

فوتورسانایی ماندگار در کپه کادمیوم تلوراید CdTe(Sb)

علی آرش رناسی*

چکیده

این مقاله حاصل یک طرح تحقیقاتی است که پدیده فوتورسانایی ماندگار¹ (PPC) را در کپه نیمه رسانای کادمیوم تلوراید با آلایش آنتیموان CdTe(Sb) بررسی می کند. واهلش PPC در CdTe(Sb) در ناحیه دمایی $295K < T < 110K$ از قانون توانی، $I_{ppc}(t) = t^{-\alpha}$ پیروی می کند که پارامتر فروافت α به صورت تابعی از دما تعیین شده است. با وجود این، PPC تنها در دماهای بالای 90 K قابل مشاهده است. برخلاف نتایج گزارش شده قبلی روی بیشتر مواد که اثرات PPC را به طور عمده در دماهای پایین نشان می دهد، در اینجا سازوکار حاکم بر PPC حضور افت و خیزهای پتانسیل - محلی کاتوره ای در نمونه است که ویژگی های ترابرد حامل را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد. چنین افت و خیزهایی می تواند هم توسط افت و خیزهای ترکیبی و هم توسط پتانسیل ناخالصی ایجاد شود.

کلیدواژه

نیمه رسانا، فوتورسانایی ماندگار، افت و خیزهای پتانسیل محلی کاتوره ای - جریان تاریکی، زمان واهلش.

* عضو هیئت علمی دانشگاه پیام نور مرکز بروجرد

مقدمه

در این مقاله نتایجی را که از طریق آزمایش به دست آورده ایم بررسی نموده، نشان می‌دهیم هر یک از این مدل‌ها چه سهمی در منشأ پدیده PPC در خصوص CdTe(Sb) دارند.

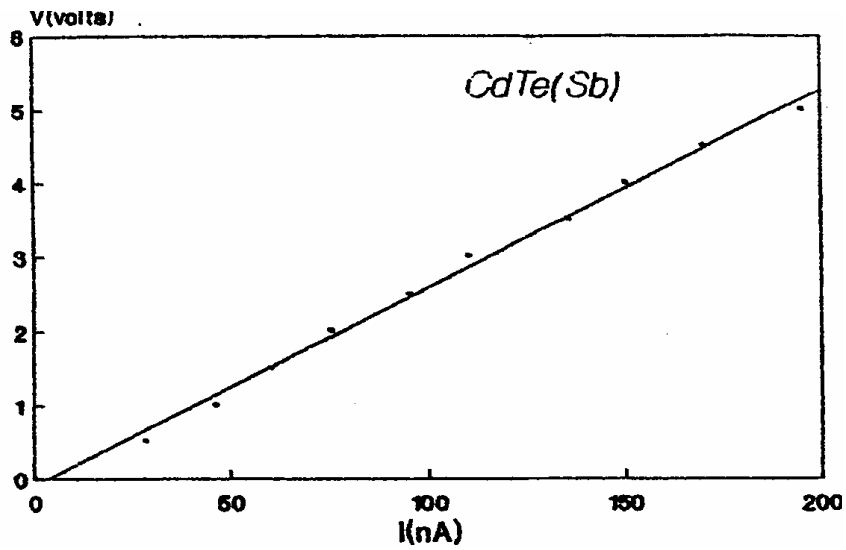
مواد و روش‌ها

نمونه‌ای که در این طرح، فرایند واهلش PPC در آن مطالعه و بررسی شده است، کپه CdTe(Sb) است که ضخامت آن ۳mm و سطحی در حدود ۸ mm × ۹ mm دارد. از آنجایی که آزمایش‌های مربوط به بررسی نیمه‌رساناها، به ویژه PPC، روی سطح آنها انجام می‌شود، سطح نمونه‌ها باید کاملاً صاف و صیقلی باشد. بنابراین بایستی سطح نمونه‌ها را با استفاده از سمباده‌های بسیار نرم به خوبی صیقل داد. برای عبور جریان در نیمه‌رساناها سیم‌های نازک مسی به کار برده شده است که این سیم‌ها توسط چسب نقره‌ای طوری روی نمونه‌ها چسبانده می‌شود که دو الکتروُد هر کدام به قطر ۱mm و به فاصله ۳mm از هم روی آنها تعبیه گردد. برای اطمینان از اهمی بودن اتصالات، ولتاژهای مختلفی را به صورت مستقیم و معکوس بر نمونه‌ها اعمال کرده، جریان‌های سطحی را اندازه گرفته ایم. نمودارهای ولتاژ جریان که در دو حالت مستقیم و معکوس به دست آمده، در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. این نمودارها مشخص می‌کنند که اتصالات کاملاً اهمی‌اند. توجه شود محور ولتاژ بر حسب ولت، و محور جریان بر حسب نانوآمپر درجه بندی شده است.

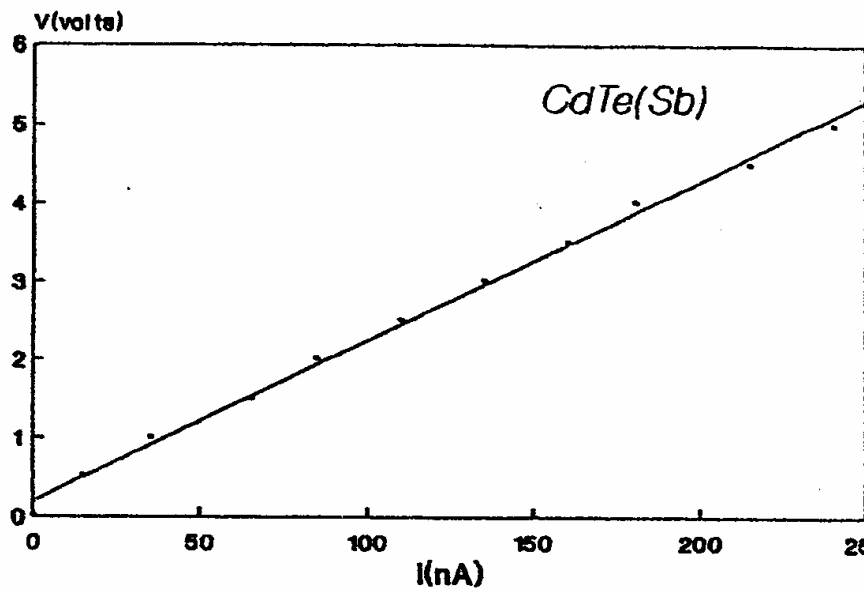
فوتورسانایی، افزایش در رسانایی الکتریکی نیمه‌رساناهاست که توسط تابش نور فرودی بر نیمه‌رسانا به وجود می‌آید. فوتورسانایی ماندگار (PPC) فوتورسانایی‌ای است که بعد از قطع برانگیزش نوری، برای مدتی (از دقیقه تا هزاران سال) در نیمه‌رسانا ماندگار می‌ماند. پدیده PPC در انواع بسیاری از مواد نیمه‌رسانا مشاهده شده است. اثر PPC کاربرد عملی قابل توجهی در ساخت قطعات حافظه نوری، آشکارسازهای مادون قرمز و ویدیکن‌ها^۲ و دوربین‌های تلویزیونی دارد (Sheinkman & Shik 1979). چندین سازوکار و مدل برای توصیف این اثر پیشنهاد شده است که از جمله می‌توان مدل سد ماکروسکوپی^۳، مدل واهلش شبکه بزرگ^۴ و مدل افت‌وخیزهای پتانسیل - محلی کاتوره‌ای^۵ را نام برد. در مدل سد ماکروسکوپی، سدهایی از قبیل آنچه در پیوندها مشاهده می‌شود وجود دارد و همچنین سدهای سطحی، حامل‌های بار را در فضای حقیقی جدا می‌کنند و در نتیجه احتمال بازترکیب آنها کاهش می‌یابد (Lin et.al. 1990; Theodorou & Queisser 1983).

در مدل واهلش شبکه بزرگ، انرژی تابش فرودی به اندازه‌ای است که ماده حساس به نور را تغییر شکل می‌دهد و حالت‌های انرژی جای گزیده را نزدیک مکان‌های تغییر شکل یافته، مختل می‌کند (Lang & Logan 1977). در مدل افت‌وخیزهای پتانسیل - محلی کاتوره‌ای، بی‌نظمی در نیمه‌رسانا موجب افت‌وخیز در لبه‌های نوار رسانش و ظرفیت شده، که همین امر به اثر PPC منجر می‌شود (Dissanayake et.al. 1984; Palmer et.al. 1992).

2. Vidicons
3. Macroscopic Barrier Model
4. Large Lattice Relaxation Model
5. Random Local _ Potential Fluctuations



شکل ۱. نمودار ولتاژ - جریان (با پلاریته مستقیم) برای CdTe(Sb) در دمای اتاق تاریک که برای چک کردن اتصالات مهمی انجام شده است.



شکل ۲. نمودار ولتاژ - جریان (با پلاریته معکوس) برای CdTe(Sb) در دمای اتاق تاریک، برای چک کردن اتصالات مهمی - مقایسه این شکل با شکل (۱) نشان می‌دهد که اتصالات کاملاً مهمی هستند.

فوتون‌هایی را گسیل نماید که انرژی آنها بیش از گاف انرژی CdTe(Sb) است.

نتایج و داده‌های به‌دست آمده در شرایط مختلف به‌طریقی به‌دست آمده‌است که سامانه را همیشه تا دمای اتاق گرم می‌کنیم تا نمونه را به حالت اولیه‌اش برگردانیم و سپس دوباره تا دمای مورد نظر، نمونه را سرد می‌کنیم. زمان تعادل در هر دما حدود ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. این عمل باعث می‌شود که در هر آزمایش، نمونه تحت شرایط اولیه یکسانی قرار گیرد. در تمام آزمایش‌ها، ولتاژ بایاس اعمال شده به نمونه ۳ ولت است. جریان توسط یک دستگاه نانوآمپرمتر بسیار حساس که از طریق یک رابط به رایانه متصل می‌شود اندازه‌گیری شده است.

مشاهدات و نتایج و بحث

در نمونه CdTe(Sb)، چهار ناحیه دمایی متفاوت برای PPC وابسته به دما حاصل شد. به‌ازای $T < 90\text{K}$ ، هیچ‌گونه اثری از PPC دیده نشد. در ناحیه دمایی $90\text{K} < T < 110\text{K}$ تابش نور، PPC سطح - پایینی را القا می‌کند (منظور از PPC سطح - پایینی این است که واهلش آن زمان بسیار کوتاهی دارد). در ناحیه دمایی $110\text{K} < T < 200\text{K}$ همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، با کاهش دما PPC سریع‌تر فروافت می‌یابد. این امر برخلاف مدل‌های موجود بوده (به‌جز مدل افت‌وخیز پتانسیل - کاتوره‌ای) و غیرمنتظره است. زیرا بنا به پیشگویی این مدل‌ها، هرچه دما پایین‌تر برود اثر PPC محسوس‌تر و واهلش آن

در این آزمایش، برای ایجاد دماهای پایین، از نیتروژن مایع که دمایی در حدود 78K (96°C -) دارد استفاده شد؛ با این حال حداقل دمای قابل دستیابی در این آزمایشها 85K بود. با توجه به اینکه در دماهای پایین، رطوبت هوا باعث برفک زدن و منجمد شدن نمونه‌ها می‌شود و روی خواص آنها اثر سوء می‌گذارد، برای جلوگیری از ایجاد برفک، هوای درون محفظه‌ای را که آزمایش روی نمونه‌ها در آنجا انجام می‌شود تا 10^{-2}mbar تخلیه نمودیم که این کار توسط یک دستگاه پمپ خلأ - بالا صورت گرفت. برای نصب نمونه‌ها در خلأ از یک نگهدارنده مسی استفاده شد (که از نظر تماس حرارتی بسیار خوب عمل می‌کند) و به‌وسیله یک لایه عایق الکتریکی نازک از نمونه جدا شده بود. برای تغییر دما از یک گرمکن الکتریکی که از سیم روکش‌دار بسیار نازک $CrNi$ ساخته شده و به پشت نگهدارنده مسی چسبیده بود، استفاده گردید. به‌طوری‌که انتقال گرما و در نتیجه تغییر دادن دمای نمونه‌ها سریع و به‌راحتی امکان‌پذیر بود. اندازه‌گیری و کنترل دما توسط ترموکوپل مس - کنستانتان انجام شد. در طول آزمایش ثابت بودن دمای نمونه به‌دقت کنترل شده، به‌طوری‌که خطا در خواندن دما حداکثر 1K بود. علاوه بر این، از یک لامپ 60W و ات معمولی با نور سفید به‌عنوان چشمه برانگیزش استفاده شد. خروجی این منبع طیف گسترده‌ای از طول موج‌ها را دارد، پس می‌توان اطمینان داشت که این چشمه قادر است

است. رسم دوباره این نمودار در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد نمودار، رفتاری کاملاً خطی پیدا می‌کند و این بیانگر تبعیت فروافت PPC از قانون - توانی است. منشأ فیزیکی برای دو واهلش - نمایی - کشیده و قانون - توانی، خیلی روشن نیست. باوجود این، عقیده بر آن است که هر دو می‌توانند سینیتیک واهلش گستره وسیعی از سامانه‌های نامنظم را به سمت تعادل، در شرایط متفاوت توصیف کنند (Blumen et.al.1986; Liu & Chao 1989). شکل (۴) نیز منحنی فروافت PPC بهنجار شده را در ناحیه $T > 200K$ ، به‌ازای سه دمای مختلف $T = 220K$ ، $T = 250K$ و $T = 295K$ نشان می‌دهد. ترسیم دوباره همین نمودار در مقیاس لگاریتمی و توجه به رفتار خطی نمودار، بیانگر این است که در گستره دمایی $T > 200K$ فروافت PPC باز هم از قانون - توانی پیروی می‌کند.

شکل (۶)، نمودارهای فروافت PPC بهنجار شده را برای زمان‌های نوردهی ۶۰ ثانیه و ۹۰ ثانیه، در دمای $130K$ ، به‌ازای ولتاژ بایاس ۳ ولت نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش زمان نوردهی، فروافت دیرتر، یا واهلش PPC طولانی‌تر است. همچنین، با توجه به شکل (۷)، رفتار خطی نمودار $Ln[I_{ppc}(t)]$ برحسب $Ln(t)$ نشان‌دهنده این است که باز هم فروافت از قانون - توانی تبعیت می‌کند.

۶. جریان تاریکی (I_d Dark Current)، مقدار جریانی است که در نیمه‌رسانا یا قطعه شارش می‌یابد وقتی هیچ تابشی بر آن فرود نمی‌آید.

طولانی‌تر است، ولی هنگامی که دما از $200K$ بالاتر می‌رود، PPC رفتار فروافت معمولی را نشان می‌دهد، یعنی با افزایش دما PPC سریع‌تر افت پیدا می‌کند. (ر.ک. شکل ۴).

اگر جریان‌های PPC را در $t = 0$ یعنی لحظه‌ای که نور برانگیزش قطع می‌شود، به واحد بهنجار کنیم، می‌توان PPC را به صورت تابعی از زمان چنین نوشت (Jiang & Lin 1990):

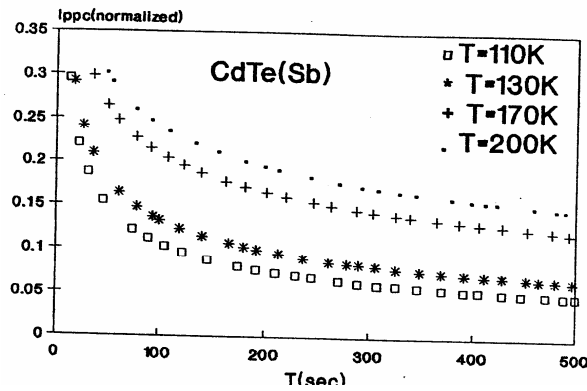
$$I_{ppc}(t) = [I(t) - I_d] / [I(0) - I_d] \quad (1)$$

که در آن $I(0)$ جریان فوتورسانایی اولیه، $I(t)$ جریان فوتورسانایی در زمان فروافت t و I_d جریان تاریکی است. رفتار فروافت PPC در CdTe(Sb) در ناحیه دمایی $110K < T < 200K$ می‌تواند توسط قانون - توانی زیر توصیف شود:

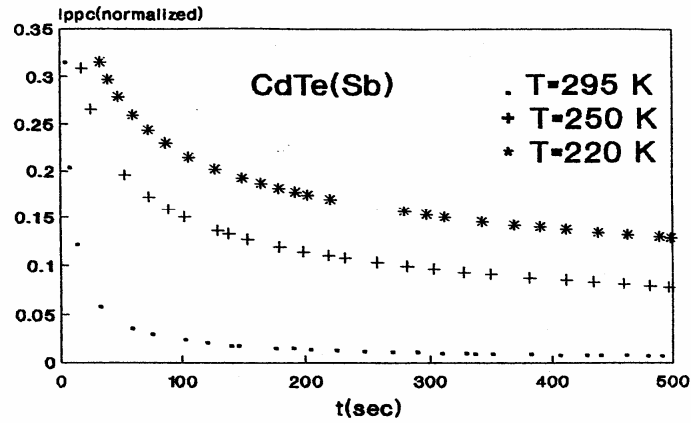
$$I_{ppc}(t) = t^{-\alpha} \quad (t > t_0) \quad (2)$$

که در آن t_0 حدود یک ثانیه و α پارامتر فروافت است. شرطی که به فاز P PC مربوط می‌شود به‌ازای $\alpha < 1$ مشخص می‌شود. به‌ازای $\alpha > 1$ ، PPC قابل چشم‌پوشی بوده، پاسخ زمان فوتورسانایی در حدود پاسخ سامانه (یک ثانیه) است. شکل (۵) نمودار پارامتر فروافت α به صورت تابعی از دماست.

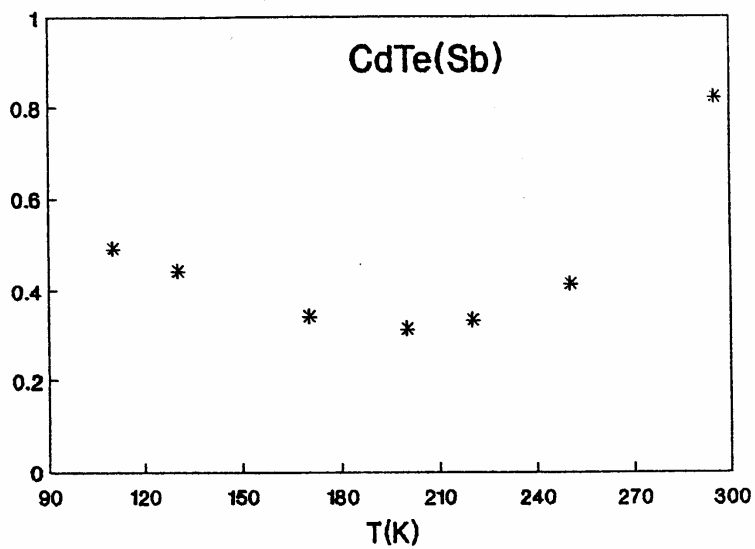
شکل (۳) رفتار فروافت PPC بهنجار شده را در ناحیه دمایی $110K < T < 200K$ ، به‌ازای چهار دمای مختلف نشان می‌دهد. در این منحنی، ولتاژ بایاس اعمال شده ۳ ولت و زمان نوردهی ۹۰ ثانیه



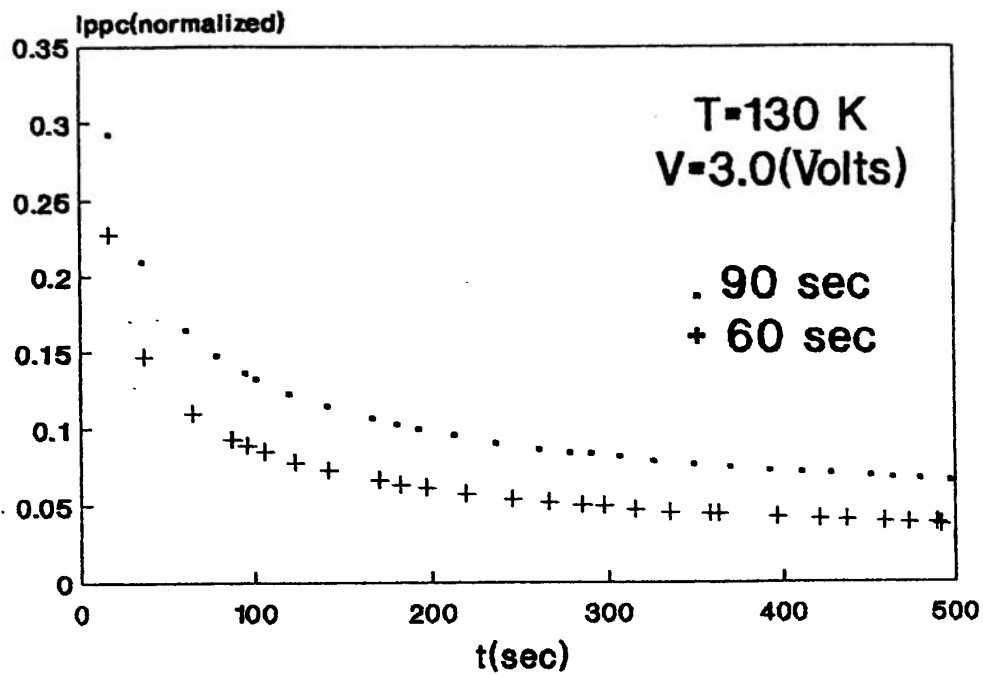
شکل ۳. نمودار فروافت PPC برای چهار دمای مختلف. هر منحنی در $t=0$ لحظه ای که نور برانگیزش قطع می‌شود، به واحد بهنجارشده و جریان تاریکی کم شده است.



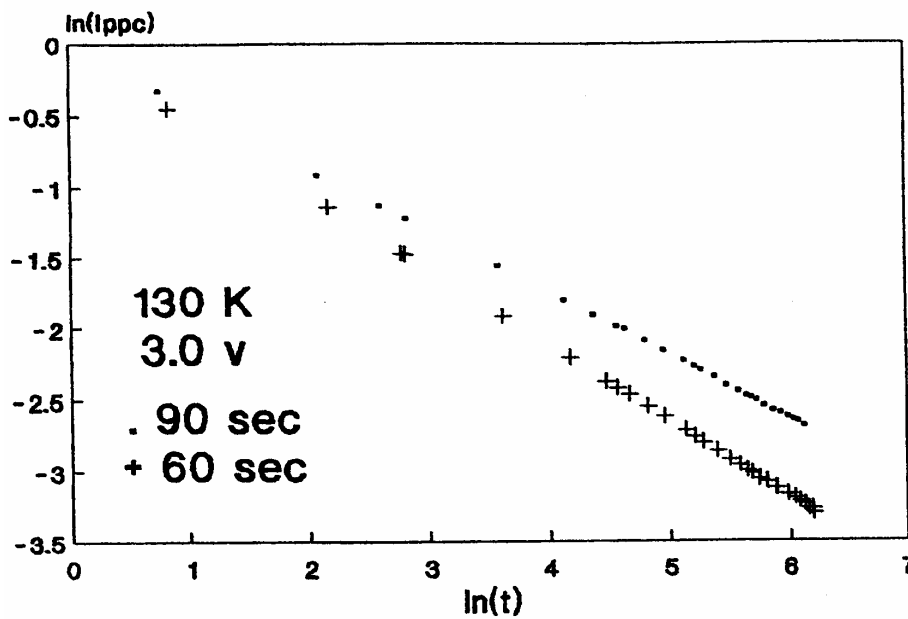
شکل ۴. منحنی‌های فروافت PPC در CdTe(Sb) برای سه دمای مختلف $T=295k$ ، $T=250k$ ، $T=220k$. هر منحنی در $t=0$ مطابق با رابطه (۱) به واحد بهنجارشده است.



شکل ۵. پارامتر فروافت α (قانون - توانی) برحسب دما برای CdTe(Sb) به‌ازای ۹۰ ثانیه تابش نور و ولتاژ بایاس ۳ ولت



شکل ۶. نمودارهای فروافت PPC برای CdTe(Sb) در دمای 130k و ولتاژ بایاس ۳/۰ ولت، به ازای ۶۰ ثانیه و ۹۰ ثانیه زمان نوردهی



شکل ۷. نمودارهای $\ln[I_{ppc}(t)]$ بر حسب $\ln(t)$ به ازای زمان‌های نوردهی $t=60s$ و $t=90s$ در دمای 130k. رفتار خطی نشان می‌دهد که

فروافت PPC بهنجارشده در CdTe(Sb) از قانون $I_{ppc}(t) = t^{-\alpha}$ ($t > t_0$) پیروی می‌نماید که t_0 حدود یک ثانیه است.

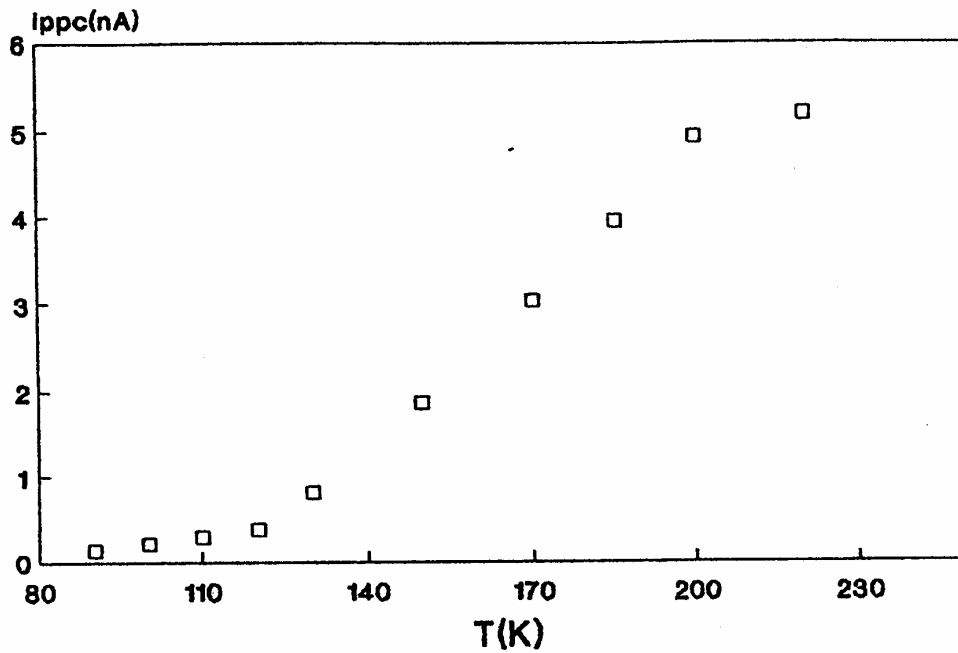
توسط رابطه (۳) قابل تشریح است. از آنجایی که نزدیک آستانه تراوش، الکترون‌ها از طریق جهش در PPC شرکت می‌کنند، در دماهای نزدیک آستانه، داده‌ها با رابطه (۳) به خوبی سازگاری ندارند. این رفتار قبلاً برای بسیاری مواد دیگر مشاهده شده است (Dutta & Horn 1981). رفتار فروافت PPC و گذار فاز نزدیک 120K تأییدی بر استدلال ما است که PPC توسط افت‌وخیزهای پتانسیل - محلی کاتوره‌ای در نمونه القا می‌شود. در اینجا مشاهده گذار فاز در PPC، از طریق مدل واهلش شبکه بزرگ و یا از طریق مدل سدماکروسکوپی، قابل توجیه نیست. به طور کلی نتایج به دست آمده از این طرح تحقیقاتی نشان می‌دهد در CdTe(Sb)، افت‌وخیزهای پتانسیل - محلی کاتوره‌ای که توسط افت‌وخیزهای ترکیبی و یا پتانسیل ناخالصی القاء شده‌اند، مسئول PPC مشاهده شده در آن هستند. PPC تنها به‌ازای دماهای بالاتر از 90K قابل مشاهده است. با این حال تا دمای اتاق نیز وجود دارد. چنین رفتاری از دیدگاه دو مدل سدماکروسکوپی و مدل واهلش شبکه بزرگ غیرمنتظره است. در گستره دمایی $110\text{K} < T < 295\text{K}$ و اهلش PPC توسط قانون - توانی به خوبی توصیف می‌شود. با توجه به دمای بحرانی به دست آمده ($T_C \cong 120\text{K}$) ملاحظه می‌شود، در دماهای بالاتر از T_C الکترون‌ها در حالت تراوش، اثر PPC را به وجود می‌آورند و در دماهای پایین‌تر از T_C پدیده PPC از طریق جهش الکترون‌ها بین حالت‌های جای‌گرفته صورت می‌گیرد. پدیده PPC در این نمونه‌ها برای کاربردهای قطعات نیمه‌رسانا، به‌ویژه آشکارسازهای مادون قرمز بسیار سودمند است.

اثر PPC مشاهده شده در CdTe(Sb) با مدل افت‌وخیز پتانسیل - محلی کاتوره‌ای سازگاری دارد. شکل (۸) مقادیر جریان حداکثر PPC را به صورت تابعی از دما به‌ازای $90\text{K} < T < 110\text{K}$ نشان می‌دهد. در ناحیه دمایی ثابت 3 ولت نشان می‌دهد. در ناحیه دمایی $90\text{K} < T < 110\text{K}$ تراز فرمی در ناحیه جای‌گرفته سقوط می‌کند و سیستم در حالت رسانایی پائینی قرار می‌گیرد که در آن مورد PPC از طریق جهش الکترون بین حالت‌های جای‌گرفته انجام می‌شود. با وجود این، نزدیک 120K افزایش قابل ملاحظه‌ای در PPC مشاهده می‌شود (نک. شکل ۸). در این وضعیت، الکترون‌ها از حالت‌های جای‌گرفته به حالت‌های غیرجای‌گرفته می‌روند (تراوش می‌یابند). در دماهای بالاتر از 120K ، هنگامی که حفره‌ها هنوز جای‌گرفته هستند، PPC به‌طور عمده توسط رسانش تراوش^۷ صورت می‌گیرد (جرم مؤثر حفره‌ها بسیار بیشتر از جرم مؤثر الکترون‌هاست). بنابراین، در دماهای بالاتر از آستانه تراوش، پیش‌بینی می‌شود بتوان وابستگی دمایی حداکثر جریان PPC را که در شکل (۸) نشان داده شده، توسط رابطه زیر توصیف کرد (Jiang et. al. 1991):

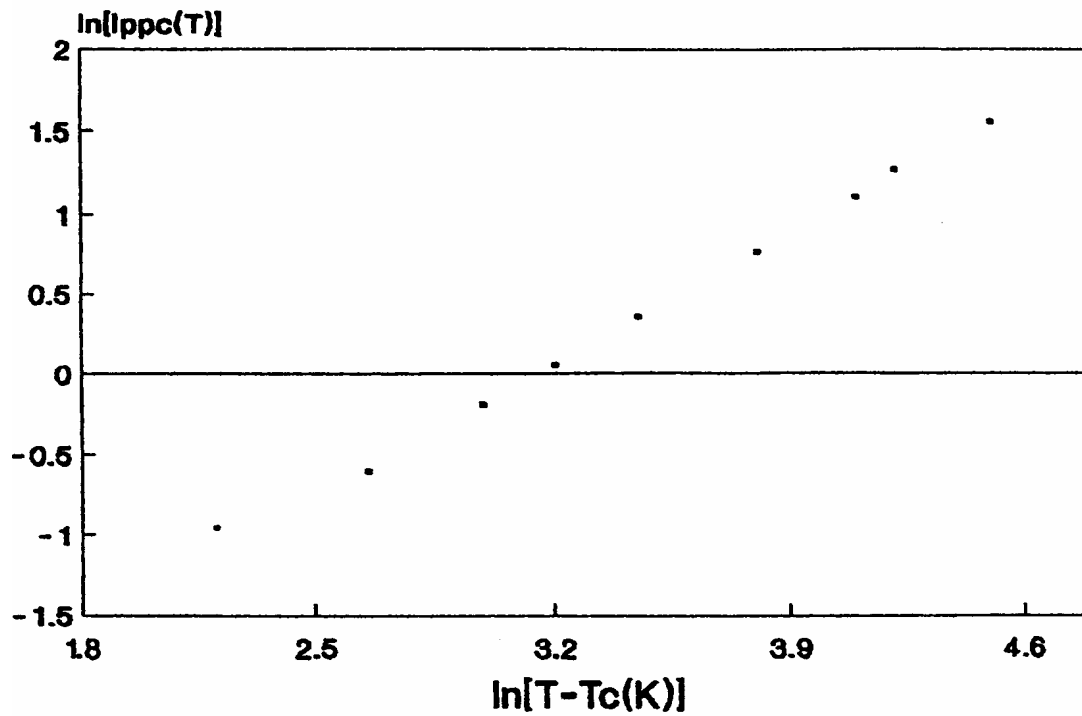
$$I_{PPC}(T) = \alpha (T - T_C)^{\nu} T > T_C \quad (3)$$

که در آن T_C دمای بحرانی است که در آن دما الکترون‌ها گذار فاز را از حالت‌های جهش به تراوش انجام می‌دهند و ν نمای رسانندگی است. از تطبیق داده‌های تجربی با حداقل - مربعات و رابطه (۳) در ناحیه دمایی $130\text{K} < T < 200\text{K}$ مقادیر نمای رسانایی $V = 1/19 \pm 0/02$ و دمای بحرانی $T_C = 115 \pm 5\text{K}$ به دست می‌آید، در شکل (۹) نمودار $\ln[I_{ppc}(T)]$ بر حسب $\ln(T - T_C)$ برای داده‌های تجربی به دست آمده در ناحیه $130\text{K} < T < 200\text{K}$ رسم شده است. رفتار خطی بیانگر این است که حداکثر جریان PPC به خوبی

7. Percolation Conductance



شکل ۸. جریان‌های حداکثر فوتورسانایی ماندگار در کپه CdTe(Sb) به صورت تابعی از دما. زمان نوردهی ۹۰ ثانیه است. به افزایش تیز نزدیک 120k توجه شود.



شکل ۹. نمودار ln(I_{ppc}(T, t=0)) بر حسب ln(T - T_c) با T_c = 115 ± 5k به ازای ۹۰ ثانیه تابش نور. شیب خط نمای رسانایی v = 1/19 ± 0/02 را نمایش می‌دهد.

- Dissanayake, A. et. al.** (1992), *Phys. Rev. B* 45, 13996;
- Dutta, P. and P. M. Horn** (1981), *Rev. Mod. Phys* 53: 479;
- Jiang, H. X. et. al.** (1991), *J. Appl Phys* 69: 6701;
- Jiang, H. X. and J. Y. Lin** (1990), *Phys. Rev. Lett.* 64: 2547;
- Lang, R and D.V. A. Logan** (1977), *Phys. Rev. Lett.* 39: 635;
- Lin, J. Lin, J. Y. et. al.** (1990), *Phys. Rev. B* 42: 5855;
- Liu, F. S. and W. Chao** (1989), *Phys. Rev. B* 40: 7091;
- Palmer, R. et. al.** (1984), *Phys. Rev. Lett.* 53: 958;
- Sheinkman, M. K. et. al.** (1979),
- Theodorou, D. E. and H. J. Queisser** (1983), *Phys. Rev. B* 27: 7786. ■

سپاسگزاری

بدین وسیله بر خود فرض می‌دانم از برادر بزرگوار، جناب آقای دکتر خانیکی، معاونت محترم پژوهشی دانشگاه پیام نور، که با ایجاد تحولات بنیادین در دستگاه تحت مدیریت‌شان، مایه دلگرمی هرچه بیشتر استادان هیات علمی در امر پژوهش بوده‌اند، سپاسگزاری و قدردانی نمایم. همچنین، از راهنمایی‌ها و تذکرات سودمند جناب آقای محمد بامداد، رئیس محترم گروه فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد در طول سه ماهی که مشغول انجام این طرح بودم، سپاسگزارم.

منابع

Blumen A., J. Klafler and G. Zumofen:
In *Optical Spectroscopy of Glasses*, edited by I. Zschokke, Reidel, Dordrecht: 199-265;