تاریخ چاپ: بهار ۱۳۹۰

بررسی مکانیسم هدایت الکتریکی قطعات لایه نازک ساندویچی فتالوسیانین مس

محمداسماعیل عظیم عراقی، ملورینا دلفی رضایی: دانشگاه تربیت معلم تهران

چکیده

در این پژوهش اندازه‌گیری‌هایac بر روی لایه‌های نازک فتالوسیانین مس CuPc با الکترودهای آلمینیومی در محدوده ی فرکانس‌های 10^{2} تا 10^{5} هرتز و درفاصله دمایی ۳۰۰ تا۴۲۰ درجه کلوین بررسی شده است. مقدار ظرفیت وعامل اتلاف با افزایش فرکانس کاهش می‌یابند و ظرفیت با افزایش دما افزایش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که غالب شدن مدل‌های جهشی با برد متغیر(VRH) وتئوری نواری در مکانیسم رسانش وابسته به شرایط اعمال شده است. مشاهده شد که در فرکانس‌های پایین و درجه حرارت‌های بالا مکانیسم هدایت از نوع نواری، و در فرکانس‌های بالا و درجه حرارت‌های پایین از نوع جهشی با برد متغیر است. مقدار گاف انرژی CuPc با استفاده از اندازه‌گیری‌های dc تعیین شده است.

مقدمه

فتالوسیانین‌ها گروهی از مواد آلی هستند که به‌طور کلی دارای پایداری حرارتی‌اند و می‌توانند به صورت لایه‌های نازک و بدون تجزیه و تفکیک به وسیله تبخیر درخلأ لایه نشانی شوند[۱]. آن‌ها رفتار نیمه رسانایی را نشان می‌دهند ورسانایی الکتریکی آن‌ها با حضور گازهای مختلف تغییر می‌کند. در دو دهٔ اخیر، توجه محققان بسیاری بر کاربردهای تکنولوژی صنعتی این ترکیبات، به خصوص در زمینه‌های سلول‌های فتوولتائیک (PV)[۲]، دیودهای گسیل نور (OLED)[۳]، ترانزیستورهای اثر میدان(FETs)[۴] و همچنین سنسورهای گازی[۵] متمرکز شده است. رفتاراین مواد در حالت کلی با دو روش مهم بررسی می‌شود: ۱) اپتیکی (معمولاً با اندازه‌گیری‌های جذبی اپتیکی)[۶]، [۷]، [۸]؛ ۲) الکتریکی (با استفاده از قطعه‌های صفحه‌ای و ساندویچ). قطعه‌های صفحه‌ای شامل لایه‌های نازک با الکترودهای طلا،اساساً به عنوان حس‌گرهای گازی استفاده می‌شوند و همچنین برای مشاهده واکنش مواد به گازهای مختلف به وسیلهٔ مشخصات الکتریکی dc،به کار می‌روند، در حالی‌که قطعه‌های ساندویچ می‌توانند به خوبی برای اندازه‌گیری‌های ac مورد استفاده قرار گیرند. خواص الکتریکی dc قطعه‌های لایه نازک Pc به صورت وسیعی در سال‌های اخیر بررسی شدند [۹]، [۱۰]، [۱۱]. در بررسی‌های حاضر، اندازه‌گیری‌های الکتریکی ac به صورت تابعی از دما برای بررسی الکترونیکی لایه‌های

واژه‌های کلیدی: لایه نازک ساندویچی Al/CuPe/Al، مکانیسم هدایت الکتریکی، گاف انرژی
دریافت ۸۹/۲/۱ پذیرش ۸۹/۷/۱٤

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

نازک و تشخیص مکانیسم رسانندگی تحت شرایط مختلف انجام داده شده است و گاف انرژی ماده مورد نظر با استفاده از اندازه‌گیری‌های dc محاسبه شده است.

روش کار

قطعه‌های ساندویچی Al/CuPc/Al با تبخیر حرارتی پی در پی در خلأ با فشار تقریبی $۱۰^{-۵}$ میلی بار بر روی زیر لایه‌های شیشه‌ای تمیز شده آماده شدند. زیر لایه‌ها در طول تبخیر در دمای اتاق نگه‌داری شدند. آهنگ تبخیر CuPc[۶] انگستروم بر ثانیه و ضخامت آن در طول لایه نشانی با استفاده از کریستال کوارتز کنترل می‌شد. تمام اندازه‌گیری‌های گزارش شده در این مقاله با لایه‌های با ضخامت ۲۰۰ ± ۱۰ nm انجام داده شده است. آهنگ تبخیر Al تحت عنوان الکترود، ۲ انگستروم بر ثانیه و ضخامت نهایی آن ۱۰۰ ± ۵nm اندازه‌گیری شده است.

برای این که بتوانیم اندازه‌گیری‌های الکتریکی را در گستره وسیع دمایی انجام دهیم از یک اتاقک فولادی ضد زنگ استفاده شد.

اندازه‌گیری‌های ac ذیل به وسیله LCR متر از نوع MT 4080A & MT 4080D صورت گرفته است:

۱) بستگی ظرفیت به فرکانس و درجه حرارت در محدودهٔ $۱۰^{۲}$ تا $۱۰^{۵}$ هرتز ودر فاصلهٔ دمایی۳۰۰ تا ۴۲۰ درجهٔ کلوین اندازه‌گیری شد.

۲) بستگی عامل اتلاف ($\tan\delta$) برای همان محدوده فرکانس و دما بررسی شده است.

از طریق این داده‌ها نمودار رسانندگی بر حسب فرکانس را رسم کردیم. همچنین با استفاده از نمودار δ بر حسب $1/T$ انرژی فعال‌سازی محاسبه شده است. در اندازه‌گیری‌های dc با استفاده از آمپرسنج حساس (Keithley) جریان مستقیم بر حسب دما اندازه‌گیری شده و با استفاده از شیب نمودار جریان بر حسب$1/T$ گاف انرژی CuPc محاسبه شده است.

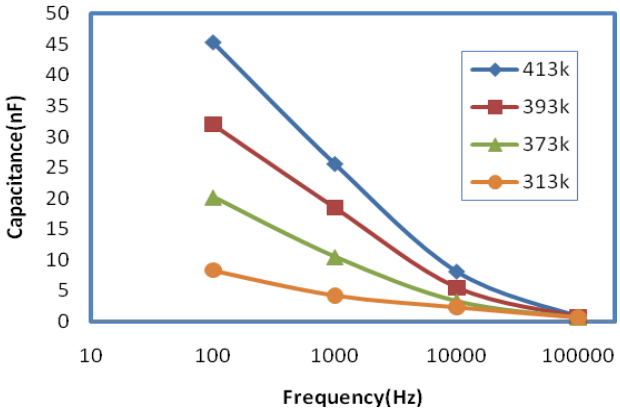
بحث و نتایج

ظرفیت و عامل اتلاف: ظرفیت قطعه‌های ساندویچی لایه نازک CuPc بر حسب تابعی از فرکانس در محدودهٔ $۱۰^{۲}$ تا $۱۰^{۵}$ هرتز در دماهای ۴۱۳، ۳۷۳،۳۹۳ و ۳۱۳ کلوین اندازه‌گیری شد. چنان که در شکل ۱ نشان داده شده است با افزایش درجه حرارت تغییرات ظرفیت قطعه ساخته شده CuPc با کاهش فرکانس، افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد،ولی در دماهای پایین و فرکانس‌های بالا تغییر ظرفیت با فرکانس کم‌تر است.

تغییرات ظرفیت گزارش شده در لایه‌های نازک فتالوسیانین کلروآلمینیوم، فتالوسیانین سرب و فتالوسیانین مولیبدنوم نتایج به‌دست آمدهٔ بالا را تأیید می‌کند[۹].

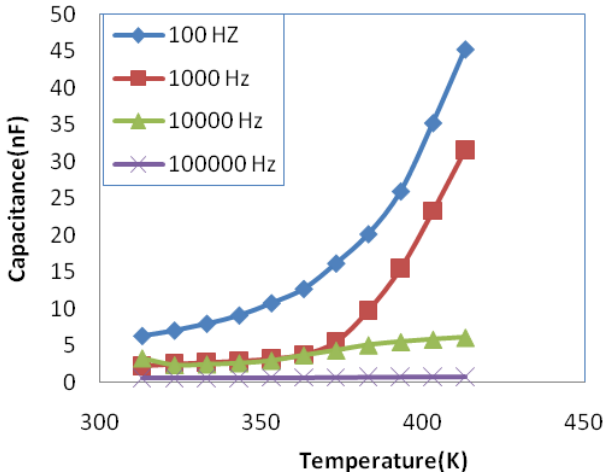
این نتایج به طور واضح تری در شکل ۲ نشان داده شده‌اند، ظرفیت بر حسب تابعی از دما برای فرکانس‌های

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]



شکل۱. تغییرات ظرفیت بر حسب فرکانس در دماهای مختلف

۱۰۲ تا ۱۰۵ هرتز رسم شده است. مشاهده شده است که در فرکانس‌های پایین‌تر از ۱۰۴ هرتز و درجه حرارت‌های بالاتر از ۳۷۰ درجهٔ کلوین، تغییرات ظرفیت بر حسب دما بسیار محسوس است.



شکل۲. تغییرات ضرفیت با دما در فرکانس‌های مختلف

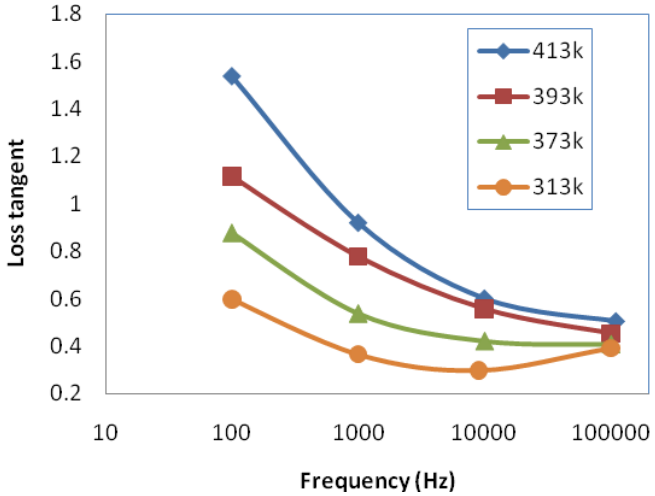
هر دو نتیجه نشان داده شده در شکل ۱ و۲ می‌تواند با تئوری گاسومی[۱] توصیف شود [۱۲]. در این مدل، فرض شده است که هر سیستم خازن شامل یک المان ظرفیت C است که فرکانس و دما روی آن اثر ندارد و یک المان مقاومت R دارد که در لایهٔ دی الکتریک با C موازی است. هر دو R و C با r که به طول ماده بستگی دارد، سری هستند. الکترودهای طلا با فتالوسیانین‌ها اتصال اهمیت دارند [۱۳] ولی اتصال (انسدادی)[۲] با الکترودهای آلمینیومی به وجود می‌آید [۱۴]، [۱۵].

همچنین کاهش $\tan\delta$[۳] با افزایش فرکانس در شکل ۳ نشان داده شده است. در این نمودار - که $\tan\delta$ بر حسب فرکانس در دماهای مختلف را نشان می‌دهد- عامل اتلاف مینیمومی($\tan\delta_{min}$) را مشاهده می‌کنیم که با

۱.Goswami ۲.blocking ۳.Loss tangent

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

افزایش دما، به سمت فرکانس‌های بالاترجابه‌جایی پیدا می‌کند،که این جابه‌جایی به سمت فرکانس‌های بالاتر با افزایش دما، به کاهش R با افزایش دما بستگی دارد. مقدار $\tan\delta_{min}$ همچنین با افزایش دما افزایش می‌یابد. همچین تغییراتی در عامل اتلاف نسبت به فرکانس، در لایه‌های نازک فتالوسیانین کلرو آلمینیوم نیز مشاهده شده است [۱۶].



شکل۳. تغییرات عامل اتلاف با فرکانس در دماهای مختلف

با توجه به مدل گاسومی، C_s و $\tan\delta$ و مقاومت معادل سری R_s به این صورت تعریف می‌شوند:

$$C_s = \frac{1+\omega^2R^2C^2}{\omega^2R^2C} = C + \frac{1}{\omega^2R^2C} \qquad (۱)$$

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega RC}\left(1+\frac{r}{R}\right) + \omega rC \qquad (۲)$$

$$R_s = r + \frac{R}{\omega^2R^2C^2+1} \qquad (۳)$$

که ω فرکانس زاویه‌ای است.

در معادلهٔ (۱) با افزایش فرکانس مقدا ر C_s کاهش می‌یابد و در فرکانس‌ها ی بالا به مقدار ثابت C میل می‌کند.

همچنین برای هر فرکانس، C_s با افزایش دما، افزایش می‌یابد، زیرا طبق رابطهٔ زیر R با افزایش دما کاهش پیدا می‌کند.

$$R = R_0 \exp\frac{\Delta E}{KT} \qquad (۴)$$

چنان که در شکل ۱ و۲ مشاهده شد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

برای Al/CuPc/Al، R>>r، بنا بر این $\tan\delta$ به صورت $\tan\delta = \frac{1}{\omega RC} + \omega rC$ نوشته می‌شود. در این معادله درفرکانس‌های بالا ترم ω مطرح است در صورتی که در فرکانس‌های پایین ترم $\frac{1}{\omega}$ مطرح است.

بنا بر این معادله (۲) نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین، $\tan\delta$ با افزایش فرکانس، کاهش می‌یابد که در این صورت $\tan\delta_{min}$ از $\omega_{min} = \left[\frac{1}{rRC^2}\right]^{1/2}$ به‌دست می‌آید، همچنین این معادله نشان‌گر افزایش $\tan\delta$ با افزایش فرکانس در فرکانس‌های بالا است.

رسانندگی: رسانندگی با رابطهٔ زیر تعریف می‌شود :

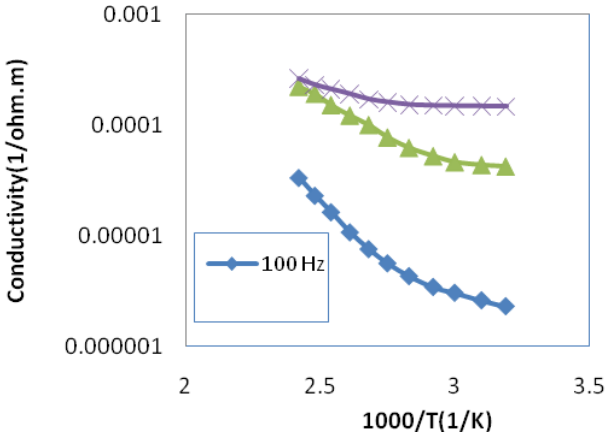
$$\sigma = \sigma_0(\omega)e^{\frac{-E_t}{KT}} \qquad (۵)$$

که E_t انرژی فعال‌سازی، K ثابت بولتزمن و σ_0 مقدار σ در 1/T=0 هستند.

تغییرات σ بر حسب 1/T در فرکانس‌های ثابت ۱۰۲، ۱۰۴ و ۱۰۵ هرتز در شکل ۴ نشان داده شده که انرژی فعال‌سازی برای آن‌ها با توجه به شیب نمودار $Ln\sigma$ بر حسب 1000/T به ترتیب ۰/۳۰۴، ۰/۲۱۵ و ۰/۰۵۸ الکترون ولت محاسبه شده است.

در شکل ۴ این کاهش در انرژی فعال سازی با افزایش فرکانس، با توجه به کاهش شیب نمودار با افزایش فرکانس قابل مشاهده است. متوسط انرژی فعال سازی برابر۰/۰۲ ± ۰/۱۹ الکترون ولت است، که این مقدار برای ZnPc و H_2 Pc به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۳۳ الکترون ولت گزارش شده است [۱۷]، [۱۸].

در فرکانس‌های پایین و دماهای بالا، مکانیسم هدایت الکتریکی عمدتاً نواری است چون با افزایش درجه حرارت، رسانندگی افزایش می‌یابد. در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰۰۰ هرتز و در درجه حرارت‌های پایین، با افزایش دما تغیرات چندانی در رسانندگی مشاهده نمی‌شود؛ در نتیجه مکانیسم هدایت الکتریکی جهشی با برد متغیر(VRH) است.

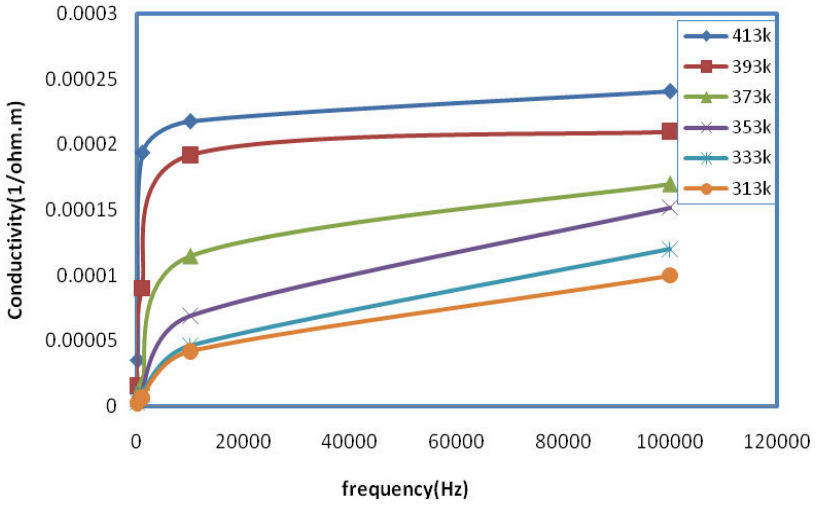


شکل۴. بستگی رسانندگی ac به 1/T در فرکانس‌های مختلف

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

مدل VRH یک مکانیسم رسانندگی ممکن در فتالوسیانین‌های لایه نازک است که با مشاهدات تجربی در دماهای پایین و خیلی پایین تأیید شده است. بر اساس بستگی دمایی رسانندگی، لیموگین[۱] و ایون[۲] در سال (۱۹۸۵) مکانیسم رسانندگی VRH را در نمونه‌های *FePc* و *CoPc* مشاهده کردند [۱۹]. به طور مشابه، گولد[۳] در سال (۱۹۸۹) همین مدل را برای لایه‌های نازک *CuPc* پیشنهاد کرد [۲۰].

توضیحات بالا در شکل ۵ نیز قابل مشاهده است که در آن داده‌های رسانندگی ac بر حسب فرکانس در دماهای ثابت رسم شده است. با توجه به این نمودار نیز مشاهده می‌کنیم که در فرکانس‌های بالا و درجه حرارت‌های پایین مکانیسم هدایت از نوع جهشی با برد متغیر، و در فرکانس‌های پایین و درجه حرارت‌های بالا از نوع نواری است، که به صورت گذار الکترونی بین نوار ظرفیت و سطوح تله تعریف می‌شود. نتایج مشابهی در بررسی مکانیسم هدایت الکتریکی در قطعات ساندویچی Au/Bu-PBD/Au مشاهده شده است [۲۱].

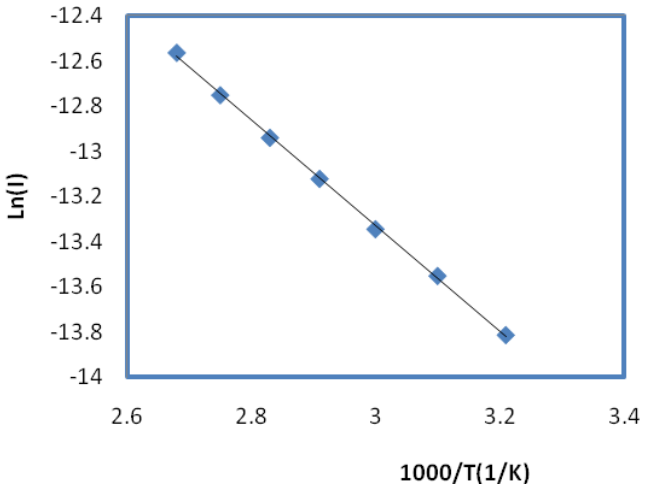


شکل۵. بستگی رسانندگی ac به فرکانس در دماهای مختلف

اندازه‌گیری dc : در شکل ۶ تغییرات رسانندگی dc بر حسب 1/T نشان داده شده است. با توجه به معادله (۴) که در آن R_0 ثابت و ΔE انرژی فعال‌سازی است، و با استفاده از شیب این نمودار انرژی فعال‌سازی CuPc برابر ۰/۰۲ ± ۰/۲ الکترون ولت و گاف انرژی آن در حدود۰/۰۲ ± ۰/۴۱ الکترون ولت محاسبه شده است. بنا بر این چنان که مشاهده می‌کنیم متوسط انرژی فعال‌سازی رسانندگی ac در درجه حرارت‌های بالا که در حدود ۰/۱۹ الکترون ولت محاسبه شد، با تقریب خوبی برابر انرژی فعال‌سازی در رسانندگی dc است، که این خود تأییدی بر غالب شدن تئوری نواری در مکانیسم هدایت الکتریکی در دماهای بالا است [۲۲].

۱.Le Mogin ۲. Even ۳.Gould

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]



شکل ۶. تغییرات جریان I بر حسب 1/T

نتیجه گیری

اندازه‌گیری‌های الکتریکی ac و همچنین dc به صورت تابعی از دما برای بررسی الکترونیکی لایه‌های نازک CuPc و تشخیص مکانیسم رسانندگی در آن‌ها، تحت شرایط مختلف انجام داده شد. در محدودهٔ فرکانس‌های $۱۰^{۲}$ تا $۱۰^{۵}$ هرتز در دماهای مختلف مشاهده شد که تغییرات ظرفیت این قطعه‌های آماده شده با تبخیر حرارتی، نسبت به تغییرات فرکانس به‌خصوص در دماهای بالا بسیار محسوس است، به‌طوری که مقادیر ظرفیت و عامل اتلاف با افزایش فرکانس،کاهش و مقدار ظرفیت با افزایش دما،افزایش می‌یابد. مکانیسم رسانندگی قطعه‌های ساندویچی Al/CuPc/Al به درجه حرارت و فرکانس اعمال شده بستگی دارد. مشاهده شد که مکانیسم هدایت در فرکانس‌های بالا و درجه حرارت‌های پایین از نوع جهشی با برد متغیر، و در فرکانس‌های پایین و درجه حرارت‌های بالا، از نوع نواری است. و در نهایت گاف انرژی ماده با استفاده از شیب نمودار جریان بر حسب 1/T محاسبه شد.

منابع

1. R. D. Gould, R.I. Blyth , phys. stat. sol. (a) 120 (1990) K57.

2. H. Yanagai, H. Kataaura, Y.Ueda, J. Appl. Phys. 75 (1994) 568.

3. A. Fujii,Y. Ohmori, K.Yoshino, IEEE Trans. Electron Devices, 44 (1997) 1204.

4. P. M. Burr, P. D. Jeffery, J. D. Benjamin, M.J. Uren, Thin solid films, 151 (1987) L111.

5. A. K. Abbas, A. Krier, R. A. Collins, J. Phys. D: Appl. Phys. 26 (1993) 1120.

6. G. Susich , Anal. Chem, 22 (1950) 425.

7. A. A. Ebert, Jr. H. B. Gottlieb, J. Amer. Chem. Soc, 74 (1952) 3806.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]

8. M. Shigemitsu, Bull. Chem.Soc, Jap, 32 (1959) 607.

9. Yu. A. Vidadi, L. D. Rozenshtein and Chistyakov, Soviet Phys Solid state (1963) 173.

10. A. Arshak, S. Szleetni and A. Arshak, Sensors, 2 (2002) 174.

11. R. D. Gould, T. S. Shafai, Thin Solid Films 373 (2000) 89.

12. A. Goswami and A. P. Goswami, Thin Solid Films, 16 (1973) 175.

13. M. E. Azim-Araghi and A. Karier, Pure Appl Opt. 6 (1997) 443.

14. B. Boudjema, G. Guillaud, M. Gamoudi, M. Maitrot, J. Andre, M. Martin and J. Simon, J. Appl. Phys, 56 (1984) 2323.

15. A. K. Abass, A. Krier, R. A. Collins, phys. stat. sol. (a) 142 (1994) 435.

16. M. E. Azim-Araghi, Indian Journal of Pure and Applied Physics, 45 (2007) 40.

17. A. S. Riad, Physica B270 (1999) 148.

18. A. S. Riad, M. T. Korayem, T. G. Abdel-Malik, Physica B270 (1999) 140.

19. J. Le Mogin, R. Even, J. Chem. Phys. 83 (1985) 6472.

20. A. K. Hassan, R. D. Gould, J. Phys: Condens. Matt. 1 (1989) 6679.

21. M. E. Azim-Araghi, D. Campbell, Thin Solid Films, 320 (1998) 320.

22. S. Darvish, International Journal of Pure and Applied Physics, 1, No. 2 (2005) 165.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-03]