یکسوکنندگی در نانو دیود خودسوئیچ گرافنی با استفاده از آلایش گیت‌های جانبی

حسن قاضی اسدی[1] پیمان نایبی[2]

۱- دانشجوی دکترا -گروه برق- دانشکده فنی ومهندسی- واحد ساوه -دانشگاه آزاد اسلامی- ساوه- ایران
ghaziasadi@iau-saveh.ac.ir

۲- استادیار-گروه فیزیک- دانشکده فنی ومهندسی- واحد ساوه -دانشگاه آزاد اسلامی- ساوه- ایران
nayebi@iau-saveh.ac.ir

چکیده: خواص الکترونیکی و رفتار یکسوسازی دیودهای خود سوئیچ گرافنی با آلایش گیت‌های جانبی با اتم‌های نیتروژن و بور، با استفاده از روش تنگ بست تابعی چگالی، مورد بررسی قرار گرفت. آلایش گیت‌های ادوات، سبب تغییر هدایت الکتریکی نانو نوار گرافنی گیت‌ها و کانال نیمه‌هادی می‌گردد. در نتیجه، اندازه ولتاژ آستانه بایاس مستقیم به میزان قابل ملاحظه ای کاهش یافته، به صورتی که در ساختارهای ۵۶۵ آلایش یافته با اتم‌های بور و نیتروژن، این ولتاژ نزدیک به صفر است. همچنین، جریان الکتریکی عبوری در بایاس مستقیم و معکوس ادوات آلایش یافته، نسبت به ساختار غیر آلائیده، به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. در بین همه ساختارها، ساختار ۵۶۵ آلایش یافته با اتم‌های بور، دارای بیشترین نسبت یکسوسازی به میزان ۵۵۸/۵۵ است و ماکزیمم جریان عبوری در بایاس مستقیم در محدوده بایاس اعمالی نیز مربوط به این ساختار، به مقدار ۸/۵۶μA است.

واژه‌های کلیدی: دیود خودسوئیچ گرافنی، نانونوار گرافنی آرمچیر، آلایش گیت‌های جانبی، بور، نیتروژن، تنگ بست تابعی چگالی

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۰۷/۲۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر پیمان نایبی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – ساوه – دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه – دانشکده‌ی فنی و مهندسی

۱- مقدمه

اخیراً، علاقه به توسعه ادوات الکترونیکی فرکانس بالا، با استفاده از مواد جدید، به سرعت در حال افزایش است [۷-۱]. از جمله این ادوات می‌توان به افزاره مسطح جدیدی که به عنوان دیود خودسوئیچ (SSD) شناخته می‌شود، اشاره نمود [۸]. این افزاره، دو پایانه ای است و از یک کانال نیمه هادی باریک بین دو شیار عمودی پشت به پشت هم L-مانند که گیت‌های جانبی را در اطراف کانال ایجاد می‌کنند، تشکیل شده است [۸]. یکسو کننده‌های SSD در فرکانس‌هایی بسیار بالاتر از دیودهای معمول کار می‌کنند که در دمای اتاق تا حد تراهرتز می‌رسد [۱۰-۹]. همچنین، SSD ها به عنوان آشکارسازهای THz [۱۲-۱۱] و ادوات حافظه[۱۴-۱۳] نیز به کار می‌روند.

نوع جدیدی از این ادوات معرفی شده است که برای عملکرد بهتر، از گرافن با تحرک حامل بار و تراکم حامل بسیار بالا، به عنوان لایه فعال این ادوات استفاده می‌شود و از این رو، به عنوان دیود خودسوئیچ گرافنی (GSSD) نامیده شده است[۱۷-۱۵].

وستلاند[۱] و همکارانش[۱۶] با رشد اپی تاکسی[۲] گرافن روی یک زیرلایه 4H-SiC استاندارد، با دخالت هیدروژن، یکسو کننده GSSD ساختند که این ساختار بوسیله تکنیک لیتوگرافی الکترونی پرتو الکترونی[۳] (EBL) پیاده سازی شده است. همچنین، وینترز[۴] و همکارانش [۱۸] به روشی مشابه، یکسو کننده GSSD با توان معادل نویز[۵] (NEP) ۱۷۰ $pW/Hz^{1/2}$ در فرکانس ۴۹ GHz ساخته اند.

اخیراً، الدیرینی[۶] و همکارانش [۱۹ و ۱۵] دیودهای اثر میدانی نیمه هادی-عایق- فلز (MISFED) خود سوئیچ گرافنی را پیشنهاد نمودند که در آن نانو نوارهای گرافنی آرمچیر (AGNRs) با عرض‌های مختلف به عنوان گیت‌های فلزی و کانال نیمه هادی به کار رفته اند. نتایج کار آنها بیانگر آن است که کانال مانند یک نیمه هادی نوع n رفتار می‌کند که ولتاژهای مثبت (منفی) اعمالی به گیت‌های جانبی، سبب باز شدن (مسدود شدن) کانال می‌گردد.

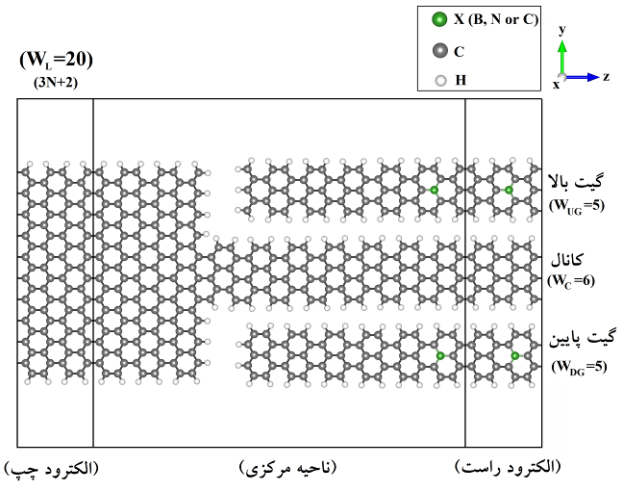
در مطالعه قبلی [۲۰]، طراحی جدیدی برای ساختار GSSD پیشنهاد کردیم که در آن گیت‌های جانبی به کانال متصل نیستند و آن را دیود خود سوئیچ گرافنی گیت‌ها منفصل (DG-GSSD) نامیدیم. در ساختار این افزاره‌ها، گیت‌های جانبی، بسته با اینکه لبه-های نانو نوار گیت‌های جانبی شان به یک یا دو اتم هیدروژن منتهی شده باشد، رفتار فلزی یا نیمه هادی داشتند. نتایج بدست آمده بیانگر آن است که ادوات DG-GSSD، نسبت به مدل قبلی با گیت‌های متصل به کانال، پایدارتر هستند و از نظر پیاده سازی، ساخت آنها آسان‌تر است. علاوه بر این، نسبت یکسوسازی در آنها بالاتر است.

در این تحقیق، روش دیگری برای یکسوسازی ساختار GSSD ارائه شده است که در آن اتم‌های ناخالصی در گیت‌های جانبی DG-GSSD ها به کار رفته اند. این اتم‌های ناخالصی، باعث تغییر ساختار باند انرژی یکی از الکترودها شده است و لذا، فرآیند یکسوسازی جریان الکتریکی رخ می‌دهد.

۲- ساختار قطعه و روش مدلسازی

به منظور بررسی خواص الکترونیکی و یکسوکنندگی ادوات آلایش یافته DG-GSSD، از ساختارهای با کانالی متشکل از یک نانونوار گرافنی آرمچیر، به عرض ۶ اتم کربن و گیت‌های جانبی به عرض ۵ اتم کربن استفاده شده است که ساختارهای ۵۶۵ نامیده می‌شوند.

شکل (۱)، ناحیه فعال ساختار افزاره را در حالت کلی بسته به نوع اتم X (B, N or C) نشان می‌دهد که در آن، گیت‌های جانبی مجزا با یک اتم ناخالصی آلایش شده اند. لازم به ذکر است که ساختار C-Doped، همان ساختار غیرآلایش یافته (Undoped) است. اتم‌های ناخالصی، در مرکز گیت‌های جانبی قرار گرفته و اتم مورد نظر (X) به رنگ سبز نشان داده شده است که می‌تواند در هر حالت، یکی از اتم-های کربن (C)، بور (B) و یا نیتروژن (N) باشد. بنابراین، ساختارها در سه حالت بدون آلایش(565-Undoped)، آلایش یافته با بور 565-B) (Doped و آلایش یافته با نیتروژن (565-N Doped) در نظر گرفته شده است. در همه ساختارها، لبه‌های نانونوارهای کانال و گیت‌های جانبی به یک اتم هیدروژن منتهی شده اند. دو گیت جانبی، ۶ سلول واحد (در حدود nm ۲۵) طول دارند؛ و الکترودهای چپ و راست به ترتیب در جهت‌های منفی و مثبت محور z، متناوب شبه نامتناهی هستند.



شکل (۱): ساختار ناحیه فعال ادوات 565-X Doped GSSD در حالت کلی بسته به نوع اتم های X (B, N or C) که با رنگ سبز نشان داده شده اند. W_L ، W_{UG}، W_C و W_{DG} به ترتیب بیانگر تعداد اتم های عرض نانو نوارهای الکترود چپ، گیت بالایی، کانال و گیت پایینی هستند

در شبیه سازی این GSSD ها، از شیوه تنگ بست تابعی چگالی (DFTB) به همراه روش تابع گرین غیر تعادلی (NEGF) تعبیه شده در نرم افزار Atomistix ToolKit (ATK) استفاده شده است[۲۱].

در ابتدا، ساختار الکترودهای چپ/ راست و ساختار ادوات با انتخاب نقاط k به روش مونکهرست –پک[۷]، به ترتیب با ۲۱×۱×۱ و۸۰×۱×۱ نقطه در ناحیه اول بریلوئن[۸]، به آرامش رسیده است. برش مش برابر ۱۵۰ Ry و شرایط همگرایی انرژی کل و نیروهای روی هر اتم به ترتیب کوچکتر از 10^{-6} eV و ۰/۰۵ eV/Å در نظر گرفته شده است. دمای الکترونیکی ادوات در ۳۰۰K ثابت فرض شده و فضای خلأیی برابر ۱۵ Å در جهت‌های x و y در نظر گرفته شده، تا از برهمکنش بین سوپر سلول‌های مجاور جلوگیری به عمل آوریم. همه شکل‌های ساختاری در اینجا با استفاده از نرم افزار VESTA رسم شده است[۲۲]. بعد از بهینه سازی ابعاد افزاره، برای محاسبات انتقال الکترونیکی، تعداد نقاط k مونکهرست-پک به ۱۰۰×۱×۱ افزایش یافته است تا محاسبات انتقال الکترونیکی با دقت بالاتری انجام پذیرد.

جریان کل به صورت اختلاف بین دو شار الکترونی وارد شده از الکترودهای چپ و راست تعریف می‌شود. بنابراین، برای محاسبه جریان الکتریکی عبوری خالص (I) از افزاره، فرمول لاندوئر- بوتیکر[۹] به روش تابع گرین غیر تعادلی (NEGF) به صورت زیر به کار رفته است[۲۳]:

$$I = \frac{2e}{h}\int_{\mu_L}^{\mu_R} T(E,V_b)\left[f(E-\mu_L)-f(E-\mu_R)\right]dE \qquad (۱)$$

که در فرمول بالا $\mu_{L,R} = E_F \pm eV_b/2$ (E_F مقدار میانگین سطح فرمی است) برابر پتانسیل شیمیایی الکترودهای راست و چپ، e بار الکترون، h ثابت پلانک، $f(E,\mu)$ تابع توزیع فرمی- دیراک[۱۰]، $T(E,V_b)$ بیانگر احتمال انتقال الکترونیکی و V_b نشان دهنده ولتاژ بایاس اعمالی به الکترودها است. $T(E,V_b)$ یک تابع انتقال وابسته به بایاس است که مجموع احتمالات انتقال همه کانال‌های موجود در انرژی E تحت بایاس ولتاژ خارجی V_b است و به صورت زیر تعریف می‌شود[۲۴]:

$$T(E,V_b) = Tr\left[G^A(E,V_b)\Gamma_R(E)G^R(E,V_b)\Gamma_L(E)\right] \qquad (۲)$$

رابطه تریسی بالا اغلب فرمول فیشر- لی[۱۱] نامیده می‌شود. توابع پهن شدگی $\Gamma_L(E)$ و $\Gamma_R(E)$ به ترتیب از انرژی‌های خود بستگی الکترودهای چپ و راست به دست می‌آیند و $G^R(E,V_b)$ و $G^A(E,V_b)$ به ترتیب توابع گرین تاخیری و پیشرفته هستند که اتصال به ناحیه مرکزی را توصیف می‌کنند. همچنین، نسبت یکسوسازی (RR) از معادله بدست می‌آید که $I(V_f)$ جریان بایاس مستقیم و $I(V_r)$ جریان بایاس معکوس است.

$$RR = \left|\frac{I(V_f)}{I(V_r)}\right| \qquad (۳)$$

۳- نتایج و بحث

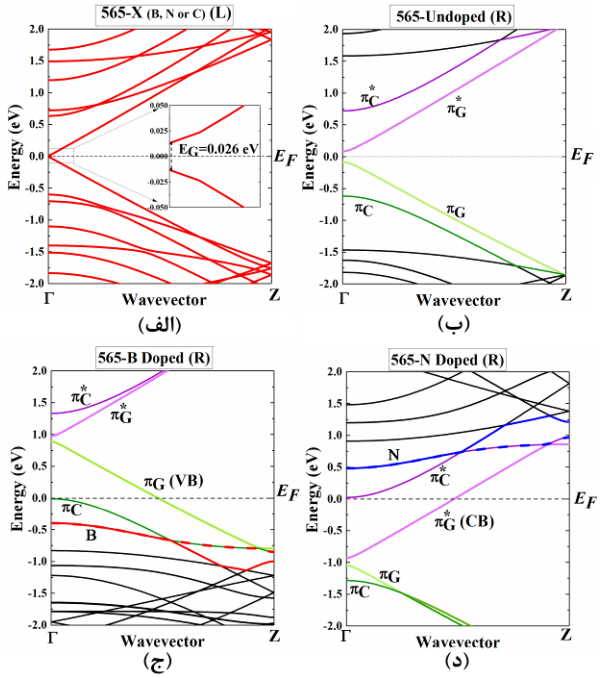
ابتدا، برای بررسی عملکرد یکسوسازی ادوات ۵۶۵ بدون آلایش و آلایش یافته با بور و نیتروژن، ساختار باند الکترودهای چپ (L) و راست (R) این ادوات، در محدوده انرژی ۲- eV تا ۲ eV در شکل (۲) رسم شده است.

همانطور که در شکل (۲) قابل مشاهده است، همه ساختارها، دارای ساختار نواری الکترودهای چپ مشابهی هستند (شکل (۲)-(الف))، اما بسته به اتم‌های X (B, N or C)، دارای ساختار نواری الکترود راست متفاوتی می‌باشند. الکترود سمت چپ به عرض ۲۰ اتم کربن، دارای رفتاری شبه فلزی است، از این رو گاف انرژی نواری مستقیم آن نزدیک صفر است. در ساختار نواری الکترودها، نوارهای انرژی π و π^* به ترتیب متناظر با ترازهای ظرفیت (VB) و ترازهای هدایت (CB) هستند. هر کدام از الکترودهای سمت راست از سه نانونوار گرافنی آرمچیر تشکیل شده است که هر یک از آنها سبب ایجاد نوارهای انرژی در ساختار نواری نشان داده شده می‌گردد.

برای وضوح بیشتر، نوارهای نزدیک تراز فرمی الکترودهای سمت راست (شکل (۲)-(ب-د))، با رنگ‌های متمایزی مشخص شده و نامگذاری شده است، به صورتی که در ساختار نواری الکترود سمت راست در همه ساختارها، نوارهای با رنگ های سبز و بنفش پررنگ به ترتیب بیانگر نوارهای انرژی π_C (VB_C) و π_C^* (CB_C) کانال هستند. از سوی دیگر، نوارهای با رنگ‌های سبز و بنفش کم رنگ به ترتیب بیانگر π_G (VB_G) و π_G^* (CB_G) گیت های جانبی می-باشند. اما در حالت B-Doped، نوارهای انرژی ناشی از اتم‌های ناخالصی بور در گیت‌های جانبی، به رنگ قرمز ممتد و قرمز خط چین با برچسب B نشان داده شده است و در حالت N-Doped، نوارهای ایجاد شده توسط اتم‌های ناخالصی نیتروژن موجود در گیت‌های جانبی، با رنگ های آبی ممتد و آبی خط چین با عنوان N متمایز گردیده است. لازم به ذکر است که در اثر تزریق اتم‌های ناخالصی های نیتروژن (بور) تراز فرمی به سمت بالا (پایین) شیفت پیدا کرده است و AGNR ها از نیمه‌هادی‌های ذاتی به نیمه‌هادی‌های نوع n (نوع p) تبدیل شده اند که این رفتار مشابه تزریق ناخالصی در نانولوله‌های کربنی (CNTs) می‌باشد[۲۵]. البته، در اینجا ساختار الکترونیکی با آنچه در CNT های آلایش یافته با اتم‌های بور و نیتروژن مشاهده می شود، متفاوت است. در CNT آلایش یافته با اتم نیتروژن، نوارهای انرژی ناخالصی(N) که معمولاً ترازهای دهنده نامیده می شود، توسط الکترون اضافی قرار گرفته در اطراف مکان ناخالصی N ایجاد شده و یک نوار ناخالصی خاص در زیر مینیمم نوار هدایت (CBM) ایجاد می‌کنند [۲۵]. به صورت مشابه، در CNT آلایش یافته آلایش با اتم بور، نوارهای انرژی ناخالصی (B) (ترازهای پذیرنده)، توسط حفره اضافی قرار گرفته در اطراف مکان ناخالصی B ایجاد شده است. اما در اینجا، درAGNRهای آلایش یافته با اتمهای نیتروژن، نوارهای ناخالصی ایجاد شده بالای CBM قرار می گیرند و این نوارهای

ناخالصی به طور خودکار یونیزه شده و حامل های بار آنها (الکترونها) از این نوارها به نوار هدایت منتقل می گردد[۲۶]. بنابراین، سطح دهنده در اینجا دیگر نوارهای ناخالصی نیستند، بلکه پایین ترین تراز اشغال نشده است. در AGNR های آلایش یافته با اتمهای بور، ساختار الکترونیکی کاملاً برعکس حالت آلایش یافته با اتمهای نیتروژن است، به صورتی که نوارهای ناخالصی به صورت کامل پر شده اند و بنابراین در زیر ماکزیمم تراز ظرفیت (VBM) قرار می گیرند. به صورت مشابه، حاملهای بار این نوارهای ناخالصی (حفره ها) به تراز ظرفیت منتقل شده و این نوارها یونیزه می‌گردند. بنابراین، در اینجا نیز سطح پذیرنده دیگر نوارهای ناخالصی نیست، بلکه بالاترین تراز اشغال شده است[۲۶].

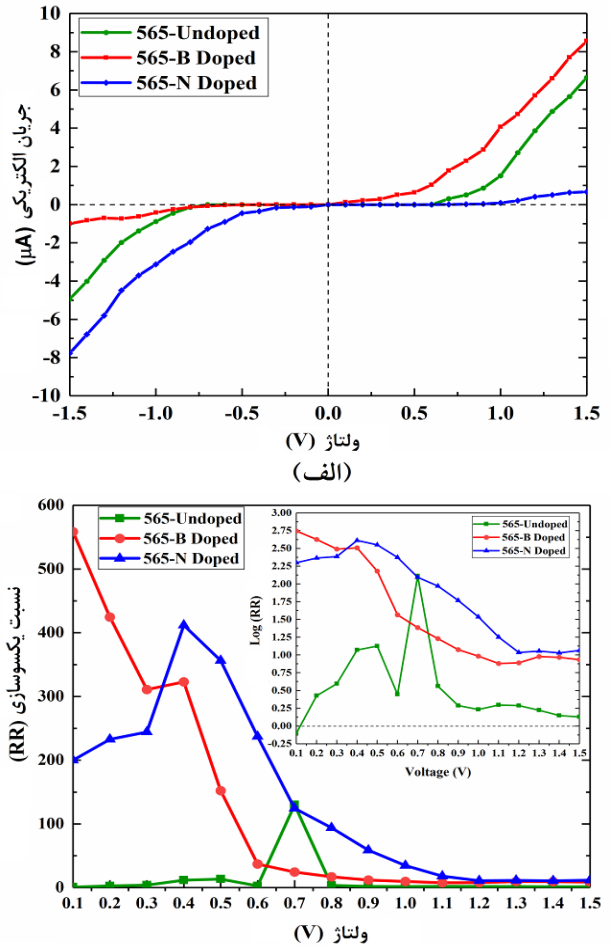
در ساختار غیرآلائیده ۵۶۵، در ساختار نواری الکترود سمت راست، نزدیک به تراز فرمی، ۶ نوار انرژی (۳ نوار انرژی بالای تراز فرمی و ۳ نوار پایین تراز فرمی) مشاهده می‌شود که در بالا و پایین، ۲ تا از این ۳ نوار، که نزدیک تر به تراز فرمی هستند و بر یکدیگر منطبق شده اند، مربوط به گیت‌های جانبی است، اما نوارهای دورتر که گاف انرژی بزرگتری را ایجاد می‌کنند، مربوط به کانال می‌باشد.



شکل (۲): ساختارهای نواری الکترودهای (الف) چپ (L) و (ب)-(د) راست (R) ادوات 565-X Doped GSSD، (X (B, N or C. شکل درونی، نشان دهنده بخشی از ساختار نواری با وضوح بیشتر است. تراز فرمی (E_F) روی صفر تنظیم شده است

در ساختارهای آلایش یافته، در اثر تزریق ناخالصی، نوارهای انرژی کانال، برای تطابق با تراز فرمی و نوارهای گیت‌های جانبی، جابجا شده اند که علت آن تغییر پتانسیل الکترواستاتیک کانال، ناشی از گیت‌های جانبی آلائیده است که موجب شیفت نوارهای انرژی می‌گردد؛ به صورتی که در ساختار B-Doped، کانال و گیت‌های جانبی مشابه یک نیمه هادی نوع p و در ساختار N-Doped، هر دو، مشابه یک نیمه هادی نوع n رفتار می‌کند، بدون آنکه گاف انرژی مستقیم کانال، نسبت به ساختار غیرآلائیده، تغییر قابل ملاحظه ای را نشان دهد. هر چند این جابجایی نوارها نسبت به تراز فرمی در ساختار غیر آلائیده نیز مشاهده می‌شود، اما مقدار آن قابل توجه نیست. در ادامه، در تحلیل علت یکسو سازی و نحوه عبور جریان از این افزاره‌ها، به بررسی بیشتر این نوارها خواهیم پرداخت.

شکل (۳)-(الف) منحنی‌های جریان- ولتاژ عبوری از این ادوات را در محدوده بایاس ۱٫۵ V- تا ۱٫۵ V نشان می‌دهد و در شکل (۳)-(ب) منحنی‌های قدر مطلق نسبت‌های یکسوسازی (*RR*) این ادوات در محدوده بایاس اعمالی رسم شده است. در داخل منحنی‌های نسبت یکسوسازی، لگاریتم این قدر مطلق‌ها رسم شده، که نشان دهنده درجه بزرگی یکسوکنندگی آنها است. لازم به ذکر است که در همه ادوات، ولتاژ بایاس به الکترود سمت چپ اعمال شده و الکترود سمت راست زمین شده است.



شکل (۳): (الف) منحنی‌های جریان- ولتاژ عبوری و (ب) منحنی‌های قدر مطلق نسبت‌های یکسوسازی ادوات 565-X Doped GSSD

همانطور که در نمودارهای *I-V* شکل (۳)-(الف) قابل مشاهده است، در ساختارهای B-Doped، یکسو سازی در ربع اول و در ساختارهای N-Doped یکسو سازی در ربع سوم نمودار رخ می‌دهد و جهت بایاس مستقیم این ساختار، سمت ولتاژهای منفی است. (جریان‌ها و ولتاژهای آستانه بایاس مستقیم منفی هستند). بنابراین، لازم به ذکر است که نسبت‌های یکسوسازی ساختارهای N-Doped بر این اساس محاسبه شده اند. همچنین، ساختار 565-Undoped دارای کمترین جریان بایاس مستقیم و بیشترین جریان بایاس معکوس در بین ساختارها است، همچنین در نمودارهای *RR* شکل (۳)-(ب) در محدوده بایاس اعمالی، غیر از ولتاژ ۰/۷ ولت، ساختار 565-Undoped، دارای کمترین نسبت یکسو سازی در بین ساختارهای متناظر خود است.

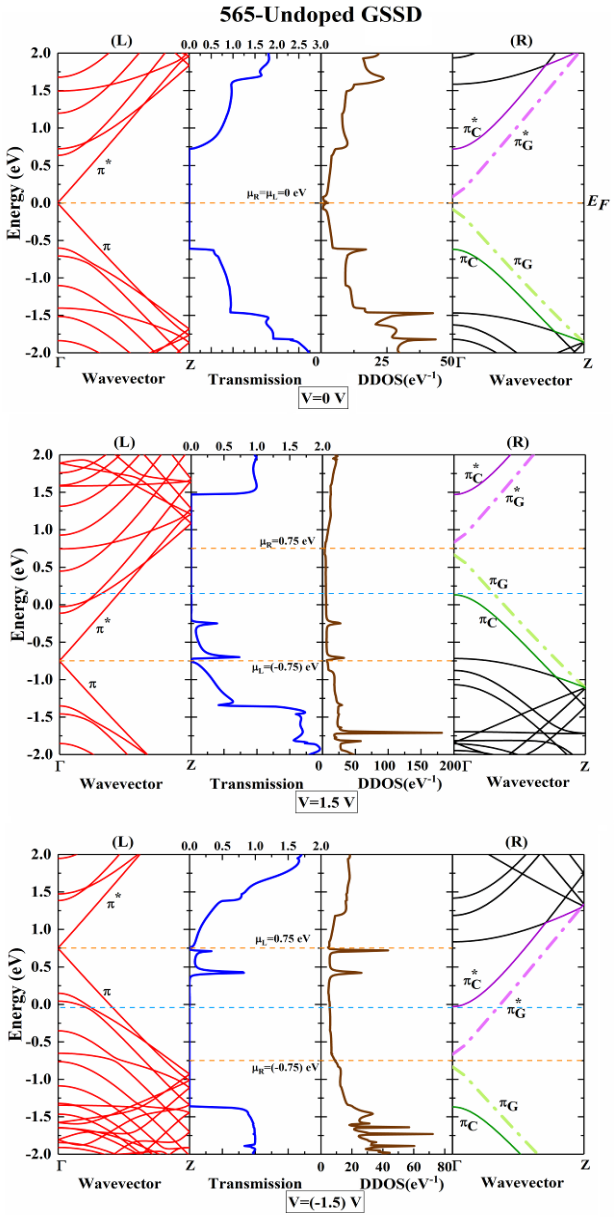
در جدول (۱) حداکثر نسبت‌های یکسوسازی، ولتاژهای آستانه، حداکثر و حداقل جریان‌های این ادوات در محدوده بایاس اعمالی ۱/۵ V- تا ۱/۵ V نشان داده شده است. در بین همه ساختارها، ساختار 565-B Doped دارای بیشترین نسبت یکسوسازی برابر ۵۵۸/۵۵ است و ماکزیمم جریان عبوری در بایاس مستقیم در محدوده بایاس اعمالی، مربوط به این ساختار به میزان ۸/۵۶ μA است. از نمودار جریان– ولتاژ شکل (۳)-(الف) و مقادیر جدول (۱) به روشنی قابل ملاحظه است که با آلایش گیت‌های جانبی، اندازه ولتاژ آستانه بایاس مستقیم به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می‌یابد، به عنوان نمونه، در ساختارهای آلائیده 565-B, N Doped، این ولتاژ نزدیک به صفر است که بسیار مطلوب است. همچنین، مقادیر اندازه جریان عبوری در بایاس مستقیم (معکوس) ادوات آلایش یافته، نسبت به ساختار غیر آلائیده افزایش (کاهش) یافته است.

در ادامه، مکانیسم عبور جریان در ادوات 565-Undoped، 565-B Doped و 565-N Doped در بایاس ولتاژ صفر و ولتاژهای ۱/۵ V و ۱/۵ V-، به کمک رسم نمودارهای ساختار باند انرژی الکترودهای چپ (L) و راست (R) و منحنی طیف انتقال (T-E) و چگالی حالت-های ادوات (DDOS) به ترتیب، در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) توضیح داده شده است. در داخل برخی از نمودارهای طیف انتقال، این طیف در محدوده انرژی معینی، با بزرگنمایی رسم شده است.

جدول (۱): حداکثر نسبت های یکسوسازی، ماکزیمم و مینیمم جریان‌ها و ولتاژهای آستانه بایاس مستقیم و معکوس انواع مختلف ساختارهای 565-X Doped GSSD، در محدوده بایاس اعمالی ۱/۵ V- تا ۱/۵ V

دیود GSSD	حداکثر نسبت یکسوسازی	حداکثر جریان در بایاس مستقیم (μA)	حداکثر جریان در بایاس معکوس (μA)	ولتاژ آستانه بایاس مستقیم (V)	ولتاژ آستانه بایاس معکوس (V)
565-Undoped	۱۲۹/۹۲	۶/۶۵	-۴/۹۳	۰/۶	-۰/۷
565-B Doped	۵۸۵/۵۵	۸/۵۶	-۰/۹۹	----	-۰/۶
565-N Doped	۴۱۱/۸۸	-۷/۷۸	۰/۶۷	----	۰/۹

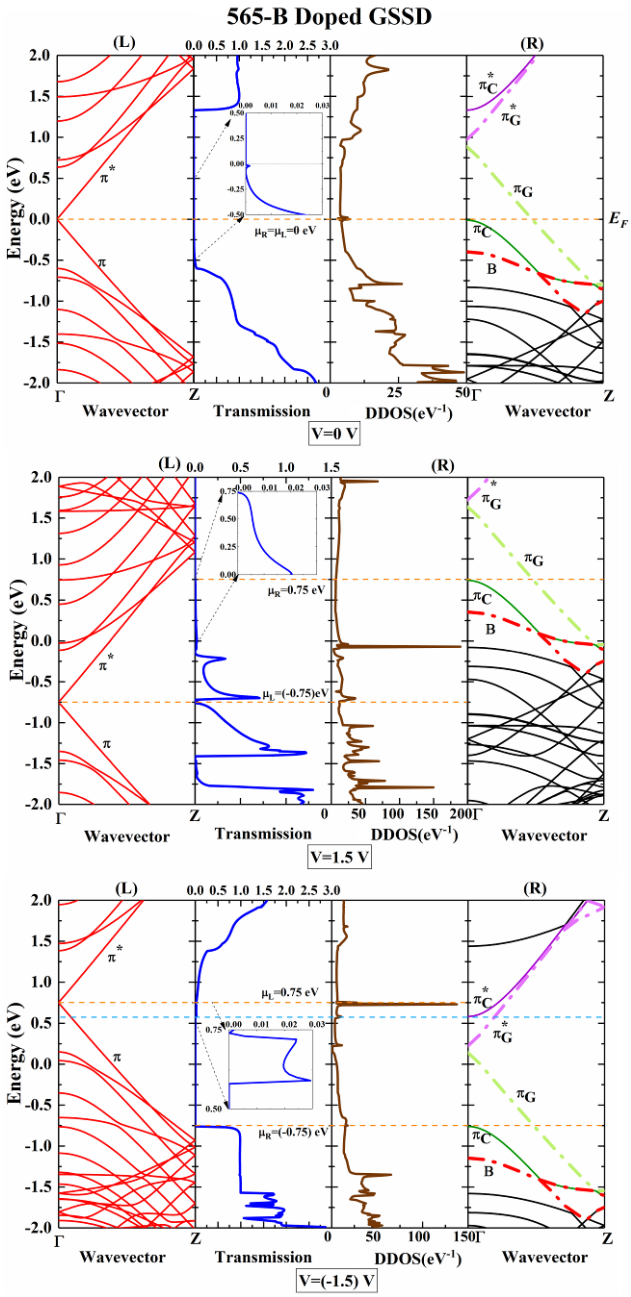
جهت پلارتیه مثبت در این ادوات به صورتی در نظر گرفته شده که وقتی بایاس ولتاژ خارجی به میزان *V* ولت اعمال می‌گردد، انرژی پتانسیل شیمیایی الکترود چپ (راست) به مقدار نصف ولتاژ اعمالی($eV/۲$) به سمت پایین (بالا) جابجا می‌شود. همانطور که در شکل‌های (۴-۶) قابل مشاهده است، در هیچ ولتاژ بایاسی، انطباق بین نوارهای انرژی ناشی از گیت‌های جانبی در ساختار باند الکترود راست



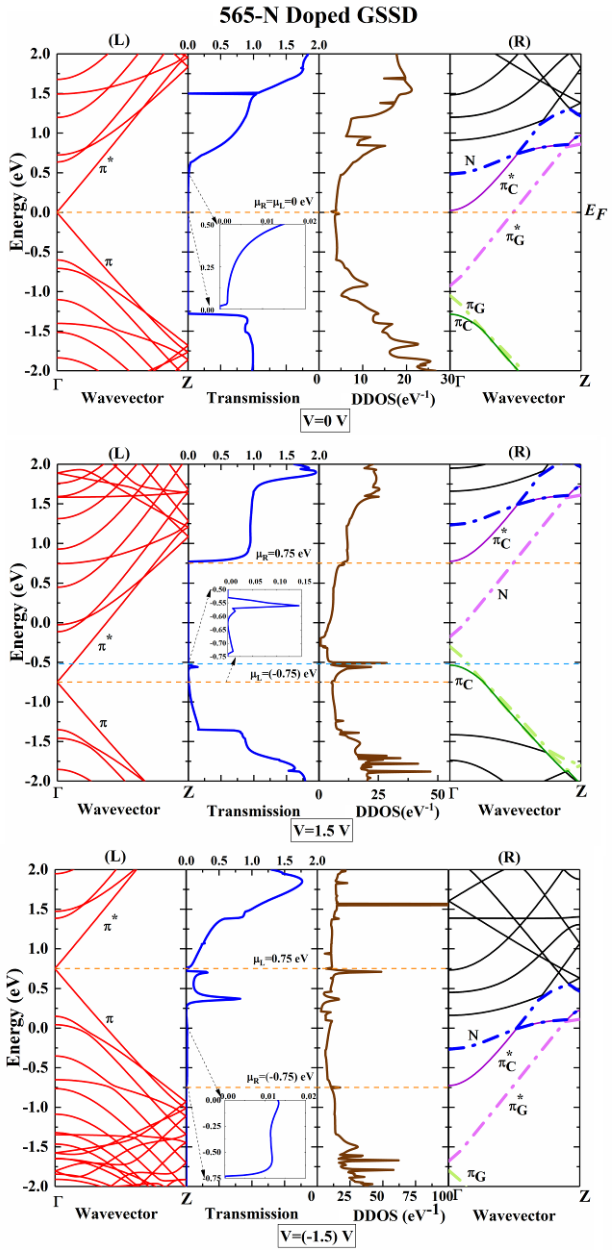
شکل (۴): ساختار نواری الکترودهای چپ (L)، منحنی طیف انتقال (T)، منحنی چگالی حالت های افزاره (DDOS) و ساختار نواری الکترود راست (R) در بایاس های ولتاژ ۰V، ۱/۵ V و ۱/۵ V- برای افزاره 565-Undoped-GSSD

(که این نوارهای انرژی، نزدیک به تراز فرمی به صورت خطوط رنگی خط چین نشان داده شده است) و نوارهای انرژی ساختار باند الکترود چپ، منجر به عبوری در نمودار طیف انتقال متناظر نمی‌گردد و به همین علت این نوارهای گیت‌های جانبی در ساختار باند، به صورت خط چین نشان داده شده اند. صفر بودن مقدار طیف انتقال (T) در این ناحیه همپوشانی، به این دلیل است که هیچ اتصالی بین گیت‌های جانبی و الکترود سمت چپ وجود ندارد، بر خلاف کانال که به الکترود چپ متصل است و همپوشانی بین نوارهای انرژی ناشی از کانال در ساختار باند الکترود راست (که نوارهای انرژی کانال، نزدیک به تراز فرمی به صورت خطوط رنگی نشان داده شده است) و نوارهای ساختار باند الکترود چپ، منجر به عبور در طیف انتقال می‌گردد.

مقدار جریان با انتگرال مقدار عبور در ناحیه طیف انتقال محدود به پنجره بایاس، که با خطوط خط چین نارنجی رنگ در این شکل‌ها (که به وسیله پتانسیل الکتروشیمیایی الکترودهای راست (μ_R) و چپ



شکل (۵): ساختار نواری الکترودهای چپ (L)، منحنی طیف انتقال (T)، منحنی چگالی حالت های افزاره (DDOS) و ساختار نواری الکترود راست (R) در بایاس های ولتاژ ۰V، ۱/۵ V و ۱/۵ V- برای افزاره 565-B Doped-GSSD



شکل (۶): ساختار نواری الکترودهای چپ (L)، منحنی طیف انتقال (T)، منحنی چگالی حالت های افزاره (DDOS) و ساختار نواری الکترود راست (R) در بایاس های ولتاژ ۰V، ۱/۵ V و ۱/۵ V- برای افزاره 565-N Doped-GSSD

(μ_L) تعیین می‌گردد) مشخص شده است، متناسب است. خط‌چین آبی کم رنگ، تفکیک کننده پنجره بایاس به دو بخش است که در بخشی از آن همپوشانی موثر بین نوارهای کانال در الکترود راست و نوارهای الکترود چپ آغاز می‌گردد و در بخش دیگر همپوشانی غیر موثر بین نوارهای ناشی از گیت‌های جانبی در الکترود راست و نوارهای الکترود چپ وجود دارد که منجر به عبوری در طیف انتقال و به طبع آن جریانی نمی‌شود. در این شکل‌ها، در کنار نمودارهای طیف انتقال، نمودارهای چگالی حالت‌های ادوات رسم شده است. علی رغم اینکه چگالی حالت‌ها در بیشتر انرژی‌ها غیر صفر است، اما این برای ایجاد شارش جریان کافی نیست. از سوی دیگر، همانطور که در شکل‌های (۴-۶) قابل مشاهده است، هر جایی که پیک‌های DDOS بر پیک‌های طیف انتقال منطبق می‌شوند، یک انتقال تشدیدی رخ می‌دهد.

همان طور که در شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود، به علت نوع آرایش نوارهای انرژی ساختار باند الکترود سمت راست، ناشی از آلایش، این دو ساختار در ولتاژهای مثبت و منفی عملکرد متفاوتی دارند؛ به صورتی که ساختار B-Doped در ولتاژهای مثبت و ساختار N-Doped در ولتاژهای بایاس منفی، هدایت بهتری از خود نشان می‌دهند که منجر به رفتار یکسوسازی می‌گردد، اما ساختار Undoped شکل (۴) رفتار نسبتاً مشابهی در ولتاژهای مثبت و منفی از خود نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، در این تحقیق، به کمک روش DFTB در ترکیب با NEGF، خواص الکترونیکی و رفتار یکسوسازی ادوات DG-GSSD با گیت‌های جانبی آلایش یافته با اتم‌های نیتروژن و بور، مورد بررسی قرار گرفت.

تغییر عرض گیت‌ها و یا نامتقارن کردن آنها، موجب تغییر عرض نانو نوار گرافنی الکترود سمت چپ می‌گردد که به این ترتیب، بر روی خواص الکترونیکی و یکسوسازی ساختارها اثر گذار است. از سوی دیگر، عرض نانو نوار گرافنی آرمچیر کانال بسیار کلیدی و تعیین کننده پارامترهای یکسوسازی است، زیرا گاف الکتریکی آن با عرض تغییر می‌کند.

آلایش گیت‌های جانبی سبب تغییر هدایت الکتریکی گیت‌ها شده، به صورت غیر مستقیم، یک اتصال شبه پیوندی آلائیده در کانال مرکزی نیمه هادی ایجاد کرده و موجبات یکسوسازی افزاره را فراهم می‌آورد، به صورتی که ساختارهای B-Doped در ولتاژهای مثبت و ساختارهای N-Doped در ولتاژهای بایاس منفی، هدایت بهتری از خود نشان می‌دهند. با آلایش گیت‌های جانبی، جریان عبوری در بایاس مستقیم (معکوس) ادوات آلایش یافته، نسبت به ساختار غیر آلائیده افزایش (کاهش) یافته است و همچنین، اندازه ولتاژ آستانه بایاس مستقیم به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می‌یابد، به عنوان نمونه، در ساختارهای آلائیده 565-B, N Doped، این ولتاژ نزدیک به صفر است.

مراجع

[۱] مرادی نسب، مهدی، فتحی پور، مرتضی، "مدل بسته جریان - ولتاژ در ترانزیستورهای نانولوله کربنی آلاییده"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هشتم-شماره دوم،۶۹-۷۴، ۱۳۹۰.

[۲] نادری، علی، قدرتی، مریم، "ساختار جدید ترانزیستور اثر میدانی نانولوله کربنی با ناخالصی‌های سبک در کانال و دی‌الکتریک دو قسمتی"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال پانزدهم-شماره دوم،۹-۱۶، ۱۳۹۷.

[3] Makihara, K., Kato, T., Kabeya, Y., Mitsuyuki, Y., Ohta, A., Oshima, D., Iwata, S., Darma, Y., Ikeda, M., Miyazaki, S., "Nano spin-diodes using FePt-NDs with huge on/off current ratio at room temperature", Sci. Rep, 6: 33409, 2016.

[4] Sarkar, K., Palit, M., Guhathakurata, S., Chattopadhyay, S., Banerji, P., "Single InxGa1-xAs nanowire/p-Si heterojunction based nanorectifier diode", Nanotechnology, 28, 385202, 2017.

[5] Auton, G. H., But, D., Zhang, J., Hill, E. W., Coquillat, D., Consejo, C., Nouvel, P., Knap, W., Varani, L., Teppe, F., Torres, J., Song, A.,"THz Detection and Imaging using Graphene Ballistic Rectifiers", Nano Lett., Vol. 17, No. 11, pp. 7015–7020, 2017.

[6] Si, J., Liu, L., Wang, F., Zhang, Z., Peng, L.-M., "Carbon Nanotube Self-Gating Diode and Application in Integrated Circuits", ACS Nano, Vol. 10, No. 7, pp. 6737–6743, 2016.

[7] Zeng, X., Otnes, G., Heurlin, M., Mourão, R. T., Borgström, M. T., "InP/GaInP nanowire tunnel diodes", Nano Res., 11: 2523, 2018.

[8] Song, A. M., Missous, M., Omling, P., Peaker, A. R., Samuelson, L., Seifert, W., "Unidirectional electron flow in a nanometer-scale semiconductor channel: a self switching device", Appl. Phys. Lett., 83, pp.1881–1883, 2003.

[9] Balocco, C., Kasjoo, S. R., Lu, X. F., Zhang, L. Q., Alimi, Y., Winnerl, S., Song, A. M. , "Room temperature of a unipolar nanodiode at terahertz frequencies", Appl. Phys. Lett., 98, 223501, 2011.

[10] Balocco, C., Song, A. M., Åberg, M., Forchel, A., Gonz_alez, T., Mateos, J., Maximov, I., Missous, M., Rezazadeh, A. A., Saijets, J., Samuelson, L., Wallin, D., Williams, K., Worschech, L., Xu, H. Q., "Microwave detection at 110 GHz by nanowires with broken symmetry", Nano Lett., 5, pp.1423–1427, 2005.

[11] Kasjoo, S. R., Song, A. M., "Terahertz detection using nanorectifiers", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 34, No. 12, pp. 1554–1556, 2013.

[12] Majewski, L. A., Balocco, C., King, R., Whitelegg, S., Song, A. M., "Fast polymer nanorectifiers for inductively coupled RFID tags", Mater. Sci. Eng. B, 147, pp. 289–292, 2008.

[13] Daher, C., Torres, J., Iniguez-de-la-Torre, I., Nouvel, P., Varani, L., Sangaré, P., Ducournau, G., Gaquière, C., Mateos, J., González, T., "Room temperature direct and heterodyne detection of 0.28–0.69-THz waves based on GaN 2-DEG unipolar nanochannels", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 63, No. 1, pp. 353–359, 2016.

[14] Iniguez-de-la-Torre, I., Gonzalez, T., Pardo, D., Mateos, J., "Monte Carlo analysis of memory effects in nano-scale rectifying diodes", Phys. Status Solidi C, 5, pp.82–85. 2008,
[15] Al-Dirini, F., Hossain, F. M., Nirmalathas, A., Skafidas, E., "All-graphene planar self-switching MISFEDs, metal-insulator-semiconductor field-effect diodes", Sci. Rep., 4, 3983, 2014.
[16] Westlund, A., Winters, M., Ivanov, I. G., Hassan, J., Nilsson, P. A., Janzen, E., Rorsman, N., Grahn, J., "Graphene self-switching diodes as zero-bias microwave detectors", Appl. Phys. Lett., 106, 093116, 2015.
[17] Al-Dirini, F., Hossain, F. M., Nirmalathas, A., Skafidas, E.,"Asymmetrically-gated graphene self-switching diodes as negative differential resistance devices", Nanoscale, Vol. 6, No.13, pp. 7628-7634, 2014.
[18] Winters, M., Thorsell, M., Strupinski, W., Rorsman, N., "High frequency electromagnetic detection by nonlinear conduction modulation in graphene nanowire diodes", Appl. Phys. Lett., Vol. 107, No. 4, 143508, 2015.
[19] Al-Dirini, F., Nirmalathas, A., Skafidas, E., "Graphene self-switching diodes with high rectification ratios", 13th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO), IEEE Beijing China, pp. 698–701, 2013.
[20] Ghaziasadi, H., Jamasb, Sh., Nayebi, P., Fouladian, M., "Rectification of graphene self-switching diodes: First-principles study", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 99, pp.123–133, 2018.
[21] Stokbro, K. et al., "Semiempirical model for nanoscale device simulations", Phys. Rev. B 82, 075420, 2010.
[22] Momma, K., Izumi, F., "VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data", J. Appl. Crystallogr., 44, pp.1272–1276, 2011.
[23] Büttiker, M., Imry, Y., Landauer, R., Pinhas, S. "Generalized many-channel conductance formula with application to small rings", Phys. Rev. B, Vol. 31, No. 10, p. 6207, 1985.
[24] Fisher, D. S., Lee, P. A., "Relation between conductivity and transmission matrix", Phys. Rev. B, Vol. 23, No. 12, p. 6851, 1981.
[25] Yu, Sh. –Sh., Zheng, W. –T., "Effect of N/B doping on the electronic and field emission properties for carbon nanotubes, carbon nanocones, and graphene nanoribbons", Nanoscale 2 pp.1069-1082, 2010.
[26] Yu, Sh. Sh., Zheng, W. T., Jiang, Q, "Electronic Properties of Nitrogen-/Boron-Doped Graphene Nanoribbons With Armchair Edges", IEEE T NANOTECHNOL, Vol. 9, No. 1, pp. 78-81, 2010.

زیرنویس‌ها

[1] Westlund
[2] Epitaxy
[3] Electron-Beam Lithography
[4] Winters
[5] Noise-Equivalent Power
[6] Al-Dirini
[7] Monkhorst–Pack
[8] Brillion Zone
[9] Landauer-Büttiker
[10] Fermi-Dirac
[11] Fisher-Lee