مشخصات الكتريكي نيمه رساناي از نوع Au/ClMgPc/Au

عزت‌اله حاج اميني: دانشگاه شهيد رجايي

چكيده

در اين مقاله اندازه‌گيري‌هاي طيف نگاري در محدوده فركانس ۱۰ KHz تا ٤ MHz در دماهاي متفاوت براي احساسگرهاي نيمه‌رسانا و لايه نازك Au/ClMgPc/Au گزارش شده است. تغييرات رسانائي الكتريكي(a.c) به‌دست آمده با فركانس زاويه‌اي (ω) به صورت تابع ω^n تغيير مي‌كند. توان n در فركانس‌هاي بالا با تقريب خوبي برابر يك است. اندازه‌گيري‌ها در اين تجربه مكانيزم رسانائي الكتريكي در دماهاي پائين و فركانس‌هاي بالا در اين لايه نازك نيمه‌رسانا از مدل هوپينگ(Hopping) پيروي مي‌كند. تغييرات گاف انرژي (فاصله نوار رسانش و ظرفيت) به صورت تابعي از درجه حرارت و فركانس مورد مطالعه قرار گرفته است. توزيع نمائي ترازهاي انرژي تحت عنوان ناخالصي سطوح و همچنين تراز انرژي با انرژي eV ۰/۰۰۵ ± ۰/۰۸ در اين تحقيق شناسائي شده است. ظرفيت خازن Au/ClMgPc/Au و اطلاعات مربوط به ضريب اتلاف($\tan\delta$) در قالب مُدل گاسوامي(Goswami)[۱۰] در اين تحقيق مورد تجزيه و تحليل قرار گرفته است.

مقدمه

در دهه اخير نيمه رساناهاي آلي از نوع Metal phthalocyanies (Mpc's) با توجه به كاربرد آنها در ساخت احساسگرهاي گازي و سلول‌هاي خورشيدي مورد توجه خاص محققان قرارگرفته است. مشخصات الكتـريكي (d.c) Mpc's در دو حـالت تـك بـلور و لايـه نـازك بـررسي شده است[۱]، [۲]، [۳]، [٤]، [٥]. نيمه‌رساناهاي لايه نازك (Mpc's) در ولتاژهاي پائين از قانون رسانائي الكتريكي اُهمي پيروي مي‌كنند. در حالي كه در ولتاژهـاي بـالا، رسانائي الكتريكـي بـا استفـاده از نوارهاي انـرژي كه در ميان نوارهاي انرژي نيمه رسانـاهـا محـدود شـده‌انـد، صـورت مي‌گيرد. رسانائي الكتريكي (a.c) در نمونه‌هاي متفاوت(MPc's): , ZnPc) CuPc , MgPc) همواره از تابع ω^n پيروي مي‌كند، به طوري كهω فركانس زاويه‌اي و توان n كوچكتر يا مساوي يك است ($n \leq ۱$) [٦]، [۷]، [۸]، [۹].

رفتار نيمه‌رساناها در اين حالت از مكانيـزم رسانـائي الكتريكي هوپينگ پيروي مي‌كند. نتايج به دست آمده در اين زمينه، به طور كلي به مطالعه داده‌هاي d.c بستگي دارد. منظور از داده‌هاي d.c مشخصات جريان الكتريكي بر حسب درجه حرارت و همچنين جريان الكتريكي بر حسب ولتاژ است و نتايج به دست آمده در رابطه با ايجاد شرايط آزمايش‌هاي مربوط است. اخيراً مطالعات گسترده‌اي براي تعيين مكانيزم رسانائي

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

الكتريكي اجسام در شرايط متفاوت انجام مي‌گيرد. در اين تحقيق رسانائي الكتريكي برحسب درجه حرارت براي شناسائي ساختار الكترونيكي ClMgPc انجام شده است.

آزمايش

حسگرهاي لايه نازك Au/ClMgPc/Au با استفاده از روش تبخيرگرمايي و در شرايط خلاء 10^{-4} mbar روي زير لايه‌هاي كاملاً تميز شده شيشه‌اي ساخته شده‌اند. زير لايه‌ها در طي زمان تبخير در دماي ثابت (دماي اتاق) نگه‌داشته مي‌شوند. ClMgPc به روش زير در آزمايشگاه تهيه شده است.

۴۰ گرم phthalonitrile ، ۱۰ گرم $MgCl_3$ ، ۲۰۰ميلي‌ليتر quinoline در ۵۰۰ كلوين به مدت ۲ ساعت با يكديگر كاملاً مخلوط مي‌كنيم. سپس ماده به دست آمده را از صافي عبور مي‌دهيم و آن را با استفاده از تولوئين، تتراكلريدكربن و آستون كاملاً مي‌شوييم و محصول به دست آمده را در۳۹۰ كلوين خشك مي‌كنيم تا براي تبخير آماده شود. آهنگ تبخير $1\ nms^{-1}$ است و ضخامت در طي لايه نشاني با استفاده از شمارنده بلور كوارتز انجام مي‌شود. تمام اندازه‌گيري‌ها در اين آزمايش بر روي لايه‌هاي نازك ۱ تا ۲ ميكرومتر انجام شده است. آهنگ تبخير $1nms^{-1}$ و ضخامت لايه طلا ۲۰۰nm است.

استفاده از محفظه‌اي فولادي خاص، شرايط اندازه گيري‌هاي الكتريكي در محدوده وسيعي از دما را ميسر مي‌سازد. حسگرها به منبع گرمايي مناسب و از نوع (Minco HK-۹۱۳) وصل شدند. درجه حرارت حسگرها با تقريب ۰/۱± كلوين با استفاده از ترموكوپل كروم - آلومينيوم اندازه‌گيري شد. ظرفيت، رسانائي الكتريكي و ضريب اتلاف $(\tan\delta)$ در محدوده ۱۰ KHz تا ۴ MHz با استفاده از يك فركانس سنج (Hewlett - packard) مدل ۴۲۷۵ ALCZ اندازه گيري شدند.

مباحث تئوري

حالت يك ماده را مي‌توان توسط مكانيزم‌هاي مختلف مورد بررسي قرار داد، از جمله ضريب گذردهي الكتريكي $\varepsilon(\omega)$ كه به اين شكل بيان شده است:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\circ\left[1 + \sum \chi_k(\omega)\right] = \varepsilon_1(\omega) - j\varepsilon_2(\omega) \qquad (۱)$$

علامت جمع روي χ به وسيله انديس k مشخص شده است و $\varepsilon_\circ$ معرف ضريب گذردهي الكتريكي در خلاء است و $\varepsilon_1(\omega)$ و $\varepsilon_2(\omega)$ به ترتيب مؤلفه‌هاي حقيقي و موهومي ضريب گذردهي هستند و $\chi(\omega)$ پذير رفتاري الكتريكي است. به طوري كه:

$$\chi(\omega) = \chi_1(\omega) - j\chi_2(\omega) \text{ و } \chi_1(\omega) \text{ و } \chi_2(\omega)$$

قسمت‌هاي حقيقي و موهومي پذيررفتاري الكتريكي هستند. ضريب گذردهي الكتريكي بر حسب $\chi(\omega)$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

براي هر نوع مكانيزم رسانائي الكتريكي به صورت زير انتخاب مي‌شود:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\circ[\chi(\omega)+1] = \varepsilon_1 - j\varepsilon_2 \qquad (۲)$$

به طوري كه $\chi(\omega)$ تنها يك فرآيند قطبش را مشخص خواهد كرد، مؤلفه‌هاي حقيقي و موهومي ضريب گذردهي با روابط زير داده مي‌شوند.

$$\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_\circ[1+\chi_1(\omega)] \qquad (۳)$$

$$\varepsilon_2(\omega) = \varepsilon_\circ\chi_2(\omega) \qquad (٤)$$

در حالتي كه احساسگرهاي لايه نازك به طور موازي در مدار قرار بگيرند، امپدانس مدار به صورت زير معرفي مي‌شود:

$$Z = \frac{R}{1+j\omega CR} + r = \frac{R + r(1+\omega^2R^2C^2)}{1+\omega^2R^2C^2} - j\frac{\omega^2R^2C^2}{1+\omega^2R^2C^2} \qquad (٥)$$

با توجه به تئوري ارائه شده به وسيله گاسوامي [۱۰] يك مدار سري معادل يك خازن ساده و يك مقاومت مي‌تواند به صورت زير تعريف شود:

$$R_s + \frac{1}{j\omega C_s} \quad \text{يا} \quad R_s - j\frac{1}{\omega C_s} \qquad (٦)$$

كه R_s و C_s به ترتيب معرف مقاومت سري معادل و ظرفيت خازن سري معادل است از قسمت‌هاي حقيقي و موهومي معـادلات بالا (٥) و (٦) داريم.

$$C_s = \frac{1+\omega^2R^2C^2}{\omega^2R^2C^2} = (1+D^2)C \qquad (۷)$$

$$R_s = \frac{R + r(1+W^2R^2C^2)}{1+(W^2R^2C^2)} = r + \frac{D^2}{1+D^2}R \qquad (۸)$$

به طوري كه $D = \frac{1}{\omega RC}$ است، چون ضريب اُفت $(\tan\delta)$ به وسيله $\omega C_s R_s$ داده مي‌شود، داريم:

$$\tan\delta = \frac{\omega(1+\omega^2R^2C^2)\left[R + r(1+\omega^2R^2C^2\right]}{(\omega^2R^2C)(1+\omega^2R^2C^2)} \qquad (۹)$$

$$= \frac{1}{\omega RC} + \frac{r}{\omega R^2C} + \omega rC = D(1+\frac{r}{R}) + \omega rC$$

بنابراين ضريب افت برحسب پارامترهاي r, C, R, ω بيان مي‌شود.

حال با مشتق‌گيري از ضريب افت $(\tan\delta)$ برحسب ω معادله (۹) به معادله زير تبديل مي‌شود:

$$\tan'\delta_\omega = -\frac{r}{\omega^2R^2C} - \frac{1}{\omega^2RC} + r\ C \qquad (۱۰)$$

و مشتق دوم به صورت زير است:

$$\tan''\delta_\omega = \frac{2r}{\omega^3R^2C} + \frac{2}{\omega^3RC} \qquad (۱۱)$$

$\tan''\delta$ براي تمام مقادير r, C, R, ω مثبت است، بنابراين $\tan\delta$ بايد حداقل از يك مقدار كمينه عبور كند و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

اين زماني اتفاق مي‌افتد كه معادله (۱۰) صفر شود. يعني وقتي

$$r\,C = \frac{r}{\omega^2 R^2 C} + \frac{1}{\omega^2 RC} = \frac{1}{\omega^2 RC}(1 + \frac{r}{R}) \qquad (۱۲)$$

چون $R \gg r$ در تمام حالت‌ها داريم $r\,C = \frac{1}{\omega^2 RC}$، بنابراين يك حداقل افت در يك فركانس معين داده مي‌شود كه به وسيله رابطه زير محاسبه مي‌شود:

$$\omega_{min} = \sqrt{\frac{1}{rRC^2}} \qquad (۱۳)$$

وقتي $\omega R^2 C \gg r$ يا $\frac{r}{R} \ll 1$ باشد، براي تمام حالت‌ها، معادله ۹ به صورت زير تقليل مي‌يابد:

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega RC} + \omega r\,C = (D + \omega r\,C) \qquad (۱٤)$$

در حالي كه ω كوچك باشد $\omega rC \ll \frac{1}{\omega RC}$، در اين صورت داريم:

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega RC} = D \qquad (۱٥)$$

و اگر ω بزرگ باشد $\frac{1}{\omega RC}$ معمولاً از ωrC بسيار كوچكتر است، و بنابراين داريم:

$$\tan\delta = \omega rC \qquad (۱٦)$$

بنابراين معادلات (۱٥) و (۱٦) هر دو معرف ضريب اتلاف $(\tan\delta)$ اند، به گونه‌اي كه درمعادله ۱٥ ضريب اتلاف با ω نسبت عكس، و در معادله ۱٦ ضريب افت با ω نسبت مستقيم دارد.

نتايج

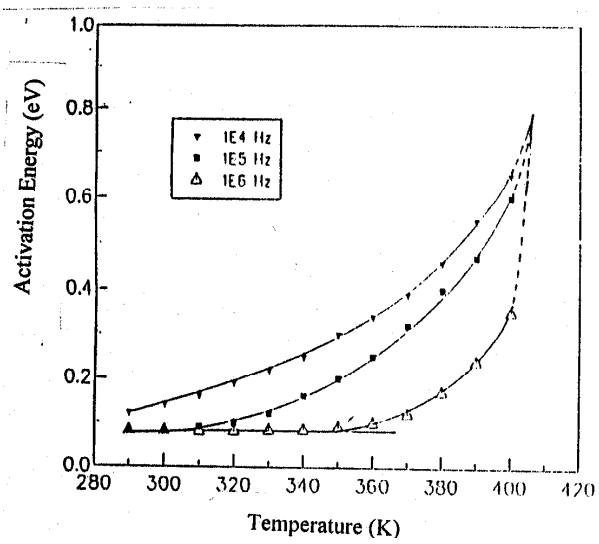
۱ - رسانائي الكتريكي

در شكل ۱ منحني نمايش (E_g) برحسب T رسم شده است. نتايج به دست آمده در شكل ۱ نشان مي‌دهد كه گاف انرژي در محدوده درجه حرارت ۳۲۰-۲۹۰ كلوين تقريباً ثابت مي‌ماند و در درجه حرارتهاي بالاتر به‌طور نمايي افزايش مي‌يابد. براي فركانس‌هاي ۱۰۰ KHz و ۱ MHz گاف انرژي به صورت نمايي با افزايش دما روي تمام مقادير σ افزايش مي‌يابد. وقتي منحني گـــاف انرژي در شكل ۱ براي درجه حرارتهاي بالاتر رسم مي‌شود منحني‌ها در يك نقطه به هم مي‌رسند. (به صورت خط چين نشان داده شده است) همگرايي منحني‌هاي گاف انرژي به سمت ۰/۰٤ ± ۰/۸ ev ميل مي‌كند. تغييرات نمائي E_g با افزايش دما بستگي به توزيع نمايي ترازهاي انرژي ماده دارد. عموماً گاف انرژي براي رسانايي الكتريكي در اكثر نيمه هادي‌هاي آلي(MPc's) در حدود ۰/۸ ev گزارش شده است. در چهارچوب تئوري نواري گاف انرژي $E_F - E_v$ مي‌باشد. به طوري كه E_F, E_v به ترتيب معرف انرژي باند فرمي و باند ظرفيت مي‌باشند[۱]،[۲]،[٤].

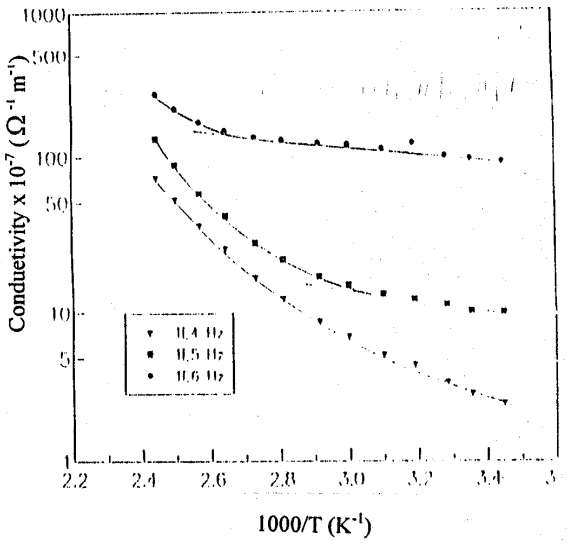
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

درحالي كه تئوري نواري انرژي به عنوان چهارچوب رسانائي الكتريكي در احساسگرهاي Au/ClMgPc/Au در نظر گرفته شود گاف انرژي ۰/۴ev ± ۰/۸ با افزايش درجه حرارت تا حدود ۴۱۰ كلوين همواره ثابت مي‌ماند(شكل۱). دردرجه حرارتهاي پايين و فركانس ۱۰۰KHz و ۱ MHz مكانيزم رسانائي الكتريكي از مدل هوپينگ پيروي مي‌كند. اين مدل در درجه حرارتهاي پايين‌تر از درجه حرارت اتاق (T<300k) براي انواع MPc's ازجمله MgPc [۷]، CuPc [۷]، [۹]، ZnPc [۶] و PbPc [۱] گزارش شده است. شكل ۱ معرف اين است كه رسانايي الكتريكي در ClMgPc براي درجه حرارتهاي كمتراز۳۱۰ كلوين و فركانس KHz ۱۰۰همچنين درجه حرارتهاي كمتر از k ۳۰۰ و فركانس MHz ۱ از مدل هوپينگ پيروي مي‌كند.

براي كسب اطلاعات بيشتر منحني نمايش رسانائي الكتريكي برحسب فركانس اعمال شده براي Au/ClMgPc/Au در درجه حرارت‌هاي ثابت در شكل ۲ رسم شده است. در فركانس‌هاي پايين و درجه حرارتهاي بالاتر از۳۲۰ كلوين منحني نمايش رسانائي الكتريكي (σ) برحسب فركانس (P_F) مشخصات فيزيكي حسگرClMgPc را معرفي مي‌كند. در فركانس‌هاي پايين شيب منحني نمايش $\ln\sigma$ برحسب lnf تقريباً برابر ۰/۱ مي‌باشد. با افزايش فركانس شيب منحني نمايش ($\ln f - \ln\sigma$) افزايش مي‌يابد و حداكثر به مقدار ثابت ۰/۱ ± ۱ مي‌رسد. افزايش شيب منحني نمايش $\ln f - \ln\sigma$ با افزايش فركانس مي‌تواند در رابطه با غالب شدن مكانيزم رسانائي الكتريكي هوپينگ باشد، درحالي كه رسانايي الكتريكي از مدل هوپينگ پيروي كند همواره رسانايي الكتريكي (σ) متناسب است با فركانس اعمال شده f^n. به طوري كه توان n برابر با ۰/۱ ± ۱است. همچنان كه ملاحظه مي‌شود رسانايي الكتريكي مستقل از درجه حرارت است. در نيمه رساناهايي كه ساختار بلوري منظم ندارند نيز رابطه متناسب بودن رسانايي الكتريكي با فركانس $\sigma \propto f^n$ برقراراست [۱۱]،[۱۲].



شكل۲- منحني نمايش تغييرات گاف انرژي برحسب درجه حرارت در فركانس‌هاي مختلف



شكل۱- منحني نمايش هدايت الكتريكي برحسب1/T براي فركانس‌هاي مختلف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

۲- ظرفيت خازن

نمايش ظرفيت خازن برحسب فركانس در شكل ۳ معرفي شده است. در درجه حرارتهاي بالا ظرفيت خازن با فركانس تغيير مي‌كند در صورتي كه در درجه حراتهاي پايين اين تغييرات كمتر است. دردرجه حرارتهاي بالا با افزايش فركانس ظرفيت خازن Au/ClMgPc/Au به شدت كاهش مي‌يابد كه در شكل۳ نشان داده شده است.

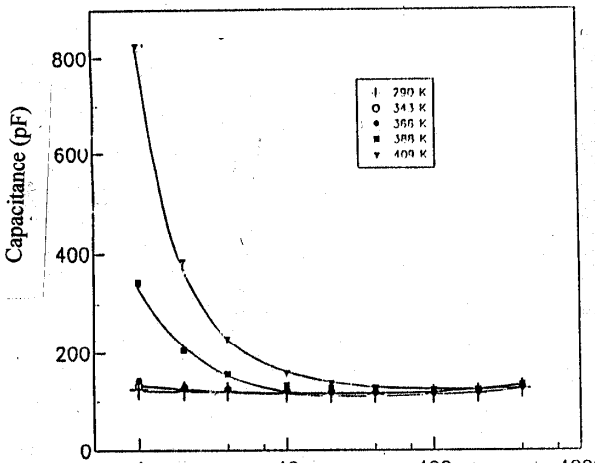
«Goswamin و همكارانش»[۱۰] با استفاده از يك مدل مدار معادل برخي از مشخصات ظرفيت خازن يك سيستم اتصال فلز، دي‌الكتريك با اتصال اهمي را پيش‌بيني كردند. آنها فرض كردند كه هر سيستم خازني يك ظرفيت C، يك مقاومت R به علت لايه نازك دي‌الكتريك مربوط به خازن كه موازي با ظرفيت C خازن است و يك مقاومت سري r كه مربوط به سيم‌هاي رابط مي‌باشد. بر طبق اين مدل ظرفيت خازن C_s و مقاومت معادل سري R_s به وسيله معادلات ۱۸ و ۱۹ معرفي مي‌شوند.

$$C_s = C + \frac{1}{\omega^2 R^2 C} \qquad (۱۷)$$

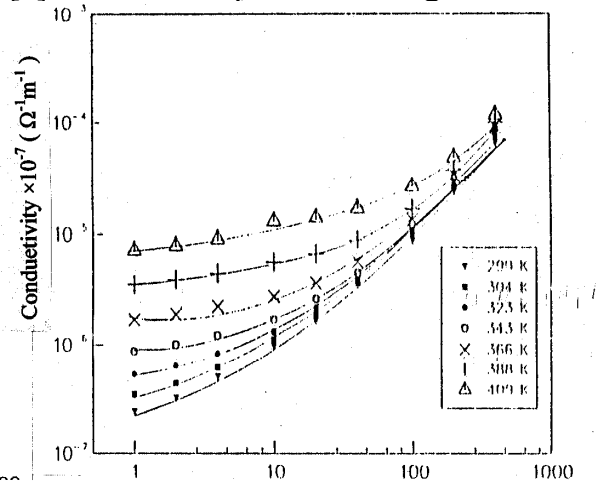
$$R_s = r + \frac{R}{\omega^2 R^2 C^2 + 1} \qquad (۱۸)$$

داده‌هاي به دست آمده در منحني نمايش شكل ۳ مربوط به ظرفيت با مدل پيشنهادي گاسوامي مطابقت دارد. با توجه به معادله۱۷، C_s بايد با افزايش ω كاهش يابد و ظرفيتي برابر۲PF ± ۱۲۱را با توجه به شكل ۳ در همه حرارتها معرفي مي‌كند.

شكل٤ منحني نمايش R برحسب $\frac{1}{T}$ را معرفي مي‌كند درحالي كه داريم: $R = R_\circ e^{E_g/KT}$ دراين رابطه $R_\circ$ معرف مقدار ثابت مقاومت مي‌باشد در حالتي كه $\frac{1}{T} = \circ$ و E_g معرف گاف انرژي است. با استفاده از منحني نمايش شكل٤ مي‌توان گاف انرژي را محاسبه كرد به طوري كه $E_g =$ ۰/۳۲ ± ۰/۰۲eV است، اين مقدار با نتايج به دست آمده براي CuPc و ZnPc [٦] و [۹] بسيار نزديك است.



شكل٤- تغييرات ظرفيت برحسب فركانس در درجه حرارت‌هاي مختلف



شكل۳- منحني نمايش تغييرات هدايت الكتريكي بر حسب فركانس در درجه حرارت‌هاي مختلف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

نتيجه‌گيري

حسگرهاي لايه نازك براي اندازه‌گيري رسانائي الكتريكي در محدوده فركانس ١٠ KHz تا ٤ MHz در درجه حرارتهاي مختلف ساخته شده است. مكانيزم رسانائي الكتريكي در اين حسگرها Au/ClMgPc/Au وابسته به درجه حرارت و فركانس اعمال شده است. دراين تحقيق مشخص شده است كه مكانيزم رسانايي الكتريكي دردرجه حرارتهاي پايين و فركانس‌هاي بالا عمدتاً از مدل رسانائي الكتريكي هوپينگ پيروي مي‌كند در صورتي كه در درجه حرارتهاي بالا و فركانس‌هاي پايين مدل نواري انرژي غالب است. ظرفيت با افزايش فركانس كاهش مي‌يابد و با افزايش درجه حرارت افزايش پيدا مي‌كند. اين نتيجه با مدل گاسوامي كه داراي اتصال اهمي است مطابقت كامل دارد.

References

1. A. Ahmad and R.A. Collins, J. thin Solid Films 217 75 (1992).
2. D.F. Barbe and C.R. Westgate, J. Chem. Phys. Solids 52 4046 (1970).
3. A. K. Hassan and R.A. Gould, J. Phys. D: Appl. Phys. 22 1162 (1989).
4. A. K. Abass, R. A. Collins and A. Krier, J. phys. Chem. Solids 54 375 (1993).
5. A. Sussman, Appl. Phys. 38 2784 (1967).
6. A. M. Saleh, R. A. Gould and A. K. Hassan, Phys. Stat. Sol. 139 (1993).
7. Yu. A. Vidadi, L. D. Rozenshtein and Cistyakov, Soviet Phys. Solid State 11 173 (1969).
8. S. A. James, A. K. Ray and S. Silver Phys. Stat Sol. (a) 129 435 (1992).
9. R. A. Gould and A. K. Hassan Thin Solid Films 223 334 (1993).
10. A. Goswami and A. P. Goswami, Thin Solid Films 16 175 (1973).
11. N. F. Mott and E.A. Davis Electronic processes in Non-Crystalline Materials, 2nd Edition, Clarendon Press, Oxford (1979) 225.
12. Yu. A. Vidadi, K. Sh. Kocharli, B. Sh. Barkhalov and S.A. Sadreddinov, Phys. Stat. Sol. (a) 34, K77 (1976).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]