

УДК 539.321; 539.21
PACS 72.20.My; 73.50.Jt

ТОВЩИННІ ЗАЛЕЖНОСТІ ГАЛЬВАНОМАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛІВОК GeTe

Г.О. Ніколаєнко, О.І. Рогачова

*Національний технічний університет "Харківський
політехнічний інститут"
кафедра теоретичної та експериментальної фізики
вул. Фрунзе, 21, 61002, Харків, Україна
e-mail: ann011289@yandex.ru*

Одержано залежності електропровідності σ і коефіцієнта Холла R_H тонких полікристалічних плівок GeTe від їх товщини ($d = 30 - 210$ нм) за кімнатної температури. Встановлено, що методом термічного випаровування полікристалів GeTe можна отримати тонкі плівки GeTe/KCl зі значеннями концентрацій дірок меншими, ніж у кристалі, майже в два рази. При зростанні товщини плівок до $d \sim 80$ нм спостерігається різке збільшення значень σ і холлівської рухливості носіїв заряду μ_H , а при подальшому зростанні d значення μ_H майже не змінюються, а значення σ змінюються з меншою швидкістю, що вказує на наявність класичного розмірного ефекту у тонких плівках GeTe.

Ключові слова: телурид германію, тонкі плівки, гальваномагнітні властивості, класичний розмірний ефект

1 Вступ

Телурид германію (GeTe) є вузькозонним напівпровідником з багатодолінною структурою енергетичних зон, з широкою областю гомогенності та високою концентрацією носіїв заряду p -типу ($0,4-2,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$). В межах області гомогенності, зміщеної у бік надлишку телуру відносно стехіометричного складу, GeTe має три поліморфні модифікації: високотемпературну модифікацію β -GeTe з гранецентрованою кубічною решіткою типу NaCl, низькотемпературну модифікацію α -GeTe з ромбоєдричною викривленою решіткою типу NaCl та низькотемпературну модифікацію γ -GeTe з орторомбічною решіткою типу NaCl. Переважний тип дефектів у GeTe – двічі іонізовані вакансії германію [1, 2]. У плівковому стані за температури підкладки нижче 320 K GeTe існує також в аморфній формі [1-3]. При нагріві в інтервалі температур 400-500 K аморфна фаза GeTe переходить у кристалічну α -

або γ -фазу, що супроводжується суттєвою зміною оптичних та електричних властивостей матеріалу. Цей фазовий перехід від аморфного до кристалічного стану при нагріві лежить в основі принципу дії перспективних енергонезалежних запам'ятовуючих пристроїв, які активно досліджуються в останнє десятиліття, через їх потенціал вищої ефективності в порівнянні з діючими флеш-пам'яттями [3, 4].

Проте найбільш широкого розповсюдження GeTe та сплави на його основі здобули у виготовленні p -гілок термоелектричних ТЕ перетворювачів, що працюють в інтервалі температур 500-900 К [1].

На теперішній час, через інтенсивний розвиток екологічно чистих відновлюваних джерел енергії, потреба у ТЕ перетворювачах безперервно збільшується. Тому актуальною проблемою ТЕ матеріалознавства залишається підвищення ТЕ ефективності таких матеріалів. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є використання низькорозмірних систем, вивчення яких спонукає до проведення систематичних робіт з розробки наукових основ керування їх кінетичними властивостями [5].

У низькорозмірних системах, коли товщина зразка стає співмірною з середньою довжиною вільного пробігу носіїв заряду, спостерігається класичний розмірний ефект, який пов'язаний із зростанням внеску дифузного розсіювання носіїв заряду на інтерфейсі при зменшенні товщини шару. Наявність класичного розмірного ефекту призводить до суттєвої залежності фізичних властивостей цих систем від їх товщини [6]. Наскільки нам відомо, кількість робіт з вивчення цього ефекту у тонких плівках GeTe дуже обмежена. Автори роботи [7] вивчали залежності σ і μ від товщини полікристалічних плівок GeTe, отриманих методом термічного випаровування у вакуумі кристалів GeTe і наступної конденсації на скляні підкладки, нагріті до температури 425 К.

Мета цієї роботи – дослідження залежності гальваномагнітних властивостей полікристалічних плівок GeTe, вирощених на підкладках (001)KCl, від товщини за кімнатної температури.

2 Методика експерименту

Тонкі плівки GeTe товщиною $d = 5-210$ нм було одержано методом термічного випаровування полікристалів телуриду германію з вольфрамового човника у безмаляному вакуумі ($10^{-5} - 10^{-6}$ Па) та наступної конденсації на поверхні відколу (001) кристалів KCl, які підтримували за температури 520 ± 10 К. В якості шихти для напылення використовувався стехіометричний GeTe з концентрацією дірок $5,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Швидкість конденсації плівок складала 0,1-0,3 нм/сек. Товщина плівок визначалась за допомогою попередньо відкаліброваного кварцевого резонатора.

Вимірювання коефіцієнта Холла R_H та електропровідності σ проводились за кімнатної температури методом постійного струму та постійного магнітного поля крізь зразок. Магнітне поле було спрямоване перпендикулярно до поверхні плівки. Похибка вимірювань R_H та σ не перевищувала $\pm 5\%$. Холлівську рухливість носіїв заряду (μ_H) та концентрацію дірок (p) розраховували, відповідно, за формулами $\mu_H = \sigma \cdot R_H$ та $p = 1/(R_H \cdot e)$, де e – заряд електрона.

3 Результати та їх обговорення

На основі проведених вимірювань гальваномагнітних властивостей тонких плівок монотелуриду германію було отримано товщинні залежності σ , μ_H та p за кімнатної температури, які представлені на рис. 1.

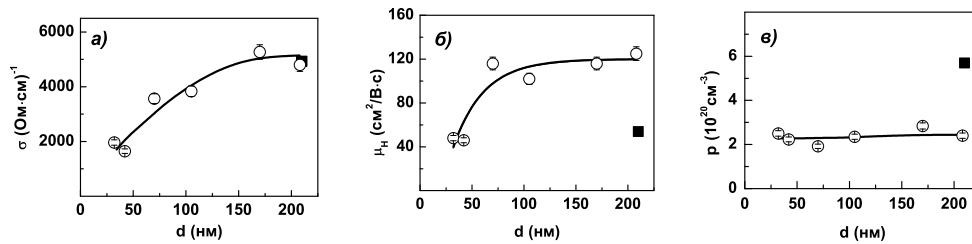


Рис. 1: Товщинні залежності електропровідності σ (а), холлівської рухливості носіїв заряду μ_H (б) та концентрації дірок p (в) тонких плівок GeTe при 300 К. Чорні квадрати – значення кінетичних коефіцієнтів для масивного кристалу, з якого виготовлялись плівки

Плівки з товщиною $d < 30$ нм не наведено на рис. 1, тому що вони виявились непровідними. Ймовірно, що при $d < 30$ нм плівки GeTe знаходилися на острівцевій стадії росту. В порівнянні із кінетичними коефіцієнтами масивного кристалу стехіометричного GeTe (чорні квадрати на рис. 1а – 1в), в тонкоплівковому стані GeTe має нижчі значення $p \sim 2-3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, що, імовірно, пов'язано зі зміною умов термодинамічної рівноваги у процесі випаровування. Зменшення значень p у плівковому стані призводить до зростання значень μ_H у порівнянні із масивним кристалом, що є позитивним фактором з точки зору термоелектричних застосувань.

В роботі [7] було отримано залежності $\sigma(d)$ та $\mu_H(d)$, виміряні за кімнатної температури, для полікристалічних плівок GeTe, одержаних методом термічного випаровування з вольфрамового човника у безмасляному вакуумі ($\sim 10^{-5}$ Па), але на скляній підкладці за 425 К. Швидкість конденсації таких плівок становила 1,5 нм/сек. На рис. 2 для порівняння наведено залежності $\sigma(d)$ та $\mu_H(d)$ для плівок GeTe, вирощених на підкладках (001)KCl за температури 520 К (результати цієї роботи) та аналогічні залежності, одержані в роботі [7], для плівок GeTe, вирощених на скляних підкладках за температури 425 К.

З рис. 2а і рис. 2б (крива 2) видно, що для конденсованих на склі за 425 К полікристалічних плівок GeTe, які були отримані в [7], в інтервалі товщин $d = 8-40$ нм спостерігається зростання значень σ та μ_H з товщиною, а в інтервалі $d = 40-300$ нм значення σ та μ_H залишаються майже незмінними, що автори роботи [7] пов'язують із підвищеною пористістю та структурним розривом (на мікроскопічному рівні) плівок.

Як видно з рис. 2а і рис. 2б (крива 1) для конденсованих на поверхні (001)KCl за 520 К плівок GeTe, з ростом товщини до $d \sim 80$ нм значення σ і μ_H різко збільшуються, при подальшому зростанні d значення μ_H майже не змінюється, а значення σ змінюються з меншою швидкістю. Такий характер залежностей $\sigma(d)$ та $\mu_H(d)$ вказує на наявність у плівках GeTe класичного розмірного ефекту.

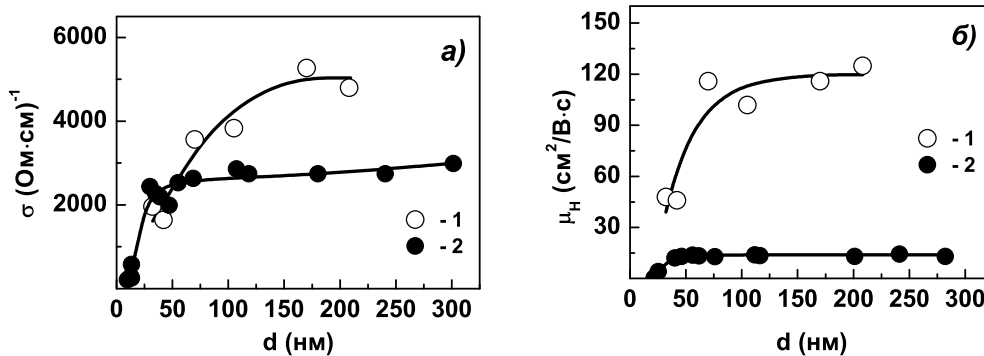


Рис. 2: Порівняльні графіки залежностей $\sigma(d)$ (а) та $\mu_H(d)$ (б) полікристалічних плівок GeTe, вирощених методом термічного випаровування у вакуумі на різних підкладках і при різних температурах конденсації: 1 – (001)KCl, 520 К (ця робота); 2 – скло, 425 К [7]

Також з рис. 2а і рис. 2б видно, що максимальні значення електропровідності та холлівської рухливості для конденсованих на склі за 425 К плівок становлять $\sigma_{\text{max}} = 3000 (\text{Ohm}\cdot\text{cm})^{-1}$ та $\mu_{H\text{max}} = 15 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, в той час як для конденсованих на (001)KCl за 520 К плівок $\sigma_{\text{max}} = 5000 (\text{Ohm}\cdot\text{cm})^{-1}$, а $\mu_{H\text{max}} = 125 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, що може бути пов'язано із більшою структурною досконалістю плівок, вирощених на KCl, порівняно із плівками, вирощеними на склі. Отже, конденсовані на підкладках (001)KCl за 520 К полікристалічні плівки GeTe мають більш високі значення σ і μ_H та являються більш привабливими з точки зору використання у ТЕ перетворювачах енергії у порівнянні з полікристалічними плівками GeTe, вирощеними на скляних підкладках за 425 К.

4 Висновки

Встановлено, що в тонких плівках телуриду германію, вирощених методом термічного випаровування у вакуумі полікристалів стехіометричного GeTe на підкладки (001)KCl за температури 520 К, спостерігається класичний розмірний ефект: на залежностях електропровідності σ і рухливості носіїв заряду μ_H від товщини плівок d існують інтервали товщин (до ~ 100 нм), де спостерігається зростання σ і μ_H при збільшенні d .

Показано, що значення концентрації дірок p у тонких плівках GeTe знижується майже в два рази у порівнянні з об'ємним кристалом і практично не залежить від товщини плівки. Цей факт є привабливим з точки зору використання тонких плівок GeTe у термоелектриці, бо одержані в плівках концентрації дірок наближаються до їх оптимальних значень у середньотемпературних термоелектричних матеріалах.

Список використаної літератури

1. М.А. Коржуев, *Теллурид германия и его физические свойства* (Москва: Наука, 1986).
2. Н.Х. Абрикосов, Л.Е. Шелимова, *Полупроводниковые материалы на основе соединений $A^{IV}B^{VI}$* (Москва: Наука, 1975).
3. V.I. Shtanov, T.B. Shatalova, L.V. Yashina et al., *J. Mendeleev Commun* **14**, №4, 136 (2004).
4. E. Gourvest, S. Lhostis, J. Kreisel et al., *Appl. Phys. Lett.* **95**, №3, 031908-1 (2009).
5. M.S. Dresselhaus, Y.-M. Lin, S.B. Cronin et al., *Semicond. and Semimet.: Recent Trends in Thermoel. mat. Res. III* **71**, 1 (2001).
6. Ю.Ф. Комник *Физика конденсированных металлических пленок* (Москва: Наука, 1979).
7. S.K. Bahl, K.L. Chopra, *J. Appl. Phys.* **41**, 2196 (1970).

Стаття надійшла до редакції 5.11.2013
прийнята до друку 3.12.2013

THICKNESS DEPENDENCES OF GALVANOMAGNETIC PROPERTIES OF THE GeTe FILMS

A. Nikolaenko, O. Rogachova

*National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"
Theoretical and Experimental Physics Department
21 Frunze Str., 61002 Kharkov, Ukraine
e-mail: ann011289@yandex.ru*

The dependences of conductivity σ and Hall coefficient R_H of GeTe thin polycrystalline films on its thickness ($d = 30 - 210$ nm) at the room temperature were obtained. It was found that GeTe/KCl thin films can be obtained by thermal evaporation polycrystalline GeTe with values of the holes concentration almost twice smaller than the values in the bulk materials. With the growth of the films thickness up to $d \sim 80$ nm a sharp σ values and Hall mobility μ_H values increasing is observed, at the further d increasing the μ_H values are virtually unchanged, while the σ values change at a lower rate, which indicates the presence of the classical size effect in GeTe thin films.

Key words: germanium telluride, thin films, galvanomagnetic properties, classic size effect

**ТОЛЩИННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ
СВОЙСТВ ПЛЕНОК GeTe****А. Николаенко, Е. Рогачева***Национальный технический университет «Харьковский
политехнический институт»**кафедра теоретической и экспериментальной физики**ул. Фрунзе, 21, 61002, Харьков, Украина**e-mail: ann011289@yandex.ru*

Получены зависимости электропроводности σ и коэффициента Холла R_H тонких поликристаллических пленок GeTe от их толщины ($d = 30 - 210$ нм) при комнатной температуре. Установлено, что методом термического испарения поликристаллов GeTe можно получить тонкие пленки GeTe/KCl с значениями концентраций дырок меньшими, чем в кристалле, почти в два раза. При росте толщины пленок до $d \sim 80$ нм наблюдается резкое увеличение значений σ и холловской подвижности μ_H , при дальнейшем увеличении d значения μ_H практически не изменяются, а значения σ изменяются с меньшей скоростью, что указывает на наличие классического размерного эффекта в тонких пленках GeTe.

Ключевые слова: теллурид германия, тонкие пленки, гальваномагнитные свойства, классический размерный эффект