



مروری بر ویژگی‌های ترابرد الکترونی در بوروفین

مرجان دهقان^۱، حسین نیکوفرد^۱، نرگس نیکوفرد^۱ و مهدی اسماعیل‌زاده^{۲*}

۱- پژوهشکده نانو، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده: مواد دوبعدی به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردشان همچون ساختار نواری خطی نزدیک سطح فرمی، رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا چشم‌انداز وسیعی را در ساخت ادوات نانو الکترونیک، ذخیره انرژی و انتقال اطلاعات پیش روی پژوهشگران قرار داده‌اند. یکی از این مواد که به تازگی مورد توجه قرار گرفته تک لایه دو بعدی از اتم‌های بور به نام بوروفین است که شامل آلوتروپ‌های مختلفی از جمله α ، β_{12} ، γ_3 و 8-pmmn است. بوروفین دارای مخروط دیراک کج و ناهمسانگرد است و افزون بر شفافیت عالی، رسانایی الکترونی و یونی فوق‌العاده دارد. این خواص به همراه ویژگی‌های دیگر بوروفین موجب کاربردهای متنوع و بالقوه این ماده در حسگرهای گازی، باتری‌های یونی فلزی و ادوات الکترونیک و اپتوالکترونیک شده است. در این پژوهش، قصد داریم به صورت مروری به مطالعه خواص بوروفین پرداخته و تاثیر عواملی همچون ناخالصی، تابش نور، کرنش، چینش اتم-های لبه نانونوار، دما، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را بر ویژگی‌های ترابرد الکترونی در این ماده بررسی کنیم.

واژگان کلیدی: مواد دوبعدی، بوروفین، ترابرد کوانتومی، میدان‌های خارجی، نانو الکترونیک.

*mahdi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

واسطه [۱۰] و حالت‌های سطحی در عایق‌های توپولوژی [۱۱ و ۱۲] بررسی شده که در برخی از آنها منجر به ویژگی ترابرد قابل توجهی از جمله تونل‌زنی کلاین می‌شوند. تونل‌زنی کلاین نقش کلیدی در طراحی دستگاه‌های الکترونیک بر پایه مواد دیراک دوبعدی ایفا می‌کند [۱۳].

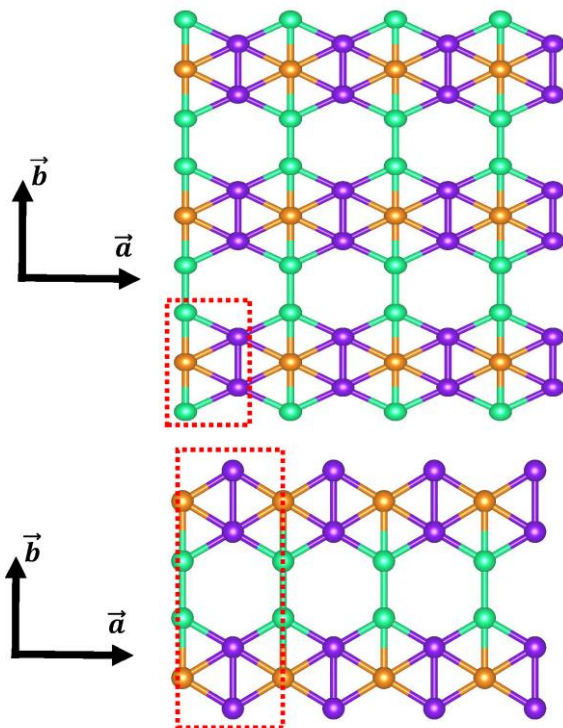
به تازگی مواد دوبعدی شامل عناصر گروه III جدول تناوبی، شامل بوروفین بررسی شده و فازهای مختلفی از این ماده همچون β_{12} ، γ_3 ، 2-pmmn و 8-pmmn بر روی بستر Ag تحت شرایط خلاء فوق‌العاده بالا سنتز شده‌اند. فاز 8-pmmn بوروفین، میزبان مخروط‌های دیراک کج و ناهمسانگرد است که موجب پیدایش اثرات جالب توجهی در این ماده همچون تونل‌زنی

مواد دوبعدی به دلیل ویژگی فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردشان مانند ساختار نواری خطی نزدیک سطح فرمی و رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا چشم‌انداز وسیعی را در طراحی و ساخت ادوات الکترونیک با عملکرد بالا و اتلاف انرژی کم، ذخیره انرژی و انتقال اطلاعات نشان می‌دهند. در این میان، ترابرد الکترونی از جمله ترابرد اسپینی و دره‌ای در مواد دو بعدی که میزبان فرمیون‌های دیراک بدون جرم هستند حائز اهمیت است. ترابرد کوانتومی در موادی همچون گرافین [۱ و ۲]، سیلیسین [۳-۵]، فسفرین [۶ و ۷]، MoS₂ [۸ و ۹]، دی‌کلکوژنید فلزات

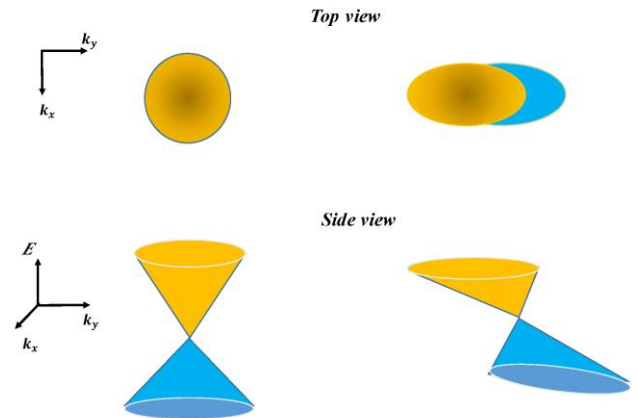
¹ Valley

کشسانی و چکش‌خواری مکانیکی بالا در این ماده شده است [۱۸]. برای فاز 2-pmmn بوروفین که دارای ساختار کماتی شکل است، ویژگی مکانیکی و الکترونیک بسیار ناهمسانگرد گزارش شده است. به طوری که مدول یانگ در امتداد جهت دسته صندلی، می‌تواند تا ۳۹۸ نیوتن بر متر باشد، که حتی از گرافین بزرگتر است. اما در امتداد جهت زیگزگاک تنها ۱۷۰ نیوتن بر متر است. همچنین، در امتداد جهت دسته صندلی دارای خاصیت فلزی و در امتداد جهت زیگزگاک، یک نوار انرژی بزرگ دارد [۱۳].

با استفاده از نظریه تابع چگالی، حسگرهای گازی بر پایه بوروفین در حضور الکترودهای طلا مطالعه شده که نشان می‌دهد این حسگرها می‌توانند برای شناسایی مولکول‌های گاز CO، NO، NO₂ و NH₃ استفاده شوند. در این تحقیق الکترودهای طلا با تشکیل سد پتانسیل، موجب کاهش جریان در مقایسه با جریان در غیاب الکترودهای طلا می‌شوند [۱۹]. با بررسی تفاوت‌های موجود در نمودارهای جریان-ولتاژ سه صفحه مختلف بوروفین شامل 2-pmmn، 8-pmmn و 8-pmmm، می‌توان از آنها برای تشخیص نوع و جهت رشد نمونه استفاده کرد. زیرا این تشخیص به جهت انتقال الکترون، ناهمسانگردی و جزئیات سلول واحد بوروفین وابسته است [۲۰].



غیرعادی کلایین و جداسازی دره‌ها در اثر اعمال ولتاژ خارجی می‌شود [۱۴ و ۱۵]. در شکل ۱، مخروط پاشندگی بوروفین نسبت به گرافین مقایسه شده به طوری که کج شدگی مخروطها در این ماده به خوبی دیده می‌شود [۱۶].



شکل ۱: (سمت چپ) مخروط پاشندگی گرافین. (سمت راست) مخروط پاشندگی بوروفین [۱۶].

ساماندهی این مقاله به شرح زیر است. در بخش دوم، ویژگی مکانیکی، حرارتی، الکترونی و نوری بوروفین را با ذکر برخی کاربردهای این ماده بیان می‌کنیم. سپس، در بخش ۳ به طور مروری به بررسی مقالاتی می‌پردازیم که تاثیر عواملی همچون دما، ناخالصی، کرنش، تابش نور و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را بر ترابرد کوانتومی بوروفین بررسی کرده‌اند. در پایان، بخش ۴ مربوط به خلاصه و نتیجه گیری است.

۲- معرفی بوروفین و ویژگی آن

بوروفین ماده‌ای دوبعدی شامل عنصر بور است که از نظر توپولوژی تا حدی معادل گرافین است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت ذخیره‌سازی هیدروژن در این ماده به دلیل جرم سبک عنصر بور، چشمگیر است. همچنین ویژگی‌های چند مرکزی پیوند بور-بور منجر به شکل‌گیری ساختارهایی با پیکربندی‌های متنوع شده که این تنوع، قابلیت‌های این ماده را در کاربردهای الکترونیک، عامل‌سازی شیمیایی و سنتز مواد به نمایش می‌گذارد [۱۷]. در شکل ۲، دو نوع ساختار بوروفین شامل β_{12} و α رسم شده است. منحصر به فرد بودن پیوند بور در این ماده منجر به

² Strain

شکل ۲: شکل بالایی ساختار اتمی بوروفین β_{12} و شکل پایینی ساختار اتمی بوروفین γ است. خط چین‌ها سلول واحد را نشان می‌دهند و بردارهای شبکه در سمت چپ هر شکل مشخص شده است [۱۸].

بوروفین به علت رسانایی الکترونی و یونی فوق‌العاده می‌تواند کاربرد گسترده‌ای در باتری‌های یون فلزی به عنوان ماده آند داشته باشد. افزون بر این، می‌تواند به عنوان یک کاتالیزور خوب در واکنش‌های تکامل هیدروژن، تکامل اکسیژن، کاهش اکسیژن و واکنش‌های کاهش الکتریکی CO_2 با عملکرد کاتالیزوری بالا به کار رود. این ماده دارای فعالیت سطحی بالایی بوده، بنابراین، مستعد اکسایش است [۱۸]. مطالعه ویژگی اپتوالکترونیک دو آلوتروپ بور دوبعدی شامل β_{12} و δ_6 ، نشان می‌دهد که هر دو ساختار به عنوان الکتروود شفاف مناسب هستند [۲۱]. متغیر بودن ویژگی نوری بوروفین در راستاهای مختلف نشان دهنده ناهمسانگردی ساختاری آن است. این ناهمسانگردی به همراه رسانش نوری بالا، حاکی از قابلیت این ماده برای استفاده در قطعات الکترونیک انعطاف‌پذیر و نمایشگرهای نسل جدید است.

محاسبات نظری پیش‌بینی می‌کند که خاصیت ابررسانایی در بوروفین می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی تحت تاثیر کرنش و آرایش^۳ حفره افزایش یابد [۲۲ و ۲۳]. همچنین ویژگی‌های غیرمعمول بازتاب آندریف^۴ در یک اتصال فلز- ابررسانا مبتنی بر بوروفین 8-pmmn در مقایسه با پیوند معمولی فلز- ابررسانا مبتنی بر گرافین حاکی از ساختار نواری ناهمسانگرد بوروفین است [۲۴ و ۲۵].

۳- ترابرد در بوروفین

۳-۱- ترابرد در نانو نوار بوروفین (BNR)

استفاده از نظریه تابعی چگالی و محاسبات ترابرد الکترونی بر اساس تابع گرین غیرتعدالی نشان می‌دهد که پایداری نانونوارهای بوروفین با افزایش عرض آنها زیاد می‌شود و فقط نانونوارهای لبه‌دار در حالت آزاد پایدارند. همچنین نانونوارهای لبه‌دار، رسانایی اهمی با مقاومت کم از خود نشان می‌دهند که می‌توان از آن‌ها در

³ Doping

⁴ Andreev

⁵ Borophene nanoribbon (BNR)

اتصالات الکتریکی یک‌بعدی در مدارهای متراکم نانومقیاس استفاده کرد [۲۶]. در پژوهش دیگری، نانونوار بوروفین با لبه زیگزاگ برای دو نوع پهنای متشکل از تعداد فرد و زوج زنجیره‌های اتمی، مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که منحنی‌های جریان-ولتاژ برای این دو حالت متفاوت است. علاوه بر آن، در نانونوار با ۵ زنجیره اتمی مقاومت دیفرانسیلی منفی در بازه مشخصی از ولتاژ خارجی مشاهده می‌شود، اما نانونوار ۶ زنجیره ای دارای رفتار فلزی بوده و جریان آن با افزایش ولتاژ زیاد می‌شود. هنگامی که دو الکتروود متصل به سیستم، دارای جهت میدان مغناطیسی مخالف باشند، فیلتر اسپینی مشاهده می‌شود. همچنین، بیشینه اثر مقاومت مغناطیسی در نانونوار زیگزاگ با تعداد زوج رشته به ۷۰٪ می‌رسد [۲۷]. مطالعات نشان می‌دهد که ویژگی مغناطیسی نانونوارهای بوروفین جدا شده از صفحات بوروفین β_{12} به شدت به جهت برش و مشخصات لبه بستگی دارد. یک نوار با عرض مشخص می‌تواند مانند یک فلز معمولی یا فلز فرومغناطیسی با خاصیت مغناطیسی در یک یا دو لبه رفتار کند. ناهمسانگردی اسپین در برخی از نانونوارها و یکسان نبودن ممان مغناطیسی در هر دو لبه حاکی از قابلیت بالقوه این نانونوارها در ادوات اسپینترونیک آینده است [۲۸].

BNR هیدروژن‌دار شده، پایدارتر از BNR معمولی است. همچنین، خاصیت مغناطیسی نانونوار را می‌توان با هیدروژن‌دار کردن لبه تنظیم کرد. مشاهده می‌شود که در نانونوار هیدروژن‌دار شده از نوع دسته‌سندلی، جریان با افزایش ولتاژ خارجی (دریچه) تا مقدار یک ولت، افزایش و سپس با افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده اثر مقاومت دیفرانسیلی منفی در سیستم است [۲۹]. محاسبات نظری به روش تابع گرین غیرتعدالی، نشان می‌دهد که هیدروژن‌دار کردن لبه‌های نانونوار از نوع زیگزاگ، می‌تواند مغناطش لبه را کاهش و نیتروژن‌دار کردن لبه موجب افزایش مغناطش می‌شود. ویژگی BNR زیگزاگ در تفاوت با نانونوار گرافینی به پهنای نوار حساس است به طوری که با افزایش پهنای نوار، مغناطش و رسانایی به شدت تغییر کرده و حالت پایه سیستم، بین پیکربندی فرومغناطیس و آنتی فرومغناطیس جهش می‌کند [۳۰]. با استفاده از تابع گرین غیرتعدالی و تقریب تنگ بست، ویژگی ترابرد باری و اسپینی در یک BNR از نوع β_{12} با اشکال مختلف لبه مطالعه شده است. در

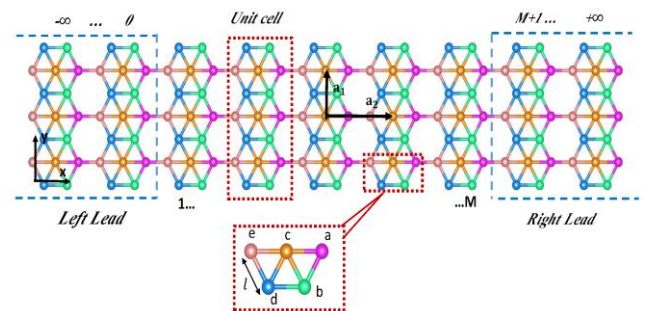
۳-۲- اثر ناخالصی روی ترابرد الکترونی

تنظیم ویژگی ترابرد الکترونی ناهمسانگرد در بوروفین تک لایه، برای استفاده این ماده در دستگاه‌های الکترونیک و نوری ضروری است. لذا در مقاله‌ای با استفاده از نظریه تابعی چگالی به همراه تابع گرین غیرتعدلی، ترابرد ناهمسانگرد در BNR را به کمک اکسایش تنظیم کرده‌اند. با تنظیم پوششی از نقص‌های اکسیژن بین ۰ تا ۱۰۰ درصد، می‌توان جهت جریان را در راستای دسته صندلی و زیگزاگ معکوس کرد. البته ویژگی‌های ترابردی قابل تنظیم در بوروفین اکسید شده را می‌توان به تاثیر متقابل چندین عامل نسبت داد، از جمله: انتقال بار سطحی بین لایه بوروفین و نقص‌های اکسیژن، اثرات پراکندگی مربوط به جهت گیری فصل مشترک بور و اکسیژن، و کانال‌های ترابردی افزوده شده از طریق نقص‌های اکسیژن [۳۳].

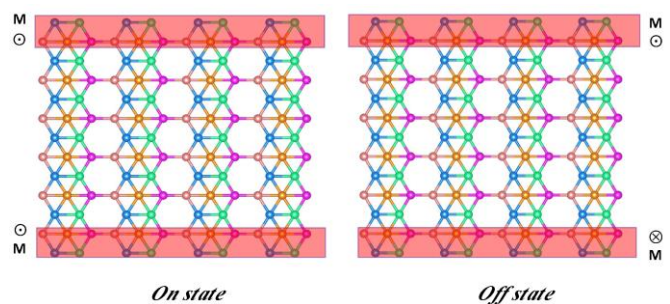
محاسبات از طریق نظریه تابعی چگالی نشان می‌دهد که آرایش بوروفین با اتم‌های کربن و نیتروژن باعث جابجایی مکان نقطه دیراک در این ماده می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که نمودارهای جریان-ولتاژ این ساختارها رفتار اهمی دارند. لذا به علت قابلیت کنترل جریان در بوروفین با آرایش‌ها، می‌توان از این ماده در طراحی سوئیچ‌های نانوالکترونیک استفاده نمود.

بوروفین در اثر جذب هیدروژن، به ماده‌ای به نام بوروفان تبدیل می‌شود. اگر چه بوروفین از نوع 8-pmmn یک نیمه‌هادی بدون گاف است اما بوروفان دارای گاف است [۳۴]. بوروفان ناهمسانگردی ترابرد الکتریکی کاملی را از خود نشان می‌دهد. همچنین بوروفان دو بعدی می‌تواند ویژگی‌های فلزی و نیمه‌رسانایی را ترکیب کرده و یک گزینه امیدوارکننده برای مواد نانو سوئیچینگ با ساختاری پایدار و نسبت on/off بالا باشد [۳۵]. اگر چه در بوروفان عدم تقارن الکترون-حفره وجود دارد، اما رسانایی الکترون-حفره در آن تقریباً متقارن است. صرف نظر از نوع ناخالصی، رسانایی الکتریکی بوروفان بسیار ناهمسانگرد است، در حالی که ضریب سیبک و شاخص شایستگی ناهمسانگرد هستند. در مقایسه با فسفرین، بوروفان با نسبت ناهمسانگردی

شکل ۳، طرحواره‌ای از این نانونوار با لبه دسته‌صندلی قابل مشاهده است. کانال عبور الکترون‌ها شامل M سلول واحد به دو رابط چپ و راست متصل شده است. در شکل ۴، میدان مغناطیسی تبدلی در حالت‌های موازی و پادموازی به لبه‌های بالا و پایین کانال اعمال می‌شود. در حضور این میدان‌ها، سیستم هم برای اسپین بالا و هم برای اسپین پایین، مانند فیلتر اسپینی رفتار می‌کند؛ به طوری که جهت اسپین الکترون‌های فرودی را می‌توان با تنظیم انرژی آنها از طریق یک ولتاژ خارجی کنترل کرد. مشاهده شده است که در یک نانونوار دسته‌صندلی، قطبش اسپینی کامل در حضور ناخالصی اندرسون و تهی‌جای‌های مختلف، از بین نمی‌رود [۳۱]. ترابرد اسپینی در نانونوار از نوع α با لبه زیگزاگ در حضور میدان مغناطیسی تبدلی بررسی شده و پدیده‌هایی همچون مقاومت مغناطیسی غول آسا و فیلتر اسپینی کامل مشاهده می‌شود [۳۲].



شکل ۳: طرحواره‌ای از یک نانونوار دسته‌صندلی بوروفین از نوع β_{12} . سلول بسیط با مستطیل خط چین مشخص شده که شامل ۵ اتم است. کانال شامل M سلول واحد است که به دو رابط چپ و راست متصل شده است [۳۱].



شکل ۴: اعمال میدان تبدلی از طریق زیرلایه مغناطیسی بر دو لبه نانونوار بوروفین که به رنگ صورتی مشخص شده است. میدان‌ها در دو حالت پادموازی (سمت راست) و موازی (سمت چپ) به نانونوار اعمال شده‌اند [۳۱].

⁶ Seebeck coefficient

⁷ Figure of merit

بالای حدود ۱۰، یک ماده ناهمسانگرد بی سابقه است. در نتیجه برای کاربردهای ترموالکتریک و سوئیچینگ در کانال‌های ترابرد دیراک امیدوارکننده است [۳۶].

با مقایسه بوروفین و بورفان از طریق فرمول بندی لاندائو-بوتیکر، متوجه شده‌اند که بوروفین دارای جریان الکترونی دو مرتبه بزرگتر از بوروفان است. افزون بر این، با بررسی وابستگی جهتی جریان در دو راستای عمود برهم (I_x و I_y) مشاهده می‌شود که نسبت $\eta = I_x/I_y$ ، برای هر دو سیستم مقدار تقریبی ۲ را خواهد داشت [۳۷]. مطالعات نشان می‌دهد ساختار الکترونی ذاتی بوروفان با هر نوع نقص از بین می‌رود. زیرا ایجاد نقص، منجر به بروز نوارهای مسطح شده که در ترابرد الکترونی مفید نیستند و این نقص‌ها شدت ترابرد و مقدار جریان را در دو جهت x و y کاهش می‌دهند. با این حال، ناهمسانگردی ترابردی را می‌توان به طور موثری با نقص تنظیم کرد که می‌تواند در طراحی دستگاه‌های عملکردی^۸ مفید باشد [۳۸].

۳-۳- اثر کرنش روی ترابرد در صفحات بوروفین

با استفاده از نظریه تابعی چگالی، ویژگی‌های ترابردی دو فاز β_{12} و χ صفحه بوروفین در حضور کرنش مطالعه شده است. فاز β_{12} ویژگی ترابردی همسانگرد اما فاز χ ویژگی ناهمسانگرد از خود نشان می‌دهد. اعمال کرنش تک محوری باعث تغییر در ساختار الکترونی آنها شده، به طوری که ناهمسانگردی در مشخصه IV فاز β_{12} را می‌توان از طریق کرنش اعمال شده در جهت x تنظیم کرد [۳۹]. نانوساختار بوروفین 8-pmmn شامل دو نوع اتم بور غیر هم‌ارز است که بارهای موثر مخالف هم دارند. نکته جالب توجه این است که با استفاده از تنش برشی^۹ خارجی، امکان تبدیل این نوع بوروفین از رفتار فلزی به یک نیم‌رسانا با گاف نواری غیرمستقیم، وجود دارد. تنش خارجی موجب گذار نیمه-رسانا-فلز در بوروفین می‌شود [۴۰].

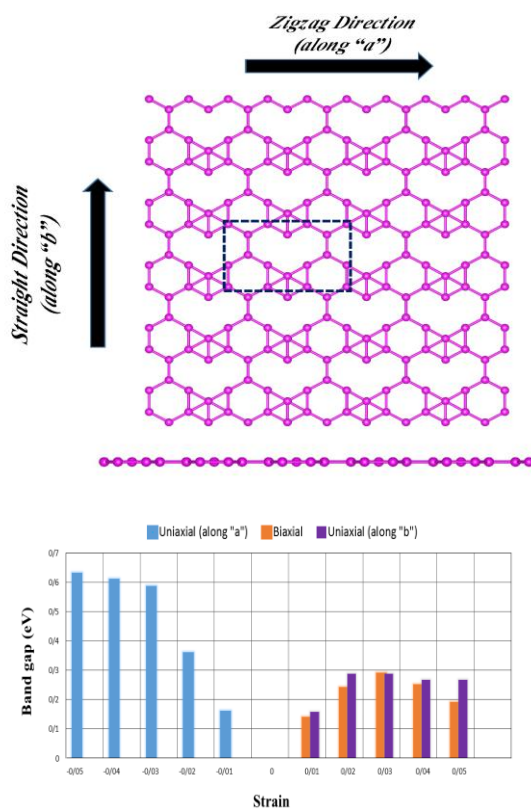
شکل ۵، ساختار صفحه بوروفین از نوع λ_5 و تاثیر کرنش روی گاف نواری را نشان می‌دهد. با استفاده از نظریه تابعی چگالی، کرنش تک محوری و دو محوری باعث باز شدن گاف نواری در

⁸ Functional device

⁹ Shear stress

سطح فرمی و بروز رفتار نیم‌رسانایی در ماده می‌شود [۴۱]. اعمال کرنش به مدل تنگ‌بست در بوروفین 8-pmmn باعث القای پتانسیل اسکالر و همچنین، القای پتانسیل برداری میدان شبه‌مغناطیسی می‌شود؛ به طوری که وابستگی این پتانسیل‌ها به تانسور کرنش قابل محاسبه است. میدان شبه‌مغناطیسی را می‌توان از طریق پدیده‌های فیزیکی همچون کوانتتس لاندائو^۱، اثر فارادی^۱ و اثر هال دره‌ای آشکارسازی کرد و در ادوات ولترونیک کاربرد دارد [۴۲].

نکته قابل توجه دیگر این است که اگر میدان مغناطیسی واقعی با میدان شبه مغناطیسی^۳ القا شده از طریق کرنش جایگزین شود، میدان الکتریکی توانایی خود را برای ایجاد ترابرد دره-قطبیده از دست می‌دهد [۴۳].



شکل ۵: شکل بالایی ساختار صفحه بوروفین از نوع λ_5 و شکل پایینی تاثیر کرنش روی گاف نواری را نشان می‌دهد. رنگ آبی و بنفش به ترتیب مربوط به کرنش تک محوری در راستاهای a و b و رنگ نارنجی مربوط به کرنش دو محوری است [۴۱].

¹ Landau quantization 0
¹ Faraday effect 1
¹ Valley Hall effect 2
¹ Pseudo magnetic field 3

۳-۴- تاثیر دما و تابش نور روی ترابرد الکترونی

رسانایی الکترونی و نوری برای نیمهفلزات دیراک کج شده ناهمسانگرد همانند بوروفین 8-pmmn با استفاده از فرمول کوبو^۴ محاسبه می‌شود. همانند گرافین، کمینه رسانایی به نظمی که در آن دما، فرکانس و حدود پراکندگی گرفته شده حساس است. هم پراکندگی درون نواری و هم پراکندگی بین نواری وابسته به جهت هستند. در حد دمای صفر، انتقال بین نوار تحت تأثیر کج‌شدگی^۵ در رابطه پاشندگی قرار نمی‌گیرد. با این حال، با افزایش دما، کمینه جالب توجهی در پراکندگی بین نوار مشاهده می‌شود که در اینجا به عنوان نتیجه تعامل بین کج‌شدگی و افزایش پتانسیل شیمیایی با دما قابل تفسیر است [۱۶].

از دیدگاه نظری، رفتار تک‌لایه بوروفین تحت تأثیر نور قطبیده بررسی شده است؛ به طوری که تغییر شدت نور قطبیده دایروی، منجر به باز شدن گاف در تحریکات تک ذره‌ای و دو ذره‌ای شده و گذاری از حالت فلزی به حالت عایق رخ می‌دهد. اما تابش نور قطبیده خطی به ماده، توپولوژی ساختار نواری را تغییر نمی‌دهد. همچنین تحلیل نمودار رسانندگی بیانگر این است که سیگنال‌های الکتریکی را می‌توان از طریق شدت و نوع قطبش نور، افزایش یا کاهش داد که قابلیت استفاده چنین سیستمی را در ادوات حساس به نور نشان می‌دهد [۴۴].

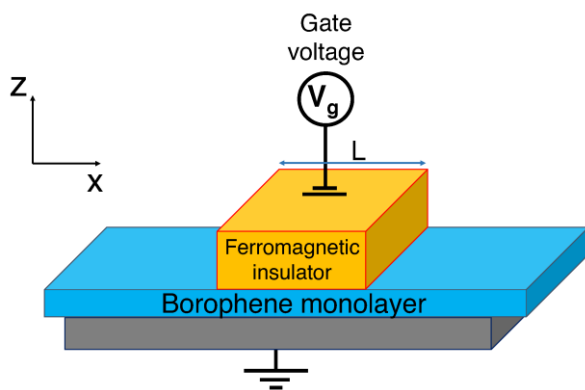
۳-۵- اثر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر بوروفین و بوروفان:

ویژگی مغناطیسی ناشی از میدان الکتریکی و ناخالصی باردار در بوروفین β_{12} مطالعه شده است. در این بررسی، کمیت پذیرفتاری پارامغناطیس اسپین پائولی (PSPS^۱) را با استفاده از هامیلتونی تنگ‌بست ۵ نواری و رویکرد تابع گرین محاسبه کرده‌اند. محاسبات نشان می‌دهد که در تمام دماها، اثر ناخالصی باردار رقیق شده بر پذیرفتاری قابل توجه نیست و پذیرفتاری با غلظت ناخالصی و پتانسیل پراکندگی، اندکی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، حساسیت پارامغناطیس اسپین پائولی ناشی از میدان

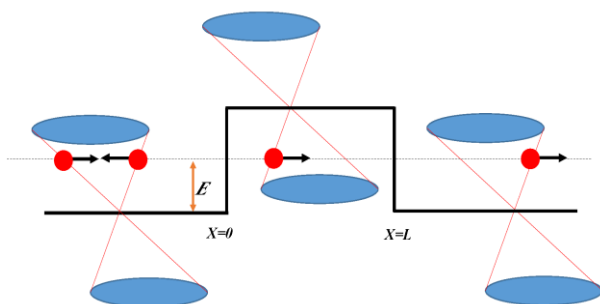
^۱ Kubo 4
^۱ Tilt 5
^۱ Pauli spin paramagnetic susceptibility

الکتریکی منجر به یک روند افزایشی برای آن، در دماهای بسیار پایین و روند کاهشی در دماهای متوسط و بالا می‌شود. این یافته‌ها راه را برای کاربردهای صنعتی از این ماده هموار می‌کند [۴۵].

در شکل ۶ طرحواره‌ای از تک لایه بوروفین 8-pmmn را تحت تأثیر یک سد مغناطیسی-الکتریکی نشان می‌دهد [۴۶]. همچنین در شکل ۷، تصویری از این اتصال n-p-n و عبور حامل‌ها از سد پتانسیل قابل مشاهده است. به طوری که در ناحیه سد (p) حامل‌ها حفره هستند و در دو ناحیه چپ و راست (n) الکترون‌ها به عنوان حامل بار هستند [۱۴].



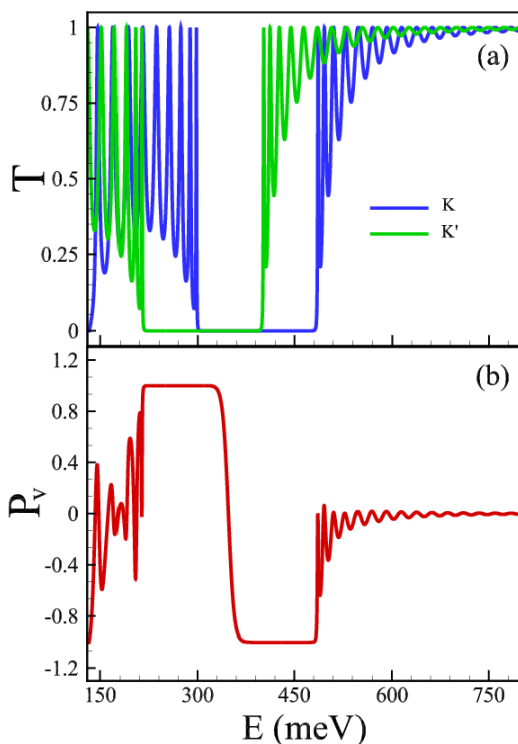
شکل ۶: طرحواره‌ای از تک لایه بوروفین. یک میدان تبدلی از طریق زیرلایه مغناطیسی، و یک پتانسیل دریاچه به اندازه V_g به ناحیه کانال به عرض L اعمال شده است. همچنین یک لایه عایق (به رنگ خاکستری) برای جلوگیری از نشت جریان دریاچه استفاده می‌شود [۴۶].



شکل ۷: تصویری از یک اتصال n-p-n که در ناحیه p به عرض L پتانسیل دریاچه V_g و میدان تبدلی به اندازه M وجود دارد. الکترون فرودی با انرژی E به سد برخورد می‌کند [۱۴].

در شکل ۸، احتمال عبور الکترون و قطبش دره‌ای در حضور پتانسیل خارجی ۳۵۰ میلی‌الکترون ولت رسم شده است. مشاهده

به عرض و ارتفاع سد پتانسیل، وقتی رخ می‌دهد که الکترون با زاویه غیرصفر به سد پتانسیل برخورد کند. تونل‌زنی غیرعادی کلاین به جهت اتصال و سرعت کج‌شدگی بستگی دارد. تونل‌زنی غیرعادی و بازتاب برگشتی ناشی از ساختار نواری ناهمسانگرد بوروفین است که توسط سرعت‌های ناهمسانگرد و کج‌شده ایجاد شده و منجر به آزاد شدن رابطه قفل‌شدگی بین بردار موج عرضی و مولفه سرعت در راستای فصل مشترک می‌شود [۱۴].



شکل ۸: احتمال عبور وابسته به دره K و K' و قطبش دره‌ای بر حسب انرژی فرمی به ازای $V_g = 350$ meV و $L = 70$ nm [۴۶].

به طور تحلیلی ویژگی تراپردی فرمیون‌های دیراک ناهمسانگرد و کج‌شده در اتصال p-n بوروفین 8-pmmn بررسی شده است. ساختار اتصال p-n مسطح به عنوان مؤلفه اساسی دستگاه‌های مختلف جدید بر اساس مواد تک‌لایه توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است. در این اتصال تونل‌زنی کلاین غیرعادی برخلاف تونل‌زنی کلاین معمولی، به سطح آرایش در نواحی n و p بستگی ندارد بلکه به جهت اتصال بستگی دارد [۱۵]. روش ماتریس تراپرد را برای بررسی تونل‌زنی کلاین فرمیون‌های بدون جرم در سراسر اتصالات n-p و n-p-n بوروفین 8-pmmn توسعه داده‌اند. در اتصال n-p مخروط‌های کج‌شده دیراک باعث

می‌شود که اعمال پتانسیل خارجی باعث تفکیک دره‌ها و قطبش دره‌ای می‌شود [۴۶]. می‌توان نشان داد که قطبش دره به جهت-گیری سد نیز بستگی دارد. در یک انرژی فرمی و ولتاژ دریچه مناسب، هنگامی که جهت‌گیری سد، عمود بر جهت کج‌شدگی مخروط‌های دیراک است، قطبش دره نزدیک به ۱۰۰ درصد می‌شود اما زمانی که جهت سد در امتداد جهت کج‌شدگی باشد جریان صفر خواهد شد. این یافته برای استفاده از بوروفین در ادوات ولیترونیک مفید است [۴۷].

هنگامی که میدان الکتریکی درون صفحه (میدان هال) به بوروفین 8-pmmn اعمال می‌شود، کج‌شدگی مخروط‌های دیراک از طریق ترازهای لاندائو خود را نشان می‌دهند. زیرا کج‌شدگی مخروط‌های دیراک، فرکانس نوسانات منحنی رسانایی طولی را تقویت می‌کند. ترازهای لاندائو وابسته به دره باعث ویژگی تراپردی دره-قطبیده در حضور میدان هال می‌شوند که در تضاد با تک لایه گرافین با مخروط‌های دیراک غیرکج‌شده همسانگرد است [۴۳].

در مقاله‌ای نشان داده‌اند که مواد دوبعدی و سه‌بعدی Dirac-Weyl (DW) که رابطه پاشندگی انرژی کج‌شده را نشان می‌دهند مانند بوروفین، می‌توانند پدیده‌های تراپرد به شدت متفاوتی را در مقایسه با مواد با حالت غیرکج‌شده مانند گرافین ایجاد کنند. پیش‌بینی می‌شود که تونل‌زنی کلاین فرمیون‌های DW با کایرالیته‌های مخالف در امتداد دو جهت مورب مجزا ظاهر شود. افزون بر این، فیلتر کردن دره و اثرات تقسیم پرتو به راحتی با روش‌های مهندسی ناخالصی تنظیم می‌شوند، در حالی که شکست امواج الکترونی به طور چشمگیری با کج‌شدگی تغییر می‌یابد، که راه را برای کاربرد در نور الکترون و ولیترونیک هموار می‌کند [۴۸].

در حضور یک سد پتانسیل ناشی از ولتاژ دریچه، یک اتصال n-p-n مبتنی بر بوروفین 8-pmmn بررسی شده است. بازتاب برگشتی^۸ وابسته به دره موج الکترونی با تغییر جهت اتصال ایجاد می‌شود. در این ماده تونل‌زنی غیرعادی کلاین وابسته به دره مشاهده می‌شود. در این نوع تونل‌زنی، تراپرد کامل بدون توجه

¹ Refraction 7
¹ Retroreflection 8

ایجاد تونل مورب کلاین می‌شوند. زاویه ترابرد کامل به فرود عادی $20,4^\circ$ است [۴۹].

ویژگی ترابرد الکترونی در پیوندهای n-p و n-p-n مبتنی بر بوروفان به طور تحلیلی بررسی شده است. هنگامی که پرتو الکترونی از ناحیه n در اتصال n-p عبور می‌کند، پرتو به دو پرتو وابسته به دره در ناحیه p تقسیم می‌شود. این ناشی از زاویه شکست وابسته به دره به علت ساختار نواری ناهمسانگرد بوروفان است. جالب توجه است که در این نوع اتصال می‌توان شکافت دره را بدون هیچ روش مدولاسیون خارجی ایجاد کرد. در یک اتصال n-p-n مبتنی بر بوروفان، تونل‌زنی غیرعادی کلاین ناشی از ساختار نواری ناهمسانگرد بوروفان است [۵۰].

ویژگی ترابرد الکترونی دیراک را در اتصال فلز-سد-فلز عادی (NBN) بوروفان تک‌لایه بررسی و احتمال عبور را با تغییر عرض ناحیه سد، انرژی فرودی الکترون و تکانه عرضی تجزیه و تحلیل کرده‌اند. گافی در نمودار احتمال عبور مشاهده می‌شود که موقعیت و پهناى گاف را می‌توان از طریق اندازه سد پتانسیل و تکانه عرضی تنظیم کرد. رفتار نوسانی یا میرایی رسانندگی با تغییر در عرض سد پتانسیل، به تعداد مدهای انتشاری و ناپایدار^{۱۹} بستگی دارد که توسط انرژی الکترون فرودی و اندازه سد کنترل می‌شود. زمانی که انرژی الکترون فرودی با ارتفاع سد یکسان است، رسانندگی به مقدار کمینه کاهش می‌یابد، که این اثر ناشی از حضور مدهای ناپایدار درون سد پتانسیل است. این یافته‌ها، یک فیلتر بردار موج قابل تنظیم مبتنی بر بوروفان را پیشنهاد می‌کند که در دستگاه‌های نانوالکترونیک مبتنی بر بوروفان مفید خواهد بود [۵۱].

ترابرد اسپین در مواد دوبعدی گرافین مانند با مخروط‌های دیراک کج‌شده در اتصال فلز عادی-فرومغناطیس-فلز عادی (N-F-N) بررسی شده است. کج شدن مخروط دیراک به شدت بر ویژگی ترابرد و در نتیجه رسانایی وابسته به اسپین تأثیر می‌گذارد. با تغییرات ملایم پارامتر کج‌شدگی، قطبش جریان اسپینی معکوس می‌شود. همچنین، جریان اسپینی را با چرخش آدیباتیک یک فرومغناطیس بالای ماده مطالعه کرده‌اند. مشاهده شده که جریان

اسپینی برای یک مقدار معین کج‌شدگی صفر می‌شود. این یافته‌ها روشی کارآمد برای کنترل‌پذیری بالای انتقال اسپین پیوند فرومغناطیسی فراهم می‌کند و می‌تواند در زمینه اسپینترونیک بسیار مفید باشد [۵۲].

۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

مطالعه و بررسی مواد دوبعدی در کوچک‌سازی ادوات الکترونیک به منظور دستیابی به سرعت بالای تبادل اطلاعات، کم کردن اتلاف انرژی و هزینه‌های ناشی از آن، حائز اهمیت است. این رویکرد مشوق محققان برای کشف مواد جدید با ویژگی متنوع‌تری شده است. بوروفین یک از این مواد دوبعدی است که به علت ناهمسانگردی ساختاری و داشتن مخروط‌های دیراک کج، ویژگی جالب الکترونی، مکانیکی، نوری و حرارتی از خود نشان می‌دهد.

در این پژوهش، به طور مروری مقالاتی را بررسی کردیم که تأثیر عواملی همچون دما، ناخالصی، کرنش، تابش نور و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را بر ترابرد کوانتومی بوروفین مطالعه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بوروفین می‌تواند به عنوان فیلترهای اسپینی و دره‌ای در ادوات اسپینترونیک و ولیترونیک به کار رود. با اعمال آرایش‌ها به این ماده می‌توان جریان عبوری را کنترل کرد و همچنین، کرنش باعث گذار نیم‌رسانا-فلز در بوروفین می‌شود. تونل‌زنی غیرعادی کلاین در این ماده پدیده دیگری است که آن را از مواد مشابه همچون گرافین متمایز می‌کند. همچنین، اثرات تابش نور به این ماده نویددهنده ساخت ادوات حساس به نور بر پایه بوروفین است.

مراجع

- [1] Esmaeilzadeh M, Ahmadi S. Spin-dependent electron transport in graphene junctions in the presence of Rashba spin-orbit interaction. *Journal of Applied Physics*. 2012; 112(10). <https://doi.org/10.1063/1.4766812>.
- [2] Dery H, Wu H, Ciftcioglu B, Huang M, Song Y, Kawakami R, Shi J, Krivorotov I, Zutic I, Sham LJ. Nanospintronics based on magnetologic gates. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2011;

¹ Evanescent

- letters. 2010; 10(4):1271-5. <https://doi.org/10.1021/nl903868w>.
- [11] Nikoofard H, Esmailzadeh M, Farghadan R, Sun JT. Quantum pumping through the surface states of a topological insulator. *Physical Review B*. 2022; 106(16):165127. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.165127>.
- [12] Pesin D, MacDonald AH. Spintronics and pseudospintronics in graphene and topological insulators. *Nature materials*. 2012; 11(5):409-16. <https://doi.org/10.1038/nmat3305>.
- [13] Wang ZQ, Lü TY, Wang HQ, Feng YP, Zheng JC. Review of borophene and its potential applications. *Frontiers of Physics*. 2019; 14(3):33403. <https://doi.org/10.1007/s11467-019-0884-5>.
- [14] Zhou X. Valley-dependent electron retroreflection and anomalous Klein tunneling in an 8-P m m n borophene-based n- p- n junction. *Physical Review B*. 2019; 100(19):195139. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.195139>.
- [15] Zhang SH, Yang W. Oblique Klein tunneling in 8- P m m n borophene p- n junctions. *Physical Review B*. 2018; 97(23):235440. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.235440>.
- [16] Herrera SA, Naumis GG. Kubo conductivity for anisotropic tilted Dirac semimetals and its application to 8-Pmmn borophene: The role of different frequency, temperature and scattering limits. *arXiv preprint arXiv:1909.04144*. 2019. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.195420>.
- [17] Mannix AJ, Zhang Z, Guisinger NP, Yakobson BI, Hersam MC. Borophene as a prototype for synthetic 2D materials development. *Nature nanotechnology*. 2018; 13(6):444-50. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0157-4>.
- [18] Tian Y, Yang H, Li J, Hu S, Cao S, Ren W, Wang Y. A comprehensive first-principle study of borophene-based nano gas sensor with gold electrodes. *Frontiers of Physics*. 2022; 17:1-7. <https://doi.org/10.1007/s11467-021-1094-5>.
- [19] Vishkayi SI, Tagani MB. Current-voltage characteristics of borophene and borophane sheets. *Physical Review B*. 2011; 83(1):014407. <https://doi.org/10.1109/TED.2011.2173498>.
- [3] Farokhnezhad M, Esmailzadeh M, Shakouri K. Strain-modulated anisotropy of quantum transport properties in single-layer silicene: Spin and valley filtering. *Physical Review B*. 2017; 96(20):205416. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.205416>.
- [4] Shakouri K, Simchi H, Esmailzadeh M, Mazidabadi H, Peeters FM. Tunable spin and charge transport in silicene nanoribbons. *Physical Review B*. 2015; 92(3):035413. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.035413>.
- [5] Takagi N, Lin CL, Kawahara K, Minamitani E, Tsukahara N, Kawai M, Arafune R. Silicene on Ag (1 1 1): Geometric and electronic structures of a new honeycomb material of Si. *Progress in Surface Science*. 2015; 90(1):1-20. <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2014.10.001>.
- [6] Nikoofard H, Esmailzadeh M, Heidari-Semiromi E, Sun JT. Quantum charge and spin pumping in monolayer phosphorene. *Physical Review B*. 2020; 102(3):035435. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.035435>.
- [7] Keshtan MA, Esmailzadeh M. Spin filtering in a magnetized zigzag phosphorene nanoribbon. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2015; 48(48):485301. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/48/485301>.
- [8] Khani H, Esmailzadeh M, Kanjouri F. Spin and valley dependent electronic transport in molybdenum disulfide considering up to the second order k-dependent terms: a more exact solution. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019; 21(15):7822-30. <https://doi.org/10.1039/C8CP07395C>.
- [9] Heshmati-Moulai A, Simchi H, Esmailzadeh M, Peeters FM. Phase transition and spin-resolved transport in MoS₂ nanoribbons. *Physical Review B*. 2016; 94(23):235424. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.235424>.
- [10] Splendiani A, Sun L, Zhang Y, Li T, Kim J, Chim CY, Galli G, Wang F. Emerging photoluminescence in monolayer MoS₂. *Nano*

- of freestanding β 12-borophene nanoribbons. Nano-micro letters. 2018; 10:1-3. <https://doi.org/10.1007/s40820-017-0167-z>.
- [28] Jin J, Wang Z, Dai X, Long M. The magnetism and transport properties of bare and hydrogenated borophene nanoribbons. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2019; 32:3893-900. <https://doi.org/10.1007/s10948-019-05178-6>.
- [29] Sun C, Wang XF, Zhou LP, Liu YS. The magnetism enhancement and spin transport in zigzag borophene nanoribbons edge-passivated by N atoms. Applied Nanoscience. 2020; 10:29-35. <https://doi.org/10.1007/s13204-019-01092-4>.
- [30] Norouzi F, Farokhnezhad M, Esmailzadeh M, Szafran B. Controllable spin filtering and half-metallicity in β 12-borophene nanoribbons. Physical Review B. 2021; 104(24):245431. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.245431>.
- [31] Askarpour Z, Farokhnezhad M, Esmailzadeh M. Controllable giant magneto resistance and perfect spin filtering in α^{\prime} β -borophene nanoribbons. arXiv preprint arXiv:2210.07645. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.07645>.
- [32] He Y, Cheng N, Chen C, Xiong S, Zhao J. Tuning the electronic transport anisotropy in borophene via oxidation strategy. Science China Technological Sciences. 2019; 62:799-810. <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9385-x>.
- [33] Wang ZQ, Lü TY, Wang HQ, Feng YP, Zheng JC. Band gap opening in 8-pmmn borophene by hydrogenation. ACS Applied Electronic Materials. 2019; 1(5):667-74. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.9b00017>.
- [34] An Y, Jiao J, Hou Y, Wang H, Wu D, Wang T, Fu Z, Xu G, Wu R. How does the electric current propagate through fully-hydrogenated borophene?. Physical Chemistry Chemical Physics. 2018; 20(33):21552-6. <https://doi.org/10.1039/C8CP04272A>.
- [35] Zare M. Thermoelectric transport properties of borophane. Physical Review B. 2019; Physical Chemistry Chemical Physics. 2017; 19(32):21461-6. <https://doi.org/10.1039/C7CP03873A>.
- [20] Adamska L, Sadasivam S, Foley IV JJ, Darancet P, Sharifzadeh S. First-principles investigation of borophene as a monolayer transparent conductor. The Journal of Physical Chemistry C. 2018; 122(7):4037-45. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10197>.
- [21] Xiao RC, Shao DF, Lu WJ, Lv HY, Li JY, Sun YP. Enhanced superconductivity by strain and carrier-doping in borophene: A first principles prediction. Applied Physics Letters. 2016; 109(12). <https://doi.org/10.1063/1.4963179>.
- [22] Cheng C, Sun JT, Liu H, Fu HX, Zhang J, Chen XR, Meng S. Suppressed superconductivity in substrate-supported β 12 borophene by tensile strain and electron doping. 2D Materials. 2017; 4(2):025032. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/aa5e1b>.
- [23] Zhou X. Anomalous Andreev reflection in an 8-P m m n borophene-based superconducting junction. Physical Review B. 2020; 102(4):045132. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.045132>.
- [24] Faraei Z, Jafari SA. Perpendicular Andreev reflection: Solid state signature of black hole horizon. Progress in Nanoscale and Low-Dimensional Materials and Devices. Springer, Cham; 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93460-6_22.
- [25] Liu Y, Dong YJ, Tang Z, Wang XF, Wang L, Hou T, Lin H, Li Y. Stable and metallic borophene nanoribbons from first-principles calculations. Journal of Materials Chemistry C. 2016; 4(26):6380-5. <https://doi.org/10.1039/C6TC01328G>.
- [26] Liu J, Wu J, Chen C, Han L, Zhu Z, Wu J. Negative differential resistance and magnetoresistance in zigzag borophene nanoribbons. International Journal of Modern Physics B. 2018; 32(04):1850033. <https://doi.org/10.1142/S0217979218500339>.
- [27] Izadi Vishkayi S, Bagheri Tagani M. Edge-dependent electronic and magnetic characteristics

- [44] Pham KD, Hien ND, Hieu NN, Phuong LT. Magnetic properties of β 12-borophene in the presence of electric field and dilute charged impurity. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2020; 120:114074. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2020.114074>.
- [45] Bidgoli FI, Nikoofard H, Nikoofard N, Esmailzadeh M. Spin-and valley-dependent transports through ferromagnetic 8-pmmn borophene monolayer. *arXiv preprint arXiv:2309.17221*. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.17221>.
- [46] Zheng J, Lu J, Zhai F. Anisotropic and gate-tunable valley filtering based on 8-Pmmn borophene. *Nanotechnology*. 2020; 32(2):025205. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abbbd7>.
- [47] Nguyen VH, Charlier JC. Klein tunneling and electron optics in Dirac-Weyl fermion systems with tilted energy dispersion. *Physical Review B*. 2018;97(23):235113. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.235113>.
- [48] Kong Z, Li J, Zhang Y, Zhang SH, Zhu JJ. Oblique and asymmetric Klein tunneling across smooth NP junctions or NPN junctions in 8-Pmmn borophene. *Nanomaterials*. 2021; 11(6):1462. <https://doi.org/10.3390/nano11061462>.
- [49] Zhou X. Valley splitting and anomalous Klein tunneling in borophane-based np and npn junctions. *Physics Letters A*. 2020; 384(25):126612. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126612>.
- [50] Das P, De Sarkar S, Ghosh AK. Tunable wavevector filtering in borophane based normal metal-barrier-normal metal junctions. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2020; 32(23):235301. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab73a2>.
- [51] Sinha D. Spin transport and spin pump in graphene-like materials: effects of tilted Dirac cone. *The European Physical Journal B*. 2019; 92:1-8. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2019-90332-7>.
- 99(23):235413. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.235413>.
- [36] Padilha JE, Miwa RH, Fazzio A. Directional dependence of the electronic and transport properties of 2D borophene and borophane. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2016; 18(36):25491-6. <https://doi.org/10.1039/C6CP05092A>.
- [37] Sun J, Zhang Y, Leng J, Ma H. The electronic and transport properties of borophane with defects: A first principles study. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2018; 97:170-6. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2017.11.012>.
- [38] Shukla V, Grigoriev A, Jena NK, Ahuja R. Strain controlled electronic and transport anisotropies in two-dimensional borophene sheets. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2018; 20(35):22952-60. <https://doi.org/10.1039/C8CP03815E>.
- [39] Lopez-Bezanilla A, Littlewood PB. Electronic properties of 8- Pmmn borophene. *Physical Review B*. 2016; 93(24):241405. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.241405>.
- [40] Bhattacharyya G, Mahata A, Choudhuri I, Pathak B. Semiconducting phase in borophene: role of defect and strain. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017; 50(40):405103. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa81b8>.
- [41] Zabolotskiy AD, Lozovik YE. Strain-induced pseudomagnetic field in the Dirac semimetal borophene. *Physical Review B*. 2016; 94(16):165403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.165403>.
- [42] Islam SF. Magnetotransport properties of 8-Pmmn borophene: effects of Hall field and strain. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2018; 30(27):275301. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aac8b3>.
- [43] Napitu BD. Photoinduced Hall effect and transport properties of irradiated 8-Pmmn borophene monolayer. *Journal of Applied Physics*. 2020; 127(3). <https://doi.org/10.1063/1.5130025>.

Review of electron transport properties in borophene

M.Dehghan¹, H.Nikoofard¹, N.Nikoofard¹ and M.Esmailzadeh^{*,2}

1. Institute of Nanoscience and Nanotechnology, University of Kashan, Kashan, Iran

2. Department of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract: Due to the unique physical and chemical properties of two-dimensional (2D) materials, such as linear band structure near the Fermi level, high electrical and thermal conductivity, they have opened up a wide vision in the fabrication of nanoelectronic devices, energy storage and information transmission. One of the theses materials that has recently received attention is a two-dimensional monolayer of boron atoms called borophene which has various allotropes such as α , β_{12} , χ_3 , 2-pmmn and 8-pmmn. This 2D material has tilted and anisotropic Dirac cone and in addition to excellent transparency, it has excellent electron and ion conductivity. These properties along with other properties of borophene have caused diverse and potential applications of this material in gas sensors, metal ion batteries and electronic and optoelectronic devices. In this paper, we intend to review the properties of borophene and investigate the effect of factors such as impurity, light radiation, strain, dimension reduction in the form of nanoribbon, temperature, electric and magnetic fields on the properties of electron transport in this material.

Keywords: Two-dimensional materials, borophene, quantum transport, external fields, nanoelectronics