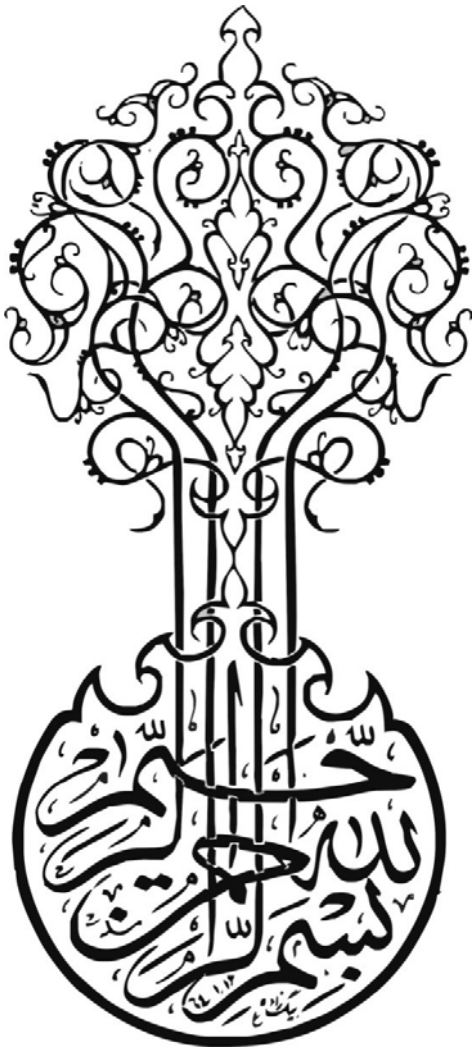
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی فناوریهای نوین
گروه مهندسی نانوالکترونیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نانوفناوری با گرایش نانوالکترونیک

عنوان

طراحی تمام جمع‌کننده حالت‌های کوانتومی

اساتید راهنما

دکتر پروفسور علی رستمی
دکتر سعید گل‌محمدی هریس

استاد مشاور

دکتر حسن رسولی سقای

پژوهشگر

نوشین دولتی ایلخچی
بهمن ۱۳۸۹

تقدیم به:

پدر و مادرم، که تکیه گاه همیشگی من هستند و باز تمامی تلخی ها، خستگی ها و اضطراب هایم را بدوش می کشند و دعاهای پاک و صادقانه شان همواره بدرقه راه من بوده است.

و خواهرانم که در پناه وجود قدرتمند و بی مثال آنها تمامی ترس هایم به شجاعت می گراید و دریغ است که از وجود پر مهر و امید بخش آنها تقدیر نکنم.

و اساتید راهنمایم که با تشویق های مداوم خود در طی این پایان نامه مرا دلگرم می دادند.

این پروژه تحت قرارداد پژوهشی مهر ۸۸ از پشتیبانی معنوی و مادی ستاد نانوفناوری ایران بهره مند شده است.

نام خانوادگی دانشجو: دولتی ایلخچی **نام:** نوشین

عنوان پایان‌نامه: طراحی تمام جمع‌کننده حالت‌های کوانتومی

استاد راهنمای اول: پروفسور علی رستمی **استاد راهنمای دوم:** دکتر سعید گل‌محمدی هریس
استاد مشاور: دکتر حسن رسولی سقای

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی نانوفناوری **گرایش:** نانوالکترونیک
دانشگاه: دانشگاه تبریز **دانشکده:** مهندسی فناوریهای نوین
تاریخ فارغ‌التحصیلی: ۱۳۸۹/۱۱/۲۰ **تعداد صفحات:** ۱۳۶

واژه‌نامه: میدان نزدیک نوری، گیت‌های نانوفتونیکی، نقطه کوانتومی، ترازهای انرژی اکسیتون

چکیده: کاربرد افزاره‌های فتونیکی درسیستم‌های محاسباتی، از سه دهه پیش، شروع شده و دائماً در حال توسعه و پیشرفت هستند، اما اندازه قطعات فوتونیکی بر محدودیت شکست نور نمی‌توانند غلبه کنند. ازطرفی دیگر، نرخ انتقال داده‌ها تا سال ۲۰۱۵ به ۱۰ ترابیت برثانیه خواهد رسید که افزاره‌های فتونیکی فعلی قادر به تأمین چنین نرخی نمی‌باشند. بدین منظور به افزاره‌های نانوفتونیکی نیاز هست تا بر مشکل محدودیت شکست نور غلبه کرده و قادر به تأمین نرخ بالای انتقال اطلاعات باشند. گیت‌های نانوفتونیکی بر اساس انتقال انرژی میدان نزدیک نوری بین نقاط کوانتومی مجاور و کنترل انتقال انرژی برانگیخته و میراشدن آن در اثر واهلش بین ترازهای انرژی اکسیتون در نقاط کوانتومی عمل می‌کنند. نحوه قرارگرفتن ممان‌های دوقطبی الکتریکی تحریک‌یافته در نانوذره، در اثر تابش نور فرودی به اندازه، ساختار و شکل نانوذرات بستگی دارد.

در فصل اول به بیان مفاهیم نظری، مکانیسم میدان نزدیک نوری و مقایسه آن با امواج میراشونده متداول، پرداخته و هدف از پیدایش آن تشریح می‌شود. در این راستا، به معرفی و بررسی رفتار زمانی، کارکرد و

تحقق فیزیکی گیت‌های نانوفتونیکی پرداخته و مزیت آن‌ها نسبت به سایر گیت‌های فتونیکی متداول بیان می‌شود. در فصل دوم، به بیان معادلات حاکم بر عمل‌کرد گیت‌های نانوفتونیکی و محاسبه ترازهای انرژی اکسیتون پرداخته می‌شود و معادله شرودینگر برای یافتن تابع پوش حل می‌شود. درنهایت، دینامیک حالت‌های کوانتومی یک اکسیتون و دو اکسیتون در نقاط کوانتومی مجاور، بر اساس عمل‌گر چگالی و رفتار زمانی انتقال انرژی تحریکی و میرایی انرژی ناشی از واهلش اکسیتون بیان می‌شوند. در انتهای فصل دوم، کارکرد گیت‌های نانوفتونیکی AND و XOR تشریح و رفتار زمانی آن‌ها شبیه‌سازی می‌شوند. تحقق فیزیکی گیت‌های نانوفتونیکی پیشین در دمای اتاق هنوز به سادگی میسر نیست. بنابراین در فصل سوم، به عنوان نمونه، طرح پیشنهادی در راستای بهبود دمای کاری گیت نانوفتونیکی AND، با استفاده از اندرکنش میدان نزدیک نوری بین نقاط کوانتومی GaN محبوس در AlN، معرفی و تحقق فیزیکی آن در دمای اتاق بحث خواهد شد. در ساختار گیت نانوفتونیکی پیشنهادی، نقاط کوانتومی GaN از طریق اندرکنش میدان نزدیک نوری بین ترازهای تشدیدی، در تزویج با یکدیگر و از طریق اندرکنش اکسیتون-فونون با مخزن فونون در تزویج می‌باشند. درنهایت، با استفاده از معادلات کوپل‌شده، احتمال اشغال اکسیتون در ترازهای انرژی نقاط کوانتومی و سرعت کارکرد افزاره در دماهای متفاوت، در حالت ماندگار و حالت گذرا بحث خواهد شد. مزیت گیت نانوفتونیکی AND پیشنهادی نسبت به گیت‌های نانوفتونیکی پیشین شامل تحقق فیزیکی گیت در دمای اتاق، افزایش سرعت سوئیچینگ، کاهش حجم افزاره، افزایش قابلیت مجتمع‌سازی و به طور خلاصه افزایش FOM[1] می‌باشد.

1. Figure of Merit

فہرست مطالب

فهرست مطالب

فهرست شکل‌ها..... VII
فهرست جداول..... IX
فهرست اختصارات..... X
پیشگفتار..... ۱

فصل ۱: پیشینه پژوهش و بررسی منابع مورد مطالعه

۱-۱ مقدمه..... ۵
۱-۲ تاریخچه میدان نزدیک نوری..... ۵
۱-۳ هدف از کاربرد میدان نزدیک نوری..... ۷
۱-۳-۱ مزیت افزاره‌های نانوفتونیکی نسبت به افزاره‌های فتونیکی..... ۷
۱-۳-۲ مقایسه امواج میراشونده با امواج میدان نزدیک نوری..... ۸
۱-۳-۳ مکانیسم ایجاد میدان نزدیک نوری..... ۹
۱-۳-۴ مشاهده میدان نزدیک نوری..... ۱۰
۱-۴ نقاط کوانتومی تزویج‌شده با میدان نزدیک نوری..... ۱۳
۱-۴-۱ نقاط کوانتومی CuCl حبس شده در NaCl ۱۴
۱-۴-۲ انتقال انرژی برانگیخته بین نقاط کوانتومی CuCl..... ۱۵
۱-۴-۳ زمان انتقال انرژی برانگیخته بین نقاط کوانتومی CuCl..... ۱۷
۱-۵ گیت‌های نانوفتونیکی و تحقق فیزیکی آن‌ها..... ۱۸
۱-۵-۱ گیت نانوفتونیکی AND..... ۲۰
۱-۵-۱-۱ اصول عمل‌کرد گیت نانوفتونیکی AND با استفاده از نقاط کوانتومی CuCl..... ۲۱
۱-۵-۱-۲ تحقق فیزیکی گیت نانوفتونیکی AND و نحوه قرائت آن..... ۲۴
۱-۵-۱-۳ رفتار زمانی گیت نانوفتونیکی AND..... ۲۶
۱-۵-۲ گیت نانوفتونیکی AND بهینه‌شده..... ۲۸
۱-۵-۲-۱ تحلیل زمانی گیت نانوفتونیکی AND بهبود یافته..... ۲۹
۱-۵-۳ تحقق فیزیکی گیت نانوفتونیکی AND در دمای اتاق..... ۳۱
۱-۶ گیت نانوفتونیکی NOT..... ۳۴
۱-۶-۱ گیت نانوفتونیکی NOT با استفاده از نقاط کوانتومی CuCl..... ۳۵
۱-۶-۲ تحقق فیزیکی گیت نانوفتونیکی NOT در دمای اتاق..... ۳۶
۱-۷ جمع‌بندی..... ۳۹

فصل ۲: مواد و روش های مورد استفاده در پژوهش

۲-۱ مقدمه..... ۴۱
۲-۲ ترازهای انرژی نقطه کوانتومی ۴۱
۲-۲-۱ ترازهای انرژی الکترون و حفره در نقطه کوانتومی..... ۴۱
۲-۲-۱-۱ ترازهای انرژی الکترون و حفره در نقطه کوانتومی کروی..... ۴۴
۲-۲-۱-۲ ترازهای انرژی الکترون و حفره در نقطه کوانتومی مکعبی..... ۴۵
۲-۲-۲ ترازهای انرژی جفت الکترون و حفره در نقطه کوانتومی..... ۴۶
۲-۲-۲-۱ ترازهای انرژی جفت الکترون و حفره در نقاط کوانتومی کروی و مکعبی..... ۴۷

۲-۲-۲-۲ مقایسه شعاع ناحیه حبس‌شده با شعاع بوهر ۴۷
۲-۳ گذار ممنوعه دوقطبی ۴۹
۲-۳-۱ محاسبه انتگرال سه بعدی تابع پوش در نقطه کوانتومی کروی ۵۱
۲-۳-۲ محاسبه انتگرال سه بعدی تابع پوش در نقطه کوانتومی مکعبی ۵۲
۲-۴ نقاط کوانتومی تزویج‌شده ۵۲
۲-۴-۱ شدت تزویج نقاط کوانتومی CuCl در ترازهای مجاز و غیر مجاز ۵۲
۲-۴-۲ حالت‌های تزویج‌شده در دو تراز انرژی یکسان ۵۴
۲-۴-۳ رفتار دوقطبی‌های نقاط کوانتومی تزویج‌شده ۵۵
۲-۴-۴ احتمال اشغال ترازهای انرژی در نقاط کوانتومی تزویج‌شده ۵۷
۲-۵ اصول اساسی گیت‌های نانوفتونیکی ۵۹
۲-۵-۱ دینامیک سیستم دو نقطه کوانتومی ۶۱
۲-۵-۱-۱هامیلتونین حاکم بر سیستم دو نقطه کوانتومی ۶۲
۲-۵-۱-۲ معادله اصلی کوانتومی در سیستم دو نقطه کوانتومی ۶۳
۲-۵-۱-۳ دینامیک سیستم دو نقطه کوانتومی در $T=0$ ۶۴
۲-۵-۱-۴ بررسی زمان پرشدگی حالت در سیستم دو نقطه کوانتومی ۶۵
۲-۵-۲ دینامیک سیستم سه نقطه کوانتومی ۶۶
۲-۵-۲-۱ هامیلتونین حاکم بر سیستم سه نقطه کوانتومی ۶۷
۲-۵-۲-۲ حالت‌های یک اکسیتون در سیستم سه نقطه کوانتومی ۶۸
۲-۵-۲-۳ حالت‌های دو اکسیتون در سیستم سه نقطه کوانتومی ۶۹
۲-۵-۳ معادله اصلی کوانتومی در سیستم سه نقطه کوانتومی ۷۰
۲-۵-۳-۱ معادله اصلی کوانتومی در سیستم سه نقطه کوانتومی در حالت یک اکسیتون ۷۰
۲-۵-۳-۲ معادله اصلی کوانتومی در سیستم سه نقطه کوانتومی در حالت دو اکسیتون ۷۰
۲-۶ رفتار زمانی گیت‌های نانوفتونیکی AND و XOR با استفاده از سه نقطه کوانتومی CuCl ۷۱
۲-۶-۱ حل معادلات اصلی کوانتومی در حالت یک اکسیتون و دو اکسیتون ۷۱
۲-۶-۲ تغییرات زمانی احتمال خروجی گیت در حالت یک اکسیتون و دو اکسیتون ۷۲
۲-۷ جمع‌بندی ۷۶

فصل ۳: طرح پیشنهادی جهت بهبود بازدهی پژوهش‌های پیشین

۳-۱ مقدمه ۷۸
۳-۲ مشکل اساسی تحقق فیزیکی گیت‌های نانوفتونیکی پیشین در دمای اتاق ۷۹
۳-۳ گیت‌های نانوفتونیکی بر اساس نقاط کوانتومی GaN محبوس در AlN ۸۱
۳-۳-۱ ویژگی‌های اساسی اکسیتون در نقاط کوانتومی GaN محبوس در AlN ۸۲
۳-۳-۲ ساختار کریستالی نقاط کوانتومیGaN ۸۳
۳-۴ طراحی گیت نانوفتونیکی AND با استفاده از ساختارهای نامتجانس GaN/AlN ۸۴
۳-۴-۱ محاسبه ترازهای انرژی اکسیتون در نقاط کوانتومی GaN ۸۵
۳-۴-۲ اصول کارکرد گیت نانوفتونیکی AND ۸۸
۳-۵ بررسی چگالی فونون در گیت نانوفتونیکی AND ۹۱
۳-۶ معادله اصلی کوانتومی برای عمل‌گر چگالی در گیت نانوفتونیکی AND ۹۳
۳-۶-۱ دینامیک یک اکسیتون در گیت نانوفتونیکی AND ۹۵
۳-۶-۲ دینامیک دو اکسیتون در گیت نانوفتونیکی AND ۹۶

۳-۷ حالت ماندگار گیت نانوفتونیکی AND ۹۷
۳-۷-۱ حالت ماندگار گیت نانوفتونیکی AND در حضور یک اکسیتون ۹۸
۳-۷-۲ حالت ماندگار گیت نانوفتونیکی AND در حضور دو اکسیتون ۹۹
۳-۷-۳ بررسی احتمالات اشغال دو اکسیتون در سیستم دو نقطه کوانتومی در ($T=0°K$) ۱۰۰
۳-۸ رفتار زمانی گیت نانوفتونیکی AND ۱۰۱
۳-۸-۱ رفتار زمانی گیت نانوفتونیکی AND در حالت خاموش یک ۱۰۲
۳-۸-۲ رفتار زمانی گیت نانوفتونیکی AND در حالت خاموش دو ۱۰۷
۳-۸-۳ رفتار زمانی گیت نانوفتونیکی AND در حالت روشن ۱۱۱
۳-۹ جمع‌بندی ۱۱۵
۳-۱۰ ارزیابی طرح پیشنهادی ۱۱۶
۳-۱۱ پیشنهادات برای ادامه کار ۱۱۸
واژه‌نامه ۱۱۹
فهرست مراجع ۱۲۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: تولید میدان نزدیک نوری ۹
شکل ۱-۲: مشاهده میدان نزدیک نوری ۱۰
شکل ۱-۳: سیستم فرعی نانومتری تشکیل یافته از دو ذره و میدان نزدیک نوری ۱۱
شکل ۱-۴: اکسیتون-پلاریتون حقیقی و مجازی ۱۲
شکل ۱-۵: نقاط کوانتومی مکعبی Y, X ۱۶
شکل ۱-۶: نماد مداری و ترکیب منطقی گیت AND ۲۱
شکل ۱-۷: حالت خاموش و روشن گیت AND ۲۲
شکل ۱-۸: طیف لومینسانس نوری دیفرانسیلی میدان نزدیک نوری ۲۵
شکل ۱-۹: رفتار زمانی سیگنال پالس ورودی دو و سیگنال خروجی از گیت نانوفتونیکی AND ۲۶
شکل ۱-۱۰: گیت نانوفتونیکی AND پیشنهادی گروه اوتسو ۲۷
شکل ۱-۱۱: گیت نانوفتونیکی AND بهینه‌شده ۲۸
شکل ۱-۱۲ رفتار زمانی احتمال اشغال تراز (۱و۱و۱) نقطه کوانتومی خروجی گیت AND پیشنهادی گروه اوتسو ۳۰
شکل ۱-۱۳ رفتار زمانی احتمال اشغال تراز (۱و۱و۱) نقطه کوانتومی خروجی گیت AND بهینه‌شده ۳۱
شکل ۱-۱۴-(الف): توضیح شماتیکی ساختار جفت چاه کوانتومی ZnO/ZnMgO رشد داده‌شده روی نانومیله ZnO ۳۲
شکل ۱-۱۴-(ب): تصویر میکروسکوپی الکترون انتقالی ۳۲
شکل ۱-۱۵: شماتیک انتقال انرژی و میرایی انرژی در چاه کوانتومی ۳۳
شکل ۱-۱۶: گیت نانوفتونکی NOT ۳۴
شکل ۱-۱۷: حالت روشن گیت نانوفتونیکی NOT ۳۵
شکل ۱-۱۸: حالت خاموش گیت نانوفتونیکی NOT ۳۶
شکل ۱-۱۹: ساختار نقاط کوانتومی InAlAs ۳۷
شکل ۱-۲۰: تحول زمانی سیگنال خروجی از نقاط کوانتومی InAlAs که به عنوان گیت NOT عمل می‌کند ۳۸
شکل ۲-۱: ساختار باندی و گاف انرژی E_g در نیمه‌هادی کپه ۴۳
شکل ۲-۲- (الف): چاه پتانسیل محبوس در یک جهت با ارتفاع نامحدود ۴۵
شکل ۲-۲- (ب): توابع پوش در چاه پتانسیل ۴۵
شکل ۲-۳: تابع ونیر در ناحیه اتمی R ۵۰
شکل ۲-۴: شدت تزویج میدان نزدیک نوری بر حسب تابعی از فاصله بین نقاط کوانتومی مکعبی CuCl ۵۳
شکل ۲-۵: حالت‌های کوانتومی در اثر اندرکنش نقاط کوانتومی تزویج‌شده ۵۴
شکل ۲-۶: رفتار زمانی $\boldsymbol{\rho_{22}}$ و $\boldsymbol{\rho_{11}}$ ۵۸
شکل ۲-۷: اصول عمل‌کرد گیت‌های نانوفتونیکی ۶۰
شکل ۲-۸: سیستم دو نقطه کوانتومی ۶۱
شکل ۲-۹: دینامیک یک اکسیتون در سیستم دو نقطه کوانتومی ۶۲
شکل ۲-۱۰: بررسی زمان پرشدگی حالت (τ_s) ۶۵
شکل ۲-۱۱: سیستم سه نقطه کوانتومی تزویج‌شده با میدان نزدیک نوری ۶۶
شکل ۲-۱۲: نمودار انتقال انرژی و عمل‌گرهای خلق و فنای اکسیتون در سیستم سه نقطه کوانتومی ۶۷
شکل ۲-۱۳: شماتیک انتقال انرژی برای حالت‌های یک اکسیتون و دو اکسیتون در سه نقطه کوانتومی ۶۸
شکل ۲-۱۴: رفتار زمانی احتمال اشغال خروجی حالت یک اکسیتون در اختلاف انرژی‌های خاص ۷۳

شکل ۲-۱۵: رفتار زمانی احتمال اشغال خروجی حالت دو اکسیتون در اختلاف انرژی‌های خاص..... ۷۴
شکل ۲-۱۶: احتمال اشغال خروجی در حالت‌های یک اکسیتون و دو اکسیتون..... ۷۵
شکل ۳-۱: ساختار کریستالی نقاط کوانتومی GaN..... ۸۳
شکل ۳-۲: گیت نانوفتونیکی پیشنهادی AND شامل نقاط کوانتومی GaN محبوس در AlN..... ۸۴
شکل ۳-۳: چگالی فونون بر حسب اختلاف انرژی ترازهای اکسیتونی در $T = 100, 200, 300^{\circ}K$..... ۹۱
شکل ۳-۴: چگالی فونون بر حسب دما در $\Delta E = 60,\ 70,\ 80,\ 90meV$..... ۹۲
شکل ۳-۵: حالت‌های مختلف حضور یک اکسیتون در سیستم دو نقطه کوانتومی..... ۹۶
شکل ۳-۶: حالت‌های مختلف حضور دو اکسیتون در سیستم دو نقطه کوانتومی..... ۹۶
شکل ۳-۷: احتمال حضور یک اکسیتون در گیت نانوفتونیکی AND بر حسب دما در حالت ماندگار..... ۹۸
شکل ۳-۸: احتمال حضور دو اکسیتون در ترازهای انرژی نقاط کوانتومی بر حسب دما..... ۱۰۰
شکل ۳-۹: رفتار زمانی احتمال حضور یک اکسیتون در حالت یک خاموش یک در $T = 100,\ 200,\ 300^{\circ}K$..... ۱۰۴
شکل ۳-۱۰: رفتار زمانی احتمال حضور یک اکسیتون در حالت دو خاموش یک در $T = 100,\ 200,\ 300^{\circ}K$..... ۱۰۵
شکل ۳-۱۱: رفتار زمانی احتمال حضور یک اکسیتون در حالت سه خاموش یک در $T = 100,\ 200,\ 300^{\circ}K$..... ۱۰۶
شکل ۳-۱۲: رفتار زمانی احتمال حضور یک اکسیتون در حالت یک خاموش دو در $T = 100,\ 200,\ 300^{\circ}K$..... ۱۰۸
شکل ۳-۱۳: رفتار زمانی احتمال حضور یک اکسیتون در حالت دو خاموش دو در $T = 100,\ 200,\ 300°K$..... ۱۰۹
شکل ۳-۱۴: رفتار زمانی احتمال حضور یک اکسیتون در حالت سه خاموش دو در $T = 100,\ 200,\ 300°K$..... ۱۱۰
شکل ۳-۱۵: رفتار زمانی جمع احتمالات حضور دو اکسیتون در دو حالت یک و دو در $T = 100,\ 200,\ 300°K$..... ۱۱۲
شکل ۳-۱۶: رفتار زمانی احتمال حضور دو اکسیتون در حالت سه در $T = 100,\ 200,\ 300°K$..... ۱۱۴

فهرست جداول

جدول ۱-۱: مقایسه موج ناپایدار و میدان نزدیک نوری..... ۸
جدول ۱-۲: پارامترهای موردنیاز برای محاسبه ترازهای انرژی..... ۱۵
جدول ۱-۳: پارامترهای مهم برای محاسبه انرژی تزویج بین نقاط کوانتومی..... ۱۷
جدول ۱-۴: ثابت‌های زمانی مهم..... ۱۷
جدول ۱-۵: مقایسه گیت‌های نوری..... ۲۰
جدول ۱-۶: حالت های مختلف گیت AND..... ۲۱
جدول ۱-۷: پارامترهای مهم برای حل معادلات زمانی..... ۲۹
جدول ۲-۱: رابطه بین احتمالات ورودی و خروجی..... ۷۶
جدول ۳-۱: مقایسه پارامترهای مهم ساختارهای ناهم‌جنس GaN/AlN و CuCl/NaCl..... ۸۱
جدول ۳-۲: مشخصه‌های مهم برای محاسبه ترازهای انرژی و توابع موج اکسیتون..... ۸۶
جدول ۳-۳: ابعاد هندسی نقاط کوانتومی GaN محبوس در AlN..... ۸۷
جدول ۳-۴: مشخصات ترازهای انرژی در نقاط کوانتومی GaN..... ۸۸
جدول ۳-۵: حالت‌های روشن و خاموش گیت AND..... ۸۸
جدول ۳-۶: پارامترهای مهم در رابطه بوز- انیشتین..... ۹۱
جدول ۳-۷: پارامترهای مهم در معادله اصلی کوانتومی گیت نانوفتونیکی AND..... ۹۴
جدول ۳-۸: مزیت گیت نانوفتونیکی پیشنهادی نسبت به گیت نانوفتونیکی گروه اوتسو..... ۱۱۶

فهرست اختصارات

ONF……..……..……..…...Optical Near Field

QD……..……...……..……..…..…….……Quantum Dot

QW……..……..…..……...……..…..…….……....Quantum Well

MBE……..……..……Molecular Beam Epitaxial

SPM…….…….…….……..……..…Scanning Probe Microscopy

FOM…….……..……..……..…..……..……Figure of Merit

PL……..……..…….……..…Photoluminescence

LO.....Longitudinal Optical

FDM…….....……..……..……Finite Difference Method

پیشگفتار

تحقیق و بررسی در زمینه کامپیوترهای کوانتومی، از سه دهه پیش شروع شده و به سرعت در حال توسعه و پیشرفت است. حد مجاز برای چگالی ذخیره‌سازی اطلاعات با استفاده از نور مرئی، $10\ \frac{GBit}{inch^2}$ گزارش شده‌است، در حالی‌که چگالی موردنیاز برای ذخیره‌سازی اطلاعات، در حافظه‌های نوری تا سال ۲۰۱۰، به $1\ \frac{TBit}{inch^2}$ خواهد رسید. قطر شکاف لازم برای ذخیره‌سازی اطلاعات توسط شکست نور محدود می‌شود و افزاره‌های فتونیکی فعلی، نمی‌توانند بر مشکل محدودیت شکست نور غلبه کنند. علاوه بر این، بر اساس تخمین‌های صورت گرفته، نرخ انتقال اطلاعات در سیستم‌های انتقال فیبر نوری، تا سال ۲۰۱۵ به $10\ \frac{TBit}{sec}$ خواهد رسید که پردازش‌گرهای فوتونیکی فعلی، قادر به تأمین چنین نرخی نمی‌باشند.

بنابراین گروه تحقیقاتی اوتسو[1] در ژاپن، با استفاده از تئوری میدان نزدیک نوری، افزاره‌های نانوفتونیکی در ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر، پیشنهاد داده‌اند. این گیت‌های نانوفتونیکی بر اساس اندرکنش میدان الکترومغناطیسی نور فرودی به نقاط کوانتومی و انتقال انرژی تحریک یافته از طریق میدان نزدیک نوری و به تبع آن واهلش در اثر اندرکنش اکسیتون با فونون عمل می‌کنند.

مزایای چشم‌گیر این گیت‌های نانوفتونیکی نسبت به گیت‌های فتونیکی متداول، شامل غلبه بر مشکل محدودیت شکست نور، نرخ بسیار بالای انتقال اطلاعات و قابلیت مجتمع‌سازی بسیار بالای آن‌ها می‌باشد. همچنین مزیت دیگر افزاره‌های نانوفتونیکی نسبت به افزاره‌های الکترونیکی، پایین بودن انرژی مصرفی آن‌ها است. زیرا انتقال انرژی در افزاره‌های الکترونیکی از طریق انتقال بار الکتریکی است، در حالی‌که انتقال اطلاعات در گیت‌های نانوفتونیکی، بر اساس انتقال انرژی تحریک یافته بین نقاط کوانتومی است.

در راستای معرفی طرح پایان نامه، در فصل اول به بیان مفاهیم نظری و تئوری میدان نزدیک نوری و کاربرد آن در گیت‌های نانوفتونیکی پرداخته می‌شود. پژوهش های متعددی در این زمینه انجام شده، که طی دهه‌ی اخیر به اوج خود رسیده است. در انتهای فصل اول، پیشینه تحقیق در زمینه طراحی، ساخت

1. Ohtsu

و تحقق فیزیکی گیت‌های نانوفتونیکی و ساخت آن‌ها در دمای اتاق صورت می‌گیرد. فصل دوم به تشریح مواد لازم جهت عمل‌کرد گیت‌های نانوفتونیکی در حضور میدان نزدیک نوری اختصاص داده می-شود. لذا کلیات مربوط به ترازهای انرژی ذرات، نحوه انتقال انرژی تحریک یافته بین نقاط کوانتومی و رفتار زمانی آن‌ها و عمل‌گر چگالی، به جهت استفاده از آن‌ها در الگوریتم پیشنهادی این پایان نامه در فصل دوم عنوان می‌شود. در فصل سوم، نوآوری‌های انجام شده در این پایان‌نامه گنجانده خواهد شد. این نوآوری‌ها، به بیان ساختار پیشنهادی پایان‌نامه با استفاده از روش‌های عمل‌گر چگالی، برای بهبود دمای کاری و سرعت گیت‌های نانوفتونیکی، خواهند پرداخت. برای تحقق گیت‌های نانوفتونیکی در دمای اتاق، نقاط کوانتومی GaN محبوس در AlN به عنوان گزینه بسیار مناسب، پیشنهاد می‌شوند. علاوه بر آن، حجم اشغال‌شده توسط این گیت‌ها بسیار پایین انتخاب می‌شود تا از قابلیت مجتمع‌سازی بالایی نسبت به گیت‌های نانوفتونیکی پیشین برخوردار شوند. همچنین در این گیت‌ها زمان سوئیچینگ بین ترازهای انرژی تشدیدی در حد چند پیکوثانیه تنظیم می-شود تا فرکانس انتقال اطلاعات به حد تراهرتز برسد. فصل چهارم نیز به بیان پیشنهاداتی جهت پژوهش‌های آینده، در خصوص ساخت گیت‌های نانوفتونیکی مدرن اختصاص داده خواهد شد.

امید که این پژوهش به موازات سایر پژوهش‌های در حال انجام در خصوص بهینه سازی گیت‌های کوانتومی نانوفتونیکی پرظرفیت و پرسرعت، راه‌گشای نیاز امروز بشر به این سیستم‌ها، چه از حیث کیفیت و چه از حیث هزینه باشد.

فصل اول:

پیشینه پژوهش و بررسی منابع مورد مطالعه

۱-۱ مقدمه

در فصل اول، به تاریخچه میدان نزدیک نوری و گیت‌های نانوفتونیکی می‌پردازیم. این گیت‌ها بر اساس انتقال انرژی میدان نزدیک نوری بین نقاط کوانتومی مجاور و کنترل انتقال انرژی برانگیخته و میراشدن آن در اثر واهلش بین ترازهای انرژی اکسیتون در نقاط کوانتومی عمل می‌کنند. در فصل اول، به معرفی گیت‌های نانوفتونیکی می‌پردازیم. به عنوان مثال، گیت‌های AND دو ورودی پیشین و NOT طراحی‌شده بر اساس انتقال انرژی میدان نزدیک نوری معرفی و اصول عملکرد آن‌ها تشریح خواهند شد. همچنین، تحقق فیزیکی گیت‌های AND و NOT در دمای اتاق، در انتهای فصل اول گنجانده خواهد شد.

۱-۲ تاریخچه میدان نزدیک نوری

در این قسمت، مروری بر کارها و پیشرفت‌های انجام‌شده در زمینه میدان نزدیک نوری انجام می‌شود. ریشه پیدایش میدان نزدیک نوری به سال ۱۹۲۸ در مقالات ادوارد هوتچینسون سینگ[1] و آلبرت انیشتین[2] به علت تشابه با تئوری آنتن و میله‌های نورافشان برمی‌گردد [۱]. اولین پروژه‌ها در این زمینه توسط فرانکلین بنجامین[3] انجام شده است [۱]. با اختراع SPM[4] و اندازه گیری‌های صورت گرفته با میدان نزدیک نوری توسط دیتر[5] و همکارانش در مرکز تحقیقاتی IBM علاقه کار به این زمینه بیشتر شد [۲]. میدان نزدیک نوری از مطالعات طیف‌نگاری ارتقا داده شده سطح و انتقال انرژی فورتز الهام گرفته است.

---

1. Edward Hutchinson Synge
2. Albert Einstein
3. Benjamin Franklin
4. Scanning Probe Microscopy
5. Dieter W.Pohl

اهمیت میدان نزدیک نوری با تحلیل‌های تحقق یافته آرنولد سومرفلد[۱] در زمینه میدان‌های پراتلاف تابش دو قطبی در سال ۱۹۰۹ بیان شده است [۳]. همچنین تئوری میدان نزدیک نوری در مطالعات امواج الکترومغناطیسی بر روی سطوح فلزی توسط زنچ[۲] در سال ۱۹۰۷ و هوندروس[۳] در سال ۱۹۰۹ نیز مشاهده شده است [۴]. علاوه بر آن، مروری بر پیشرفت‌های دهه ۱۹۹۴-۱۹۸۴ در این زمینه توسط پول دیتر در سال ۲۰۰۴ نوشته شده است [۵]. پیشرفت در موضوعات نانواپتیک (۲۰۰۶) و طیف‌نگاری تک مولکولی (۱۹۹۸) و نانوپلاسمونیک (۲۰۰۵)، در سایه تحقیق در زمینه میدان نزدیک نوری امکان‌پذیر شده است. در سال‌های گذشته نیز پیشرفت‌هایی در زمینه میدان نزدیک نوری در کتب و مقالات دیروکس[۴] (۱۹۹۶) [۶]، مویر[۵] (۱۹۹۶) [۷]، فیلارد[۶] (۱۹۹۶) [۸]، فیسچر[۷] (۱۹۹۸) [۹]، دون[۸] (۱۹۹۹) [۱۰]، کورجن[۹] (۲۰۰۳) [۱۱]، کاواتا[۱۰] (۲۰۰۲) [۱۲]، ویدرچ[۱۱] (۲۰۰۴) [۱۳]، هونگ[۱۲] (۲۰۰۴) [۱۴]، کلر[۱۳] (۲۰۰۵) [۱۵]، اشترانیک[۱۴] (۲۰۰۶) [۱۶]، بوهلیر[۱۵] (۲۰۰۶) [۱۷] و هچت[۱۶] (۲۰۰۶) [۱۸]، انجام شده است.

1. Summerfield
2. Zenneck
3. Hondros
4. Dereux
5. Moyer
6. Fillard
7. Fischer
8. Dunn
9. Courjon
10. Kawata
11. Wiederrecht
12. Hong
13. Keller
14. Stranick
15. Bouhelier
16. Hecht

۱-۳ هدف از کاربرد میدان نزدیک نوری

کاربرد افزاره‌های فوتونیکی درسیستم‌های محاسباتی، از سه دهه پیش، شروع شده و دائماً در حال توسعه و پیشرفت هستند، اما اندازه این قطعات بر محدودیت شکست نور نمی‌توانند غلبه کنند [۲۰و۱۹]. با توجه به تخمین‌های صورت‌گرفته، نرخ انتقال داده‌ها تا سال ۲۰۱۵ به ۱۰ ترابیت برثانیه خواهد رسید که بدین منظور به ابزارهایی قدرتمند در ابعاد کمتر از صد نانومتر نیاز هست تا بر مشکل محدودیت شکست نور غلبه کرده و قادر به تأمین چنین نرخی باشند که ابزارهای امروزی چنین قابلیتی ندارند [۲۳و۲۲]. بنابراین پیش بینی می‌شود، نانوذرات در افزاره‌های فوتونیکی آینده، بسیار مورد استفاده قرار خواهند گرفت. استفاده از میدان نزدیک نوری، به عنوان راه‌کردی مناسب برای غلبه بر محدودیت شکست نور، پیشنهاد شده است [۲۲]. برای غلبه بر این محدودیت، به نور حبس شده‌ای در مقیاس نانو نیاز است تا تحریک اولیه را در نانوذرات انجام دهد و فاز میدان تحریک یافته، مستقل از نور تابشی باشد. این میدان فقط به اندازه نانوذرات و ساختار و شکل آن‌ها بستگی خواهد داشت [۲۰].

به طور خلاصه، هدف از بحث میدان نزدیک نوری، غلبه بر محدودیت شکست نور است که میدان‌های انتشار یافته آزاد چنین قابلیتی ندارند. امواج میدان نزدیک نوری، با اندرکنش‌های نوری در مقیاس زیر طول موج کار می‌کنند و اندرکنش‌های غیر نورگسیل بسیار مورد توجه قرار گرفته می‌شود [۲۱و۲۰].

۱-۳-۱ مزیت افزاره‌های نانوفتونیکی نسبت به افزاره‌های فتونیکی

برای بالا بردن نرخ انتقال اطلاعات، در سیستم‌های انتقال اطلاعات فیبر نوری، به مجتمع سازی افزاره‌های فوتونیکی نیاز داریم. براساس تخمین‌های صورت گرفته، اندازه افزاره‌های سوئیچینگ ماتریس فتونیکی، باید به مقیاس زیر طول موج کاهش پیدا کند تا نیاز آینده، برای بالارفتن نرخ انتقال اطلاعات