دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین

گروه مهندسی نانوالکترونیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نانوفناوری - نانوالکترونیک

عنوان

تحلیل و طراحی ساختار ورودی- خروجی برای کامپیوترهای کوانتومی

اساتید راهنما

دکتر علی رستمی

دکتر کریم عباسیان

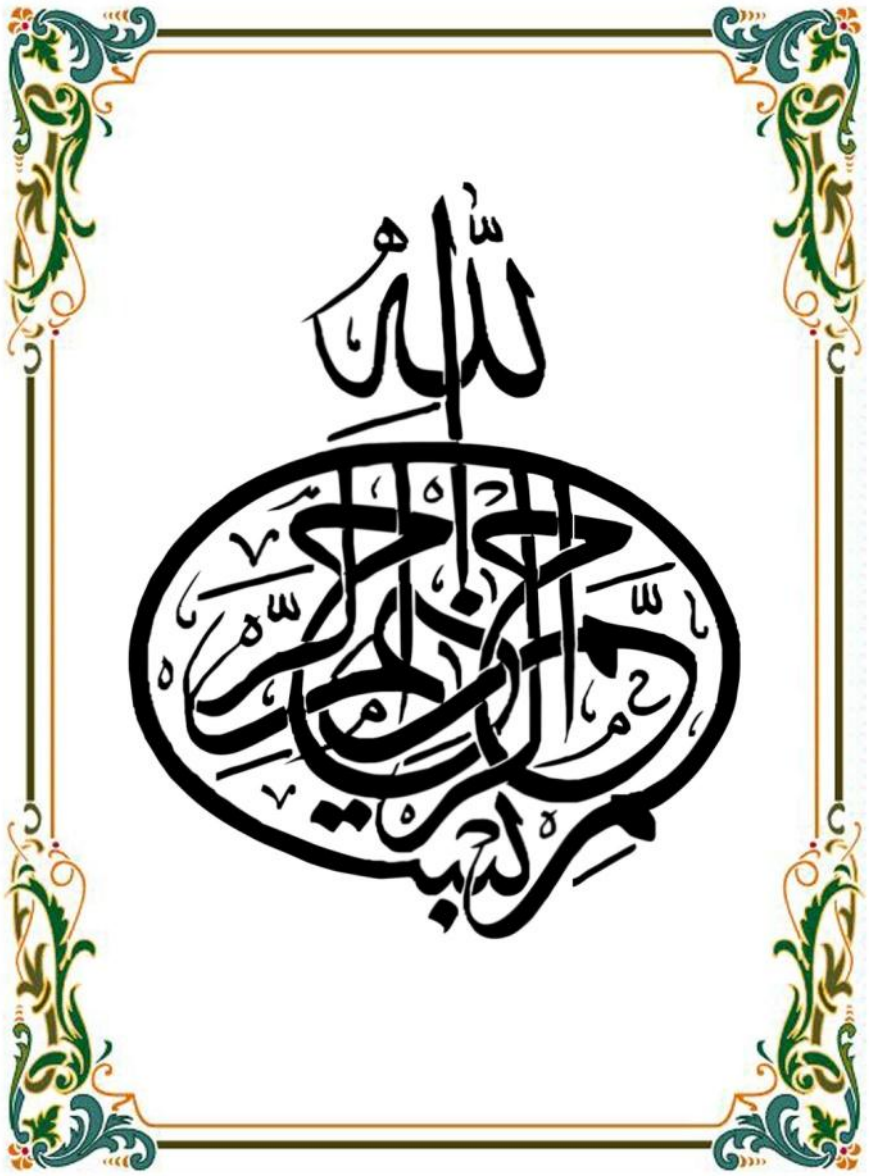
استاد مشاور

دکتر حسن رسولی

پژوهشگر

رسول قربانی

شهریور ۹۰



به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

باسپاس ازسه وجود مقدس:

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم . . .

موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم . . .

و عاشقانه سوختند تا گرما بخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند . . .

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

نام‌خانوادگی : قربانی **نام**: رسول

عنوان پایان‌نامه: تحلیل و طراحی ساختار ورودی- خروجی برای کامپیوترهای کوانتومی

اساتید راهنما: دکتر علی رستمی، دکتر کریم عباسیان

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته**: مهندسی نانوفناوری **گرایش**: نانوالکترونیک

دانشگاه: تبریز **دانشکده**: مهندسی فناوری‌های نوین

تاریخ فارغ‌التحصیلی: ۱۳۹۰/۶/۱۹ **تعداد صفحه:۱۴۶**

کلید واژه‌ها:

کامپیوتر کوانتومی، بیت کوانتومی، کیوبیت اسپینی، کیوبیت بارالکترون، بازخوانی، آماده‌سازی، اندازه‌گیری غیرمخرب، ترانزیستور تک الکترونی، نقطه کوانتومی، رژیم انسداد کولنی کوانتومی

چکیده:

در این پایان‌نامه، قصد داریم کیوبیت‌های مبتنی برنقطه کوانتومی قابل استفاده در دمای اتاق را معرفی کنیم و سپس انواع ساختار ورودی و خروجی برای این نوع از کیوبیت‌ها را مدل سازی کنیم. در این راستا، متداول‌ترین روش‌های نوری و الکتریکی که تا به حال مورد استفاده قرار گرفته است، بررسی می‌شود و سپس کیوبیتی معرفی می‌شود که با استفاده تلفیقی از روش‌های آماده سازی و اندازه‌گیری الکتریکی ذکر شده، قابلیت اجرا در در دمای اتاق را خواهد داشت به گونه ای که به راحتی بتوان ورودی و خروجی آن را کنترل کرد.

پیش گفتار

پردازش کوانتومی و کامپیوترهای کوانتومی فناوری هایی هستند که آینده دنیای کامپوترها را تشکیل می‌دهند. کامپیوترهایی که حتی از بزرگترین ابرکامپیوترهای مورد استفاده در امروزه به شکلی تصاعدی سریعتر خواهند بود. ساخت کامپیوتری فوق‌العاده سریع که از خواص عجیب فیزیک کوانتومی بهره می‌گیرد، هدفی است که امروزه، دانشمندان دنبال می‌کنند.

بین کامپیوترهای کلاسیک و کامپیوترهای کوانتومی نسل آینده تفاوت اساسی وجود دارد، آن تفاوت این است که یک کامپیوتر کلاسیک بر اساس قوانین فیزیک کلاسیک دستورات از پیش تعیین شده ای را اجرا می‌کند ، اما یک کامپیوتر کوانتومی دستگاهی است که یک پدیده‌ی فیزیکی را بر اساس مکانیک کوانتومی به صورت منحصر به فردی در می آورد تا به صورت اساسی یک حالت جدید از پردازش اطلاعات را تشخیص دهد. هر سیستم محاسباتی دارای یک پایه اطلاعاتی است که نماینده کوچکترین میزان اطلاعات قابل نمایش، چه پردازش شده و چه خام است. در محاسبات کلاسیک این واحد ساختاری بیت نامیده می‌شود که تنها می‌تواند یکی از دو رقم مجاز صفر و یک را در خود نگه دارد. در محاسبات کوانتومی هم چنین پایه ای معرفی میشود که آن‌را کیوبیت یا بیت کوانتومی می‌نامیم. یک بیت کوانتومی ممکن است درحالت‌های کلاسیک صفر یا یک و یا ترکیبی از این دو وجود داشته باشد. با توجه به خاصیت مکانیک کوانتومی، نمی‌توان دقیقاً وجود یا عدم وجود یک ذره ریز را مشخص کرد ، ولی می‌توان به وسیله آمار و احتمال، امکان وجود این ذره‌های ریز را در مکان و زمان مشخصی

تعیین کرد. ذکر این نکته لازم که هیچ راهی برای دانستن قطعی این که آیا ایـن ذره آنجـا هسـت یـا نـه، وجود ندارد. البته آنچه که در کامپیوترهای کوانتومی با ارزش است همین احتمالات است.

نظریه کامپیوترکوانتومی ازسال ۱۹۸۲مطرح بوده است، از زمانی که فیزیکدان مشهور و برنده جایزه نوبل ‘‘ریچارد فاینمن ’’ برای نخستین بار ، پیشنهاد کرد که باید محاسبات از دنیای دیجیتال وارد دنیـای جدیدی به نام کوانتوم شود، همچنین بیان کرد کامپیوتر کوانتومی چگونـه ممکـن اسـت کـار کنـد. ایـن پیشنهاد تا اوایل سال۱۹۹۰مورد توجه جدی قرار نگرفت و به صورت آکادمیک باقی ماند، البتـه در سـال ۱۹۸۵، "دویتش" متوجه شد که اظهارات فاینمن، می‌تواند تدریجاً به سـاخت کـامپیوتر کوانتـومی منجـر شود و مقاله ای را منتشر کرد مبنی بر اینکه اصولاً هر فرآیند فیزیکی را می توان به خوبی با کامپیوترهای کوانتومی مدل سازی کرد. بالاخره در ۱۹۹۴ " پیتر شور" نخستین گـام را بـرای محقـق کـردن ایـن آرزو برداشت. وقتی که بعضی از مشکلات کلیدی کامپیوترهای معمولی نشان داده شد، کامپیوترهای کوانتومی در اصل می‌توانستند خارج از رونوشت های کلاسیکی خـود محاسـبات را انجـام و اجـرا نماینـد یعنـی کارایی بسیار بالاتری را نسبت به کامپیوترهای معمولی از خود نشان مـی دادنـد. وی مقالـه ای را منتشـر نمود که حاوی روشی برای استفاده از کامپیوترهای کوانتومی در حل مشکل پیچیده ای در نظریه اعـداد، به نام فاکتورگیری بود. او نشان داد که چگونـه یـک مجموعـه از عملیـات ریاضـی کـه منحصـراً بـرای کامپیوترهای کوانتومی طراحی شده‌اند ، می‌توانند چنـین دسـتگاهی را بـه انجـام فـاکتورگیری از اعـداد بیشماری با سرعت بالاتر از کامپیوتر های کلاسیک ، قادر سازد . با این اختراع ، محاسـبات کوانتـومی از یک کنجکاوی به یک توجه جهانی تبدیل شد.

از آن موقع به بعد، گروههای تحقیقاتی در سرتاسر دنیا مسابقه ای را برای پیش قدم شدن در ساخت یک سیستم عملی آغاز نمودند. به این ترتیب ارتباط نوینی بین نظریه‌ی اطلاعات و فیزیک کوانتومی شروع به شکل‌گیری کرد که امروزه آن را محاسبات کوانتومی یا محاسبات نانومتری[1] می‌نامیم . بدین ترتیب امید است ، محاسبات کوانتومی مشکلات گذشته را برطرف سازد و افق جدیدی را ایجاد کند.

[1] *Nano Computing*

فصل اول ۲
۱-۱ مقدمه ۲
۱-۱-۱ مکانیک کوانتومی ۲
۱-۱-۲ محاسبات در دنیای کوانتومی ۳
۱-۲ تاریخچهٔ مختصری از اسپین ۱۱
۱-۲-۱ مدل فضایی بور و گسستگی فضا ۱۳
۱-۲-۲ تولد اسپین ۱۵
۱-۲-۳ آزمایش اشترن-گرلاخ ۱۷
۱-۲-۴ شرح آزمایش ۱۸
۱-۲-۵ آزمایشهای اشترن-گرلاخ متوالی ۲۰
۱-۲-۶ تکانه زاویهای مداری ۲۳
۱-۲-۷ تکانه زایهای اسپینی ۲۵
۱-۲-۸ ویژه بردارهای ماتریسهای پاوولی: اسپینورها ۲۹
۱-۲-۹ کره بلاخ ۳۰
۱-۳ تحقق فیزیکی کیوبیتها و چالشهای موجود در این راه ۳۳
فصل دوم ۳۹
۲-۱ استفاده از تک اسپینها به عنوان کیوبیت ۳۹
۲-۲ تئوری روشهای اندازهگیری و ساخت ادوات ۴۲
۲-۲-۱ نقاط کوانتومی ۴۲
۲-۲-۲ ادوات تک الکترونی ۴۴
۲-۲-۳ تاریخچه ۴۵
۲-۳ مفاهیم اولیه ۴۶
۲-۳-۱ کنترل جریان تک الکترون ۴۶
۲-۳-۲ تونل زدن ۴۷
۲-۳-۳ ابعاد ۴۸
۲-۳-۴ دما ۵۱
۲-۳-۵ محدودیت منطقه ای الکترون ۵۱
۲-۴ بررسی مهمترین ادوات تک الکترونی ۵۲

۲-۴-۱ جعبه تک الکترونی ۵۲
۲-۴-۲ ترانزیستورتک الکترونی ۵۴
۲-۴-۳ تله تک الکترونی ۵۷
۲-۵ مدل تعامل ثابت*(CI)* ۵۹
۲-۶ پیکربندی اسپین در نقاط کوانتومی چند الکترونی ۶۵
۲-۷ ساخت ۶۹
۲-۷-۱ لیتوگرافی ۷۴
۲-۸ بازخوانی اسپین تک الکترون با استفاده از تفاوت در انرژی ۷۷
۲-۸-۱ اندازهگیری اسپین الکترون در داخل یک نقطه کوانتومی ۷۸
۲-۸-۲ روش پالس دوسطحی ۸۰
۲- ۹ بازخوانی تک شات اسپین جفت الکترون با استفاده از نرخهای تونل زنی وابسته به اسپین ۸۲
۲-۹-۱ طرح بازخوانی اسپین با استفاده از نرخهای تونل زنی وابسته به اسپین ۸۴
۲-۱۰بازخوانی تک شات حالتهای اسپین دوالکترونی ۸۸
۲-۱۱ اندارهگیری غیرمخرب اسپینهای الکترون در یک نقطه کوانتومی ۹۲
۲-۱۲ کیوبیت مبتنی بر بار الکترون(شارژ کیوبیت) ۹۳
۲-۱۲-۱ آزمایش هایاشی به منظور نوشتن وخواندن کیوبیت ۹۴
۲-۱۲-۲ شرح آزمایش هایاشی ۹۵
فصل سوم ۹۸
۳-۱ مقدمه ۹۸
۳-۲ اندازهگیری نوری غیرمخرب اسپین تک الکترون در یک نقطه کوانتومی ۹۹
۳-۲-۱ قوانین انتخاب و اثر فارادی ۱۰۰
۳-۲-۲ اندازه گیری اسپین تک الکترون بهوسیله چرخش کر ۱۰۲
۳-۳ اندازه گیری الکتریکی غیرمخرب در یک نقطه کوانتومی ۱۰۴
۳-۳-۱طرح ساختار ۱۰۵
۳-۳-۲ سطوح انرژی یک نقطه کوانتومی سیلیکونی کروی: ۱۰۶
۳-۳-۳ معرفی ساختار مداری ۱۱۱
۳-۳-۴ معرفی کیوبیت ۱۱۳
۳-۳-۵ آماده سازی کیوبیت ۱۱۴
۳-۳-۶ اندازهگیری کیوبیت ۱۱۵

شکل ۱-۱- مقایسه رجستر کلاسیکی و رجستر کوانتومی ۷
شکل ۱-۲- نمایش پردازشگر کوانتومی و انجام هشت عملیات همزمان بر روی ورودی..... ۸
شکل ۱-۳- آزمایش اشترن-گرلاخ. ۱۷
شکل ۱-۴- باریکه های خارج شده از دستگاه SG..... ۱۹
شکل ۱-۵- آزمایشهای اشترن-گرلاخ متوالی ۲۱
شکل ۱-۶- نمایش هندسی کره بلاخ. ۳۱
شکل ۲-۱- نقطه کوانتومی استفاده شده توسط لاس و همکارش شامل الکترودهای فلزی گیت ۴۰
شکل ۲-۲-نقطه کوانتومی که از طریق سد تونلی به سورس و درین کوپل می‌شود..... ۴۳
شکل ۲-۳- جزیره و دو پیوند تونلی ۴۶
شکل ۲-۴- برخورد موج با سطح پتانسیل..... ۴۷
شکل ۲-۵- انرژی شارژ در حالت انسداد کولنی ۴۸
شکل ۲-۶- آستانه تونل زدن ۴۹
شکل ۲-۷- ظرفیت خازن و انرژی آستانه بر حسب ابعاد جزیره ۵۰
شکل ۲-۸- جعبه تک الکترونی..... ۵۳
شکل ۲-۹- بار الکتریکی جزیره در جعبه تک الکترونی ۵۴
شکل ۲-۱۰- ترانزیستور تک الکترونی ۵۵
شکل ۲-۱۱- مشخصه ترانزیستور تک الکترونی در حالت خاموش..... ۵۶
شکل ۲-۱۲- مشخصه ترانزیستور تک الکترونی در حالت روشن ۵۷
شکل ۲-۱۳- تله تک الکترونی..... ۵۷
شکل ۲-۱۴- مشخصه تله تک الکترونی..... ۵۸
شکل ۲-۱۵- پتانسیل الکتروشیمیایی برای گذار بین ترازهای پایه ۶۱
شکل ۲-۱۶- جاروب کردن ولتاژ گیت و اندازه گیری جریان..... ۶۳
شکل ۲-۱۷- شش حالت ممکن برای پرکردن حالت ها با دو الکترون ۶۷
شکل ۲-۱۸- لایه های مختلف از مواد نیمههادی که به صورت لایه لایه بر رویهم قرار گرفته اند ۷۰
شکل ۲-۱۹-رشد ساختار ناهمگون ۷۱
شکل ۲-۲۰- دیاگرام باندی ساختار ناهمگون ۷۳
شکل ۲-۲۱- قرار گرفتن الکترود فلزی و تشکیل نقطه کوانتومی ۷۵
شکل ۲-۲۲- مراحل ساخت در روش لیتوگرافی..... ۷۶
شکل ۲-۲۳- اندازه گیری بار نقطه کوانتومی بر اساس حالت اسپین ۷۹

شکل ۲-۲۴-. مراحل مختلف اندازهگیری حالت اسپین الکترون به وسیله پالس ولتاژ اعمالی به گیت P ۸۱
شکل ۲-۲۵- طرح بازخوانی اسپین بر اساس انتخاب انرژی و نرخ تونل‌زنی ۸۵
شکل ۲-۲۶- بازخوانی تک شات حالتهای اسپین دوالکترونی ۸۹
شکل ۲-۲۷- اندارهگیری غیرمخرب اسپینهای الکترون در یک نقطه کوانتومی ۹۲
شکل ۲-۲۸- ساختار جفت نقطه کوانتومی در آزمایش هایاشی ۹۵
شکل ۲-۲۹- سه مرحله آزمایش هایاشی ۹۶
شکل ۳-۱- ساختار باندی و قوانین انتخاب ۱۰۰
شکل ۳-۲-احتمال تابع موج برای سطح انرژی حالت پایه اوربیتال شبه s ۱۰۹
شکل ۳-۳-احتمال تابع موج برای سطح انرژی حالت تحریک شدهی اول، اوربیتال شبه p ۱۱۰
شکل ۳-۴-نمودار هدایت SET با جزیره سیلیکونی ۱۱۱
شکل ۳-۵- مشخصه هدایت بدون در نظر گرفتن تفاوت در نرخ تونل زنی ۱۱۲
شکل ۳-۶- شبیه سازی کامپیوتری کیوبیت ۱۱۳
شکل ۳-۷- کیوبیت در حالت 0 ..... ۱۱۶
شکل ۳-۸- کیوبیت در حالت 1 ..... ۱۱۶
شکل ۳-۹- مقایسه دو حالت کیوبیت ۱۱۷

جدول ۱-۱- مقایسه زمان همدوستی وزمان انجام عملیات گیت روی چند سیستم مختلف ۳۵
جدول ۳-۱- عناصر ماتریس برای نور پلاریزه شده دایروی $\sigma +$ و $\sigma -$ ۱۰۴
جدول ۳-۲-پارامترهای مواد ۱۰۷
جدول ۳-۳-پارامترهای شبیه سازی در *SIMON* ۱۰۷

فصل اول

پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش

۱

۱-۱ مقدمه

۱-۱-۱ مکانیک کوانتومی

بیش از ۳۰۰ سال است که فیزیکدانان در حال مطالعه نیروهای طبیعت هستند . در سال ۱۶۸۷ اسحاق نیوتن نظریه معروف خود تحت عنوان اصول ریاضی در فلسفه طبیعی را بیان کرد که شالوده اصلی مکانیک کلاسیک را تشکیل می‌دهد. این چارچوب، همراه با تئوری الکترومغناطیس ماکسول، با دقت قابل قبولی بسیاری از جهانی که ما آن را در زندگی روزانه تجربه می کنیم توصیف می‌کند. با این حال، در پایان قرن ۱۹ آشکار شد که این نظریه‌های کلاسیک موفق به توصیف مواد در مقیاس اتمی نمی‌باشند. به عنوان مثال، آن‌ها نمی‌توانند پدیده‌هایی مانند اثر فوتوالکتریک را توضیح دهند و یا اینکه چرا الکترون‌های شارژ شده منفی بر روی هسته مثبت اتم سقوط نمی‌کنند . پس فیزیکدانان به دنبال نظریه‌ای بودند که بتواند رفتار عجیب و غریب ذرات کوچک و سبک را توضیح دهد . نتیجه آن ظهور نظریه مکانیک کوانتومی بود. این نظریه که در سالهای ۲۷-۱۹۲۵ توسط ورنر هایزنبرگ، اروین شرودینگر، پل دیراک، ماکس پلانک و چند تن دیگر پایه گذاری شد، اساس تمام ادراک امروزی ما از عالم است. به بیان دقیق‌تر، مکانیک کوانتومی مجموعه‌ای از قوانین، روابط ریاضی و مفاهیم فلسفی است که توصیف کننده رفتار ذرات بنیادین تشکیل دهنده عالم است. البته با تعمیم همین قوانین و روابط، می‌توان رفتار تمام سیستم‌های فیزیکی‌ای که پیش از آن بررسی شده بودند را نیز بررسی و تعیین کرد. پایه ریاضی این نظریه جبر خطی عالی است. مفاهیمی از قبیل فضای هیلبرت ، ماتریس‌ها، عملگرها،

ویژه توابع ، ویژه مقادیر و تبدیلات از مهم‌ترین موارد می‌باشند. در حیطه فیزیک نظری نیز مباحثی همچون تابع موج، سیستم و تحول آن، فضای حالت، اندازه گیری‌ها و مکانیک آماری مورد بررسی قرار می گیرند .همچنین در سطوح بسیار پیشرفته تر این نظریه، عناوینی همچون مفهوم و کاربرد اسپین، نظریه اندازه‌گیری، متغیرهای پنهان، مساله ناجایگزیدگی، نیروی کوانتومی و میدان راهنما، پارادوکس EPR و قضیه بل مطرح می شوند. معرفی مکانیک کوانتومی به عنوان یک ساختمان کاری فیزیکی جدید در ابتدای قرن بیستم منجر به تحولی عظیم در ساختار چند هزار ساله اندیشه بشری شد. موفقیت بزرگ مکانیک کوانتومی بسیاری از دانشمندان را بر این باور رهنمون ساخته است که مکانیک کوانتومی یک نظریه اساسی واقعی از طبیعت است که در آن نظریه های کلاسیک تنها برخی از حالت های خاص آن می‌باشند.

۱-۱-۲ محاسبات در دنیای کوانتومی

قدرت پردازش یک کامپیوتر کلاسیک بستگی به تعداد ترانزیستورها بر روی ریز پردازنده دارد. با توجه به فن‌آوری ساخت پیشرفته، این عدد به طور چشمگیری در دهه های گذشته تا حدود ۸۰۰ میلیون ترانزیستور در تراشه افزایش یافته است. این ترانزیستورها دارای ابعاد تنها در حدود ۴۵ نانومتر هستند. این ابعاد آن قدر کوچک است که بیش از ۱۰میلیون ترانزیستور بر روی یک فضای کمتر از نوک قلم جا می‌گیرند . این کوچک بودن ترانزیستورها باعث می شود که آن ها دیگر به طور کامل کلاسیکی رفتار نکنند. اثراتی از جمله تونل‌زنی که منجر به جریان نشتی می‌شود ، یکی از سخت ترین موانع را برای کاهش بیشتر اندازه ترانزیستور ایجاد می‌کند . به جای مشاهده رفتار مکانیک کوانتومی به عنوان یک

مشکل برای رایانه‌های آینده، شاید بتوان از خودمان این سوال را پرسید که آیا این امکان وجود دارد که از پدیده های کوانتومی برای محاسبات استفاده کرد . یک روش، ادغام خاصیت کوانتومی درطرح محاسبات بر اساس منطق کلاسیک است. به عنوان مثال شاخه اسپین‌ترونیک[1] به دنبال استفاده از درجه آزادی اسپین الکترون‌ها به عنوان حامل اطلاعات کلاسیک است[۱]. در روش دیگر، ما می‌توانیم رایانه‌ای طراحی کنیم که با استفاده از ویژگی‌های منحصر به فرد مکانیک کوانتومی از آن در انجام محاسبات استفاده شود : به عبارتی کامپیوترکوانتومی.

فاینمن[2] نخستین کسی بود که به ایجاد یک مدل، برای تحقق کامپیوتری که بر اساس اصول فیزیک کوانتومی کار می‌کند، همت گماشت [۲]. بعدها، دیوید دویتش[3] دریافت که اظهارات فاینمن، می‌تواند مبنای ساخت کامپیوترهای کوانتومی گردد. وی مقاله‌ای منتشر کرد مبنی بر این که هر فرآیند فیزیکی را می‌توان به خوبی با کامپیوترهای کوانتومی مدل سازی کرد. وی همچنین نظریه موازی سازی کوانتومی با استفاده از حالت‌های جمع آثار[4] را، دلیلی برای توانایی کامپیوترهای کوانتومی، جهت انجام محاسبات مطرح کرد[۲]. سپس دانشمندی به نام پیتر شور[5]، مقاله‌ای منتشر نمود که در برگیرنده روشی برای استفاده استفاده از کامپیوترهای کوانتومی جهت حل مشکل پیچیده‌ای در نظریه اعداد، تحت عنوان فاکتورگیری

---

[1] *Spintronics*

[2] *Feynman*

[3] *David Deutsch*

[4] *Superposition*

[5] *Peter Shor*

بود . بر اساس این روش می‌توان با استفاده از کامپیوترهای کوانتومی یک عدد را با سرعت فوق العاده‌ای نسبت به کامپیوترهای فعلی، به مقسوم علیه‌های اول آن تجزیه کرد. بدین ترتیب با مطرح شدن الگوریتم شور، پردازش کوانتومی از فضای آکادمیک پا به دنیای عملی نهاد[۱, ۲].

قدرت ریاضی الگوریتم شور دانشمندان زیادی را به فکر انداخت تا برای پیدا کردن الگوریتم‌های کوانتومی دیگر یا برای یافتن روش‌های عملی جهت اجرای این الگوریتم ها فعالیت کنند. حمایت جدی بسیاری از موسسات دولتی و نظامی از تحقیقات در زمینه کامپیوترهای کوانتومی چه برای اهداف غیرنظامی و چه برای اهداف امنیتی، نظیر تجزیه و تحلیل رمز، سند این مدعاست[۳].

در حال حاضر با داشتن الگوریتم‌های فوق الذکر، شماری از سیستم‌هایی که از آن‌ها جهت پیاده-سازی سخت افزاری این کامپیوترها استفاده می‌کنند عبارتند از: اتم‌ها یا یون‌ها با دو تراز انرژی، ذرات با اسپین ۱/۲ و پلاریزاسیون فوتون در نانو ساختارهای کوانتومی از جمله نقاط کوانتومی [۴]که در سال‌های اخیر ، استفاده از دو حالت اسپینی الکترون محبوس در یک نقطه کوانتومی، برای تحقق کیوبیت، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است[۵].

۱-۱-۲-۱ بیت های کوانتومی (کیوبیت‌ها):

برای ساخت چنین کامپیوترهای کوانتومی ما احتیاج به بیت کوانتومی داریم ، بلوک هایی برای پردازش اطلاعات کوانتومی. یک بیت کوانتومی(کیوبیت) در کوانتوم مکانیک، قیاسی از یک بیت کلاسیک (رقم دودویی) در یک سیستم دو سطحی با دو مقدار صفر یا یک است . کیوبیت، یک سیستم مکانیک کوانتومی است و بنابراین ازقوانین مکانیک کوانتومی به جای مکانیک کلاسیک تبعیت می‌کند .

دو نتیجه مهم در مکانیک کوانتومی یعنی برهمنهی و درهم‌تنیدگی، در محاسبات کوانتومی بسیار استفاده می‌شود.

۱-۱-۲-۲ برهمنهی

بر خلاف سیستم کلاسیک دوسطحی ، که همیشه یا درحالت ۰ و یا در حالت ۱ می باشد ، یک سیستم کوانتومی دوسطحی می‌تواند در یک زمان هم در حالت ۰ و هم در حالت ۱ باشد. در این حالت اصطلاحا گفته می‌شود کیوبیت در حالت برهمنهی از حالت های $|0\rangle$ و $|1\rangle$ است یعنی $C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$ که در آن ضرایب C_0 و C_1 دامنه احتمال حالت‌های $|0\rangle$و $|1\rangle$ است به طوری که $|C_0|^2 + |C_1|^2 = 1$.اتصال این سیستم کوانتومی به یک دستگاه اندازه‌گیری منجر به اندازه‌گیری حالت‌های ویژه در یک روند به ظاهر غیرقطعی می‌شود به طوری که خروجی اندازه‌گیری شده به طور خاص به صورت تصادفی است و تنها احتمال برای هر خروجی قابل تعیین است [۶] ($|C_0|^2$ برای $|0\rangle$ و $|C_1|^2$ برای $|1\rangle$).

برای تحقیق یک کامپیوتر کوانتومی ، علاوه بر حالت های تک کیوبیتی به حالت‌های دو کیوبیتی هم نیاز می باشد که آن‌ها بیانگر سیستم‌های کوانتومی دو ذره‌ای می‌باشند[۲]. حالت-های پایه یک سیستم دو کیوبیتی، بر اساس ضرب تانسوری حالت‌های پایه $\{|0\rangle, |1\rangle\}$بیان می‌شوند بنابراین، حالت‌های پایه دو کیوبیتی ، کت‌های پایه $|00\rangle, |10\rangle, |01\rangle, |11\rangle$خواهند بودکه در واقع، $|00\rangle \equiv |0\rangle|0\rangle \equiv |0\rangle \otimes |0\rangle$ می‌باشد[۲, ۷].

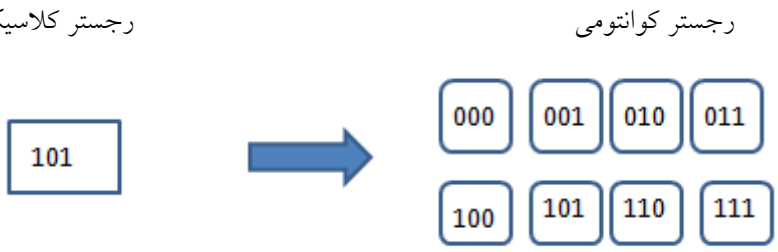
حالت یک کیوبیت دوتایی دلخواه را، می‌توان به فرم زیر نشان نشان داد[۷]:

$$|\Psi\rangle = C_0|00\rangle + C_1|01\rangle + C_2|10\rangle + C_3|11\rangle \quad (۱-۱)$$

که ضرایب C_2, C_1, C_0 و C_3، در شرایط نرمالیزاسون زیر صدق می‌کنند:

$$|C_0|^2 + |C_1|^2 + |C_2|^2 + |C_3|^2 = 1 \quad (۲-۱)$$

ظرفیت ذخیره‌سازی اطلاعات در بیت‌های کلاسیکی و کوانتومی متفاوت است. کیوبیت، علاوه بر داشتن، حالت‌های ۰ یا ۱ مانند یک بیت، می‌تواند به‌صورت ترکیب خطی از دو حالت پایه ۰ و ۱ نیز باشد، که این امر تفاوتی اساسی، ما بین بیت با کیوبیت ایجاد خواهد کرد[۲].



شکل ۱-۱- مقایسه رجستر کلاسیکی و رجستر کوانتومی

به‌عنوان مثال، هر رجستر سه بیتی در کامپیوترهای کلاسیکی، در هر لحظه، فقط می‌تواند یکی از هشت حالت ۰۰۱،۰۱۰،۰۱۱،۱۰۰،۱۰۱،۱۱۰،۱۱۱و۰۰۰ ، را ذخیره کند در حالی‌که، هر رجستر سه بیتی در کامپیوترهای کوانتومی، مطابق شکل ۱-۱در هر لحظه می‌تواند همه هشت حالت را، به صورت زیر در خود ذخیره کند.

$$a|000\rangle + b|001\rangle + c|010\rangle + d|011\rangle + e|100\rangle + f|101\rangle + g|110\rangle + h|111\rangle \quad (۳-۱)$$

بنابراین، از آنجایی که، در کامپیوتر کوانتومی، ورودی به صورت ترکیب خطی از تمامی حالت