

خطای تک الکترونی در سیم باینری اتوماتای سلولی کوانتومی

مژده مهدوی^۱

ستار میرزا کوچکی^۲، محمد امین امیری^۳

چکیده

اتوماتای سلولی کوانتومی، یک فناوری نوظهور در عرصه نانو فناوری می باشد و پیش بینی میشود که در صورت رفع مشکلاتی نظیر ساخت، سالهای آینده جایگزینی برای تکنولوژی CMOS باشد. نقص های مختلفی ممکن است در سلول های اتوماتای سلولی کوانتومی حادث شوند. یکی از این نقص ها، نقص تک الکترونی است که می تواند طی تولید یا عملکرد مدارات اتوماتای سلولی کوانتومی اتفاق افتد و منجر به ایجاد خطا در مدارات مبتنی بر این فناوری شود. بررسی این خطا از این جهت در مدارات QCA حایز اهمیت است که نوع خطای ایجاد شده در این مدارات، با مدارات CMOS متفاوت است. مدل سازی این خطا در سطح منطقی برای سیم باینری اتوماتای سلولی کوانتومی در این مقاله ارائه شده است.

کلید واژه

اتوماتای سلولی کوانتومی، نقص تک الکترونی، سیم باینری

۱. عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی mahdavi@shahryariau.ac.ir

۲. دانشیار دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳. دانشجوی دکتری برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۸۹/۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۸۹/۷/۱۴

مقدمه

صنایع میکروالکترونیک طی دهه‌های گذشته با کاهش ابعاد ترانزیستورها، مجتمع سازی، توان مصرفی و سرعت مدارات مجتمع را بهبود داده است. اما بنظر می‌رسد با وجود کاهش ابعاد ترانزیستورها، بعضی مشکلات نظیر توان مصرفی قابل نظر نیستند. اتوماتای سلولی کوانتومی (QCA) که اولین بار توسط لنت و همکاران معرفی گردید [۱]، یک فناوری نوظهور را در سطح نانو ارائه می‌دهد. استفاده از فناوری QCA برای پیاده‌سازی مدارات منطقی، یکی از روش‌هایی است که علاوه بر کاهش ابعاد مدارات منطقی و افزایش فرکانس کلاک این مدارات، توان مصرفی را کاهش می‌دهد [۱-۲]. سلول‌های QCA دارای نقطه‌های کوانتومی هستند که موقعیت الکترون‌ها در آنها، سطح باینری صفر و یک را تعیین خواهد کرد. این مهمترین ویژگی مدارات QCA در مقایسه با مدارات معمول CMOS است که در آنها حالت‌های منطقی بوسیله قرارگیری تعداد محدودی الکترون در نقطه کوانتومی مشخص می‌گردد و جریانی در مدار رد و بدل نمی‌شود.

انواع مختلف نقصهای نابجایی سلول ممکن است طی تولید مدارات و ادوات QCA حادث شود. برخی از آنها با عناوین cell displacement، cell misalignment، cell omission و cell rotation در مقالات گذشته بررسی شده‌اند.

- cell displacement نقصی است که در آن سلول معیوب در جای مناسب خود قرار نگرفته است [۲].

- cell misalignment نقصی است که در آن جهت سلول معیوب بطور مناسب ردیف نشده است [۳][۴].

- cell omission نقصی است که در آن یک سلول حذف شده است [۵].

- cell rotation نقصی است که در آن سلول معیوب چرخیده است [۶][۷].

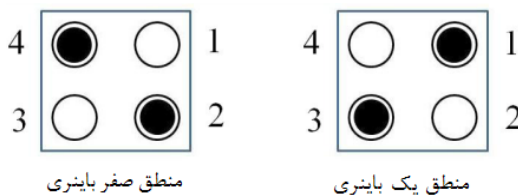
نقصهای دیگری نظیر نقص نقطه کوانتومی یا الکترون وجود دارند که ممکن است در مدارات و ادوات QCA حادث شوند [۳]. SEE ها (Single Event Effect) نمونه‌هایی از پدیده‌هایی هستند که می‌توانند مدارات و ادوات QCA را تحت تاثیر قرار دهند. این نوع پدیده‌ها می‌توانند موجب شوند تا الکترون‌ها به درون یا بیرون از یک سلول تونل بزنند و بنابراین سلول‌های باقیمانده ممکن است دارای صفر، یک، دو، سه و یا چهار الکترون باشند. این مهمترین تاثیری است که می‌تواند در اثر SEE ها

برای مدارات QCA رخ دهد. با در نظر گرفتن ساختار QCA با دو الکترون در هر سلول، می‌بینیم که سلول‌های معیوب می‌توانند منجر به عملکرد غلط مدار شوند [۸]. هدف اصلی این مقاله، مدلسازی خطای تک الکترون در سیم باینری است که تاکنون شبیه سازی کاملی برای آن، صورت نگرفته است. باتوجه به کاهش ابعاد در این فناوری، پدید آمدن نقص جزئی مانند کم شدن یک الکترون در سلول، منجر به رخداد خطای شدیدی در مدار خواهد شد که این مساله برای سیم QCA در این مقاله بررسی شده است. در مقاله های گذشته بیشتر جابجا شدن سلول QCA را در ایجاد خطا مدنظر قرار داده‌اند، ولی در مقاله حاضر ایجاد نقص در داخل سلول مورد توجه قرار گرفته است. باقیمانده در بخش ۲، مروری کوتاه بر QCA خواهیم داشت. در این بخش مقدمه‌ای بر خطای تک الکترونی نیز ارائه شده است. در بخش ۳ تاثیر خطای تک الکترون بر سیم باینری بررسی شده است و نتایج شبیه سازی آنها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. بخش ۴ شامل نتیجه‌گیری مقاله و بحث در ارتباط با نتایج بدست آمده خواهد بود.

موضوعات و روش‌ها

اتوماتای سلولی کوانتومی

در اتوماتای سلولی کوانتومی، یک سلول دارای چهار نقطه کوانتومی مانند شکل ۱ خواهد بود. نقطه‌های کوانتومی بصورت دایره‌های توخالی نمایش داده شده‌اند. هر سلول دارای دو الکترون است که بصورت دایره‌های توپر نشان داده شده‌اند.

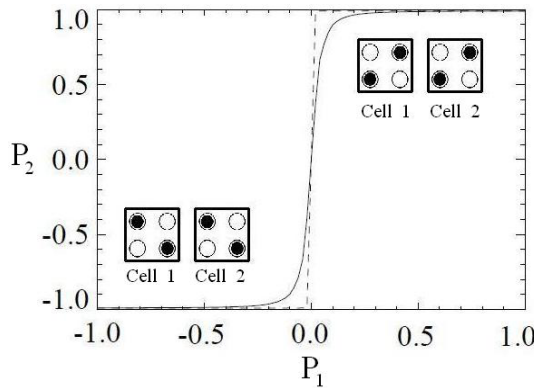


شکل ۱: سلول QCA و حالت‌های پایه‌ای

در یک سلول، الکترون‌ها با سازوکار تونل زنی مجاز به پرش بین نقطه‌های کوانتومی مجزا هستند، ولی آنها مجاز به تونل زنی بین سلول‌ها نمی‌باشند. سد پتانسیل بین سلول‌ها بقدر کافی بزرگ فرض شده است تا بطور کامل از تونل زنی بین سلولی جلوگیری کند. با وجود اینکه دو الکترون دارای نیروی دافعه می‌باشند، آنها مجبور به اشغال نقطه‌های کوانتومی هستند.

اگر آنها را بدون نیروی خارجی رها کنیم، یکی از دو ترکیب پایه ای سلول را بخود می گیرند. واضح است که الکترون ها تمایل دارند که در نقطه های کوانتومی متمایز جای بگیرند و بخاطر نیروی کولنی موجود، آنها در یک نقطه کوانتومی نخواهند ماند. با توجه به این پیش فرض ها، می توان نتیجه گرفت که حالت های پایه ای سامانه شامل دو ترکیب الکترون ها در گوشه های مخالف سلول (شکل ۱) خواهد بود که الکترونها بیشترین فاصله را از هم دارند.

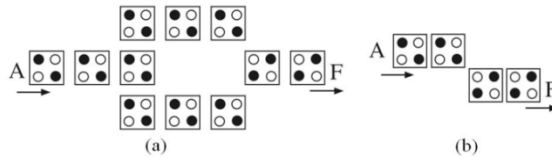
تزویدج بین دو سلول بوسیله اندرکنش کولنی بین الکترون های سلولهای مختلف انجام می گیرد. شکل ۲ چگونگی تاثیر پذیری یک سلول از سلول همسایه اش را نشان می دهد [۱۰]. این شکل دو سلول را نشان می دهد که قطبش سلول ۱ توسط قطبش سلول همسایه اش تعیین می شود. فرض شده است که P_2 در یک مقدار معینی ثابت است و روی سلول ۱ تاثیر می گذارد و بنابراین قطبش آن را تعیین می کند. نتیجه این است که تزویدج سلول به سلول در مدارات QCA شدیداً غیرخطی است. همانطور که می بینیم، حتی در صورت قطبیده شدن جزئی سلول ۲، سلول ۱ بطور کامل قطبیده شده است [۹][۱۰]. همانگونه که مشاهده می شود، می توان نتیجه گرفت که وقتی سلولی قطبیده می شود و در کنار سلول دیگر قرار می گیرد، اندرکنش کولنی باعث می شود که سلول دوم نیز قطبشی مانند سلول اول پیدا کند.



شکل ۲: کوبلینگ سلول های QCA

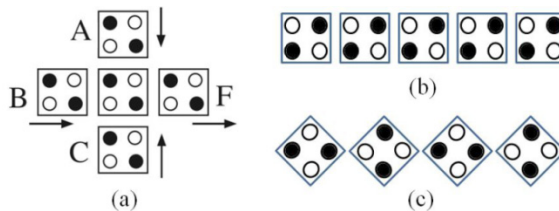
می توان از اندرکنش فیزیکی بین سلول ها جهت پیاده سازی توابع منطقی بولی پایه استفاده نمود. گیت های منطقی پایه در QCA شامل تابع منطقی اکثریت گیر و معکوس کننده می باشد که در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده اند. تابع منطقی اکثریت گیر تنها با ۵ سلول قابل پیاده سازی است.

تابع AND منطقی را می‌توان با تابع منطقی اکثریت گیر و تنظیم یکی از ورودی‌هایش به منطق صفر پیاده‌سازی نمود. تابع OR منطقی را می‌توان با تابع منطقی اکثریت گیر و تنظیم یکی از ورودی‌هایش به منطق یک پیاده‌سازی نمود [۱۱].



شکل ۳: (a) گیت معکوس کننده افزون شده، (b) گیت معکوس کننده

کلاکینگ در QCA سازوکاری جهت حرکت همزمان داده‌ها در مدار مهیا می‌کند. باید این مطلب را در نظر گرفت که کلاک همچنین جهت حرکت داده در مدارات QCA را کنترل می‌کند و همچنین توان مورد نیاز جهت عملکرد مدار را تامین می‌نماید.

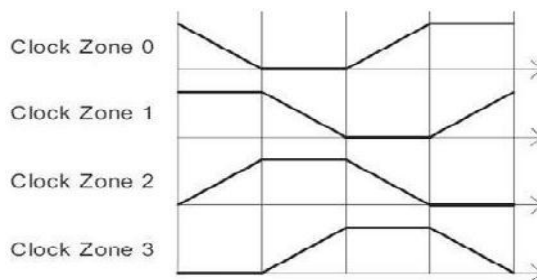


شکل ۴: (a) گیت اکثریت گیر، (b) سیم باینری، (c) سیم ۴۵ درجه

بطور دقیقتر، کلاک QCA جهت کنترل ارتفاع سد تونل زنی در سلول‌ها استفاده می‌شود. هنگامی که سطح کلاک پائین است، الکترون‌ها در موقعیت‌های مربوطه‌شان به تله می‌افتد و نمی‌توانند به نقطه‌های کوانتومی دیگر تونل زنی کنند و بنابراین مقدار منطقی سلول حفظ می‌شود. این عمل با بیشینه نگه داشتن ارتفاع سد تونل زنی محقق می‌شود. هنگامی که سطح کلاک بالا است، سلول به حالت قطبش بی اثر خواهد رفت. این عمل با کمینه نگه داشتن ارتفاع سد تونل زنی محقق می‌شود. بین این دو حالت سلول‌ها یا در حال latch شدن و یا در حال relax شدن می‌باشند.

هر سلول در منطقه کلاکینگ خاص به یکی از چهار فاز کلاک QCA ممکن که در شکل ۵ نشان داده شده، مرتبط شده است. هر سلول در ناحیه کلاک بطور همزمان با تغییرات سیگنال کلاک

latch و unlatch می‌شود و به این ترتیب داده‌ها از طریق سلول‌ها منتقل می‌شوند [۱۲][۱۳] [۱۴][۱۵].



شکل ۵: نواحی کلاک QCA

تاثیر نقص تک الکترون

در این بخش، مدل‌سازی خطا برای سیم باینری QCA ارائه خواهد شد. فرض بر این است که همه سلول‌ها دارای طول و عرض 18 nm و ابعاد نقطه برابر 5 nm هستند. فاصله مرکز تا مرکز هر دو سلول همسایه برابر 20 nm می‌باشد. بنابراین می‌توان ابعاد سلول را برابر 20 nm در نظر گرفت. بعنوان مثال ابعاد سلول 20 nm در [۱۶] و ابعاد سلول 25 nm در [۵] استفاده شده‌اند. بنابراین فرض 20 nm برای شبیه‌سازی QCA معتبر می‌باشد. فاصله مرکز تا مرکز دو نقطه کوانتومی همسایه در یک سلول QCA برابر 9 nm است (بعنوان مثال نقاط ۱ و ۲ در شکل ۱). با توجه به مقادیر فوق، سایر ابعاد قابل محاسبه هستند. بعنوان نمونه، اگر دو سلول همسایه را در نظر بگیریم، فاصله بین نقطه شماره ۴ در سلول سمت چپ و نقطه ۱ در سلول سمت راست برابر 29 nm است.

علاوه بر این برای جلوگیری از پیچیده شدن محاسبات فرض شده است که هر سلول به یک ناحیه کلاک منحصر به فرد مربوط است و هیچ دو سلول همسایه‌ای با ناحیه کلاک مشابه وجود ندارند که البته صحت نتایج با وسیع تر شدن کلاک نیز بررسی شده است.

موقعیت الکترون‌ها و قطبش سلول‌ها از واقعیت حداقل انرژی کولنی بدست آمده‌اند. انرژی کولنی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_{i,j} = \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r |r_i - r_j|} \quad (1)$$

در این رابطه q_i و q_j بار الکترون، ϵ_0 ثابت خلا و ϵ_r ثابت تراوایی نسبی ماده سازنده سلول است که گالیوم آرسناید فرض شده است. همه شبیه سازی‌ها با نرم افزار MATLAB انجام شده‌اند. دو سوال اصلی برای سیم باینری که در بر دارنده سلول معیوب است، پاسخ داده شوند:

- با در نظر گرفتن سلول معیوب، تک الکترون این سلول با وجود قطبش صفر یا یک سلول قبلی، در کدام موقعیت قرار می‌گیرد؟

- با در نظر گرفتن سلول معیوب، قطبشی که به سلول بعدی تحمیل می‌شود، چیست؟

نتایج

در ابتدا سلول معیوب را که دارای تک الکترون است، توسط سلول قبل و با منطق صفر و یک، تحریک می‌نماییم و موقعیت الکترون در سلول معیوب را بدست می‌آوریم. نتایج شبیه‌سازی در جدول I آمده است. این نتایج با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده‌اند، بدین صورت که براساس مکان قرارگیری الکترون های سلول قبل از سلول معیوب و نیز تک الکترون موجود در سلول معیوب، امکان قرارگیری الکترون در چهار نقطه کوانتومی وجود دارد، ولی از بین این چهار نقطه، الکترون در موقعیتی قرار می‌گیرد که کمترین انرژی کولنی را به سامانه تحمیل کند. هنگامی که سطح منطق سلول تحریک کننده صفر باشد الکترون در سلول معیوب به نقطه کوانتومی یک می‌رود؛ زیرا همانطور که نتایج نشان می‌دهد در این مکان کمترین انرژی به سیم باینری تحمیل می‌شود و هنگامی که سطح منطق سلول تحریک کننده یک باشد الکترون در سلول معیوب به نقطه کوانتومی دو می‌رود، چون در این مکان کمترین انرژی به سیم باینری تحمیل می‌شود و درواقع حالت پایدار برای قرارگیری الکترون ها حالتی است که کمترین نیرو به الکترون ها وارد شود.

جدول I

انرژی کولنی موقعیت الکترون‌ها در سلول معیوب سیم باینری بر اساس قطبش سلول قبلی

Prev. Cell Logic	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4
Zero	0.0089309	0.0092492	0.015224	0.013423
One	0.0092492	0.0089309	0.013423	0.015224

حال که موقعیت الکترون در سلول معیوب مشخص شد، باید منطق سلول بعد از سلول معیوب را مشخص کنیم. برای حالت دوم، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که اگر یک سلول معیوب و الکترون آن در موقعیت ۱ یا ۲ باشد، سلول بعدی به ترتیب قطبش یک و صفر را به خود خواهد گرفت. انرژی کولنی برای هر قطبش محاسبه شده و حداقل انرژی کولنی بعنوان قطبش هدف در نظر گرفته شده است. انرژی کولنی هر قطبش در جدول II نمایش داده شده است.

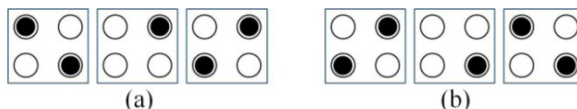
می‌توان از جدول I نتیجه گرفت که موقعیت های ۳ و ۴ در سلول معیوب نمی‌توانند توسط تک الکترون اشغال شوند، ولی جهت داشتن نتایج شبیه‌سازی کامل، این دو حالت نیز در جدول II در نظر گرفته شده‌اند.

جدول II

انرژی کولنی قطبش سلول بعدی در سیم باینری بر اساس موقعیت الکترون در سلول معیوب

Faulty Cell Position	Next Cell Logic Zero	Next Cell Logic One
Position 1	0.015224	0.013423
Position 2	0.013423	0.015224
Position 3	0.0089309	0.0092492
Position 4	0.0092492	0.0089309

شکل ۷ تاثیر وجود یک سلول معیوب در ایجاد خطا در سیم باینری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (a) می‌بینید، اگر سلول سمت چپ دارای مقدار منطقی صفر باشد، الکترون در سلول معیوب به موقعیت ۱ خواهد رفت و سلول سمت راست، مقدار منطقی یک را به خود خواهد گرفت و همان‌طور که در شکل (b) می‌بینید، اگر سلول سمت چپ دارای مقدار منطقی یک باشد، سلول معیوب دارای الکترون در موقعیت ۲ خواهد بود و سلول سمت راست، مقدار منطقی صفر را به خود خواهد گرفت. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، اگر یک نقص تک الکترون در سیم باینری حادث شود، مقدار منطقی آن سیم، معکوس خواهد شد.



شکل ۷: تاثیر سلول معیوب بر سیم باینری

بررسی این نقص در QCA از آن جهت دارای اهمیت است که الکترون جدا شده از سلول QCA که تحت عوامل مختلفی میتواند از مکان اصلیش دور شود و باعث تک الکترونی شدن سلول QCA شود، انرژی مورد نیاز برای برگشت به مکان اصلیش را ندارد و بنابراین نقصی که در مدارات CMOS می تواند باعث ایجاد خطای گذرا شود، در مدارات QCA میتواند باعث یک خطای ماندگار شود.

این نقص تاکنون در مدارات QCA مورد بررسی قرار نگرفته بود و همانگونه که قبلا بیان شد بیشتر بررسی های گذشته معطوف به جابجایی خود سلول QCA حین ساخت بوده است و نه نقص داخل سلول QCA و باتوجه به این موضوع نمی توان مقایسه ای از نتایج مقالات گذشته و مقاله حاضر داشته باشیم زیرا ماهیت خطا متفاوت است و فقط می توان بیان داشت که رخداد خطای تک الکترونی در مدارات QCA یک نقص اساسی است که می تواند باعث خطاهای فاحش و ماندگاری در مدارات این فن آوری شود، بدین منظور قبل از آنکه ساخت مدارات QCA تجاری شود، باید راهکاری برای افزایش مقاومت این مدارات در برابر چنین نقصی منظور شود.

بحث

انواع مختلف نقص های نابجایی سلول و الکترون ممکن است طی تولید مدارات و ادوات QCA حادث شود که از مهمترین آنها نقص تک الکترونی درون سلول QCA است که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله، مدلسازی خطای تک الکترونی در سیم باینری بیان شده است. نتایج مدل سازی نشان می دهد که اگر یک نقص کاهش تک الکترون، در سیم باینری حادث شود و تنها یکی از سلولها دچار این نقص شود، مقدار منطقی آن سیم معکوس خواهد شد و دیگر عملکرد اصلی را از خود نشان نخواهد داد. علاوه بر آن چون الکترون جدا شده از سلول، انرژی برگشت به مکان اصلیش را ندارد، این نقص باعث یک خطای ماندگار در مدار QCA می شود، درحالیکه چنین نقصی در CMOS فقط خطای گذرای را ایجاد می کند. همچنین بررسی نتایج مقالات گذشته نشان می دهد که نقصهای دیگری مانند جابجایی سلول، چنین تاثیر فاحشی را در مدار QCA بجا نخواهد گذاشت، بنابراین قبل از آنکه این فن آوری به تولید انبوه برسد، باید بدنبال راهکارهایی برای کاهش تاثیرات این نقص در مدارات QCA لحاظ شود.

مراجع

- 1.C. S. Lent, P. D. Tougaw, W. Porod, and G. H. Bernstein, "Quantum Cellular Automata," *Nanotechnology*, Vol. 4, No. 1, pp. 49-57, 1993.
- 2.M. B. Tahoori, J. Huang, M. Momenzadeh, and F. Lombardi, "Testing of Quantum Cellular Automata," *IEEE Trans. on Nanotechnology* vol. 3, No. 4, pp. 432-442, Dec. 2004.
- 3.M. Momenzadeh, M. B. Tahoori, J. Huang, and F. Lombardi, "Quantum Cellular Automata: New Defects and Faults for New Devices," proceedings of 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004.
- 4.M. Momenzadeh, J. Huang, and F. Lombardi, "Defect Characterization and Tolerance of QCA Sequential Devices and Circuits," proceedings of 20th IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, 2005.
- 5.M. Momenzadeh, J. Huang, M. B. Tahoori, and F. Lombardi, "Characterization, Test, and Logic Synthesis of And-Or-Inverter (AOI) Gate Design for QCA Implementation," *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* vol. 24, No. 12, pp. 1881-1893, Dec. 2005.
- 6.J. Huang, M. Momenzadeh, M. B. Tahoori, and F. Lombardi, "Defect Characterization for Scaling of QCA Devices," proceedings of 19th IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, 2004.
- 7.P.Gupta, N. K. Jha, and L. Lingappan, "A Test Generation Framework for Quantum Cellular Automata Circuits," *IEEE Trans. on VLSI Systems* vol. 15, No. 1, pp. 24-36, Jan. 2007.
- 8.M. Mahdavi, M. A. Amiri, and S. Mirzakuchaki, "SEU Effects on QCA

Circuits,” Proceedings of IEEE International Conference on Test and Diagnosis, China, Apr. 2009.

9.P. D. Tougaw and C. S. Lent, ”Dynamic Behavior of Quantum Cellular Automata,” J. Appl. Phys. vol. 80, No. 8, pp. 4722-4735, Oct. 1996.

10.P. D. Tougaw, C. S. Lent, and W. Porod, ”Bistable Saturation in Coupled Quantum-dot Cells,” J. Appl. Phys. vol. 74, No. 5, pp. 3558-3565, Sep. 1993.

11.P.D. Tougaw and C.S. Lent, ”Logical Devices Implemented Using Quantum Cellular Automata,” J. Appl. Phys. vol. 75(3), pp. 1818-1825, 1994.

12.M. A. Amiri, M. Mahdavi, and S. Mirzakuchaki, ”QCA Implementation of a Mux-Based FPGA CLB,” proceedings of International Conference On Nanoscience and Nanotechnology, Australia, Feb. 2008, pp. 141-144.

13.K. Hennessy and C. S. Lent, ”Clocking of Molecular Quantum-dot Cellular Automata,” J. Vac. Sci. Technol. vol. 19, No. 5, pp. 1752-1755, Sep. 2001.

14.K. Kim, K. Wu, and R. Karri, ”The Robust QCA Adder Designs Using Composable QCA Building Blocks,” IEEE Trans. On Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems vol. 26, NO. 1, Jan. 2007.

15.V. Vankamamidi, M. Ottavi, and F. Lombardi, ”Two-Dimensional Schemes for Clocking/Timing of QCA Circuits,” IEEE Trans. On Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems vol. 27, No. 1, pp. 34-44, Jan. 2008.

16.Heumpil Cho and Earl E. Swartzlander, ”Adder Designs and Analyses for Quantum-Dot Cellular Automata,” IEEE Trans. on Nanotechnology, vol. 6, No. 3, pp. 374-383, May. 2007.

