

УДК 621.315.592

ISSN 1729-4428

Д.М. Фреїк, О.Л. Соколов

Рухливість носіїв у багатошарових епітаксійних структурах $A^{IV}B^{VI}$

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

Для квантово-розмірних структур, $PbTe/PbS$, $PbTe/EuTe$ та $PbTe/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$, осаджених на сколи (001) монокристалів КСІ досліджено залежність холлівської рухливості носіїв струму від їх загальної товщини. Розділено рухливість, пов'язану із дифузним розсіюванням на поверхні і дислокаціях невідповідності. Показано, що високі значення рухливості носіїв для сполуки $PbTe/PbS$ обумовлені компенсацією напруг сіткою дислокацій на міжфазних межах.

Ключові слова: плівки, халькогеніди свинцю, розсіювання носіїв, дислокації.

Стаття поступила до редакції 11.05.2005; прийнята до друку 09.10.2005.

Вступ

Багатошарові епітаксійні системи (надгратки) на основі напівпровідників є типовими представниками квантових ям (quantum wells (QW)) – структур, розміри яких в одному напрямку складають декілька міжатомних відстаней, а розміри у двох інших напрямках являють собою макроскопічну величину [1]. Квантові ями на основі тонкопліткових гетеросистем є перспективними для створення активних елементів наноелектроніки [2]. Стабільність властивостей гетероструктури, що є важливо для їх технологічного використання, суттєво залежить від наявності дефектів і полів напруг у плівках [3]. Крім того, для таких систем, на відміну від монокристалів, характерним є те, що відношення поверхні до об'єму є значним. Це суттєво впливає на явища переносу і домінуючі механізми розсіювання [4].

У літературі [5,6] відомі дослідження процесів релаксації напруг, а зменшення рівня псевдоморфної деформації у гетеросистемах на основі халькогенідів свинцю. Авторами робіт [7,8] досліджено двошарові гетероструктури $PbTe/PbS$ і проведено розрахунок ефективної рухливості за умови розсіювання носіїв на поверхні і дислокаціях невідповідності на міжфазній межі. Електрон-фононній взаємодії і рухливості електронів у квантово-розмірній структурі $PbTe/PbS$ присвячена робота [9].

Метою цієї роботи є дослідження механізмів розсіювання в багатошарових епітаксійних наноструктурах на основі телуриду свинцю.

I. Методика експерименту

Тонкі плівки для дослідження отримували методом гарячої стінки згідно [10]. В якості підкладок використовували свіжі сколи (001) монокристалів КСІ. Температура осадження складала 520-620 К. Сендвіч структури вирощували почерговим осадженням відповідних халькогенідів, товщина яких складала (30-50) нм на попередньо нанесений підшар одного із них ($PbTe$, $EuTe$, $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$).

Ефективну рухливість носіїв струму від товщини багатошарових структур $PbTe/PbS$, $PbTe/EuTe$, $PbTe/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ визначали холлівським вимірюванням компенсаційним методом у постійних електричних і магнітних полях.

Для дослідження величини деформації ґратки на міжфазній межі методом рентгенографії, крім того були виготовлені двошарові структури. Період ґратки визначали для двох взаємоперпендикулярних напрямків – нормально до поверхні плівки (a_{\perp}) і в її площині (a_{\parallel}). Деформація визначалась згідно співвідношення [5]

$$\varepsilon = 2(a_{\parallel} - a_{\perp}) / (a_{\parallel} + a_{\perp})(1 + \gamma), \quad (1)$$

де γ – коефіцієнт Пуассона.

II. Результати експерименту

Залежність ефективної рухливості $\mu_{\text{exp}} (\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$

багатошарових систем від їх загальної товщини $d = (0,004-2,5) \cdot 10^{-6}$ м (рис. 1) можна наближено апроксимувати аналітично залежностями:

$$\mu_{1\text{exp}} = 30,06 + 1,56 \ln d \quad (2)$$

для PbTe/PbS;

$$\mu_{2\text{exp}} = 7,68 + 0,39 \ln d \quad (3)$$

для PbTe/EuTe;

$$\mu_{3\text{exp}} = 5,99 + 0,32 \ln d \quad (4)$$

для PbTe/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te.

З аналізу отриманих графіків (рис. 1) і виразів (2)-(4) можна виділити три особливості: перша – рухливість плівок в області малих товщин гетероструктур ($d < 0,5$ мкм) різко зменшується; друга – для товщин гетероструктур $d > 0,7$ мкм явно виражена тенденція до насичення значення величини рухливості; третя – найбільшими значеннями холлівської рухливості носіїв визначаються гетероструктури PbTe/PbS (рис. 1,а; вираз (2)).

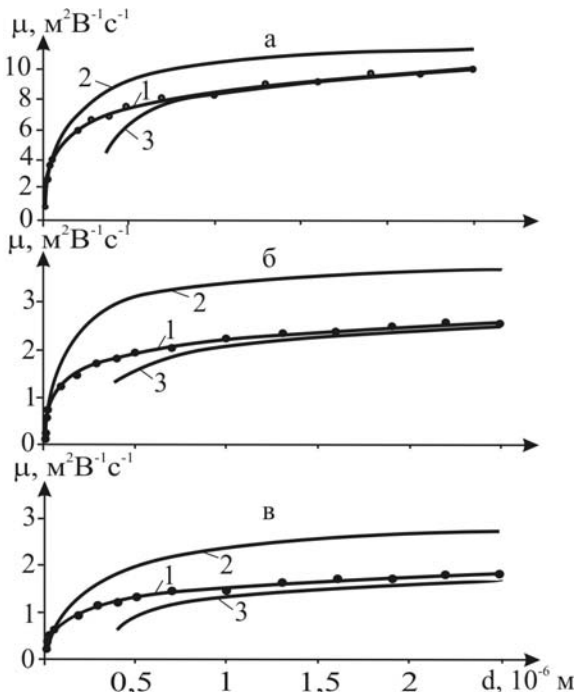


Рис. 1. Залежність експериментально визначеної рухливості (μ_{exp} – 1) і розрахованих рухливостей, пов'язаних із розсіюванням на поверхні (μ_n – 2) та дислокаціях невідповідності (μ_d – 3) від товщини гетероструктур: а – PbTe/PbS; б – PbTe/EuTe; в – PbTe/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te;

Тепер про напруги. Загальною ознакою є зменшення величини залишкової пружної деформації у двошарових структурах із ростом товщини нанесеного верхнього шару (рис. 2). Тобто має місце явище релаксації напруги із товщиною плівки. Іншою ознакою є те, що величина цієї релаксації є найбільшою для гетероструктури PbTe/PbS (рис. 2-1) і зменшується при переході до PbTe/EuTe (рис. 2-2) і PbTe/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (рис. 2-3). Крім того область локальної релаксації величини деформації є найбільш вузькою для PbTe/PbS (рис. 2-1), тоді як для PbTe/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te вона поширюється майже на всю товщину гетероструктури (рис. 2-3).

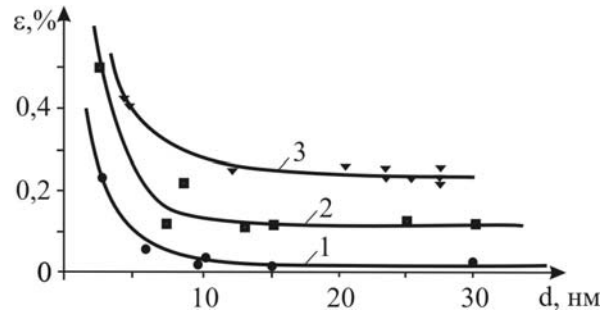


Рис. 2. Залежність залишкової пружної деформації ϵ від товщини d плівок PbTe у двошарових структурах: 1 – PbTe/PbS; 2 – PbTe/EuTe; 3 – PbTe/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te.

III. Обговорення результатів

Дислокації невідповідності, що утворюються на міжфазній межі можна розглядати як заряджені включення – деякі мікрообласті електростатичного поля, які приводять до зменшення рухливості носіїв заряду [7]. 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 умов, що окрема дислокація – заряджений циліндр, для рухливості будемо мати вираз:

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

$$\text{де } \delta \approx \frac{\pi R^2}{d} \sqrt{N_n}.$$

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

$$\mu_d = \mu_v \left(1 - \frac{\pi R^2}{d} \sqrt{N_n} \right) \quad (6)$$

Для випадку дифузного розсіювання на поверхні, рухливість визначається як [7,8]:

$$\mu_n = \mu_v (1 + \lambda/d)^{-1}, \quad (7)$$

де λ – середня довжина вільного пробігу носіїв.

Проведені розрахунки рухливості носіїв згідно (6) і (7) для визначених значень μ_v , λ , а також R і N_n наведено на рис. 1 – криві 2,3. Видно, що якщо для області малих товщин ($d < 0,5$ мкм) гетеросистем дифузне розсіювання добре описує експеримент (рис. 1 – криві 2), то вже при більших значеннях загальної товщини має місце значне розходження між експериментом і розрахунками. У цьому випадку експеримент добре апроксимується за умови реалізації розсіювання на дислокаціях невідповідності (рис. 1 – криві 3). Особливо це характерно для системи PbTe/PbS (рис. 1,а).

Високі значення рухливості носіїв у гетеросистемі PbTe/PbS (рис. 1,а) із значною різницею у сталих ґратки ($a_{\text{PbTe}} = 6,46 \text{ \AA}$, $a_{\text{PbS}} = 5,94 \text{ \AA}$ [11]) можна пояснити релаксацією псевдоморфних напруг за рахунок гомогенного зародження значної кількості дислокацій невідповідності які

локалізуються на незначних відстанях від міжфазних меж гетероструктури. Це, зокрема, підтверджується експериментально (рис. 2-1). Наявність різкої металургійної межі через відсутність перемішування складових компонентів структури PbTe/PbS і акомодация напруг за рахунок утворення дислокацій невідповідності і забезпечують високі значення рухливості (рис. 1,а; формула (2)).

В епітаксійних системах із малою навідповідністю параметрів ґратки PbTe/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te ($a = 6,42 \text{ \AA}$ для Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te [11]) зберігається висока залишкова псевдоморфна деформація до дуже значних товщин епітаксійного шару (рис. 2-3) внаслідок нерівномірного розподілу і недостатньої кількості ростових дислокацій. Це і обумовлює додаткове розсіювання носіїв, що є причиною зменшення величини рухливості (рис. 1,в). У цьому сенсі гетеросистема PbTe/EuTe є проміжною між двома розглянутими вище ($a_{\text{EuTe}} = 6,58 \text{ \AA}$ [11]) (рис. 1,в; 2-2). Для кращого співпадання розрахунків з експериментом (рис. 1,б,в) необхідно враховувати ще додаткове розсіювання носіїв на структурних дефектах росту – псевдоморфній деформації.

Висновки

1. Показано, що низький рівень залишкових напруг при сталій сітці дислокацій невідповідності на міжфазній межі для гетероструктур PbTe/PbS з великою невідповідністю для сталих ґраток є причиною високої стабільності системи із значними рухливостями носіїв.
2. Для гетероструктур, що мають малу невідповідність для сталих ґраток PbTe/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te і PbTe/EuTe переважає значна псевдоморфна деформація міжфазних меж; вони характеризуються меншими рухливостями носіїв.
3. В області незначних товщин багатошарових структур ($d < 0,5 \text{ мкм}$) переважає дифузне розсіювання на поверхні. Розсіювання на дислокаціях невідповідності домінує для товщин $d > 0,7 \text{ мкм}$.

Фреїк Д.М. – заслужений діяч науки і техніки України, доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедрою фізики і хімії твердого тіла;
Соколов О.Л. – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла.

- [1] Н.Н. Герасименко. Наноразмерные структуры в имплантированных полупроводниках // *Российский химический журнал*. **XLVI** (5), сс. 30-41 (2002).
- [2] В.Е. Борисенко. Нанoeлектроника – основа информационных систем XXI века // *Соросовский образовательный журнал. Физика*. **5**, сс. 100-104 (1977).
- [3] Ю.А. Тхорик, Л.С. Хазан. *Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетероэпитаксиальных системах*. Наукова думка. Киев. 304 с. (1983).
- [4] *Поверхностные свойства твердых тел*. Под ред. М. Грина. Мир. М. 432 с. (1972).
- [5] И.Ф. Михайлов, Б.А. Савицкий, А.Ю. Сипатов, А.И. Федоренко, Л.П. Шпаковская. Упругие деформации и напряжения в эпитаксиальных бикристаллах халькогенидов свинца // *Кристаллография*. **26**(4), сс. 792-798 (1981).
- [6] С.С. Борисова, И.Ф. Михайлов, Л.С. Палатник, А.Ю. Сипатов, А.И. Федоренко, Л.П. Шпаковская. Формирование планарных слоёв в одномерных сверхрешотках при послойном механизме роста // *Кристаллография*. **34**(3), сс. 716-722 (1989).
- [7] О.А. Александрова, 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).
- [8] Д.М. Фреїк, В.Ф. Пасічняк, О.Л. Соколов, Б.С. Дзундза. Особливості розсіювання носіїв заряду в епітаксійних структурах на основі халькогенідів свинцю // *Фізика і хімія твердого тіла*. **5**(3), сс. 455-459 (2004).
- [9] В.В. Бондаренко, В.В. Забудский, Ф.Ф. Сизов. Электрон-фононное взаимодействие и подвижность электронов в квантово-размерных структурах II типа PbTe/PbS // *Физика и техника полупроводников*. **32**(6), сс. 739-742 (1998).
- [10] Д.М. Фреїк, М.А. Галушак, Л.И. Межиловская. *Физика и технология полупроводниковых пленок*. Вища школа. Львів. 152 с. (1988).
- [11] Н.Х. Абрикосов, Н.Е. Шелимова *Полупроводниковые материалы на основе соединений $A^{IV}B^{VI}$* . Наука. Москва. 194 с. (1975).

D.M. Freik, O.L. Sokolov

The Mobility of the Carriers in the Multilayer Structures $A^{IV}B^{VI}$

Department of physics and solid chemistry
 Precarpathian national university of name of Vasily Stefanyk
 201, Galitska Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine

The thickness dependence of Hall charge carriers of PbTe/PbS, PbTe/EuTe, PbTe/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te quantum-size structures, grown on (100) KCl monocrystals is researched. It is separated the mobility of diffusion scattering on surface, and the mobility of misfit dislocations. It is shown, that high carrier mobility of tension by net of dislocations on the interphases boundaries.