود $c/1.7$ اندازه‌گیری کردند. با استفاده از تداخل‌سنجی دو فوتون، تأخیر زمانی را برای عبور یک فوتون از مانعی با ضخامت $1/1$ میکرومتر که شامل گاف‌باندهای فوتونی است، محاسبه کرده و دریافتند که قله‌ی بسته‌ی موج فوتون این فاصله را در حدود $(1/47 \pm 0/2)$ فمتوثانیه زودتر از بسته‌ی موجی که همین فاصله را در خلأ می‌پیماید، طی می‌کند. سپس اسپیلمن^۵ و همکارانش [۹] انتشار امواج الکترومغناطیسی مرئی را از گاف‌باندهای فوتونی با استفاده از پالس‌های اپتیکی با دوام ۱۲ فمتوثانیه بررسی کردند. آنها این آزمایش را برای بلورهای فوتونی که تعداد لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی آنها متفاوت است، تکرار کردند و تأخیر گروه را برای پالس عبوری در عبور از مانع و در غیاب مانع اندازه‌گیری کردند. نتیجه‌ی جالب اینکه، دریافتند که زمان عبور برای موانع تاریک، کوتاه و مستقل از ضخامت مانع است که در واقع تأییدی بر اثر هارتمن است.

¹ A. Enders

² G. Nimtz

³ A. M. Stienberg

⁴ Single-Photon

⁵ Ch. Spielmann

متعاقباً مجاهدی^۱ و همکارانش [۱۰]، آزمایش‌هایی را در رابطه با تونل‌زنی میکروموج‌ها از ساختار گاف-باند‌های بلورهای فوتونی یک‌بعدی مطالعه کردند. آنها با استفاده از تک پالس میکروموج، هم از لحاظ فرکانسی و هم از لحاظ زمانی، بررسی‌هایی انجام دادند. در مطالعاتی که از لحاظ زمانی انجام دادند مشاهده شد که قله‌ی بسته‌ی موج تونل‌زننده (440 ± 20) پیکوثانیه زودتر از بسته‌ی موج عبوری از خلأ می‌رسد. لنگی^۲ و همکارانش [۱۱] نیز تونل‌زنی فرانوری پالس‌های اپتیکی پیکو ثانیه را در فیبرهای پریودی توری براگ^۳ گزارش دادند. آنها از پالس‌های اپتیکی، با دوام ۳۸۰ پیکوثانیه استفاده کردند، این پالس‌ها بوسیله‌ی یک لیزر تک فرکانس اربیم-اتربیم^۴ دارای فرکانس نزدیک به ۱/۵ MHz، تولید می‌شدند. لنگی و همکارانش سرعت گروه را در عبور از ۲ سانتی‌متر فیبر توری، تقریباً ۱/۷۹ مرتبه بزرگتر از سرعت نور در خلأ اندازه‌گیری کردند. همچنین هاج^۵ و همکارانش [۱۲]، تأخیر گروه را در فرکانس رادیویی برای ساختارهای متناوب تشکیل شده از کابل‌های موازی اندازه‌گیری کردند. ساختار تعریف شده به مانند فیلتری رفتار می‌کرد که دارای یک نوار ممنوعه بود. آنها برای پالس گاوسی با پهنای ۴ میکروثانیه، تأخیر گروهی از مرتبه‌ی ۱۵۰ نانوثانیه، اندازه‌گیری کردند. در ضمن سرعت گروه پالس گاوسی را در این آزمایش در حدود ۳c بدست آوردند.

جی. ویس^۶ و ا. ویس^۷ [۱۳]، زمان عبور بسته‌ی موج گاوسی را از مانع متقارن مربعی مطالعه کردند و نشان دادند که پدیده‌ی هارتمن تنها محدود به موانعی با میرایی نمایی میدان نمی‌شود بلکه در خطوط عبوردهی با قرار دادن یک مدار *LCR* نیز اتفاق می‌افتد. موگا^۸ و همکارانش [۱۴] نیز نشان دادند که زمان عبور بسته‌ی موج عبوری در تونل‌زنی ذره‌ی کوانتومی از مانع پتانسیلی مربعی مستقل از ضخامت مانع می‌-

¹ M. Mojahedi

² S. Longhi

³ periodic fiber Bragg grating

⁴ Erbium-Ytterbium

⁵ A. Hache

⁶ J. Weis

⁷ O. weis

⁸ J. G. Muga

باشد که در واقع بیان کننده‌ی اثر هارتمن است و به فرانوری بودن سرعت نور اشاره دارد. بعدها اسپوسیتو^۱ [۱۵]، با مطالعه‌ی تونل‌زنی از موانع مربعی چندگانه، زمان فازی را مستقل از ضخامت مانع بدست آورد. همچنین دلگادو^۲ و جمعی از همکارانش [۱۶] نیز اثر هارتمن را در محیط‌های جاذب نشان دادند.

۴-۱ بلورهای فوتونی

بلورهای فوتونی ساختارهای جالبی هستند که توانایی کنترل و دستکاری در جریان فوتون‌ها را دارند. این ساختارها دارای گاف‌باندهای فوتونی^۳ می‌باشند که انتشار امواج الکترومغناطیسی را با استفاده از پتانسیل پریودیکی کنترل می‌کنند. رفتار فوتون‌ها در بلورهای فوتونی مشابه با حرکت الکترون‌ها در داخل بلورهای نیم‌رسانا می‌باشد که بوسیله‌ی باندهای رسانش و ممنوعه کنترل می‌شود به همین خاطر امروزه به جای استفاده از الکترون‌ها، از فوتون‌های سرعت بالا، برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود و همین امر سبب ایجاد تحول چشم‌گیری در صنعت ارتباطات شده است [۱۷]. همچنین مشکلاتی که توسط الکترون‌ها در روند انتقال اطلاعات پدید می‌آید برای بلورهای فوتونی مطرح نمی‌باشد. به این صورت که، طی انتقال اطلاعات از تراشه-های سیلیکون^۴، الکترون‌ها از گیت^۵های الکترونیکی عبور می‌کنند و در بر هم‌کنش با یکدیگر باردار شده و گرمای فراوانی ایجاد می‌کنند در نتیجه حرکت الکترون‌ها محدود می‌شود. اما در بلورهای فوتونی، فوتون‌ها طی انتقال اطلاعات باردار نمی‌شوند و این مزیتی در استفاده از بلورهای فوتونی می‌باشد [۱۷]. فوتون‌ها در عبور از یک بلور فوتونی با شماری از لایه‌های دی‌الکتریک، با ضرایب شکست متفاوت روبرو می‌شوند. تفاوت ضرایب شکست دو لایه، سبب عبور و بازتاب فوتون‌ها از سطح مشترک لایه‌های دی‌الکتریک شده و تداخل میان فوتون‌های بازتابیده و عبوری بصورت آرایشی از گاف باندهای فوتونی نمایان می‌شود که گاف‌باندهای

¹ S. Sposito

² F. Delgado

³ Photonic band gap

⁴ Silicon

⁵ Gate