

فوتورسانایی ماندگار در تک بلور کادمیوم تلوراید CdTe

علی آرش رناسی*

چکیده

در این مقاله که حاصل یک پروژه تحقیقاتی است، فوتورسانایی ماندگار (PPC) در یک تک بلور نیمه رسانای کادمیوم تلوراید (CdTe) مورد بررسی قرار گرفته است. فروافت PPC برای CdTe از تابع نمایی - کشیده تبعیت می نماید که معمولاً در گستره وسیعی از مواد نامنظم مشاهده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که افت و خیزهای پتانسیل - محلی کاتوره ای مسئول PPC مشاهده شده در تک بلور کادمیوم تلوراید هستند.

کلیدواژه

نیمه رسانا، برانگیزش نوری، فوتورسانایی ماندگار، افت و خیزهای پتانسیل محلی کاتوره ای، جریان تاریکی، زمان واهلش، نمای فروافت.

مقدمه

شبکه را دارند و می توانند الکترونها را آزاد و حفرهها را در مکانهای برانگیختگی به جای گذارند. الکترونها و حفرههای اضافی که به این طریق به صورت زوج ایجاد می شوند در رسانایی بلور شرکت دارند، که در این صورت تحت روشنایی، رسانایی افزایش می یابد.

در نیمه رساناها بر خلاف اجسام رسانا، الکترونها و حفرهها هر دو در رسانایی شرکت دارند. اگر به یک بلور نیمه رسانا نور تابیده شود و بسامد نور به اندازه ای باشد که انرژی فوتون ($h\nu$) مساوی یا بزرگتر از گاف انرژی ممنوعه نیمه رسانا باشد. فوتونهای فرودی انرژی کافی برای شکستن پیوندهای زوج الکترونهای کووالانسی موجود در

* عضو هیئت علمی دانشگاه پیام نور، مرکز بروجرد

نظریه کاملی برای PPC وجود ندارد. یکی از خصوصیات کلی فوتورسانایی ماندگار آن است که با گرم کردن نمونه بالاتر از یک دمای مشخص، که این دما به ماده و نوع ناخالصی موجود در آن بستگی دارد، می تواند فرو نشانده شود. بسیاری از نیمه رساناها این رفتار را در دماهای پائین، در حدود 77K از خود نشان می دهند (۱۳)، اما مشاهده آن حتی در دمای اتاق نیز غیر معمول نیست. زمان این واهلش نیز بسته به شرایط حاکم بر آزمایش و نوع ماده نیمه رسانا، ممکن است از چندین ثانیه تا هزاران سال به طول انجامد. اخیراً ثابت زمان واهلشی برابر با 10^{13} ثانیه در $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ مشاهده شده است (۱۰). تا کنون چند مدل برای PPC پیشنهاد شده است و اکثر آنها بر اساس حضور سدهای ماکروسکوپی و یا میکروسکوپی هستند که حاملهای بار را در فضای حقیقی جدا می کنند و احتمال باز ترکیب را کاهش می دهند. مهمترین این مدلها به اختصار عبارتند از: مدل واهلش شبکه بزرگ^۴، مدل افت و خیز پتانسیل - محلی کاتوره ای^۵ و مدل سد ماکروسکوپی^۶. در مدل واهلش شبکه بزرگ، انرژی تابش فرودی به اندازه ای است که ماده حساس به نور را تغییر شکل می دهد و حالت های انرژی جایگزیده را نزدیک مکانهای تغییر شکل مختل می نماید (۹ و ۸). این مدل برای مواد قطبی نظیر CdS و CdTe که در آنها برهم کنش قوی بین الکترونها و فوتونها وجود دارد، تا اندازه ای مناسب است. همچنین بسیاری از ویژگیهای PPC در $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ را می تواند به خوبی توصیف نماید. با وجود این درک طبیعت این مدل بسیار مشکل است و هنوز هم به شدت تحت بررسی است (۱۲ و ۱۰). مدل افت و خیزهای پتانسیل - محلی کاتوره ای پیشنهاد می کند، بی نظمی در نیمه رسانا موجب افت

این افزایش که متناسب با شدت نور می باشد، به فوتورسانایی^۱ معروف است و مشخصه تمام نیمه رساناها به حساب می آید. البته مواردی وجود دارد که رسانایی در نیمه رسانا تحت روشنایی افزایش نمی یابد بلکه برعکس کاهش پیدا می کند. یعنی مقدار رسانایی حالت - پایدار در حضور نور نسبت به رسانایی در تاریکی کمتر است و هر اندازه شدت نور بیشتر باشد این مقدار بیشتر کاهش می یابد. به این نوع فوتورسانایی اصطلاحاً «فوتورسانایی منفی»^۲ یا «فوتورسانایی غیر عادی»^۳ می گویند. فوتورسانایی غیر عادی تا به حال در موارد نادری مثل لایه های سلنیم آمورف مشاهده شده است (۷). اما در حالت کلی هنگامی که نور به نیمه رسانا تابیده می شود، رسانایی افزایش می یابد. امروزه بیش از ۱۰۰۰ ترکیب نیمه رسانا شناخته شده است که چنین خاصیتی دارند. فوتورسانایی ماندگار (PPC)^۴ فوتورسانایی است که بعد از قطع برانگیزش نوری برای مدتی (از دقیقه تا هزاران سال) در نیمه رسانا ماندگار می ماند. این اثر یکی از جالبترین پدیده ها در نیمه رساناهاست که منشاء ماندگاری آن تا کنون به طور کامل شناخته نشده است زیرا رابطه بین تابشی که یکبار بر نمونه تابیده می شود و آهنگ تولید و باز ترکیب حاملهای بار در حین تابش و بعد از آن به خوبی معلوم نیست (۱۴). PPC برای میزان کردن چگالی گاز الکترون دو بعدی در فصل مشترکهای پیوند نامتجانس^۵ سودمند است و می تواند به عنوان روش غیر مخربی برای ردیابی ناخالصیها در نیمه رسانا مورد استفاده قرار گیرد (۱۶). این پدیده در ترکیبات III-V, II-VI نیمه رساناهای آمورف و رنگیه های آلی^۶ مشاهده شده است. همچنین فوتورسانایی ماندگار در لایه های بس بلورین^۷ و همگن نازک، تک بلورها و حتی پودرها گزارش شده است (۵). به دلیل کاربردهای عملی در این رشته، به ویژه ساخت قطعات اپتوالکترونیک^۸ ویدیکنها^۹ و غیره، بررسی و مطالعه در خصوص PPC اهمیت فوق العاده ای یافته است (۱۳). با این وجود هنوز

4. Persistent Photoconductivity

6. Organic dyes

8. Optoelectronic

10. Large Lattice Relaxation Model

11. Random Local - Potential Fluctuations

12. Macroscopic Barrier

5. Heterojunction

7. Polycrystalline

9. Vidicons

نمونه و نگهدارنده مسی قرار دارد. برای جلوگیری از برفک‌زدن نمونه در دماهای پایین، هوای بین دو استوانه را با یک پمپ خلاء بالا تا ۲-۱۰ mbar تخلیه می‌کنیم. کنترل و تغییر دمای نمونه از طریق یک گرمکن الکتریکی که به پشت نگهدارنده مسی چسبیده می‌شود، صورت می‌گیرد، به‌طوری‌که انتقال گرما و تغییر دمای نمونه با سرعت و به‌راحتی امکان‌پذیر است. سنجش دمای نمونه توسط یک دماسنج ترموکوپلی که از مس-کنستانان ساخته شده، انجام می‌شود. از مزیت‌های این دماسنج ترموکوپلی، ظرفیت گرمایی ذاتی کم و گستره دمایی وسیع (از 200°C تا 400°C) آن است. در طول آزمایش ثابت‌بودن دمای نمونه به‌دقت کنترل می‌شود به‌طوری‌که خطا در خواندن دما حدود 0.1 K است.

در بلور CdTe گاف انرژی (از نوع مستقیم) بین نوارهای رسانش و ظرفیت در دمای 300 K برابر $E_g = 1.45\text{ eV}$ و در دمای صفر مطلق $E_g = 1.607\text{ eV}$ است. از طرفی چون نور زرد لامپ سدیم دارای دو خط با طول موجهای عمده 5890 \AA و 5896 \AA است، فوتونهایی که از این لامپ گسیل می‌شوند دارای انرژی کافی ($E = 2.11\text{ eV}$) برای برانگیزش الکترونها از نوار ظرفیت به نوار رسانش هستند، بنابراین از این لامپ به‌عنوان چشمه برانگیزش استفاده شد. در عمل نور زرد سدیم توسط یک عدسی محدب با فاصله کانونی $f = +100\text{ mm}$ به‌صورت یک باریکه موازی درآمده، سپس به‌وسیله عدسی محدب دیگری که فاصله کانونی آن $f = +150\text{ mm}$ است، روی نمونه CdTe متمرکز می‌شود^{۱۳}. برای جلوگیری از آسیب رساندن به سطح آن باید دقت کرد، نمونه اندکی جلوتر از نقطه کانونی شدن پرتوها قرار گیرد.

در این آزمایش داده‌های به‌دست آمده در شرایط

و خیز در لبه‌های نوار رسانش و ظرفیت شده که همین امر به اثر PPC منجر می‌شود (۱۱).

در مدل سد ماکروسکوپی، سدهایی از قبیل آنچه در پیوندها مشاهده می‌شود و همچنین سدهای سطحی، حامل‌های بار را در فضای حقیقی جدا می‌کنند و در نتیجه احتمال باز ترکیب آنها کاهش می‌یابد (۱۵).

مواد و روشها

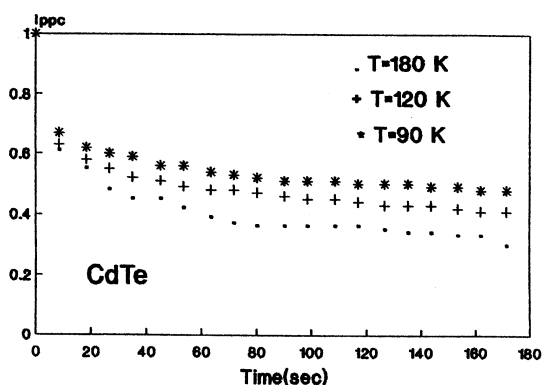
در این پروژه تحقیقاتی ماده نیمه‌رسانایی که مطالعه و بررسی فرآیند واهلش فوتورسانایی ماندگار روی آن انجام پذیرفت تک بلور آلایش نیافته کادمیوم تلوراید (CdTe) است که ضخامت 2 mm و سطحی در حدود $5\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ دارد. به‌دلیل آنکه آزمایش مربوط به پدیده PPC روی سطح نیمه‌رسانا انجام می‌شود، ابتدا سطح نمونه را با سمباده‌های مخصوص و بسیار نرم کاملاً صیقلی نمودیم و برای عبور جریان از نیمه‌رسانا دو سیم نازک مسی را با چسب نقره‌ای روی سطح نمونه چسبانیدیم که بدین وسیله دو الکتروود هر کدام به قطر 1 mm و به فاصله 3 mm از یکدیگر روی نمونه تعبیه گردید. قسمت مهم کار اطمینان یافتن از اهمی بودن اتصالات مربوط به الکترودهاست که این کار را با اعمال ولتاژهای مستقیم و معکوس به نمونه و اندازه‌گیری جریانهای سطحی انجام دادیم.

آزمایش درون یک محفظه فولادی دو جداره که از دو استوانه هم محور ساخته شده انجام می‌گیرد و برای ایجاد دماهای پایین از نیتروژن مایع که دمایی در حدود 78 K (-196°C) دارد استفاده می‌شود. نیتروژن مایع درون استوانه داخلی ریخته شده و نمونه (CdTe) به‌وسیله نگهدارنده مسی که از نظر هدایت گرمایی بسیار خوب عمل می‌کند در فضای بین دو استوانه نزدیک قاعده پایینی استوانه‌ها نصب می‌گردد. البته یک لایه عایق الکتریکی بسیار نازک بین

۱۳. بهترین و استانداردترین روش برای کانونی کردن پرتوها استفاده از آینه‌های شلجمی است که می‌تواند حداکثر مقدار فوتون را روی نمونه بتاباند.

آزمایشگاه ما قابل دستیابی می باشد (۹۰K است) می تواند توسط تابع نمایی کشیده^{۱۵} زیر که به تابع کلراج^{۱۶} معروف است به خوبی توصیف شود (۳):

$$I_{PPC}(t) = I_{PPC}(0) \exp[-(t/\tau)^\beta], \quad 0 < \beta < 1 \quad (2)$$



شکل ۱. منحنیهای فروافت جریان PPC به دست آمده برای CdTe در سه دمای $T = 180\text{ K}$ و $T = 120\text{ K}$ ، $T = 90\text{ K}$ بعد از ۱۵ ثانیه تابش نور. هر منحنی در $t = 0$ ، یعنی لحظه ای که نور برانگیزش قطع می شود، به واحد بهنجار شده و جریان تاریکی از داده های به دست آمده کم شده است.

در این رابطه τ ثابت زمان فروافت یا ثابت زمان واهلش و β نمای فروافت است. (یادآوری می شود مدت زمانی است که طول می کشد تا جریان PPC به $1/e$ مقدار اولیه اش کاهش یابد).

این فروافت نمایی - کشیده، نتیجه ای از توزیع کاتوره ای حاملهای بار در فضای حقیقی است. ثابت شده است که واهلش حاملهای بار در گستره وسیعی از سیستمهای نامنظم به سمت تعادل را می توان با عبارت نمایی - کشیده یعنی رابطه (۲) توصیف نمود (۶). بنابراین چنین رفتار فروافتی شباهتهای سیستم حاضر را با سیستمهای نامنظم نشان می دهد و بدین ترتیب بر این اشاره دارد که افت و خیزهای پتانسیل - کاتوره ای میکروسکوپی

مختلف، به طریقی حاصل شده اند که سیستم بعد از هر اندازه گیری همیشه تا دمای اتاق گرم می شود (مثلاً دو ساعت طول می کشد تا از دمای ۹۰K به ۳۰۰K برسد). سپس در تاریکی، تا دمای مورد نظر برای اندازه گیری بعدی سرد می شود. زمان تعادل برای هر دما حدود ۳۰ دقیقه است. این روش تضمین می کند که داده های به دست آمده در تمام آزمایشها، شرایط اولیه یکسانی داشته اند. ولتاژ بایاس اعمال شده به نمونه در تمام آزمایشها ۲ ولت است و جریان نمونه توسط یک نانوآمپرتر بسیار حساس که به کامپیوتر متصل است، اندازه گیری می شود.

نتیجه و بحث

منحنیهای فروافت PPC برای تک بلور CdTe در سه دمای $T = 180\text{ K}$ و $T = 120\text{ K}$ ، $T = 90\text{ K}$ در شکل ۱ نشان داده شده است. PPC در $t = 0$ ، یعنی لحظه ای که نور برانگیزش قطع می شود به واحد بهنجار می شود، به طوری که جریان PPC را می توان به صورت تابعی از زمان چنین نوشت (۱۲):

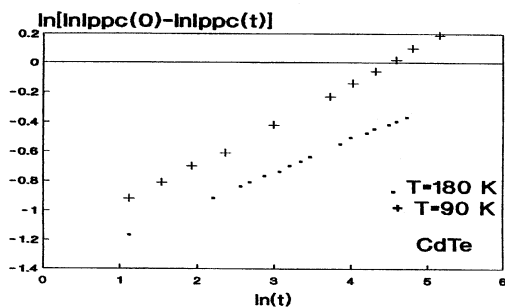
$$I_{PPC}(t) = [I(t) - I_d] / [I(0) - I_d] \quad (1)$$

که در آن $I(0)$ جریان فوتورسانایی اولیه، $I(t)$ جریان فوتورسانایی در زمان فروافت t و I_d جریان تاریکی^{۱۴} است. این منحنیها به ازای دماهای مذکور، در ولتاژ بایاس ثابت ۲ ولت برای مقدار فوتون یکسان که به نمونه تابیده شده است، یعنی زمان نوردهی ۱۵ ثانیه به دست آمده اند. این سه منحنی نشان می دهند که PPC در $T = 180\text{ K}$ سریعتر از $T = 90\text{ K}$ و $T = 120\text{ K}$ فروافت می یابد.

به عبارت دیگر، وقتی دما کاهش می یابد، زمان واهلش طولانیتر شده و PPC دیرتر فروافت می نماید. رفتار فروافت (یا واهلش) PPC در تک بلور CdTe در ناحیه دمایی $T > 90\text{ K}$ (حداقل دمایی که در

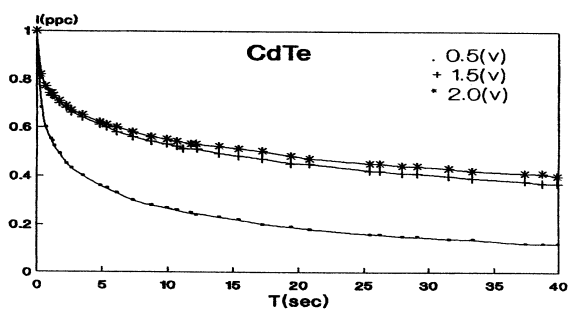
14. Dark Current
16. Kohlrausch

15. Stretched - exponential



شکل ۲. نمودار $\ln[\ln I_{ppc}(0) - \ln I_{ppc}(t)]$ بر حسب $\ln(t)$ برای دو دمای $T = 180\text{ K}$ و $T = 90\text{ K}$. رفتار تقریباً خطی نشان می‌دهد که PPC مطابق با تابع نمایی - کشیده $I_{ppc}(t) = I_{ppc}(0) \exp[-(t/\tau)^\beta]$ فروافت می‌یابد.

شکل ۳ منحنیهای فروافت جریان بهنجار شده در دمای اتاق ($T=295\text{ K}$) به ازای ولتاژهای بایاس ۰/۵، ۱/۵ و ۲ ولت برای ۱۵ ثانیه زمان نوردهی نشان می‌دهد. این منحنیها بیانگر این هستند که PPC در دمای اتاق هم وجود دارد، با این تفاوت که فروافت آنها بسیار سریع یا به عبارتی زمانهای واهلش آنها بسیار کوتاه است.



شکل ۳. نمودارهای فروافت جریان PPC برای CdTe در دمای اتاق ($T=295\text{ K}$)، به ازای سه ولتاژ بایاس اعمال شده مختلف، $V=0.5\text{ V}$ ، $V=1.5\text{ V}$ ، $V=2.0\text{ V}$ ، به ازای $V=0.5\text{ V}$ و $V=2\text{ V}$ ، (***) برای ۱۵ ثانیه زمان نور دهی. هر منحنی در $t=0$ ، یعنی لحظه‌ای که نور برانگیزش قطع می‌شود، به واحد بهنجار شده و جریان تاریکی از داده‌های به‌دست آمده کم شده است

منشاء PPC مشاهده شده در تک بلور CdTe هستند. اگر از رابطه (۲) لگاریتم بگیریم خواهیم داشت:

$$\ln I_{ppc}(t) = \ln I_{ppc}(0) - (t/\tau)^\beta \quad (3)$$

با گرفتن لگاریتم مجدد از رابطه بالا به‌دست می‌آوریم:

$$\ln[\ln I_{ppc}(0) - \ln I_{ppc}(t)] = \beta \ln t - \ln \tau^\beta \quad (4)$$

این رابطه همان معادله خط راست $y = bx + a$ است که شیب آن $b = \beta$ و عرض از مبدا آن $a = -\ln \tau^\beta$ است.

شکل ۲ نمودارهای $\ln[\ln I_{ppc}(0) - \ln I_{ppc}(t)]$

بر حسب $\ln t$ برای دو دمای 90 K و 180 K را نشان می‌دهد و رفتار تقریباً خطی در این شکل قابل مشاهده است. از این منحنیها می‌توان β و τ را به‌دست آورد. این دو پارامتر به ازای دماهای مختلف، با استفاده از روش حداقل - مربعات از روی داده‌های تجربی محاسبه می‌شوند. به کمک یک برنامه کامپیوتری که برای روش حداقل - مربعات نوشته شده به زبان فرترن، مقادیر شیب b و عرض از مبدا a به‌دست می‌آیند. برای دمای 90 K مقادیر $a = -1/407$ و $b = 0/221$ حاصل شده است که با استفاده از آنها پارامترهای فروافت $\beta = 0/221$ و $\tau = 582/02\text{ sec}$ به‌دست می‌آیند. به همین ترتیب برای دمای 180 K از روی داده‌های تجربی مقادیر $a = 0/236$ و $b = 0/274$ حاصل می‌شود که با استفاده از آنها پارامترهای $\beta = 0/274$ و $\tau = 91/00\text{ sec}$ محاسبه می‌شوند. همچنین به ازای دمای 120 K نیز این پارامترها $\beta = 0/285$ و $\tau = 185/82\text{ sec}$ به‌دست می‌آیند. بنابراین با دقت بر نتایج به‌دست آمده ملاحظه می‌شود، با افزایش دما، زمان واهلش CdTe کاهش می‌یابد یا به‌عبارت دیگر PPC با سرعت بیشتری فروافت می‌نماید.

مشاهده شده در CdTe ناشی از افت و خیزهای پتانسیل محلی کاتوره‌ای القاء شده توسط افت و خیزهای ترکیبی هستند (متأسفانه به دلیل کمبود امکانات، این آزمایش انجام نشد).

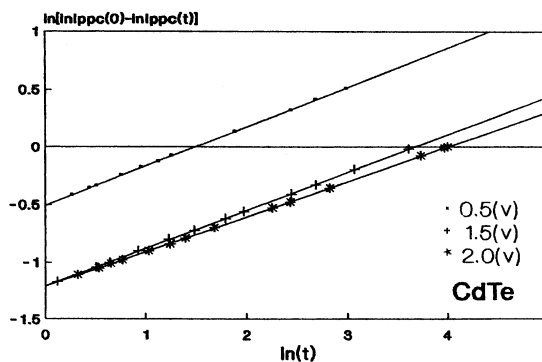
بر اساس مدل کاتوره‌ای پیش‌بینی می‌شود که برای PPC حد دمای بالایی (TU) وجود دارد که به ازای دماهای بالاتر از آن این پدیده وجود ندارد و یا قابل چشم پوشی است (۱۱)، این حد دمایی بالا در CdTe، حدود $TU=300K$ به دست آمده است. همین‌طور حد دمای پایینی (T_L) وجود دارد که در دماهای پایینتر از آن الکترون‌ها کاملاً جایگزیده هستند و ترابرد حامل قابل صرف نظر است. بنابراین اثر PPC قابل مشاهده نیست. به دلیل محدودیت امکانات آزمایشگاهی اندازه‌گیری در دماهای پایینتر از $90K$ انجام نگرفت، بنابراین حد دمایی پایین قابل ارزیابی نبود. وقتی دما افزایش می‌یابد، رسانایی یا از طریق جهش الکترون گرمایی بین مکانهای جایگزیده ($T < T_C$) یا از طریق تراوش یا نفوذ^{۱۷} از میان شبکه مکانهای قابل حصول ($T > T_C$) صورت می‌گیرد.

T_C دمای بحرانی است که در آن دما، الکترون‌ها گذار فاز از حالت‌های جهش به تراوش را انجام می‌دهند (۴). اندازه‌گیری T_C اطلاعات با ارزشی راجع به افت و خیزهای ترکیبی در نمونه می‌دهد. وقتی که سیستم در حالت تراوش است، $T > T_C$ ، انتظار می‌رود که وابستگی دمایی PPC به صورت زیر باشد:

$$I_{ppc}(T) = \alpha (T - T_C)^{\nu} \quad \text{و} \quad T > T_C \quad (5)$$

که ν نمای رسانندگی است. $I_{ppc}(T)$ جریان اشباع یا ماکزیمم جریان است. متأسفانه به دلیل اینکه می‌توانستیم دمای نمونه را از $90K$ پایینتر ببریم، در نتیجه T_C قابل اندازه‌گیری نبود. برای مشاهده اثر PPC حد ولتاژ بایاس بالا و پایینی وجود دارد که خارج از این محدوده، این پدیده وجود ندارد و یا قابل چشم پوشی است. در دمای اتاق برای نمونه CdTe حد ولتاژ بایاس بالا $V_u=3/1 V$ و حد پایین حدود $L_{VL}=0/4 V$ به دست آمد.

شکل ۴ نیز نمودارهای $Ln[LnIppc(t) - LnIppc(0)]$ بر حسب $Ln t$ را به ازای همین ولتاژهای بایاس در دمای اتاق نشان می‌دهد. رفتار تقریباً خطی بیانگر این است که فروافت PPC در دمای اتاق نیز از تابع نمایی - کشیده پیروی می‌کند. پارامترهای فروافت به ازای ولتاژهای بایاس $0/5$ ، $1/5$ و 2 ولت به ترتیب برابر با $\beta = 0/34$ و $\beta = 0/30$ ، $\tau = 39/39 \text{ sec}$ و $\beta = 0/32$ ، $\tau = 4/42 \text{ sec}$ و $\tau = 55/20 \text{ sec}$ به دست می‌آیند (شکل‌های ۳ و ۴).



شکل ۴: نمودار $Ln [Ln Ippc (0) - Ln Ippc (t)]$ بر حسب $Ln(t)$ در دمای اتاق به ازای ولتاژهای مختلف. رفتار خطی نشان می‌دهد که واهلش PPC بخوبی توسط تابع نمایی - کشیده $Ippc(t) = Ippc(0) \exp[-(t/\tau)^\beta]$ توصیف می‌شود، که در آن τ ثابت زمان فروافت و β نمای فروافت است.

اینکه فروافت PPC در CdTe از تابع نمایی - کشیده تبعیت می‌کند، نشانگر این است که افت و خیزهای پتانسیل - کاتوره‌ای میکروسکوپیک مسئول PPC مشاهده شده در آن هستند. این افت و خیزهای پتانسیل - کاتوره‌ای به احتمال بسیار زیاد از افت و خیزهای ترکیبی در نمونه نشأت گرفته باشند. انتظار می‌رود که بتوان این اثر را در CdTe به‌طور اپتیکی توسط تابش مادون قرمز که طول موج بلند دارد فرو نشانند، و در این صورت اثبات می‌شود که PPC

منابع

1. Chadi, D. J. and Chang, K. J. (1988), Phys. Rev. Lett. 61,873;
2. —, (1989), Phys. Rev. B39,10063;
3. Dissanayake, A. ; Elahi, M. ; Jiang, H. X. and Lin. J. Y. (1992) Phys. Rev. B42;
4. Jiang, H.X ; Brown, G. and Lin, J. Y. (1991), J. Appl. Phys.69,6701;
5. Joshi, N.V. (1990), . Photoconductivity, first edition, Marcel Oekker, New York;
6. Kakalios, J., Streef, R.A. and Jackson, W.B. (1987), Phys.Rev.Lett.59,1037;
7. Korsunskii, M.I. (1973), Anomalous Photoconductivity, John Wiley, New York;
8. Lang D. V. and Logan, R. A. (1977), Phys. Rev. Lett. 39,635;
9. Lang, D.V., Logan, R. A. and Jaros M. ,(1979), Phys. Rev. B19 ,1015;
10. Lin, J.Y., Dissanayake, A., Brown, G. and Jiang H.X. (1990), Phys.Rev.B42,5855;
11. Lin, J. Y. and Jiang, H. X. (1990), Phys. Rev. B41. 5178;
12. Palmer, R., Stein, D.L., Abrahams, E. and Anderson, P.W. (1984), Phys.Rev.Lett.53,958;
13. Sheinkman, M. K. and Ya. Shik A., Fiz. Tekh Poluprovdon (1976), 10,209 [Sov. Phys. Semicond. 10,128];
14. Stormer, H. J., Dingle R., Gossard, A.C. Wiegmann W.W. and Sturge, M.D. (1979), Solid State Commun, 29,705;
15. Theodorou, D.E., Queisser, H. J., (1983), Phys. Rev. B27,7786;
16. Theodorou, D.E., Queisser, H. J., and Bauser, E., (1982), Appl.Phys.Lett.41,628. ■