

بررسی خصوصیات انتقالی-کوانتومی در تک کریستال های 2H-TaSe_2

سید محمد علی رادمنش^{*۱}

۱- هیئت علمی، پژوهشکده فوتونیک و فناوری های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران، ایران
*Corresponding author, email: radmanesh@ut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق ما نشان می دهیم که ویژگی های مغناطش- کوانتومی تک کریستال های 2H-TaSe_2 توسط سرکوب موج دانسیته ی بار و ارتقای دمای ابر رسانایی در حد $T_c=2.32\text{K}$ با استفاده از عنصر Pt در نقش آلاینده در مقدار ۱ درصد اتمی می تواند اصلاح شود. غالب شدن گذار موج دانسیته بار در دمای حدود 100K که با رفتار غیر فلزی همراه است، هنگامی که خصوصیات مغناطش- مقاومتی در جهت محور c اندازه گیری شود، نسبت به کریستال میزبان بدون حضور اتم های Pt که در آن علیرغم وجود ناهمسانگردی عمده میان جهت درون صفحه ای ab و c همچنان رفتار فلزی حاکم است، بنیانگر تغییر چشمگیر سطح فرمی کریستال های 2H-TaSe_2 با ورود اتم های Pt و قرار گرفتن آن در بین لایه های Se-Ta-Se با پیوند ضعیف واندروالس است که با اهدای الکترون های خود باعث ارتقای پدیده های انتقال کوانتومی و کاهش برهم کنش الکترون- فونون در ساختار شبکه هگزاگونال شده و در نهایت دمای بحرانی گذار به حالت مایزنر بیش از ۱۷ برابر افزایش می یابد.

کلیدواژه‌ها: ابر رسانایی، محدود شونده گی برهم کنش الکترون- فونون، استقرار ضعیف الکترونی، سطح فرمی

Quantum-Transport Features in 2H-TaSe_2 Single Crystals

Seyed Mohammad Ali Radmanesh

¹ Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran, E-mail address: radmanesh@ut.ac.ir

Abstract

In this work, we report on the magneto-transport properties of the Pt doped 2H-TaSe_2 single crystals. A dramatic enhancement of superconducting $T_c=2.32\text{K}$ almost 17 times the host TaSe_2 as well as a peculiar nonmetallic behavior along c-axis is indicative of the modified electronic features of the hexagonal crystal lattice by the Pt donated electrons. This causes the destruction in the nesting of the Fermi surface and suppresses the charge density wave (CDW) order as a competing agent with superconductivity. The disorder due to the ballistic motion of the electrons is attributed to the diminished electron-phonon coupling in the 2H-TaSe_2 crystalline structure when doped by the Pt atoms. Thus, the less phonon contribution in the electronic features leads to the tremendous strengthening of the Meisner state.

Keywords: Superconductivity, Electron-Phonon Coupling, Weak Localization, Fermi Surface

۱- مقدمه

امروزه به خوبی مشخص شده است که ترکیبات حاوی فلز واسطه و عنصر کالکوجن با فرمول عمومی MX_2 (M نماینده فلز واسطه همچون Ta, Mo, V و نظایر آن و X عنصر کالکوجن که می تواند S, Se یا Te باشد) با دارا بودن ویژگی های متمایزی همچون ساختار کریستالی شبه دوبعدی برآمده از پیوند کوالانت قوی درون صفحه ای X-M-X و پیوند ضعیف و اندروالس X-X میان صفحات حاوی عنصر کالکوجن می توانند به ظهور جنبه های الکترونیکی منحصر به فردی منجر شوند [1-4]. در ساختار شبکه هگزاگونال ترکیب $TaSe_2$ عنصر واسطه ی Ta به صورت یک منشور سه وجهی با عنصر کالکوجن Se در تماس است، هرچند که در حالت کلی تماس میان این عناصر ممکن است به صورت همسایگی در هرم های شش گوشه نیز باشد. حضور صفحات متوالی حاوی عنصر واسطه و کالکوجن به صورت متوالی در ساختار کریستالی با فرمول MX_2 به بروز ویژگی چند نوعی^{۳۶} در این ترکیبات می انجامد که در آن ساختار کریستالی ثابت بوده اما تعداد تکرار صفحات حاوی کالکوجن متفاوت است. به عنوان نمونه چند نوعی های 2H, 4H, 3R و 1T با کنترل پارامترهای رشد می توانند در ترکیب $TaSe_2$ مجال تشکیل شدن پیدا کنند [5,6]. این امر فرصتی کم نظیر برای تنظیم خصوصیات انتقالی-کوانتومی^{۳۷} در این ترکیبات بوجود می آورد، زیرا که با افزایش توالی صفحات در ساختار کریستالی برهم کنش الکترونیکی صفحات افزایش یافته که این امر گاف انرژی کوچکتری را بدنبال خواهد داشت. در چند نوعی پایه $2H-TaSe_2$ مشخص شده است که حالت های کوانتومی موج دانسیته ی بار همتراز^{۳۸} و ناهمتراز^{۳۹} به ترتیب در دماهای 90K و 123K که با رفتار فلزی همراه است رخ داده که در نهایت با گذار به حالت ابر رسانایی در دمای $T_c = 0.133K$ همراه خواهد بود [7-9]. شایان توجه است که حالت های موج دانسیته بار و ابر رسانایی^{۴۰} به طور خاص تحت عنوان ناپایداری های ضعیف در سطح فرمی^{۴۱} انگاشته می شوند که ناشی از جفت شوندگی الکترون - فونون^{۴۲} است. در مورد ترکیب $2H-TaSe_2$ با گروه فضایی $P6_3/mmc$ بررسی ها نشان داده که همکاری و در مواردی رقابت میان نظم موج دانسیته بار و ابر رسانایی نقش عمده ای در تعیین ویژگی های الکترونیکی چند نوعی های 2H و 3R ایفا می کند [10-12]. با این وجود در ترکیبات حاوی دو عنصر کالکوجن و فلز واسطه به صورت استوکیومتری ویژگی های ابر رسانایی هنوز تا درک کامل فاصله دارند که بدلیل حالت پایه نظم موج چگالی بار پیچیده و درگیری چندین باند 4d و یا هیبریدی از 4d و باند قطبی p از سطوح فرمی مختلف است. چنین جنبه های منحصر به فردی امکان ظهور ابر رسانایی غیر متعارف را در این ترکیبات افزایش می یابد [12-14].

در این کار ما نشان می دهیم که آلاییدن ترکیب پایه $2H-TaSe_2$ با تنها یک درصد اتمی Pt به افزایش شگفت انگیز دمای بحرانی ابر رسانایی و همچنین رفتار غیر فلزی خواص انتقالی کوانتومی تحت میدان در جهت خارج صفحه ای بر خلاف ترکیب پایه منجر می شود. از طرف دیگر بررسی خواص انتقالی تحت میدان در مقادیر بالاتر و پایین تر از دمای بحرانی گذار به ابر رسانایی نشان دهنده ی رقابت پاد استقرار ضعیف با ابر رسانایی در تعیین خصوصیات الکترونیکی ترکیب $2H-TaSe_2$ آلائیده شده با Pt است.

^{۳۶} Polytypism
^{۳۷} Quantum-Transport Properties
^{۳۸} Commensurate Charge Density Wave (CCDW)
^{۳۹} Incommensurate Charge Density Wave (ICDW)
^{۴۰} Superconductivity
^{۴۱} Fermi Surface
^{۴۲} Electron-Phonon Coupling

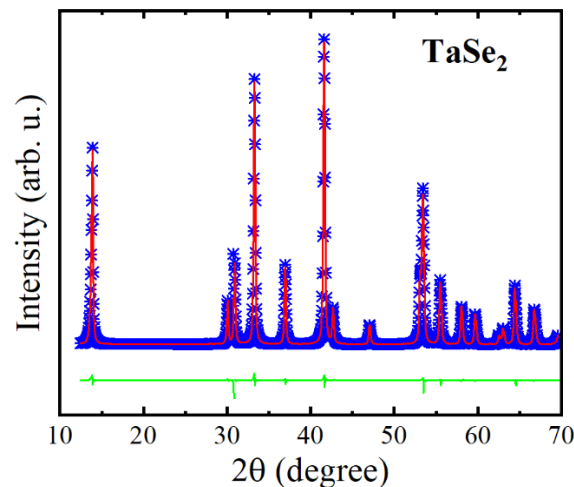
۲- مواد و روش‌ها

تک کریستال‌های بالک 2H-TaSe_2 آلاینده شده با Pt در حد یک درصد اتمی با ابعاد در حد یک سانتی متر با استفاده از روش انتقال بخار شیمیایی^{۴۳} تولید شدند که بدین منظور مقادیر استوکیومتری از پیش سازنده‌ها با یکدیگر مخلوط شدند. سپس در یک کوره ی تیوبی از جنس کوارتز تحت خلا و بسته در دمای 900°C به مدت 4 روز قرار گرفتند تا در اثر واکنش‌های حالت جامد پودر اولیه ترکیب موردنظر بدست آید. تک کریستال‌های صفحه‌ای با بزرگی یک سانتی متر با استفاده از گرادیان دمایی در یک کوره دو منطقه‌ای با منطقه ی گرم در حد 950°C و منطقه ی سرد جهت رشد در دمای 830°C حاصل شد. ساختار و خلوص فازی ترکیب با استفاده از پراش پرتو ایکس و آنالیز ریتولد بدست آمد. خواص مغناطش-انتقالی کوانتومی ترکیب نیز جهت بررسی در دماها و میدان‌های مغناطیسی متنوع برای مطالعه اندازه گیری شد.

۳- بحث

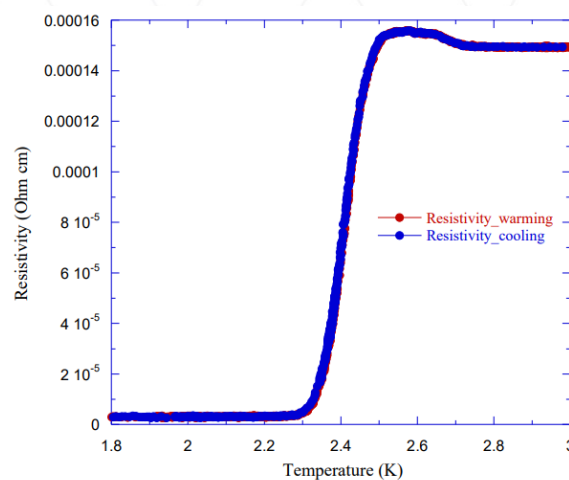
در شکل ۱ الگوی پراش پرتو X مربوط به ترکیب TaSe_2 به همراه تصفیه ی پیک‌های ظاهر شده توسط آنالیز ریتولد نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده ی تطبیق کامل پیک‌ها با چند نوعی 2H است که این امر بیانگر حفظ چند نوعی پایه 2H با ورود عنصر آلاینده Pt به درون ساختار است. از طرف دیگر وجود تنها پیک‌های مربوط به مراتب پراش (002) در الگوی ارائه شده بیانگر کیفیت بالای تک کریستال و ویژگی ذاتی تورقی ساختار است که به ایجاد شبکه شبه دوبعدی منجر می‌شود. شکل ۲ تغییرات مقاومت خارج از صفحه در جهت محور c را به عنوان تابعی از دما نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار نمایان است افت شدید مقاومت در دمای تقریبی $T_c=2.32\text{K}$ مشاهده می‌شود که بر گذار ترکیب از حالت نرمال به حالت مایزنر^{۴۴} دلالت دارد. از طرف دیگر حوالی دمای بحرانی و کمی بالاتر از آن با کاهش دما مقاومت افزایش می‌یابد که در هر دو فرایند گرمایش و سرمایش به وضوح دیده می‌شود. در اینجا استقرار ضعیف الکترون با ارتقای مقاومت در مسیر پیمایش توسط یک جفت الکترون در تلاش به حفظ موج دانسیته بار بوده و با گذار به حالت به ابر رسانایی در تقابل است. از طرف دیگر در شکل ۳ تغییرات مقاومت در جهت c در محدوده ی دمایی 20mK تا 300K حاکی از رفتار نامعمول غیرفلزی در این ترکیب است. این درحالی است که در ترکیب مرجع 2H-TaSe_2 بدون حضور عنصر Pt علیرغم وجود ناهمسانگردی زیاد در ساختار کریستالی در جهت c نیز مقاومت همچنان رفتار فلزی دارد که این امر در تعارض آشکار با نتایج حاضر است. اما به صورت جالب توجه نواحی گذار به حالات کوانتومی موج دانسیته بار هم تراز و غیر هم تراز همچنان در دماهای به ترتیب 90K و 130K قابل مشاهده است که نشان دهنده ی دوام این حالت است.

^{۴۳}Chemical vapor transport method
^{۴۴}Misner State

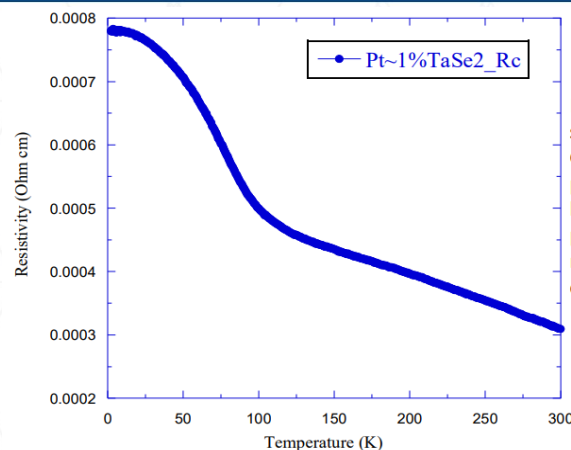


شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس تک کریستال TaSe₂ آلاینده شده با Pt در حد یک درصد اتمی به همراه آنالیز ریتولد برای تصفیه پیک ها که تطابق با چند نوعی 2H را به خوبی نشان می دهد.

برای توضیح این پدیده باید به گسترش ساختار لایه ای 2H ترکیب با ورود عناصر Pt که با افزایش قابل توجه پارامتر c شبکه ناشی از پیوند ضعیف و اندروالسی است متوسل شویم. این امر در دماهای بالاتر از دمای گذار به کاهش مشارکت موثر فونون در ویژگی های انتقالی منجر می شود [9]. در حقیقت ساختار لایه ای ترکیبات حاوی کالکوجن مضاعف و فلز واسطه فاصله ی مراودات الکترونیکی کاهش می یابد که نقش عنصر Pt در کمرنگ نمودن پیوند ضعیف بین لایه ای و اندروالسی قابل ملاحظه است. بنابراین در این شرایط جفت شوندگی الکترون - فونون کمتری برای موازنه نمودن حالت های الکترونی رقیب در همسایگی موج دانسیته بار وجود خواهد داشت. می توان مشاهده کرد که در دماهای پایین تر رفتار غیرفلزی خارج صفحه ای که به یاری موج دانسیته بار می آید، پررنگ تر است [11].

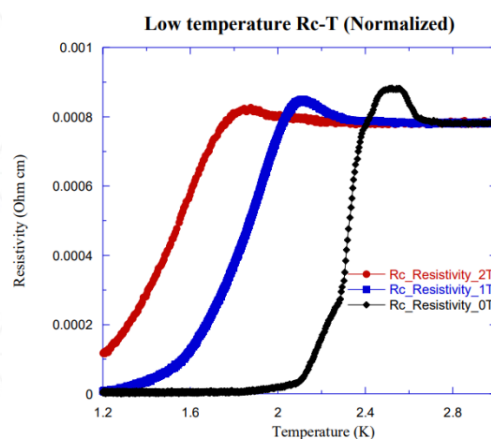


شکل ۲. تغییرات مقاومت در تک کریستال های 2H-TaSe₂ آلاینده شده با Pt به عنوان تابعی از دما در دو فرایند سرمایش و گرمایش که رقابت حالت استقرار ضعیف با ابر رسانایی را بوضوح نشان می دهد.



شکل ۳. نمودار تغییرات مقاومت خارج از صفحه در گستره‌ی دمایی فوق پایین تا دمای اتاق که رفتار نامعمول غیر فلزی را در اثر کاهش پراش فونون با ورود عنصر آلاینده ی Pt در شبکه میزبان 2H-TaSe₂ نشان می دهد.

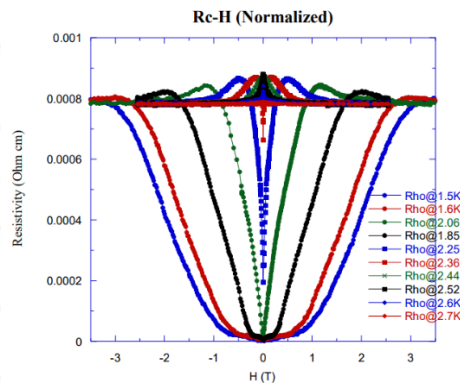
تغییرات مقاومت خارج از صفحه در جهت محور C بر حسب مقادیر مختلف میدان مغناطیسی در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس رابطه ی لورنتز با اعمال میدان مغناطیسی بدلیل انحراف شار مغناطیسی از جهت حرکت الکترون در منطقه ی نفوذی و یا بالیستیک مقاومت - مغناطش در اثر نیروی ظاهر شده افزایش می یابد. همان طور که دیده می شود در میدان های بزرگتر منحنی انتقال - مغناطش به سمت چپ در دماهای پایین تر جابجا می شود که این امر بر کاهش دمای بحرانی ابر رسانایی ناشی از سرکوب حرکت بالیستیک الکترون دلالت می کند. با این حال در مورد حالت استقرار ضعیف که ناشی از نظم موج دانسیته بار در ناحیه ی نفوذی است، نیز روند مشابهی دیده می شود، به نحوی که میدان بزرگتر باعث کاهش این حالت گذار در اثر تخریب نظم می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تاثیر بارز اعمال میدان تضعیف کلی فرایندهای انتقال- کوانتوم در ترکیب است [12].



شکل ۴. الف تصاویر یک ورقه از ساختارهای Nb₃SiTe₆ ب یک سطح هم پتانسیل از توزیع الکترونی فضایی مربوط به صفحه ی Nb/Si. سلول واحد در تصویر با مستطیل سیاه مشخص شده است.

به منظور تحقیق بهتر موضوع از اندازه گیری مغناطو- مقاومت در بازه ی دمایی و میدانی گسترده تر برای حصول اطمینان از روند ذکر شده استفاده می کنیم که در شکل ۵ قابل مشاهده است. در دماهای پایین تر از دمای بحرانی T_c= 2.32K با مغناطو- مقاومت منفی مواجه هستیم که هرچه دما کمتر شود گستره و میزان آن افزایش می یابد که بیانگر تاب آوری بیشتر پدیده های انتقالی - کوانتومی در حالت حرکت بالستیک است. از سوی دیگر در دماهای بالاتر از دمای بحرانی با افزایش دما از میزان حالت استقرار ضعیف کاسته می شود که نشان دهنده ی تاثیر مشهود نوسانات حرارتی در تخریب حرکت الکترون در

ناحیه ی نفوذی است. همچنین به عنوان یک قاعده ی کلی در هر دو ناحیه ی نفوذی و بالیستیک افزایش دما و اعمال میدان باعث تخریب و کاهش گستره ی جنبه های الکترونیکی ساختار کریستالی می شود.



شکل ۵. نمودار مغناطو- مقاومت خارج از صفحه در جهت عمود بر رشد تک کریستال $2H-TaSe_2$ آلاینده شده با Pt: انتقال مغناطو- مقاومت در هر دو ناحیه مثبت و منفی اندازه گیری شده است.

۴- نتیجه گیری

رقابت میان حالت ابر رسانایی با استقرار ضعیف الکترونی در تک کریستال های $2H-TaSe_2$ آلاینده شده با یک درصد اتمی Pt با اندازه گیری مغناطو-مقاومت در جهت عمود بر رشد تک کریستال محرز شد که در آن دمای بحرانی ابر رسانایی در حد ۱۷ برابر بالاتر از ترکیب میزبان است. همچنین تابع دمایی مقاومتی رفتار نامعمول غیر فلزی را در بازه ی دمایی گسترده تا دمای محیط نشان می دهد که در آن حالت های گذار به موج دانسیته بار همتراز و ناهمتراز در ناحیه ی نفوذی حاکم است. این پدیده های منحصر به فرد به کاهش پراش فونون در اثر ورود عنصر Pt در شبکه کریستالی هگزاگونال و در نتیجه کاهش برهم کنش میان لایه های X-M-X دارای پیوند ضعیف و اندروالس با از دست رفتن جفت شوندگی الکترون - فونون مرتبط است که می تواند ناشی از ابر رسانایی غیر متعارف در این ترکیب به شمار آید.

۵- تقدیر و تشکر

همکاری و مساعدت گروه پژوهشی فوتونیک همچنین پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای در تهیه مقاله مورد قدردانی می باشد.

۶- مراجع

- [1] A. Soumya Narayanan, et al., (2013) Quantum phase transition from triangular to stripe charge order in $NbSe_2$, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 110 (5), 1623–1627.
- [2] V. Vescoli, L. Degiorgi, H. Berger, L. Forro, (1998) ' Dynamics of correlated two-dimensional materials: the $2H-TaSe_2$ case, Phys. Rev. Lett. 81, 453–456.
- [3] B. Ruzicka, L. Degiorgi, H. Berger, R. Gaal, ' L. Forro, (2001) ' Charge dynamics of $2H-TaSe_2$ along the less conducting c-axis, Phys. Rev. Lett. 86, 4136–4139.
- [4] K.I. Yokota, G. Kurata, T. Matsui, H. Fukuyama, (2000), Superconductivity in the quasi-two-dimensional conductor $2H-TaSe_2$, Phys. B 284–288, 551–552.
- [5] Karvonen, J. T. & Maasilta, I. J. (2007) Influence of phonon dimensionality on electron energy relaxation. Phys. Rev. Lett. 99, 145503.
- [6] DiTusa, J. F., Lin, K., Park, M., Isaacson, M. S. & Parpia, J. M. (1992) Role of phonon dimensionality on electron-phonon scattering rates. Phys. Rev. Lett. 68, 1156–1159.
- [7] Tienda-Luna, I. M. et al. (2013) Effect of confined acoustic phonons on the electron

- mobility of rectangular nanowires. Appl. Phys. Lett. 103, 163107.
- [8] Lin, J. J. & Bird, J. P. (2002) Recent experimental studies of electron dephasing in metal and semiconductor mesoscopic structures. J. Phys. Condens. Matter 14, R501.
- [9] Y. Liu, et al., (2016) Nature of charge-density-wave and superconductivity in 1T-TaSe_{2-x}Te_x, Phys. Rev. B 94, 041531.
- [10] E. Morosan, et al., (2006) Superconductivity in Cu_xTiSe₂, Nat. Phys. 2, 544.
- [11] Lijun Li, et al., (2017) Superconducting order from disorder in 2H-TaSe_{2-x}S_x, npj. Quantum Mater. 11, 1–7.
- [12] D.C. Freitas, et al., (2016) Strong enhancement of superconductivity at high pressures within the charge-density-wave states of 2H-TaS₂ and 2H-TaSe₂, Phys. Rev. B 93, 184512.
- [13] H. Luo, et al., (2015) Polytypism, polymorphism, and superconductivity in TaSe_{2-x}Te_x, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 112 (11), E1174–E1180.
- [14] F. Dyson, (2004) A meeting with Enrico Fermi, Nature 427, 297.