ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 5, № 2 (2004) С. 302-306

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 5, № 2 (2004) P. 302-306

УДК 621.315.592

Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза, І.В. Калитчук, В.М. Кланічка

Рухливість носіїв заряду і механізми їх розсіювання в плівках сульфіду свинцю

Кафедра фізики і хімії твердого тіла
Прикарпатського університету імені Василя Стефаника,
вул.. Галицька, 201, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна, E-mail: freik@pu.if.ua

Досліджено залежність рухливості носіїв струму в плівках n-PbS від товщини в інтервалі 0,1-7 мкм при температурах 77-300 К. Розраховано внески рухливості, зумовлені розсіюванням на поверхні та дислокаціях невідповідностей, утворених на гетеро межах. Визначено переважаючі механізми розсіювання носіїв заряду.

Ключові слова: плівки, сульфід свинцю, дислокації, розсіювання, рухливість.

Стаття поступила до редакції 5.11.2003 р.; прийнята до друку 11.03.2004 р.

I. Вступ

Плівки халькогенідів свинцю – перспективні матеріали для детекторів і джерел інфрачервоного діапазону оптичного спектру випромінювання [1, 2]. При реалізації лінійок і матриць активних елементів важливим параметром є товщина тонко плівкового матеріалу. З літературних джерел [3-5] відомо, що в області малих товщин, механізми розсіювання в плівках суттєво відрізняються від таких у масивних зразках. Тут, зокрема, крім розсіювання на теплових коливаннях гратки і іонізованих центрах необхідно враховувати розсіювання на границях зерен, поверхні, дислокаціях невідповідності та дефектах росту [3-5]. У зв'язку із цим важливою проблемою є оцінка цих додаткових механізмів розсіювання у тонких плівках.

У роботі проведено дослідження рухливості носіїв заряду у плівках PbS різної товщини в інтервалі температур 77-300 К.

II. Експеримент і його результати

Плівки отримували з парової фази методом гарячої стінки на свіжих сколах (111) монокристалів BaF_2 згідно методики [7]. Швидкість росту плівок складала 1-3 нмс$^{-1}$. Товщина плівки варіювалась в межах 0,1-7 мкм часом осадження. Температура підкладок підтримувалася у межах $T_п$ = 520-570 К.

Холлівська рухливість визначалася із е.р.с. Холла, виміряної у постійних електричних і магнітних полях при двох напрямках струму. Струм через зразок подавався паралельно до підкладки і складав 0,1-0,5 мА. Магнітне поле було напрямлено перпендикулярно до поверхні плівок при індукції магнітного поля 0,8-1,5 Тл. Вимірюваний зразок мав чотири холлівські і два струмові контакти. Концентрація носіїв у всіх зразках складала (1-3)·10^{18} см$^{-3}$.

Залежність холлівської рухливості носіїв заряду плівок n-PbS від товщини для різних температур наведено на рис. 1. Видно, що для всіх досліджуваних температур 77-300 К із зменшенням товщини плівок їх рухливість зменшується. При цьому особливо значна зміна величини рухливості характерна для області низьких температур 77-145 К. При товщинах плівок більших за 6 мкм характерна тенденція до насичення. Так само як і для масивних зразків [6], підвищення температури приводить до зменшення абсолютного значення рухливості (рис. 1).

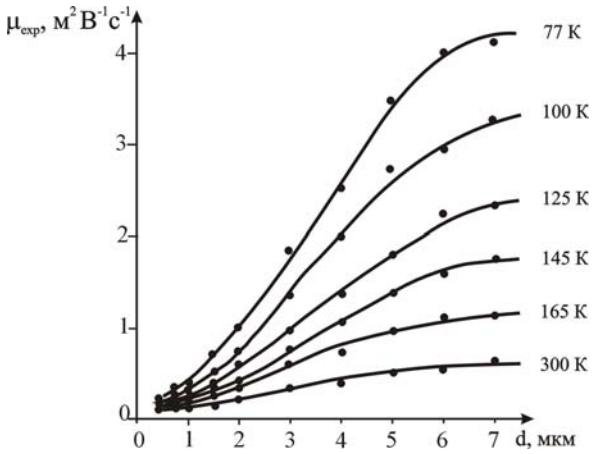

Рис. 1. Залежність ефективної рухливості μ_{exp} плівок n-PbS від товщини d для різних температур.

III. Розсіювання на поверхні

Згідно правила Маттісена [8], ефективна рухливість, виміряна на експерименті μ_{exp}, співвідноситься із складовими як

$$\frac{1}{\mu_{exp}} = \frac{1}{\mu_П} + \frac{1}{\mu_з} + \frac{1}{\mu_v}, \qquad (1)$$

де $\mu_П$ – рухливість носіїв, пов'язана із розсіюванням на поверхні (поверхнева); μ_v – рухливість для масивного зразка (об'ємна); $\mu_з$ – рухливість, яка враховує розсіювання на дислокаціях невідповідності гетеро межі, міжзеренне розсіювання, дефектах росту (залишкова).

Розсіювання на поверхні згідно [4] можна розрахувати за формулою

$$\mu_П = \frac{\mu_v}{(1+\lambda/d)}, \qquad (2)$$

тут λ – середня довжина вільного пробігу; d – товщина плівки. Зауважимо, що для тонких плівок можливі прояви розмірних ефектів – за середньою довжиною вільного пробігу і дебаївською довжиною екранування. Для халькогенідів свинцю обидві довжини складають 25-50 нм [3, 4]. Так як це значно менше, ніж номінальна товщина досліджуваних плівок то вплив розмірних явищ на рухливість носіїв

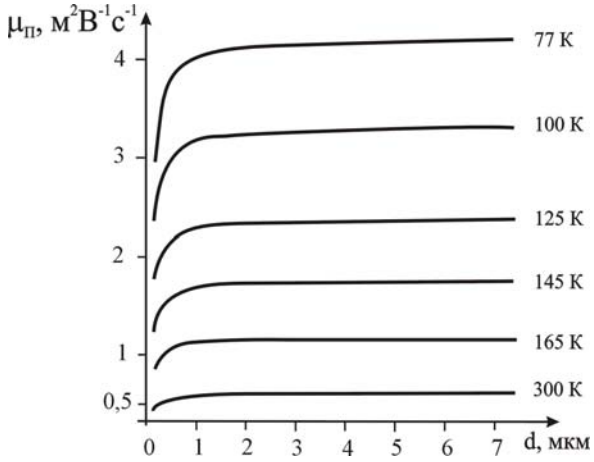

Рис. 2. Залежність поверхневої рухливості $\mu_П$ плівок n-PbS від товщини d для різних температур.

заряду малоімовірний.

Розраховані значення поверхневої рухливості для плівок при $\lambda = 50$ нм наведено на рис. 2. Об'ємні рухливості μ_v визначені для монокристалів згідно [6] з врахуванням розсіювання на екранованому кулонівському і короткодіючому потенціалі вакансій, деформаційних потенціалах, акустичних і оптичних фононів, поляризаційному потенціалі оптичних фононів і взаємодії між носіями для різних температур дані у таблиці. Зауважимо, що суттєвий вплив поверхневого розсіювання на значення рухливості носіїв заряду характерне для товщин менших за 1 мкм, що зумовлює їх значне зменшення (рис. 2). При цьому підвищення температури призводить до зсуву цієї межі на бік менших товщин.

IV. Залишкова рухливість

Залишкову рухливість розраховано зі співвідношення (1) за відомими значеннями μ_{exp}, $\mu_П$, μ_v зображено на рис. 3. видно, що із збільшенням товщини плівки у зазначеному інтервалі, вона зростає на три порядки величини. Її зростання особливо помітне в області товщин більших за один мікрометр при низьких температурах.

З метою визначення домінуючого механізму розсіювання носіїв заряду для товщин плівки більших за 1 мкм нами проаналізовано температурну залежність залишкової рухливості $\mu_з(T)$. Відомо [8], що температурну залежність рухливості для плівок товщиною d можна представити у вигляді

$$\mu_з = \mu_0(d) \cdot T^{-n(d)}, \qquad (3)$$

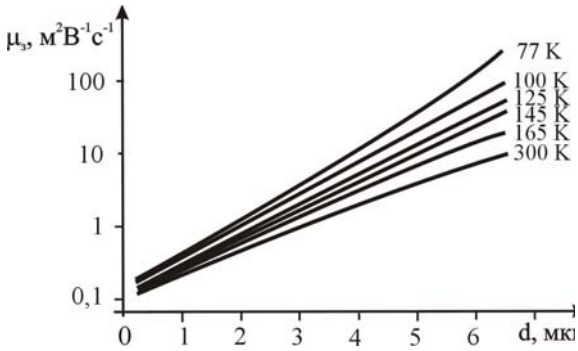

Рис. 3. Залежність залишкової рухливості $\mu_з$ плівок n-PbS від товщини d для різних температур.

де $\mu_0(d)$– стала величина, яка визначається параметрами матеріалу і залежить від товщини плівок; n(d) – показник, який визначається переважанням конкретного механізму розсіювання у плівках для заданої товщини. Для достатньо досконалих плівок хвалькогенідів свинцю $n \approx 2{,}5$, що пов'язано із розсіюванням на довгохвильових акустичних фононах із врахуванням температурної залежності ефективної маси. При поверхневому

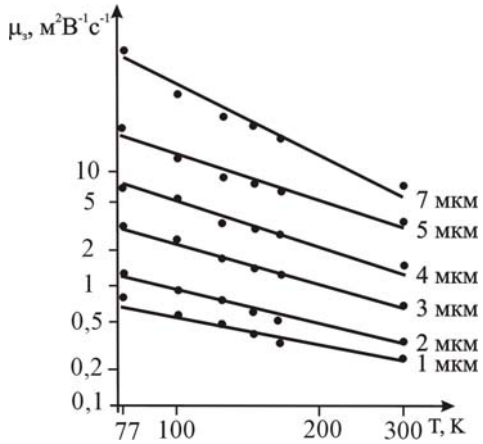

Рис. 4. Залежність залишкової рухливості $\mu_з$ від температури T для плівок n-PbS різної товщини.

розсіюванні $n \approx 0{,}5$. Із розсіюванням на дефектах росту пов'язують значення параметра $n = 0{,}8$, а із розсіюванням на дислокаціях – $1{,}5 \le n < 2{,}0$ [3, 4].

Визначені показники n для плівок різної товщини наведено на рис. 5. Виявилося, що залежність n(d) можна апроксимувати прямою лінією із аналітичним виразом

$$n(d) = 0{,}52 + 0{,}23d. \qquad (4)$$

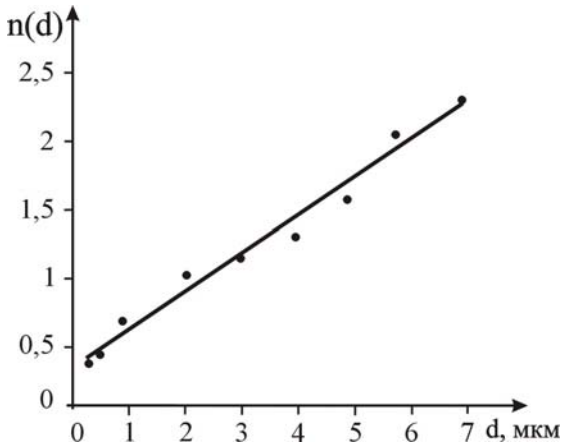

Рис. 5. Залежність показника n температурної залежності рухливості від товщини d плівок n-PbS.

Таким чином, для товщин плівок менших за 1 мкм $n \approx 0{,}5$, що підтверджує домінування розсіювання носіїв заряду на поверхні. Для більших товщин 1 мкм $\le d \le 7$ мкм показник n зростає в межах $0{,}7 < n < 2{,}1$. Таким чином, механізм розсіювання носіїв струму на дислокаціях ($1{,}5 \le n < 2{,}0$) реалізується для товщин плівок 4,3 мкм $\le d < 6{,}4$ мкм.

V. Розсіювання на дислокаціях

Дислокації невідповідності, що утворюються на межі "плівка-підкладка" можна розглядати як заряджені включення – деякі мікрообласті електростатичного поля, які приводять до зменшення рухливості носіїв заряду. Так, зокрема, дислокація у кристалі n-типу є не що інше як лінійний від'ємний заряд, навколо якого скупчений позитивний вже об'ємний заряд. Носій заряду – електрон, який рухається у електростатичному полі дислокації зазнає розсіювання. За умови, що окрема дислокація – заряджений циліндр, для рухливості будемо мати вираз [3]:

$$\mu_d = \mu_v(1-\delta), \qquad (5)$$

де $\delta \approx \dfrac{\pi R^2}{d}\sqrt{N_\Pi}$

Тут δ – доля об'єму, зайнятого циліндрами об'ємного заряду дислокації; R – радіус цього циліндра; N_Π – поверхнева густина дислокацій. Тоді

$$\mu_d = \mu_v\left(1 - \frac{\pi R^2}{d}\sqrt{N_\Pi}\right). \qquad (6)$$

З іншого боку, розсіювання на дислокаціях можна представити у наближенні часу релаксації $\langle\tau\rangle$:

$$\mu_d = \frac{e\langle\tau\rangle}{m^*},$$

де m^* – ефективна маса носіїв заряду – електронів; e – заряд електрона. Так як час релаксації визначається як [9]

$$\langle\tau\rangle = \frac{3}{8RN_\Pi v}, \qquad (7)$$

вираз для рухливості μ_d буде

$$\mu_d = \frac{3e}{8RN_\Pi v m^*}. \qquad (8)$$

Тут v – дрейфова швидкість розсіювання електронів.

За умови, що залишкова рухливість $\mu_з$ дорівнює рухливості μ_d вирази (6) і (8) дають можливість зробити оцінку зміни радіуса R і поверхневої густини N_Π дислокацій від товщини плівки. Необхідні дані,

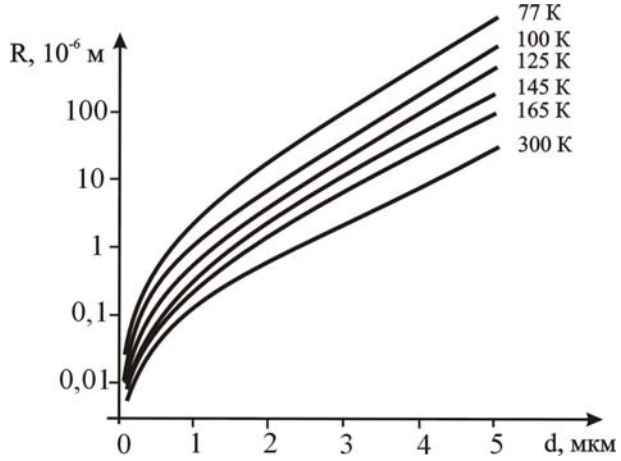

Рис. 6. Залежність радіуса дислокацій R для плівок n-PbS від товщини d для різних температур.

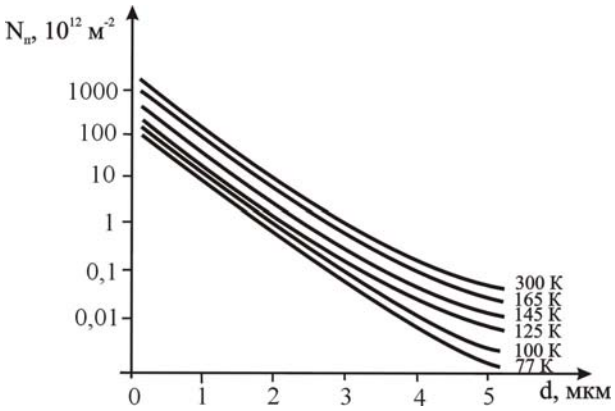

Рис. 7. Залежність поверхневої густини дислокацій N_Π плівок n-PbS від товщини d для різних температур.

використані при розрахунках, наведено у таблиці, а результати проведених обчислень представлено на рис. 6, 7. Варто зауважити, що радіус дислокацій спочатку із збільшення товщини плівок зростає (рис. 6). Це характерно для всіх досліджуваних температур. При цьому радіус дислокацій складає 10-10^5 нм. Густина дислокацій із зростанням товщини має тенденцію до зменшення (рис. 7). За абсолютною

Таблиця

Значення основних величин, які використовувалися при розрахунку рухливостей плівки сульфіду свинцю

Величина	Позначення і розмірність	Значення
Об'ємна рухливість для різних температур (при максимальній товщині)	μ_v , м^2/Вс (300 К)	0.615
	μ_v , м^2/Вс (165 К)	1,16
	μ_v , м^2/Вс (145 К)	1,75
	μ_v , м^2/Вс (125 К)	2,38
	μ_v , м^2/Вс (100 К)	3,32
	μ_v , м^2/Вс (77 К)	4,22
Довжина вільного пробігу	λ , м	$5\cdot10^{-8}$
Швидкість електрона	v , м/с	10^5
Концентрація носіїв	n , м$^{-3}$	10^{24}
Заряд електрона	e , Кл	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$
Стала Планка	$\hbar$, Дж·с	$6{,}62\cdot10^{-34}/(2\cdot\pi)$
Ефективна маса	m* , Кг	$0{,}1822\cdot10^{-30}$

величиною вона складає 10^{12}-10^{15} м$^{-2}$.

VI. Висновки

1. Досліджено залежність рухливості n-PbS від товщини 0,1 мкм ≤ d ≤ 7 мкм для температур 77-300 К .
2. Виконано розрахунок поверхневої, а також залишкової рухливості, пов'язаної із розсіюванням на дислокаціях.
3. Показано, що якщо для товщин плівок менших за 1 мкм домінує розсіювання на поверхні, то при 4,3 мкм d < 6,4 мкм – на дислокаціях невідповідності.

Д.М. Фреїк – заслужений діяч науки і техніки України, доктор хімічних наук, професор, директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедрою фізики і хімії твердого тіла;
Б.С. Дзундза – магістр фізики;
І.В. Калитчук – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла;
В.М. Кланічка – декан фізичного факультету, завідувач кафедрою теоретичної і експериментальної фізики, кандидат фізико-математичних наук, професор.

[1] J.N. Zemel. Recent developments in epitaxial IV-VI films // *J. Luminescence*, **7**, pp 524-541 (1973).
[2] H. Holloway. Thin Films IV-VI semiconductor photodiodes // *Physics thin films,* new York, **11**, pp 105-203 (1980).
[3] P.R. Vaya, J. Majht, B.S.V. Gopalam, C. Dattatrepan. Thickness Dependence of Hall Mobility of HWE Grown PbTe Films // *Phys. Stat. Sol. (a),* **87**(341), pp 341-350 (1985).
[4] О.А. Александроав, Р.Ц. Бондоков, Н.В. Саунин, Ю.М. Таиров. Подвижность носителей заряда в двухслойных структурах PbTe/PbS // *Физика и техника полупроводников,* **32**(9), сс. 1064-1068 (1998).
[5] І.В. Калитчук, В.М. Кланічка. Розсіювання носіїв заряду в плівках n-PbS // *Фізика і хімія твердого тіла,* **5**(1), сс. 106-112 (2004).
[6] D.M. Freik, L.I.Nykyruy, V.M. Shperun. Scattering Mechanisms of Electrons on Monocrystalline PbTe, PbSe and PbS // *Semiconductor Physics, quantum electronics and potoelectronics,* **5**(4), pp/ 362-367 (2002).
[7] Д.М. Фреик, М.А. Галущак, Л.И. Межиловская. *Физика и технология полупроводниковых пленок*. Вища школа, Львів, 152 с. (1988).
[8] Ю.И. Равич, В.А. Ефимова, В.А. Смирнова. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS. Наука, М. 384 с. (1968).
[9] М.А. Глауберман, О.А. Кулініч, В.В. Єгоров, Н.А. Каніщева, В.В. Козел. Вплив структурних дефектів у при поверхневих шарах кремнію на перетворювальні властивості інжекційно-інверсійної магніточутливої структури // *Фізика і хімія твердого тіла,* **5**(1), сс. 38-43 (2004).

D.M. Freik, B.S. Dzundza, I.V. Kalytchuk, V.M. Klanichka

Mobility of Charge Carriers and Scattering Mechanisms in the Lead Sulfide Films

Department of physics and chemistry of solid state
at the 'Vasyl Stefanyk' Prekarpathian University
201, Galytska Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine, E-mail: freik@pu.if.ua

The dependence of current carriers mobility is explored in n-PbS films from thickness in interval 0,1-7 μm at temperature range 77-300 K. There are calculated the mobility contribution, conditioned by dispersion on surface and distributions of disparities, that formed on the hetero-borders. The prevailing scattering mechanisms of charge carriers are determined.