



طراحی و شبیه‌سازی یک جمع‌کننده کامل دودویی مبتنی بر حلقه‌های کوانتومی

امیر تقوی مطلق و حجت الله خواجه صالحانی*

گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد واحد دماوند، دماوند، ایران

چکیده: در این مقاله، با استفاده از هشت حلقه کوانتومی که از هر یک حلقه‌ها شار مغناطیسی $\Phi_c = \frac{\phi_c}{2}$ عبور کرده است یک مدار جمع‌کننده کامل دودویی طراحی شده است. حلقه‌های کوانتومی به دو گروه چهارتایی تقسیم شده‌اند که به صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. این آرایش از دو طرف بطور متقارن به الکترودهای نیمه بی‌نهایت متصل شده‌اند و سه ولتاژ گیت نیز به عنوان ورودی‌های جمع‌کننده کامل به حلقه‌ها اعمال شده است. هامیلتونی سیستم با استفاده از روش بستگی قوی تقریب زده شد و جریان عبوری از آن با استفاده از روش تابع گرین غیرتعادلی محاسبه شده است. مشخصه‌های هدایت الکتریکی-انرژی و جریان-ولتاژ برای مقادیر متفاوت ولتاژهای گیت بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهند این مدار کوانتومی همانند مدار یک جمع‌کننده کامل دودویی رفتار می‌کند.

واژگان کلیدی: ترابرد کوانتومی، حلقه کوانتومی، جمع‌کننده کامل، تابع گرین.

hksalehani@damavandiau.ac.ir

حلقه‌های کوانتومی از جمله نانوساختارهایی هستند که اندازه آنها از مرتبه طول فاز همدوسی^۲ الکترونها می‌باشد و به واسطه ساختار هندسی خاص و منحصر به فردشان پدیده‌های کوانتومی همچون نوسان آهارانوف-بوهم^۳ [۹] و جریان ماندگار^۴ [۱۰] را نمایش می‌دهند. بطور کلی حلقه‌های کوانتومی توسط دو مدل شبیه‌سازی می‌شوند که عبارتند از: مدل گسسته و مدل پیوسته. در مدل گسسته حلقه‌ها از M نقطه شبکه با N الکترون تشکیل شده است که الکترونها می‌توانند از یک نقطه شبکه به نقطه

۱- مقدمه

در سالهای اخیر و به واسطه پیشرفت‌های حاصل شده در تکنولوژی، امکان ساخت نانو ساختارهایی وجود دارد که می‌توانند به عنوان اجزای اصلی در آینده صنعت الکترونیک باشند. مطالعه ترابرد الکترونی در این نانوساختارها همواره مورد توجه پژوهشگران بوده و پس از اولین مطالعه انجام شده توسط آویرام و راتنر^۱ [۱]، به تازگی نیز مطالعات تئوری و تجربی متفاوتی درباره ترابرد الکترون در سیستم‌های متفاوت انجام شده است [۲-۸].

² Coherence phase

³ Aharonov - Bohm

⁴ Persistent current

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳

¹ Aviram - Ratner

ورودی گیتها و جریان عبوری نیز به عنوان خروجی گیت در نظر گرفته شد.

در مرجع [۱۹]، ترابرد الکترون در حلقه کوانتومی دوگانه هم مرکز مورد بررسی قرار گرفته شد. در این ساختار حلقه بیرونی به الکترونها متصل است و ارتباط آن با حلقه داخلی از طریق جفت شدگی تونلی است. با مطالعه نوسانهای آهارانوف-بوهم در منحنی هدایت الکترونیکی، تاثیر جفت شدگی بین حلقه‌ها، دما و برهمکنش الکترونها بر منحنی هدایت الکترونیکی و جریان عبوری از حلقه بررسی و با اعمال شارمغناطیسی ثابت عبوری از حلقه و ولتاژ گیت نامتقارن به نقاطی از حلقه بیرونی یک گیت نانومقیاس XOR طراحی شد.

با بررسی ترابرد اسپینی در حلقه های کوانتومی و محاسبه قطبش اسپینی در حضور برهمکنش اسپین-مدار راشبا، انواع گیت‌های منطقی AND، OR، NOT و NAND طراحی شد [۲۰-۲۱]. در مرجع [۲۲]، قطبش اسپینی و انتشار زمانی هارمونیکهای مربوط به تابش انجام شده در حلقه ای که تحت تاثیر میدان مغناطیسی متغییر قرار دارد مورد مطالعه قرار گرفته شده است. با اختصاص ۰ و ۱ به شدتهای بالا و پایین تابشهای گسیل شده از حلقه کوانتومی به عنوان خروجی یک گیت منطقی NOT طراحی شد [۲۲]. با بررسی منابع و مطالعات انجام شده مشاهده می شود هر چند از نانوساختارهایی همچون حلقه های کوانتومی در طراحی انواع گیت‌های کوانتومی استفاده شده است اما تاکنون با استفاده از این نانوساختارها یک مدار جمع کننده کامل طراحی نشده است. در این مقاله یک جمع کننده کامل دودویی شامل هشت حلقه کوانتومی که از هر حلقه شار مغناطیسی ثابت $\phi = \phi_0/2$ عبور می کند، شبیه سازی می شود. کل سیستم متشکل از هشت حلقه کوانتومی به دو بخش مجزا (حاصل جمع ورودی ها و مقدار نقلی خروجی) تقسیم شده و در هر بخش دو الکترون نیمه بی نهایت (چشمه - درآشامنده) بصورت متقارن به دو طرف ساختار کوانتومی متصل شده اند. همچنین ولتاژهای گیت اعمالی V_a, V_b, V_c نقش ورودی‌های سیستم را دارند که V_c مقدار نقلی ورودی جمع کننده کامل است و V_s نیز یک ولتاژ ثابت است که همواره به حلقه اعمال شده و از نظر اندازه با ولتاژ ورودی ها یکسان است. برای مدل سازی از مدل

دیگر بپردازیم. مطالعه ترابرد الکترون در حلقه های کوانتومی و استفاده از تداخل های سازنده و ویرانگر امواج الکترونی در این ساختارهای حلقوی شکل، امکان طراحی و شبیه سازی انواع گیت‌های منطقی کوانتومی را بوجود آورده است [۱۱-۲۲]. در مراجع [۱۱-۱۹] ترابرد الکترون در سیستم هایی شامل یک یا چند حلقه کوانتومی که از هر حلقه شار مغناطیسی ثابتی عبور می کند و از دو طرف به الکترونها چشمه^۵ و درآشامنده^۶ متصل شده اند مورد بررسی قرار گرفته شده است. با اعمال ولتاژهای گیت به نقاطی از حلقه ها به عنوان ورودی سیستم، انواع گیت‌های منطقی کوانتومی طراحی شده است. مایتی^۷ با استفاده از جفت حلقه کوانتومی که از هر حلقه شار مغناطیسی $\phi = \phi_0/2$ (که ϕ_0 کوانتوم شار است) عبور می کند، یک گیت منطقی AND طراحی و شبیه سازی کرده است [۱۱] و در این آرایش حلقه‌ها به صورت سری به یکدیگر متصل شدند و از دو سمت به الکترون فلزی نیمه بی نهایت متصل شده و دو ولتاژ گیت به بازوی زیرین حلقه‌ها اعمال می شود. این ولتاژهای ورودی نقش ورودی های گیت AND را بازی می کنند. نتایج بدست آمده براساس نمودارهای هدایت - انرژی و جریان - ولتاژ برای دو حالت جفت شدگی قوی و ضعیف^۸ نشان می دهد که ساختار در نظر گرفته شده با در نظر گرفتن ولتاژهای گیت اعمالی به عنوان ورودی و جریان عبوری از حلقه به عنوان خروجی همانند یک گیت AND رفتار می کند. او با تغییر تعداد حلقه ها، آرایش اتصال آنها و همچنین، تغییر نقاط اعمال ولتاژ گیت، سایر گیت‌های منطقی همچون OR، XOR، XNOR، NAND، NOR و NOT را طراحی کرد [۱۲-۱۷].

خانزادی و خواجه صالحانی با استفاده از سه حلقه کوانتومی و استفاده از مدل بستگی قوی^۹ و همچنین روش تابع گرین به طراحی و شبیه سازی انواع گیت های منطقی AND، OR، NOT، XOR، XNOR، NAND و NOR پرداختند [۱۸]. در این مقاله نیز ولتاژهای گیت اعمالی به نقاط متفاوت به عنوان

⁵ Source

⁶ Drain

⁷ Maiti

⁸ Strong and weak coupling

⁹ Tight binding model

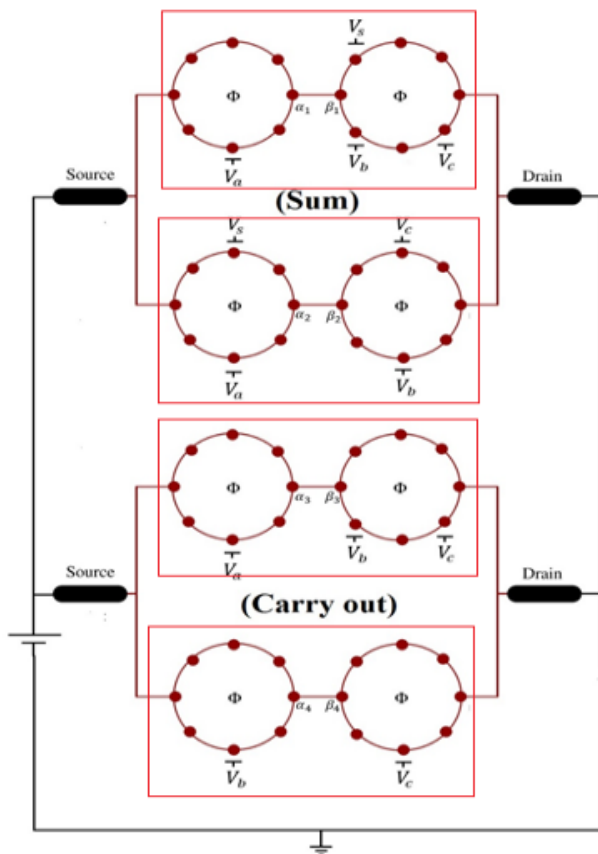
که در اینجا T احتمال انتقال الکترون در کل سیستم، e بار الکترون و h بیانگر ثابت پلانک است. براساس تابع گرین^{۱۱} حلقه‌های کوانتومی و الکترودهای متصل به آنها، احتمال انتقال الکترونی برابر است با [۲۴]:

$$T = \text{Tr}[\Gamma_S G_R^a \Gamma_D G_R^a] \quad (۴)$$

که G_R^a و G_R^r به ترتیب تابع گرین تاخیری و پیشرفته حلقه‌هاست و تحت تاثیر جفت شدگی چشمه و درآشامنده است. همچنین، Γ_D و Γ_S توابع انتشار هستند و به ترتیب مشخصه جفت شدگی سیستم با چشمه و درآشامنده هستند. برای یک سیستم کامل شامل حلقه‌های کوانتومی، چشمه و درآشامنده تابع گرین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G = (E - H)^{-1} \quad (۵)$$

که در آن E انرژی الکترونیهای تزریق شده از چشمه است.



بستگی قوی و برای انجام محاسبات از روش تابع گرین^{۱۰} استفاده شده است. با محاسبه منحنی مشخصه های جریان-ولتاژ و همچنین، هدایت الکتریکی به صورت تابعی از انرژی نشان داده می شود به ازای ورودی‌های مناسب ساختار کوانتومی پیشنهاد شده همانند یک جمع کننده کامل دودویی رفتار می‌کند.

۲- مدل نظری جمع کننده کامل مبتنی بر حلقه های کوانتومی

شکل (۱) طرحی از یک جمع کننده کامل دودویی طراحی شده با استفاده از حلقه های کوانتومی را نشان می‌دهد. طبق روابط بولی [23] در یک جمع کننده کامل حاصل جمع ورودی ها و مقدار نقلی خروجی برابر است با:

$$\text{Sum} = A \oplus B \oplus C = A(BC + B'C') + A'(B'C + BC') \quad (۱)$$

$$\text{Carry out} = AB + AC + BC = A(B + C) + BC \quad (۲)$$

رابطه (۱) حاصل جمع ورودی ها (A و B و C) و رابطه (۲) مقدار نقلی را نشان می‌دهد. برای اینکه ساختار کوانتومی مناسب با استفاده از روابط (۱) و (۲) شبیه سازی شود، این روابط به گیت-های پایه بسط داده شده‌اند. به عبارت دیگر هر کدام از بلوک های قرمز رنگ بیانگر هر یک از زوج حلقه های کوانتومی است که به صورت سری به هم دیگر جفت شده‌اند (شکل (۱)). وجود ولتاژهای ورودی بر نقاط متفاوت شبکه، وجه تمایز این جفت حلقه‌ها از همدیگر هستند و روابط مورد نظر را پیاده سازی می‌کنند.

برای محاسبه هدایت الکتریکی (g) در حلقه‌های کوانتومی از فرمول هدایت لاندرو [۲۴] استفاده شده که در دمای پایین و ولتاژ بایاس بصورت زیر خواهد بود:

$$g = \frac{2e^2}{h} T \quad (۳)$$

¹⁰ Green function

¹¹ Green function

مقاله در دمای صفر درجه فرض شده است. (نتایج و محاسبات در دماهای پایین و نزدیک به صفر نیز معتبر است.) لازم به ذکر است برای سادگی در محاسبات مقادیر $c=e=h=1$ در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

انرژی نقاط شبکه حلقه کوانتومی برابر با صفر در نظر گرفته می شود. به عبارت دیگر $\epsilon_i = 0$ ولی در نقاط a, b, c و s به دلیل اعمال مقادیر ولتاژها به ترتیب برابر V_a, V_b, V_c و V_s در نظر گرفته می شود. طبق مبنای دودویی، ورودی ها می تواند برابر با مقدار کم ارزش (۰) یا مقدار پر ارزش (۱) باشند. در محاسبات، ورودی های سیستم برابر با $V_c = V_b = V_a = 2V$ برابر مقدار پر ارزش یا یک منطقی و $V_c = V_b = V_a = 0V$ برابر مقدار کم ارزش یا صفر منطقی در نظر گرفته می شود. V_s بطور ثابت برابر با ۲ ولت است. شدت جهش بین نزدیکترین همسایه ها در حلقه های کوانتومی (t) برابر با ۳ و در الکترون ها (ϵ') و (t') به ترتیب برابر با ۰ و ۴، و همچنین انرژی فرمی (E_f) مساوی ۰ در نظر گرفته شده است. به طور کلی نتایج حاصل از این مقاله بر اساس شدت جفت شدگی قوی یعنی حالتی که ($\tau_{S(D)} \sim t$) محاسبه می شود، که مقدار جفت شدگی بین چشمه و درآشامنده با حلقه ها برابر $\tau_S = \tau_D = 2.5$ در نظر گرفته می شود. مقدار شار عبوری از هر حلقه نیز برابر طبق رابطه (۸) به ازای $n = 0$ برابر با $\varphi = \frac{\varphi_0}{2}$ در نظر گرفته شده است.

بدلیل پهنای حلقه های کوانتومی، نمی توان بطور دقیق مرزی برای شاری که از مرکز حلقه عبور می کند تعیین کرد. تقریب دیوار پتانسیل بینهایت نیز تقریب ایده آلی است و بنابراین احتمال حضور ذره حتی در نزدیکی مرکز حلقه وجود دارد. این عوامل سبب شده که از مفهوم لوله شار بینهایت نازکی که از مرکز حلقه عبور می کند، برای بررسی کمیات وابسته به شار استفاده گردد. در نمونه های تجربی حلقه های کوانتومی قطری در محدوده ۴۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر دارند. در چنین حلقه های کوچکی میدانهای مغناطیسی بزرگی برای ایجاد شار مغناطیسی کوانتومی لازم هست. برای رفع این مشکل، هد^{۱۳} و همکارانش با مطالعات تجربی بر این نوع از حلقه ها، ساختارهای نانومقیاسی را پیشنهاد

شکل ۱: مدار یک جمع کننده کامل متشکل از هشت حلقه کوانتومی که از دو بخش (Sum) و (out Carry) تشکیل شده و هر بخش بصورت متقارن به دو الکترون نیمه بی نهایت (چشمه - درآشامنده) متصل شده است. ولتاژهای متغیر aV, bV, cV و ورودی های سیستم می باشند و بر نقاط معینی از شبکه اعمال شده اند (cV مقدار نقلی ورودی در نظر گرفته شده). همچنین sV ولتاژ ثابت است و نقش NOT منطقی را ایفا می کند.

در واقع برای محاسبه تابع گرین نیاز به وارون ماتریس بی نهایت کل سیستم، شامل حلقه های کوانتومی و دو الکترون نیمه بی نهایت (چشمه و درآشامنده) است. اما برای اینکه بتوان سیستم را بصورت محدود مورد بررسی قرار داد، برای هر قسمت یک زیر ماتریس متناسب با خصوصیات آن بخش در نظر گرفته شده است. از این رو تابع گرین برای سیستم شامل حلقه های کوانتومی بصورت زیر نوشته می شود:

$$G_R = (E - H_R - \Sigma_S - \Sigma_D)^{-1} \quad (6)$$

که پارامترهای Σ_D و Σ_S نشان دهنده تابع خود انرژی^{۱۲} هستند و ناشی از جفت شدگی حلقه ها و چشمه و درآشامنده می باشند و کلیه اطلاعات مربوط به جفت شدگی در آنها وجود دارد. H_R هامیلتونی حلقه ها در غیاب برهمکنش الکترونهاست و در مدل بستگی قوی به صورت زیر تقریب زده می شود:

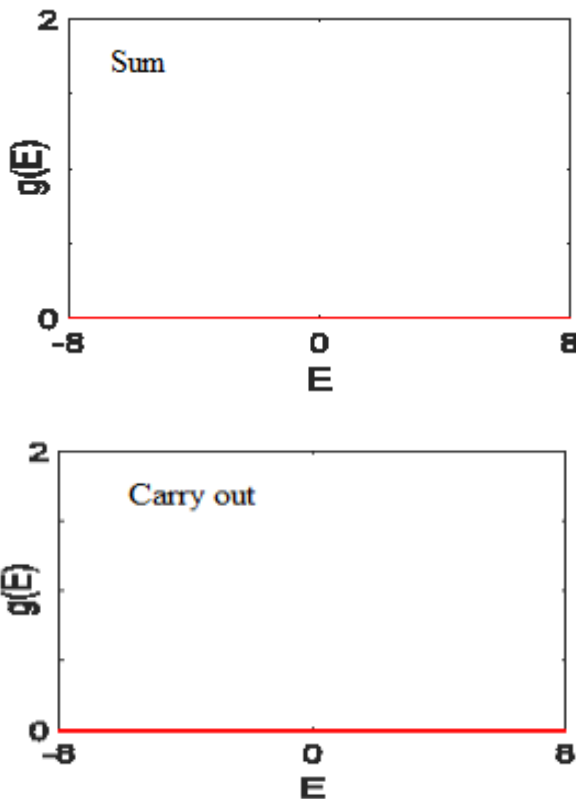
$$H_R = \sum_i (\epsilon_i + V_a \delta_{ia} + V_b \delta_{ib} + V_c \delta_{ic} + V_s \delta_{is}) c_i^\dagger c_i + \sum_{ij} (c_i^\dagger c_j e^{i\theta} + c_j^\dagger c_i e^{-i\theta}) \quad (7)$$

که در این رابطه، ϵ_i انرژی نقاط شبکه است و به نقاط a, b, c, s از حلقه ها نیز ولتاژ گیت اعمال شده است. c_i و c_i^\dagger به ترتیب عملگر نابودی و عملگر خلق یک الکترون در نقطه i و t شدت جهش بین دو نقطه همسایه در یک حلقه است. همچنین، برای سادگی در محاسبات، شدت جهش بین حلقه ها در نقاط $\alpha_1 - \beta_1, \alpha_2 - \beta_2, \alpha_3 - \beta_3$ و $\alpha_4 - \beta_4$ نشان داده شده در شکل (۱) هم برابر با مقدار t در نظر گرفته شده است بالا در دمای بالا از بین می رود. به این ترتیب تمامی محاسبات در این

¹² Self energy

¹³Hod

حلقه‌ها باعث شکل‌گیری حالت NOT منطقی [۱۷] برای ورودی متناظر با آن در بازوی مقابل می‌شود.

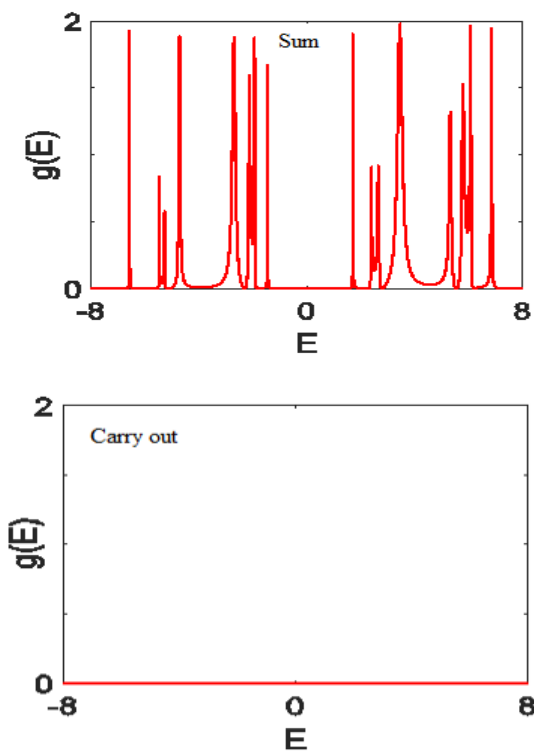


شکل ۲: نمودارهای هدایت الکتریکی بر حسب انرژی برای حاصل جمع ورودیها و مقدار نقلی مربوط به جمع کننده کامل شامل هشت حلقه کوانتومی برای حالتی که $V_a=0, V_b=0, V_c=0$ تمامی ورودی‌ها برابر با صفر منطقی است.

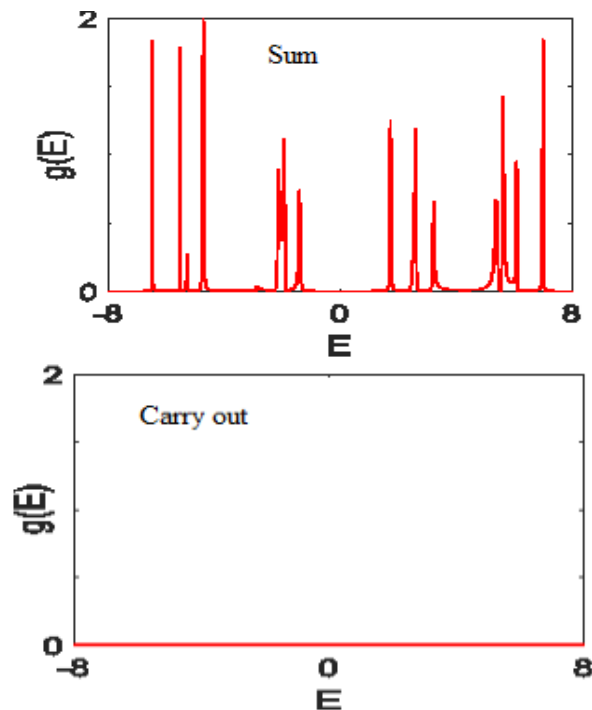
دادند که در شدت میدانهای مغناطیسی متوسط نیز خاصیت تداخل سنجی آهارانوف-بوهم را داشته باشد [۲۳-۲۶].

شکل (۲)، نمودارهای هدایت الکتریکی بر حسب انرژی الکترون را برای حاصل جمع و مقدار نقلی مربوط به ورودیهای جمع کننده کامل نشان داده در شکل (۱) برای حالتی که تمامی ورودی‌ها (V_c, V_b, V_a) برابر صفر منطقی است نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود هدایت الکتریکی نیز برابر با صفر است. در نتیجه انتظار می‌رود، جریانهای خروجی جمع کننده نیز برابر صفر باشند. مطابق شکل (۳) اگر یکی از ورودی‌های سیستم برابر یک منطقی باشد، آنگاه در نمودار هدایت الکتریکی برای حاصل جمع ورودیها (Sum) قله‌هایی در منحنی هدایت الکتریکی در انرژی‌های معین دیده می‌شود اما نمودار هدایت الکتریکی به ازای مقدار نقلی جمع کننده (Carry out) همچنان صفر است. در حالتی که دو تا از ورودی‌های سیستم برابر یک منطقی باشند (شکل (۴))، آنگاه نمودار هدایت الکتریکی برای جمع ورودیها (Sum) برابر با صفر و نمودار هدایت الکتریکی مربوط به مقدار نقلی (Carry out) دارای قله‌هایی در انرژی‌های مشخص است. طبق شکل (۵) اگر تمامی ورودی‌ها برابر یک منطقی باشند، آنگاه نمودارهای هدایت الکتریکی برای حاصل جمع ورودیها (Sum) و مقدار نقلی (Carry out) دارای قله‌هایی هستند که منجر به جریان خروجی غیر صفر می‌شوند.

درواقع تمامی قله‌های تشدید هدایت الکتریکی با حالت‌های انرژی سیستم مرتبط است و بیانگر طیف هدایت الکترونی حلقه‌های کوانتومی است. همچنین، دامنه احتمال عبور الکترون از چشمه به درآشامنده، به تداخل کوانتومی امواج الکترونی در دو بازوی بالایی و پایینی حلقه بستگی دارد. چون طول دو بازوی بالایی و پایینی حلقه کوانتومی با یکدیگر برابرند، اگر حلقه‌ها بصورت متقارن به چشمه و درآشامنده متصل شده باشند و تحت شار مغناطیسی Φ قرار بگیرند و هیچ ولتاژی به نقاط شبکه اعمال نشود، دامنه احتمال عبور الکترون از حلقه برابر صفر خواهد بود $(T=0)$. زیرا تداخل کوانتومی موجهای بازوی بالایی و بازوی پایینی حلقه کوانتومی ویرانگر هستند. بنابراین، هنگامی که ورودی‌های سیستم مورد نظر برابر صفر باشند، احتمال انتقال الکترون امکان پذیر نیست و در نتیجه جریانی در درآشامنده پدید نخواهد آمد. از سوی دیگر، وجود ولتاژ ثابت V_s در بعضی از

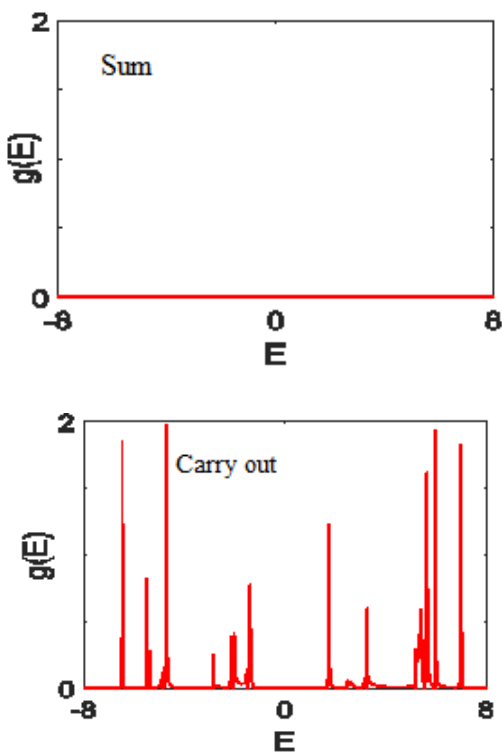


ج) $V_a=0, V_b=0, V_c=2$

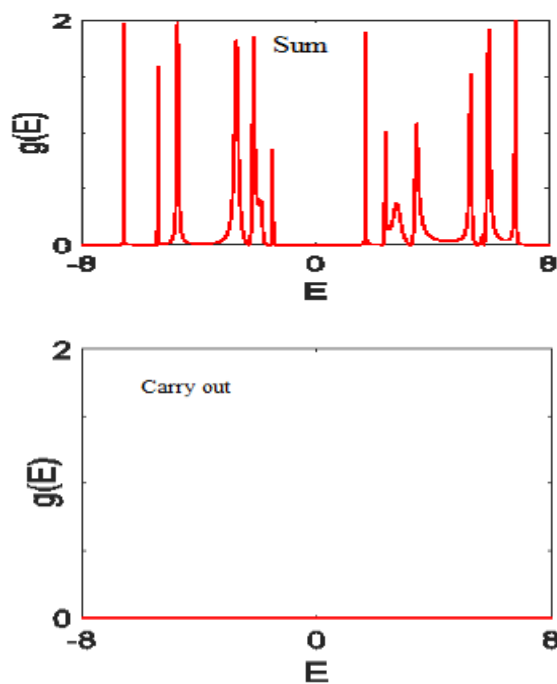


الف) $V_a=2, V_b=0, V_c=0$

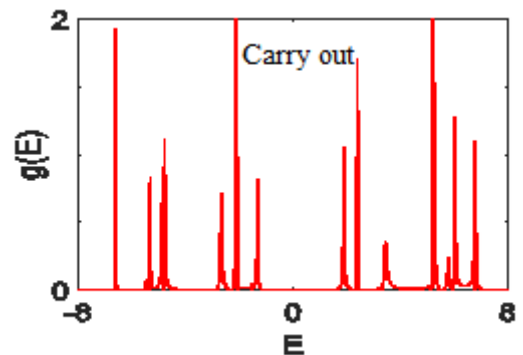
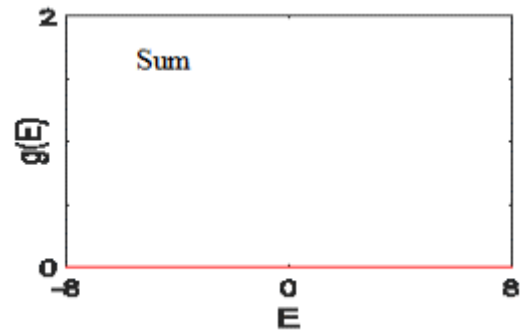
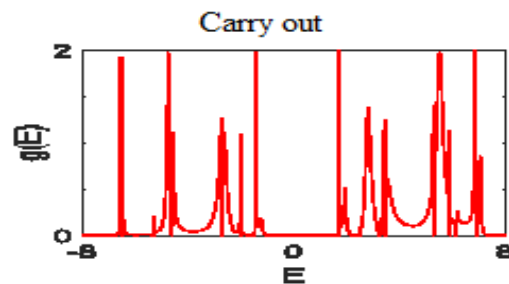
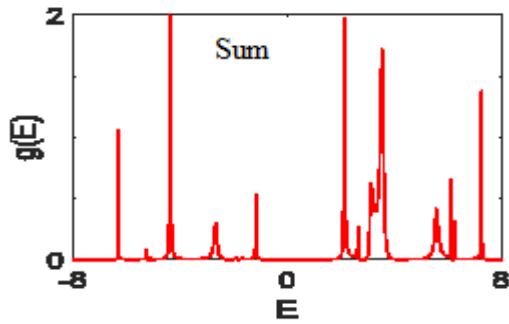
شکل ۳. نمودارهای هدایت الکتریکی بر حسب انرژی برای حاصل جمع ورودیها و مقدار نقلی مربوط به جمع کننده کامل شامل هشت حلقه کوانتومی برای حالتی که یکی از ورودیها برابر یک منطقی است



الف) $V_a=2, V_b=2, V_c=0$



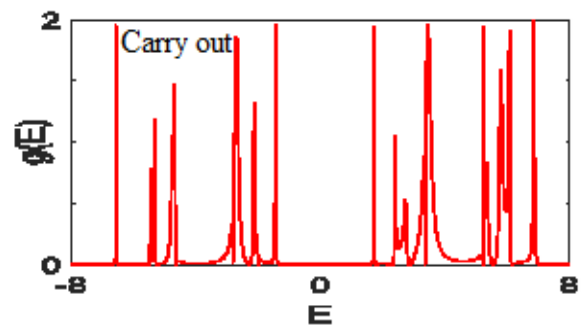
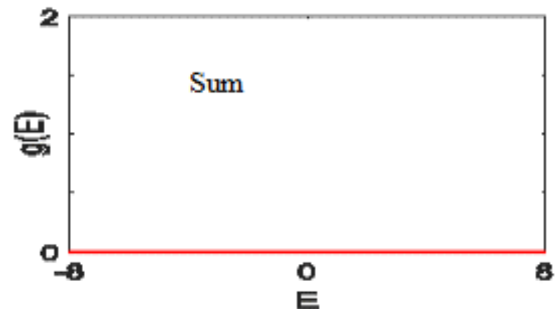
ب) $V_a=0, V_b=2, V_c=0$



شکل ۵. نمودارهای هدایت الکتریکی بر حسب انرژی برای حاصل جمع ورودیها و مقدار نقلی مربوط به جمع کننده کامل شامل هشت حلقه کوانتومی برای حالتی که تمامی ورودی های سیستم برابر یک منطقی است. $V_a=2, V_b=2, V_c=2$

$V_a=2, V_b=0, V_c=2$ (ب)

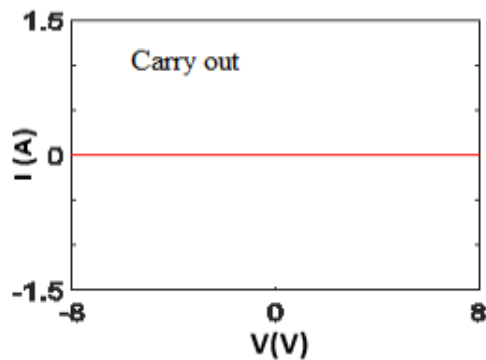
برای درک بهتر مفاهیم بالا، می توان به بررسی نمودار جریان الکتریکی بر حسب اختلاف پتانسیل اعمال شده بین دو الکترود پرداخت. در رابطه (۹) جریان عبوری از حلقه های کوانتومی بر اساس انتگرال تابع انتقال بدست می آید و همچنین، تابع انتقال نیز طبق رابطه (۳) با معلوم بودن هدایت الکتریکی بدست می آید. شکل (۶) نمودارهای جریان الکتریکی بر حسب اختلاف پتانسیل برای حاصل جمع ورودیهای جمع کننده کامل و مقدار نقلی آن را نشان می دهد. در این حالت تمامی ورودی ها برابر صفر است و هیچ جریانی خروجی در سیستم وجود ندارد. مطابق شکل (۷)، اگر یکی از ورودی ها برابر ۲ ولت باشد، تنها در بخش حاصل جمع جریان الکترونی وجود دارد و هنگامی که دو تا از ورودی ها برابر با ۲ ولت باشد (شکل (۸)) صرفا در بخش مقدار نقلی وجود جریان مشهود است. در واقع نتایج فوق مطابق با نمودارهای هدایت الکتریکی-انرژی است. زیرا جریان ناشی از انتقال الکترونی به دلیل وجود قله های تشدید موجود در نمودار هدایت الکتریکی است. همچنین، افزایش ولتاژ بایاس، پتانسیل الکترونها را افزایش می دهد و به موجب آن سطوح انرژی حلقه های



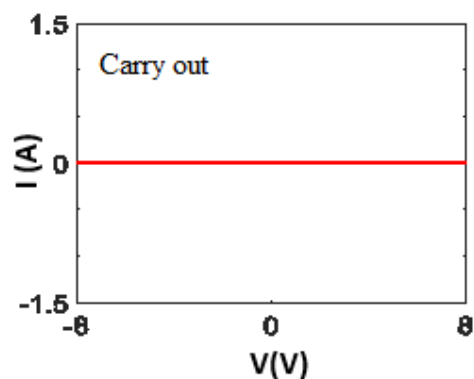
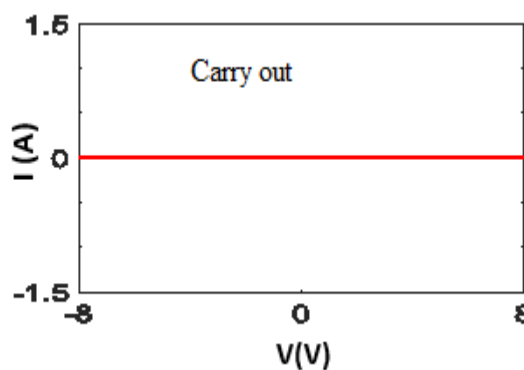
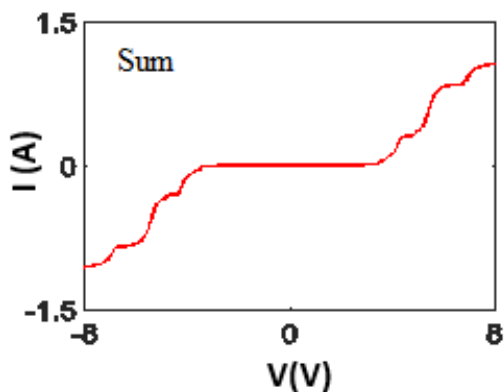
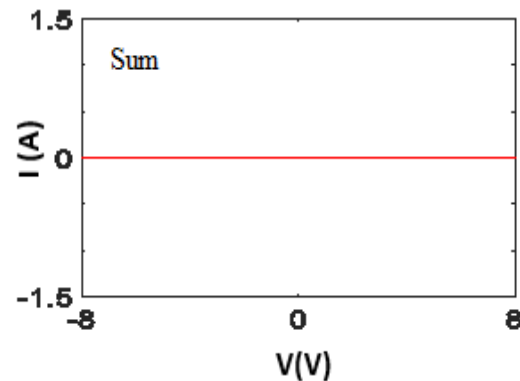
$V_a=0, V_b=2, V_c=2$ (ج)

شکل ۴. نمودارهای هدایت الکتریکی بر حسب انرژی برای حاصل جمع ورودیها و مقدار نقلی مربوط به جمع کننده کامل شامل هشت حلقه کوانتومی برای حالتی که دو تا از ورودی ها برابر یک منطقی است.

کوانتومی بیشتر می‌شود، در نتیجه موجب افزایش جریان و افزایش شیب صعودی منحنی آن می‌شود.



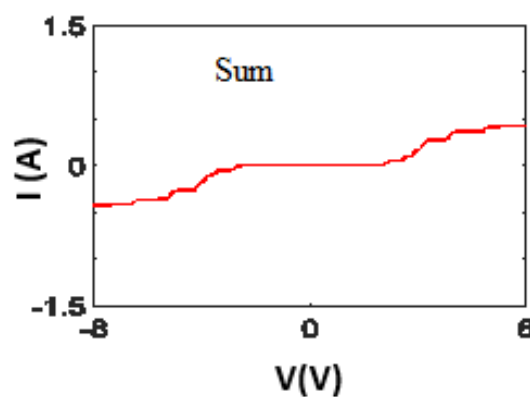
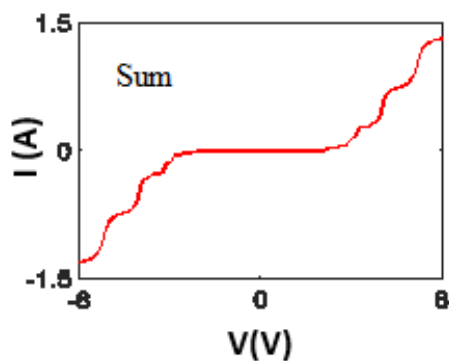
$V_a=2, V_b=0, V_c=0$ (الف)

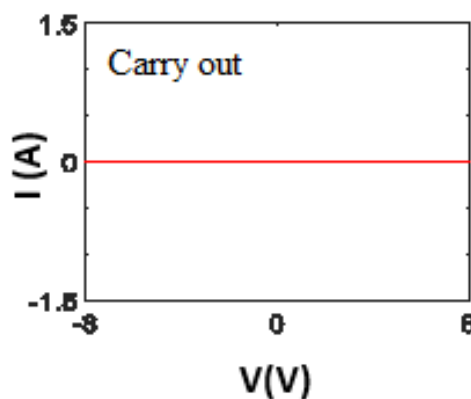
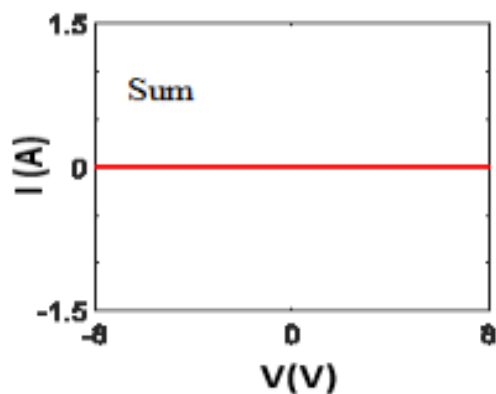


$V_a=0, V_b=2, V_c=0$ (ب)

شکل ۶ نمودارهای جریان الکتریکی بر حسب اختلاف پتانسیل برای حاصل جمع ورودیها و مقدار نقلی مربوط به جمع کننده کامل شامل هشت حلقه کوانتومی برای حالتی که تمام ورودی‌های سیستم برابر صفر منطقی است.

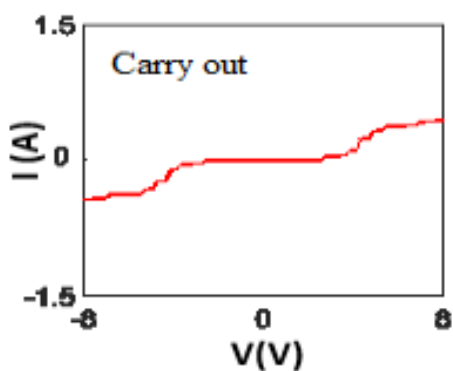
$V_a=0, V_b=0, V_c=0$



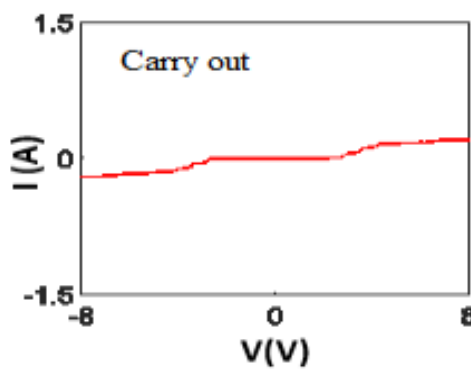
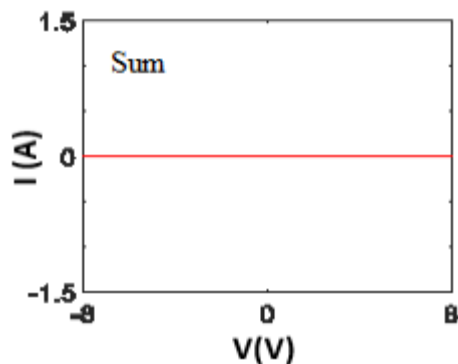
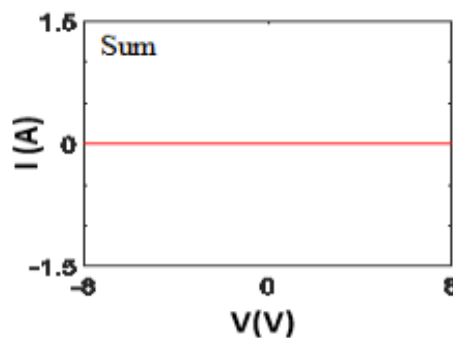


ج) $V_a=0, V_b=0, V_c=2$

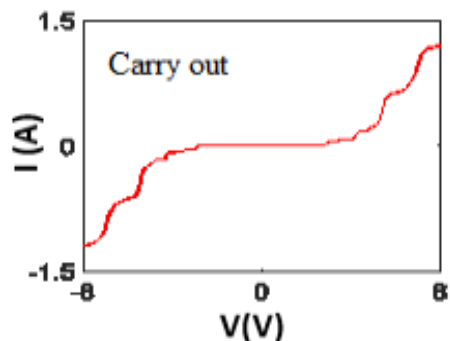
شکل ۷. نمودارهای جریان الکتریکی بر حسب اختلاف پتانسیل برای حاصل جمع ورودی‌ها و مقدار نقلی مربوط به جمع کننده کامل شامل هشت حلقه کوانتومی برای حالتی که که یکی از ورودی‌های سیستم برابر یک منطقی است.



ب) $V_a=2, V_b=0, V_c=2$



الف) $V_a=2, V_b=2, V_c=0$



ج) $V_a=0, V_b=2, V_c=2$

شکل ۸. نمودارهای جریان الکتریکی بر حسب اختلاف پتانسیل برای حاصل جمع ورودی‌ها و مقدار نقلی مربوط به جمع کننده کامل شامل هشت حلقه کوانتومی برای حالتی که دو تا از ورودی‌های سیستم برابر یک منطقی است.

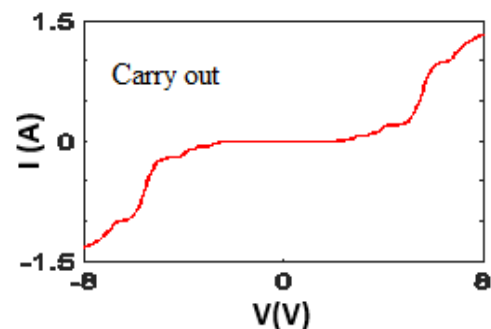
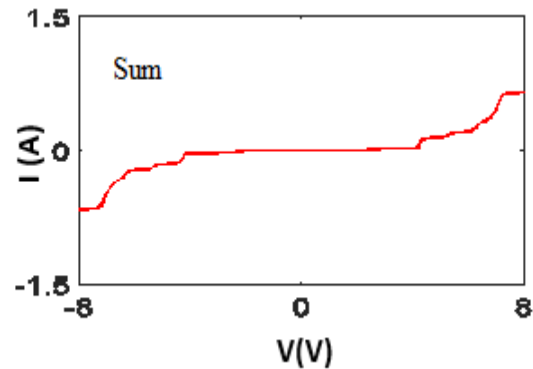
جریان-ولتاژ تشریح شده است. طبق نتایج هنگامی که حاصل جمع (Sum) در قسمت خروجی جمع کننده کامل برابر یک (منطقی) خواهد شد که همه ورودی‌ها و یا یکی از ورودی‌ها برابر یک باشد. همچنین، مقدار نقلی خروجی (Carry out) زمانی برابر یک منطقی می‌شود که همه ورودی‌ها و یا دو تا از ورودی‌ها برابر یک باشند. به طور واضح مشخص است که سیستم فوق مطابق با مشخصه جمع کننده کامل دودویی عمل می‌کند.

جدول (۱): جدول درستی جمع کننده کامل براساس ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم در ولتاژ بایاس ۶ ولت

$V_c(V)$	$V_b(V)$	$V_a(V)$	$I_{(sum)}(A)$	$I_{(carry\ out)}(A)$
0	0	0	0	0
0	0	2	0.367	0
0	2	0	0.817	0
0	2	2	0	0.174
2	0	0	0.728	0
2	0	2	0	0.378
2	2	0	0	0.643
2	2	2	0.215	0.919

مراجع

- [1] A. Aviram, M. A., Ratner, Molecular Rectifiers. Chemical physics letters, 29(2), 277, 1974.
- [2] V. Alba, "Entanglement and quantum transport in integrable systems", Physical Review B, 97(24), 245135, (2018).
- [3] M. Thoss, & F. Evers, "Perspective: Theory of quantum transport in molecular junctions". The Journal of chemical physics, 148(3), 030901, 2018.
- [4] A. Shedbalkar, & B. Witzigmann, "Non equilibrium Green's function quantum transport for green multi-quantum well nitride light emitting



شکل ۹ نمودارهای جریان الکتریکی بر حسب اختلاف پتانسیل برای حاصل جمع ورودی‌ها و مقدار نقلی مربوط به جمع کننده کامل شامل هشت حلقه کوانتومی برای حالتی که تمامی ورودی‌های سیستم برابر یک منطقی است. $V_a=2, V_b=2, V_c=2$

جدول (۱)، جریان‌های خروجی را براساس ولتاژهای ورودی سیستم نشان می‌دهد. دامنه جریان‌ها در ولتاژ بایاس ۶ ولت محاسبه شد. همانطور که مشخص است نتایج به دست آمده مطابق با جدول درستی یک جمع کننده کامل شکل گرفته است. واحد اندازه گیری جریانهای خروجی بر اساس آمپر است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله مدار یک جمع کننده کامل دودویی با استفاده از هشت حلقه کوانتومی طراحی و شبیه سازی شده است که هر حلقه تحت تاثیر شار مغناطیسی ($\phi = \phi_0/2$) قرار دارد. حلقه-های کوانتومی به دو گروه چهارتایی تقسیم شده‌اند که به صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند و به صورت متقارن به دو الکتروود (چشمه-درآشامنده) متصل می‌شوند. همچنین ولتاژهای V_c, V_b, V_a به عنوان ورودی‌های سیستم تعریف شده‌اند. مدل سازی سیستم براساس مدل بستگی قوی انجام گرفته و محاسبات عددی با استفاده از روش تابع گرین انجام شده است. نتایج بدست آمده براساس نمودارهای هدایت الکتریکی-انرژی و

- [13] S. K.Maiti, “Quantum transport in a mesoscopic ring: Evidence of an OR gate”, *Solid State Communications*, 149(39 - 40), 1684-1688, 2009.
- [14] S. K.Maiti, “XOR gate response in a mesoscopic ring with embedded quantum dots”. *Solid State Communications*, 149(39-40), 1623-1627, 2009.
- [15] S. K.Maiti, “A Mesoscopic Ring as a XNOR Gate: An Exact Result”, *Journal of the Physical Society of Japan*, 78(11), 114602, 2009.
- [16] S. K.Maiti, “NAND gate response in a mesoscopic ring: an exact result” *Physica Scripta*, 80(5), 2009.
- [17] S. K.Maiti, “A Mesoscopic Ring as a NOT Gate: An Exact Result” *Computational and Theoretical Nanoscience*, 7(6), 594-599, 2009.
- [18] H. Khanzadi., H. K. Salehani., “Design of Basic Logic Gates by Triple Quantum Rings. *Nanoscience and Technology*”, 2(2), 119-121, 2016.
- [19]. L.F. AL-Badry,” The electronic properties of concentric double quantum ring and possibility designing XOR gate”, *Solid State Communications*, 254, 15-20, 2017.
- [20]. L. Eslami, M. Esmaeilzadeh, “Spin-polarization and spin-dependent logic gates in a double quantum ring based on Rashba spin-orbit effect: Non-equilibrium Green's function approach.”, *Journal of Applied Physics*, 115, 084307, 2014.
- [21]. E. Dehghan, D. Sanavi Khoshnoudy, A.S. Naeimi, “NAND/AND/NOT logic gates response diodes”, *Optical and Quantum Electronics*, 50(2), 67, 2018.
- [5]. N. Ho & C. Emary, “Counting statistics of dark-state transport through a carbon nanotube quantum dot”, *Physical Review B*, 100(24), 245414, 2019.
- [6] H. Zhang, D. E. Liu, M. Wimmer, & L. P. Kouwenhoven, “Next steps of quantum transport in Majorana nanowire devices”, *Nature communications*, 10, 1-7, 2019.
- [7] M. A. Darehdor, M. R. Roknabadi, & N. Shahtahmassebi, “Effects of phonon scattering on the electron transport and photocurrent of graphene quantum dot structures”, *The European Physical Journal B*, 92(1), 1-8, 2019.
- [8]. A. Donarini, M. Niklas, M. Schafberger, P. Nicola, S. Christoph, G. Milena, “Coherent population trapping by dark state formation in a carbon nanotube quantum dot”., *Nature communications*, 10, 381, 2019.
- [9]. Y. Aharonov, D. Bohm, “Significance of electromagnetic potentials in quantum theory”, *Physical Review*, 115, 485-491, 1995.
- [10]. M. Büttiker, Y. Imry, R. Landauer, “Josephson behavior in small normal one-dimensional rings”, *Physics Letters A*, 96, 365-367, 1983.
- [11] S. K.Maiti, “Electron transport in a double quantum ring: Evidence of an AND gate”, *Physics Letters A*, 373, 4470-4474, 2009.
- [12] S. K.Maiti, “NOR gate response in a double quantum ring: An exact result” *Solid State Communications*, 149(47- 48), 2146-2150, 2009.

in series of mesoscopic quantum rings”, Modern Physics Letters B, 33(34), 1950431, 2019.

[22]. D. Cricchio, E., Fiordilino, “Quantum Ring in a Magnetic Field: High Harmonic Generation and NOT Logic Gate” Advanced Theory and Simulations., 3(7), 2000070, 2020.

[23] M. M. Mano, & M. D. Ciletti , “Digital Design: with an introduction to the Verilog HDL”, New Jersey : Pearson Education., 2013.

[24]. S. Datta, Quantum Transport, Atom to Transistor, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.

[25]. O. Hod, R. Baer, E. Rabani, “Feasible Nanometric Magnetoresistance Devices” The journal of physical chemistry. B, 108, 14807-14810, 2004.

[26]. O. Hod, R. Baer, E. Rabani, “Magnetoresistance of nanoscale molecular devices based on Aharonov-Bohm interferometry”, Journal of Physics Condensed Matter, 20, 383201, 2008.

[27]. O. Hod, R. Baer, E. Rabani, “Magnetoresistance devices based on single-walled carbon nanotubes”, Journal of the American Chemical Society, 127, 1648-1649, 2005.

[28]. O. Hod, R. Baer, E. Rabani, “Magnetoresistance of nanoscale molecular devices” Accounts of Chemical Research.. 39, 109-117, 2006.



Design and simulation of a binary full adder based on quantum rings

A.Taghavi Motlagh, H. Khajeh salehani*

Department of Electrical Engineering, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran.

Abstract: In this paper, a binary full adder circuit is designed with eight quantum rings where each ring is threaded by a magnetic flux $\varphi_0/2$. The quantum rings are divided into two categories with four rings connected to each other in parallel. They are attached symmetrically to two semi-infinite one-dimensional metallic electrodes, and three gate voltages are applied as three inputs of the full adder. The Hamiltonian of system is approximated by the tight binding method, and the calculations are performed by using Green's function formalism. The conductance-energy and current-voltage characteristics are obtained for different values of applied gate voltage. The results show this quantum circuit behaves as a binary full adder.

Keywords: Quantum Transport, Quantum ring, Full adder, Green Function