دانشکده فناوری‌های نوین

گروه نانوفناوری

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد دررشته نانوفناوری با گرایش نانوالکترونیک

عنوان

بررسی و مدیریت اندرکنش اسپین الکترون در نقاط کوانتومی

اساتید راهنما

پرفسور علی رستمی

دکتر کریم عباسیان

استاد مشاور

دکتر حسن رسولی سقایی

پژوهشگر

مهشید زندمشایخی

بهمن ماه ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان...،

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

تقدیر و تشکر:

حمد و سپاس خدایی راست که، هستی را بر اساس قدرت بی کرانش بنیان نهاد و بشر را به آموختن اسرار آن رهنمون شد. خداوند حکیمی که ذره ذره کائنات جلوه ای از عظمت و علم بی انتهای او هستند.

در آغاز لازم می دانم از زحمات پدر و مادر گرامی ام پدربزرگ و مادربزرگ مهربانم، یترا و امیرحسین که لحظه لحظه بودن با آنها شور و شعفی در من برمی انگیزد تا بیاموزم آنچه را که نمی دانم، کمال تشکر را بنمایم.

از زحمات بی دریغ، تلاش های بی وقفه و راهنمایی های ارزشمند اساتید گرامی، جناب آقای دکتر علی رستمی و جناب آقای دکتر کریم عباسیان در راستای انجام این پروژه در طول یکسال گذشته، تشکر و قدردانی نمایم.

از استاد مشاور جناب آقای دکتر حسن رسولی سقایی و استاد داور جناب آقای دکتر سعید گل محمدی کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای مهندس اسداله زاده منش، که در تمامی مراحل کار اینجانب را یاری و مساعدت زیادی نمودند نهایت تشکر را دارم.

و در پایان از همکلاسی های خوبم، خانم ها سانازشعارغفاری، نوشین دولتی، نازلی رسولی، آرزو میقان و تمامی دوستان عزیزم در دانشکده و خوابگاه که در طول این مدت یار و همراه من بودند کمال تشکر را دارم.

حرفهای ما هنوز ناتمام

تا نگاه می کنی وقت رفتن است

...

مهشید زند مشایخی

بهمن ۸۹

نام خانوادگی : زندمشایخی نام : مهشید

عنوان پایان‌نامه : بررسی زمان واهلش اسپین در یک نقطه کوانتومی

اساتید راهنما : پرفسورعلی رستمی – دکتر کریم عباسیان استاد مشاور: دکتر حسن رسولی سقایی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: نانو فناوری گرایش: نانوالکترونیک دانشگاه: تبریز

دانشکده: مهندسی فناوری‌های نوین تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۸۹ تعداد صفحات:۱۰۳

کلید واژه : اسپین ، واهلش اسپین، نقطه کوانتومی و برهمکنش اسپین- مدار الکترون .

چکیده:

بیت کوانتومی معادل بیت کلاسیکی دیجیتال می‌باشد که برای ذخیره‌سازی اطلاعات کوانتومی مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از بهترین ایده‌ها برای تحقق کیوبیت، استفاده از حالت‌های اسپینی الکترون محبوس شده در یک تقطه کوانتومی می‌باشد ولی در این بین، یکی از موانع جدی که بر سر راه تحقق وذخیره‌سازی اطلاعات کوانتومی وجود دارد، واهلش اسپین الکترون است. الکترون محبوس شده در نقطه کوانتومی از محیط ایزوله نبوده و کوپلینگی بین آن و محیط اطراف وجود دارد که باعث محدود شدن طول عمر اطلاعات ذخیره شده توسط آن‌ها می‌شود. تلاش ما در این پایان نامه بررسی مکانیسم‌های واهلش اسپین الکترون و شناسایی پارامترهای فیزکی تاثیرگذار برآن، جهت پیدا کردن راه‌کاری مفید برای دستکاری این پارامترها می‌باشد، تا بتوان با کنترل اندرکنش‌های کیوبیت اسپینی عمر اطلاعات ذخیره شده در آن‌ها را تا جائی افزایش داد که گیت‌های کوانتومی بتوانند عملیات پردازش اطلاعات را روی آن‌ها انجام دهند. یکی از مهمترین این اندرکنش‌ها، بر همکنش اسپین – مدار الکترون می‌باشد که به طور کامل در نانو ساختارها مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت نرخ واهلش اسپین، ناشی از این برهمکنش، برای یک نقطه کوانتومی دو بعدی محاسبه شده است.

فصل اول

مقدمه ۱

بررسی منابع

۱-۱ بیت وکیوبیت ۴

۱-۱-۱ کیوبیت اسپینی ۷

۱-۲ تاریخچهٔ مختصری از اسپین ۷

۱-۲-۱ مدل فضایی بور و گسستگی فضا ۹

۱-۲-۲ تولد اسپین ۱۰

۱--۲-۳ آزمایش اشترن-گرلاخ ۱۲

۱-۲-۴ شرح آزمایش ۱۲

۱-۲-۵ آزمایش‌های اشترن-گرلاخ متوالی ۱۵

۱-۳ مکانیک کوانتوم اسپین ۱۸

۱-۳-۱ تکانه زاویه‌ای مداری ۱۸

۱-۳-۲ تکانه زایه‌ای اسپینی ۲۰

۱-۳-۲-۱ ویژه بردارهای ماتریس‌های پاوولی: اسپینورها ۲۳

۱-۴ کره بلاخ ۲۴

۱-۵ معرفی گیت‌های کوانتومی ۲۷

۱-۵-۱.گیت CNOT ۲۸

۱-۵-۲ گیت هادامارد..... ۲۹

۱-۵-۳ گیت T ۳۰

۱-۵-۴ گیت X ۳۰

۱-۶ تحقق فیزیکی کیوبیت و چالش‌های موجود در این راه ۳۱

۱-۷ پیشینه پژوهش ۳۵

فصل دوم

مواد و روش ها

۲-۱- مقدمه ۳۸

۲-۲- واهلش اسپین ۳۸

۲-۳ برهم‌کنش اسپین-مدار الکترون ۴۰

۲-۳-۱ برهم‌کنش اسپین-مدار الکترون در جامدات ۴۴

۲-۳-۱-۱ برهم‌کنش راشبا ۴۵

۲-۳-۱-۲ برهم‌کنش درشلهوس ۴۶

۲-۴ تاثیر میدان‌های مغناطیسی بر روی اسپینور ۴۹

۲-۴-۱ حرکت تقدیمی اسپین ۴۹

۲-۴-۲ چرخش بر روی کرهٔ بلاخ ۵۲

۲-۴-۳ تغییرات زمانی اسپینور بر روی کره بلاخ ۵۴

۲-۵ مکانیسم‌های واهلش اسپین ۵۷

۲-۵-۱ مکانیسم الیت-یافت ۵۸

۲-۵-۱-۱ اسپینورهای گاز الکترونی دو بعدی با در نظر گرفتن برهمکنش اسپین-مدار الکترون ۵۹

۲-۵-۲ مکانیسم دیاکناوپرل ۶۶

۲-۵-۳ مکانیسم پیکاس- آرنو- بیر ۶۹

۲-۵-۴ برهمکنش هایپرفاین ۶۹

۲-۶ واهلش اسپین در یک نقطه کوانتومی ۷۱

۲-۶-۱ مدل نفطه کوانتومی ۷۳

۲-۶-۲ محاسبه نرخ واهلش اسپین در نقطه کوانتومی ۷۶

۲-۶-۳ برهمکنش الکترون-فونون ۷۷

۲-۶-۴ برهمکنش اسپین-مدار الکترون ۷۹

۲-۷ نتیجه‌گیری کلی ۸۲

۲-۸ پیشنهادات ۸۳
منابع

فهرست شکل ها

شکل ۱-۱: مقایسه رجستر کلاسیکی و رجستر کوانتومی ۵

شکل ۱-۲:نمایش پردازشگر کوانتومی ۶

شکل ۱-۳ آزمایش اشترن-گرلاخ ۱۳

شکل ۱-۴ باریکه‌های خارج شده از دستگاه SG ۱۴

شکل ۱-۵ آزمایش‌های اشترن-گرلاخ متوالی ۱۶

شکل ۱-۶ نمایش هندسی کره بلاخ ۲۵

شکل ۱-۷ نمایشی از شبکه کوانتومی ۲۷

شکل ۱-۸ نمایش مداری گیت CNOT ۲۹

شکل ۱-۹ : نمایش مداری گیت هادامارد..... ۲۹

شکل ۱-۱۰ : نمایش مداری گیت T..... ۳۰

شکل ۱-۱۱: نمایش مداری گیت X..... ۳۰

شکل ۲-۱ نمایشی از حرکت تقدیمی اسپین ۵۲

شکل ۲-۲ نمایشی از نحوه فلیپ شدن اسپین..... ۵۳

شکل ۲-۳ تشریح دو مرجع استفاده شده، برای توصیف تغییر اسپینور ۵۴

شکل ۲-۴ نمایشی از نحوه پلاریزاسون اسپین در بردارهای موج ۵۸

شکل ۲-۵ نمایشی از ساختار نامتناجس شکل گرفته در صفحه گاز الکترونی دو بعدی ۵۹

شکل ۲-۶ نمایشی از ترازهای شکافته شده اسپینی ۶۴

شکل ۲-۷ نمایشی از مکانیسم الیت‌یافت ۶۶

شکل ۲-۸ نشان دهنده مکانیسم دیاکناوپرل ۶۸

شکل ۲-۹ نمایشی از مکانیسم پیکاس-آرنو-بیر ۶۹

شکل ۲-۱۰ نمایشی از وضعیت الکترون و اسپین‌های هسته ۷۰

شکل ۲-۱۱ نمایش چگونگی برهمکنش هایپرفاین ۷۰

شکل ۲-۱۲ شماتیکی از نقطه‌ی کوانتومی دو بعدی ۷۴
شکل ۲-۱۳ نمایشی از پروسه فلیپ شدن اسپین برای نقطه کوانتومی ۷۶
شکل ۲-۱۴ نشان دهنده جهت‌گیری اسپینی ناشی از دو برهمکنش راشبا و درشلهوس ۸۰
شکل ۲-۱۵ نشان دهنده تغییر نرخ واهلش اسپین براساس تغییر ضریب برهمکنش درشلهوس . ۸۲

فهرست جدول ها

جدول ۱-۱ نشان‌دهنده ارتباط بین کیوبیت‌های ورودی وخروجی .CNOT..... ۲۹
جدول ۱-۲ ارتباط بین کیوبیت وردی و خروجی گیت .هادامارد..... ۳۰
جدول ۱-۳ ارتباط بین کیوبیت وردی و خروجی در گیت .X..... ۳۱
جدول ۱-۴ مقایسه زمان همدوستی وزمان انجام عملیات گیت ۳۳
جدول ۲-۱ ثابت‌های فیزیکی و پارامترهای ماده برای نقطه کوانتومی سیلیکون ۷۸

فصل اول

مقدمه و بررسی منابع

مقدمه

"تعداد ترانزیستورهای یک تراشه با مساحت ثابت هر دو سال یک‌بار، دو برابر خواهد شد."

این قانون برای اولین بار توسط گوردون مور[1] از بنیان‌گذاران شرکت اینتل در سال ۱۹۶۵ مطرح و به قانون مور معروف گردید. با گذر زمان، ۲ برابر شدن تعداد، برای هر دوسال دستخوش تغییراتی گردید و به دو برابر به ازای هر ۱۸ ماه، تغییر کرد [۲،۱].

بااین وجود حتی فکر پایان یافتن اعتبارقانون مور، در آن سالها به ذهن کمتر کسی خطور می‌کرد. نکته قابل توجه این است که این ۲ برابر شدن تعداد ترانزیستورها (در دو سال یا در ۱۸ ماه) به این معناست که ابعاد ترانزیستورها در حال نصف شدن است. با طی چنین روندی در نهایت به نقطه ای خواهیم رسید که محدودیتهای فیزیکی اجازه کاهش ابعاد را نخواهند داد زیرا با کاهش ابعاد ادوات در حد ابعاد اتمی، بروز اثرات کوانتومی، اختلالاتی در عملکرد ادوات ایجاد خواهند کرد و این حقیقت می‌تواند به عنوان مهر پایانی بر اعتبار قانون مور تلقی گردد، هرچند احتمالا این قانون حدودا یک دهه دیگر نیز معتبر باقی خواهد ماند.

فرضیه پایان اعتبار قانون مور سرآغاز ایجاد تحولی شگرف در دنیای محاسبات گردید و دانشمندان را به تحقیق در زمینه شناسایی شاخه های جدیدی از روش های محاسباتی واداشت تا در هنگام لزوم(احتمالا پس از سپری شدن دهه جاری) جایگزین مناسبی برای کامپیوترهای کنونی در اختیار داشته باشند، روش‌هایی چون محاسبات کوانتومی[2]، که با کمک این نوع محاسبات می‌توان پردازش اطلاعات را در سیستمهای کوانتوم مکانیکی انجام داد.

[1] Gordon. Moore
[2] Quantum computing

فاینمن[1] نخستین کسی بود که به ایجاد یک مدل، برای تحقق کامپیوتری که بر اساس اصول فیزیک کوانتومی کار می‌کند، همت گماشت [۲].

بعدها،دیویددوچ[2] دریافت که اظهارات فاینمن، می‌تواند مبنای ساخت کامپیوتر های کوانتومی گردد. وی مقاله ای منتشر کرد مبنی بر اینکه 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[3]را، دلیلی برای توانایی کامپیوترهای کوانتومی، جهت انجام محاسبات مطرح کرد [۲].

سپس دانشمندی به نام پیتر شور[4]، مقاله‌ای منتشر نمود که در برگیرنده روشی برای استفاده از کامپیوترهای کوانتومی جهت حل مشکل پیچیده ای در نظریه اعداد،تحت عنوان فاکتورگیری بود . براساس این روش می-توان با استفاده از کامپیوترهای کوانتومی یک عدد را با سرعت فوق العاده ای نسبت به کامپیوترهای فعلی، به مقسوم علیه های اول آن تجزیه کرد. بدین ترتیب با مطرح شدن الگوریتم شور، پردازش کوانتومی از فضای آکادمیک پا به دنیای عملی نهاد [۲،۱].

قدرت ریاضی الگوریتم شور دانشمندان زیادی را به فکر انداخت تا برای پیدا کردن الگوریتم های کوانتومی دیگر یا برای یافتن روش های 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 پیاده‌سازی سخت افزاری این کامپیوترها استفاده می‌کنند عبارتند از: اتم‌ها یا یون‌ها با دو تراز انرژی، ذرات با اسپین ۱/۲ و

[1] Feynman
[2] David Deutsch
[3] superposition
[4] Peter Shor

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]. ولی یکی از موانع مهم، برای این امر، اندر کنش مابین الکترون محبوس شده در نقطه‌ی کوانتومی و محیط اطراف است، که به نوبه خود باعث تغییر اطلاعات کوانتومی ذخیره شده در کیو بیت اسپینی می‌گردد.

بنابراین یکی از چالش های جدی بر سر راه تحقق ذخیره‌سازی و پردازش اطلاعات کوانتومی مبنی بر کیوبیت‌های اسپینی، طول عمر محدود اطلاعات کدگذاری شده با دو حالت اسپینی الکترون است. [۶].

هدف کلی در این تحقیق پرداختن به این چالش اساسی، در مسیر تحقق کیوبیت اسپینی می‌باشد. نتایج این تحقیق در کنترل اندرکنش کیوبیت با محیط اطراف، به منظور بالا بردن طول عمر اطلاعات ذخیره شده، موثر خواهد بود و گامی در جهت تحقق کامپیوترهای کوانتومی می‌باشد.

در راستای معرفی طرح پایان نامه، در فصل اول ابتدا به‌معرفی بیت و کیوبیت، سپس به‌بیان تاریخچه‌ای از کشف اسپین، مکانیک کوانتوم اسپین، کره بلاخ، معرفی گیت‌های کوانتومی، چالش‌های موجود در مسیر تحقق کیوبیت و تحقیقات انجام شده در زمینه زمان واهلش اسپین خواهیم پرداخت. فصل دوم به مفاهیمی نظیر برهمکنش اسپین-مدار الکترون، تاثیر میدان مغناطیسی بر روی اسپینور، معرفی مکانیسم‌های فیزیکی که سبب واهلش اسپین می‌شوند اختصاص داده شده است و سپس واهلش اسپین در یک نقطه کوانتومی مورد بررسی قرار گرفته و نرخ واهلش اسپین برای نقطه کوانتومی سیلیکونی محاسبه خواهد گردید.

بررسی منابع

۱-۱ بیت وکیوبیت

از نقطه نظر فیزیکی، یک بیت حالت فیزیکی می باشد، که برای ذخیره اطلاعات کلاسیکی از آن استفاده می‌کنند و می‌تواند یکی از دو مقدار منطقی ۰ یا ۱ را به‌خود بگیرد [۷]. در سیستمهای کوانتومی، برای ذخیره اطلاعات کوانتومی از بیت کوانتومی یا کیوبیت استفاده می‌شود [۸،۷] که، به صورت یک بردار در فضایی هیلبرت دو بعدی تعریف می‌شود[۴].

اگر $|0\rangle$, $|1\rangle$ بردارهای متعامد نرمال در این فضا باشند آنگاه می‌توان کیوبیت را به صورت زیر نشان داد:

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle \qquad c_0, c_1 \in C \quad |c_0|^2 + |c_1|^2 = 1 \quad , \tag{۱-۱}$$

که در رابطه (۱-۱) c_0, c_1 به ترتیب دامنه های احتمال مختلط باشند آنگاه در شرط نرمالیزاسیون $|c_1|^2 + |c_0|^2 = 1$، صدق خواهند کرد [۴].

برای تحقق یک کامپیوتر کوانتومی، علاوه بر حالت‌های تک کیوبیتی، به حالت‌های دو کیوبیتی هم، نیاز می‌باشد که آن‌ها بیان‌گر سیستم‌های کوانتومی دو ذره‌ای می‌باشند [۲].

حالت‌های 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]:

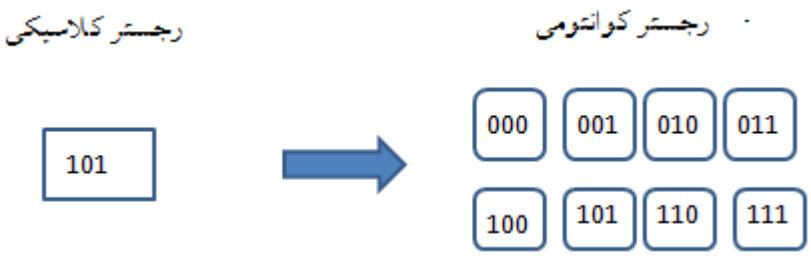
$$|\Psi\rangle = c_0|00\rangle + c_1|01\rangle + c_2|10\rangle + c_3|11\rangle \quad , \tag{۲-۱}$$

که ضرایب c_0, c_1, c_2 و c_3 ، در شرایط نرمالیزاسون زیر صدق می‌کنند [۷].

$$|c_0|^2 + |c_1|^2 + |c_2|^2 + |c_3|^2 = 1 \quad , \qquad (۳-۱)$$

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، مابین بیت با کیوبیت ایجاد خواهد کرد [۲].

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 (۱-۱) در هر لحظه می‌تواند همه هشت حالت را، به صورت $a|000\rangle + b|001\rangle + c|010\rangle + d|011\rangle + e|100\rangle + f|101\rangle + g|110\rangle + h|111\rangle$ در خود ذخیره کند. شکل

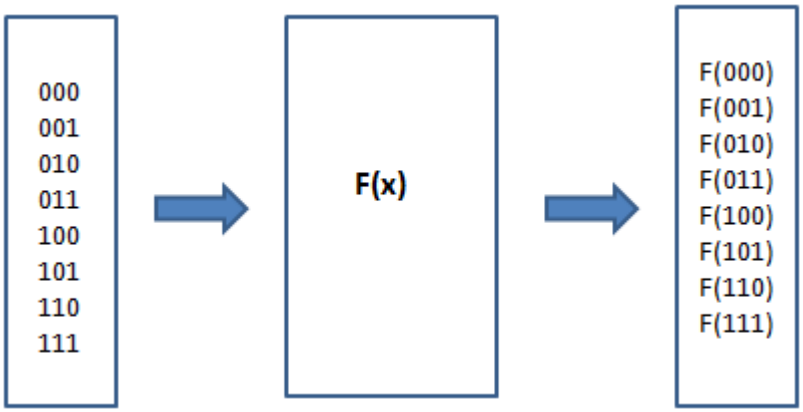


شکل ۱-۱: مقایسه رجستر کلاسیکی و رجستر کوانتومی

بنابر این، از آنجایی که، در کامپیوتر کوانتومی، ورودی به صورت ترکیب خطی از تمامی حالت های پایه، مقدار دهی می‌شود، می‌توان یکباره[۱] تمامی عملیات محاسباتی ممکن را، بر روی اطلاعات ورودی انجام داد، مثلا در یک رجستر کوانتومی سه بیتی، مطابق شکل (۱-۲)، می‌توان یکباره هشت عملیات محاسباتی را، بر

۱. parallel.[۱]

روی رجستر کوانتومی انجام داد که این امر، تاثیر زیادی بر روی زمان اجرا و حافظه مورد نیاز در پردازش محاسبات، دارد و تفاوتی اساسی در زمان انجام محاسبات کامپیوتر کلاسیک وکوانتومی، ایجاد می‌کند.



شکل ۱-۲: نمایش پردازشگر کوانتومی و انجام هشت عملیات هم‌زمان بر روی ورودی.

نکته‌ای که در اینجا باید دقت شود این است که حالت کیو بیت (برای مثال، یک سیستم تک کیوبیتی) می‌تواند به صورت هر ترکیب خطی از دو حالت پایه باشد ولی چنانچه اندازه گیری روی این سیستم انجام شود فقط آن را در یکی از حالت های $|0\rangle$ با احتمال $|c_0|^2$ و یا $|1\rangle$ با احتمال $|c_1|^2$ پیدا خواهیم کرد و حالت سیستم بلافاصله بعد از اندازه گیری یکی از حالت ها $|0\rangle$ یا $|1\rangle$ خواهد بود. این دقیقا به‌همان خاصیت سیستم‌های کوانتومی بر می‌گردد که در صورت اندازه گیری سیستم، بردار حالت سیستم به یکی از بردار های ویژه سیستم که مطابق با مقدار ویژه مشاهده شد، است، قفل[1] می‌شود [۴،۷].

[1] collapse

۱-۱ کیوبیت اسپینی

در سالهای اخیر به خواص اسپینی نانو ساختارها توجه زیادی شده است [۵]. دستکاری و باز خوانی اسپین‌ها در حالت جامد می‌تواند راه جدیدی برای گسترش ساخت قطعات الکترونیکی مانند ترانزیستورهای اسپینی و تک الکترونی، فیلترهای اسپینی و سلول حافظه اسپینی جهت توسعه فناوری اطلاعات باشد. علاوه بر اینها، دو حالت اسپینی الکترونی محبوس در یک نقطه کوانتومی می تواند یک ایده، برای تحقق یک کیوبیت برای محاسبات کوانتومی باشد [۶].

۱-۲ تاریخچهٔ مختصری از اسپین

بسیاری از دانشجویان علوم مهندسی می‌دانند که هر ذرهٔ بنیادی مانند الکترون، نوترون، فوتون و .. یک خاصیت مکانیک کوانتومی دارد که اسپین نامیده می‌شود. اسپین قابل انداز گیری است، البته نه به آسانی، بلکه حداقل به صورت اصل می‌توان آن را پذیرفت. اسپین دارای مقادیر گسسته یا کوانتیزه است که صفر را هم شامل می‌شود [۹].

بیشتر افراد تصور می‌کنند که اسپین، تکانهٔ زاویه‌ای ناشی از چرخش الکترون به دور محور خود است (همانند حرکت وضعی سیارات). این تصور از اسپین، گرچه درک مفهوم اسپین را برای ما راحت می‌کند، ولی کاملاً تصوری خام و ناکامل است.لاندا[1] و لیفشیتز[2] در کتاب خود نوشته‌اند: "اسپین در تئوری کوانتومی یک مفهوم کاملاً عجیب است و تفسیر کلاسیکی ندارد.این تعبیر که تکانهٔ زاویه‌ای ذاتی ذره، نتیجهٔ چرخش به دور محور خود باشد، کاملاً بی‌معنی است" [۱۰].

[1] Landau
[2] Lifshitz