

## СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ И МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

PACS numbers: 07.85.Fv, 61.05.cm, 61.05.cp, 68.35.Ct, 68.55.J-, 68.60.Dv, 68.65.Ac

### Зміни у структурі багат шарових плівкових наноконпозицій Sb/B<sub>4</sub>C при нагріві до 360°C

I. А. Копилець, Є. М. Зубарев, В. В. Кондратенко, В. А. Севрюкова

*Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
вул. Кирпичова, 21,  
61002 Харків, Україна*

Виготовлено та досліджено багат шарову періодичну композицію Sb/B<sub>4</sub>C з аморфними шарами сурми товщиною у 2,59 нм і шарами B<sub>4</sub>C товщиною у 1,81 нм, яка є перспективним покриттям для рентгенівської оптики. За допомогою рентгенівської дифрактометрії та електронної мікроскопії вивчено зміни у структурі цієї композиції при нагріванні до 360°C. Встановлено, що тонкі шари Sb у багат шаровій композиції Sb/B<sub>4</sub>C залишаються в аморфному стані до 250°C. За температури 290°C відбувається кристалізація шарів сурми. Це приводить до збільшення густини шарів сурми і зменшення періоду багат шарової композиції на 13,8%. Кристалізація сурми супроводжується утворенням сурм'яних лінз, які викривлюють і руйнують багат шарове покриття.

**Ключові слова:** сурма, карбід бору, аморфний стан, багат шарова композиція, наночастиці, рентгенівська дифракція.

Изготовлена и исследована многослойная периодическая композиция Sb/B<sub>4</sub>C с аморфными слоями сурьмы толщиной 2,59 нм и слоями B<sub>4</sub>C толщиной 1,81 нм, которая является перспективным покрытием для рентгеновской оптики. С помощью рентгеновской дифрактометрии и

Corresponding author: Igor Anatoliyovych Kopylets  
E-mail: kopol@kpi.kharkov.ua

*National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute',  
21 Kirpichov Str., 61002 Kharkiv, Ukraine*

I. A. Kopylets, E. M. Zubarev, V. V. Kondratenko, and V. A. Sevryukova, Changes in the Structure of the Multilayer Film Sb/B<sub>4</sub>C Nanocomposition under Heating up to 360°C, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 7: 911–921 (2016) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.38.07.0911.

електронної мікроскопії изучені змієнення в структурі цієї композиції при нагріванні до 360°C. Установлено, що тонкіє слои Sb в многослойної композиції Sb/B<sub>4</sub>C остаються в аморфному стані до 250°C. При температурі 290°C відбувається кристалізація слоїв сурьми. Це приводить до збільшенню густоти слоїв сурьми і зменшенню періода многослойної композиції на 13,8%. Кристалізація сурьми супроводжується утворенням сурьмяних линз, які ієкажають і руйнують многослойне покриття.

**Ключевые слова:** сурьма, карбид бора, аморфное состояние, многослойная композиция, нанослои, рентгеновская дифракция.

Periodic multilayer Sb/B<sub>4</sub>C composition with amorphous 2.59 nm-thick antimony layers and 1.81 nm-thick B<sub>4</sub>C layers, which is a promising coating for X-ray optics, is made and characterized. Structure changes of the composition under heating up to 360°C are investigated using X-ray diffractometry and electron microscopy. As found, the thin Sb layers remain in the amorphous state in the multilayer Sb/B<sub>4</sub>C composition up to 250°C. At a temperature of 290°C, the antimony layers are crystallized. This leads to increasing of density of the antimony layers and to reduction of multilayer composition period by 13.8%. The antimony crystallization is accompanied by the formation of antimony lenses, which distort and destroy the multilayer coating.

**Key words:** antimony, boron carbide, amorphous state, multilayer composition, nanoscale layers, X-ray diffraction.

*(Отримано 16 травня 2016 р.)*

## 1. ВСТУП

Багатошарові нанотовщинні плівкові композиції Sb/B<sub>4</sub>C є новим перспективним покриттям для рентгенівської оптики [1]. Вони являють собою десятки поєргово нанесених шарів сурьми і карбиду бору з точно заданою товщиною. За відбивною здатністю дзеркала з таким багатошаровим покриттям є одними з найліпших у діапазоні довжин хвиль 6,7–11 нм, поступаючись за коефіцієнтом відбиття лише дзеркалам з покриттям La/B<sub>4</sub>C [2–4]. Нами у попередній роботі [2] докладно досліджено структуру багатошарових композицій Sb/B<sub>4</sub>C, залежність їхніх влаєивостей від товщини шарів, часову стійкість у звичайних умовах. Однак для практичного застосування рентгенівських дзеркал важливим питанням також є їхня термічна стійкість, здатність витримувати значні променеві навантаження, так як експлуатація дзеркал часто відбувається за підвиєчених температур. Термічну стійкість нанотовщинних плівкових композицій Sb/B<sub>4</sub>C на сьогодні не досліджено. Певні застереження викликає низька температура топлення сурьми (631°C). Вона могла б виявитись причиною дифузійних процесів і руйнування багатошарової системи за відносно низьких температур.

З точки зору застосування в рентгенівській оптиці найбільший інтерес визивають багатошарові періодичні композиції (БПК) Sb/V<sub>4</sub>C з періодом (сумарною товщиною пари шарів з різних матеріалів) 3–5 нм [5]. В цих БПК товщина шарів сурми становить 1,5–2,5 нм. Як показано у роботі [2], за такої товщини шари сурми є аморфними і мають густину значно меншу за густину кристалічної сурми, що призводить до значного (на третину порівняно з кристалічними шарами) зменшення відбивної здатності дзеркал Sb/V<sub>4</sub>C на робочих довжинах хвиль. Одним зі шляхів поліпшення характеристик БПК Sb/V<sub>4</sub>C, який напрошується, є переведення за допомогою термічного оброблення аморфних шарів сурми в композиції Sb/V<sub>4</sub>C у кристалічний стан.

Задачею даної роботи було вивчення перебігу структурних змін і процесів у багатошарових періодичних композиціях Sb/V<sub>4</sub>C з товщиною шарів близькою 2 нм і аморфним станом шарів у вихідному стані при відпалах у діапазоні температур 100–360°C, а також впливу термообробки на рентгенооптичні властивості БПК Sb/V<sub>4</sub>C та руйнування таких композицій.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

Досліджувані багатошарові покриття виготовлялися методом прямо-точного магнетронного розпорошення та нанесення на підложжя з особливо гладкого скла (з шерсткістю 0,3–0,4 нм). Мішені Sb і V<sub>4</sub>C розпорошувалися в середовищі аргону за тиску  $\cong 1,5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. у вакуумній установці, яка попередньо відкачувалася до  $10^{-6}$  мм рт. ст. Для забезпечення постійної швидкості розпорошення живлення магнетронів здійснювалося від стабілізованих джерел струму. Товщина нанесених шарів регулювалася часом знаходження підложжя над магнетроном, який контролювався автоматичною системою переміщення.

Відпал зразка в діапазоні температур 100–360°C виконувався східчасто в печі у вакуумній камері ВУП-5. При кожній температурі зразок відпалювався протягом 1 години, після чого охолоджувався і виймався на повітря для дослідження.

Рентгеноструктурні дослідження здійснювалися за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-3М в CuK <sub>$\alpha$</sub> -випромінненні у геометрії  $\theta$ – $2\theta$ . За даними зйомок на малих кутах визначався період БПК і загальна конструкція багатошарової композиції. За дифрактограмами на великих кутах здійснювався контроль фазового складу.

Числові характеристики конструкції багатошарової періодичної композиції, такі як товщина складових шарів, їх густина, шерсткість міжшарових меж, визначалася шляхом математичного моделювання малокутових рентгенівських дифрактограм з використанням програми X-RayCalc [6]. В цій програмі шляхом зміни параме-

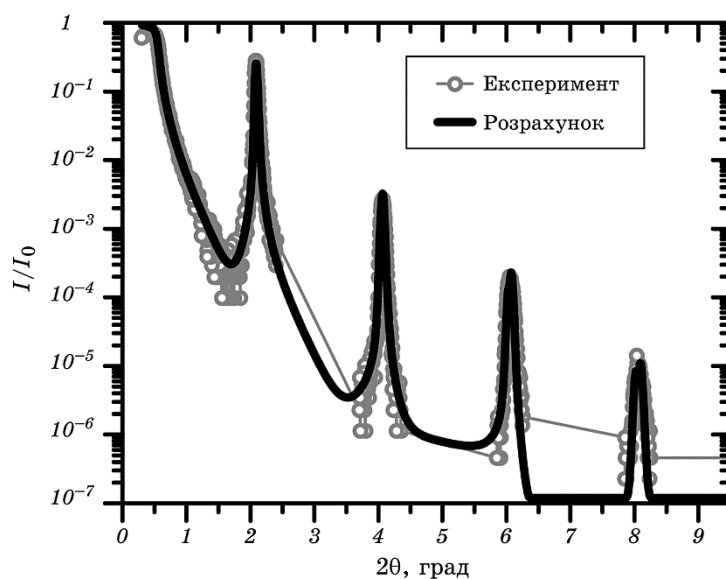
трів моделю багат шарової композиції (товщини шарів, густини, шерсткості) здійснюється підгонка розрахункової дифрактограми, створеної програмою, до експериментальної.

Електронно-мікроскопічні зображення поперечних зрізів БПК Sb/V<sub>4</sub>C одержані у мікроскопі ПЕМ-У.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

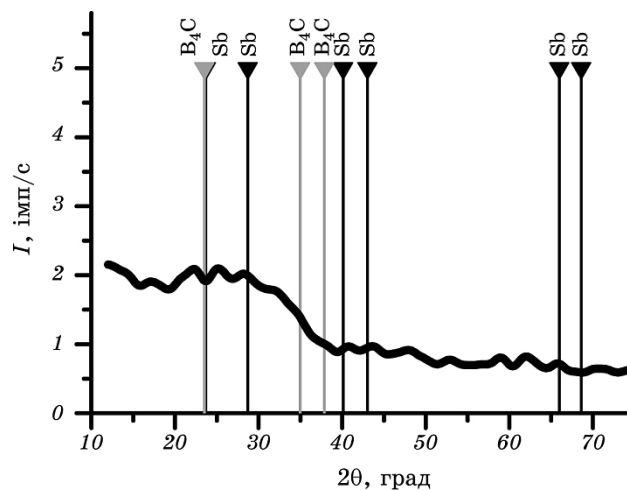
Досліджуваний у даній роботі зразок БПК Sb/V<sub>4</sub>C був виготовлений шляхом почергового нанесення ста шарів сурми і карбиду бору на скляне підложжя. За результатами моделювання малокутової рентгенівської дифрактограми (рис. 1) визначено, що товщина шарів V<sub>4</sub>C в композиції складала 1,81 нм, товщина шарів Sb — 2,59 нм (відповідно період БПК становив 4,4 нм), шерсткість шарів — 0,4 нм, густина Sb — 5,3 г/см<sup>3</sup>, густина V<sub>4</sub>C — 2,5 г/см<sup>3</sup>. Добрий збіг експериментальної та розрахункової дифрактограм після закінчення підгонки (як видно на рис. 1) свідчить, що параметри модельної структури близькі до реальних.

Аморфний стан шарів у досліджуваному зразку БПК Sb/V<sub>4</sub>C під-



**Рис. 1.** Експериментальна і розрахункова малокутові дифрактограми багат шарової періодичної композиції Sb/V<sub>4</sub>C з періодом 4,4 нм в CuK<sub>α1</sub>-випромінненні.

**Fig. 1.** Measured and calculated small-angle diffraction patterns with CuK<sub>α1</sub> radiation for a Sb/V<sub>4</sub>C periodic multilayer composition with period of 4.4 nm.



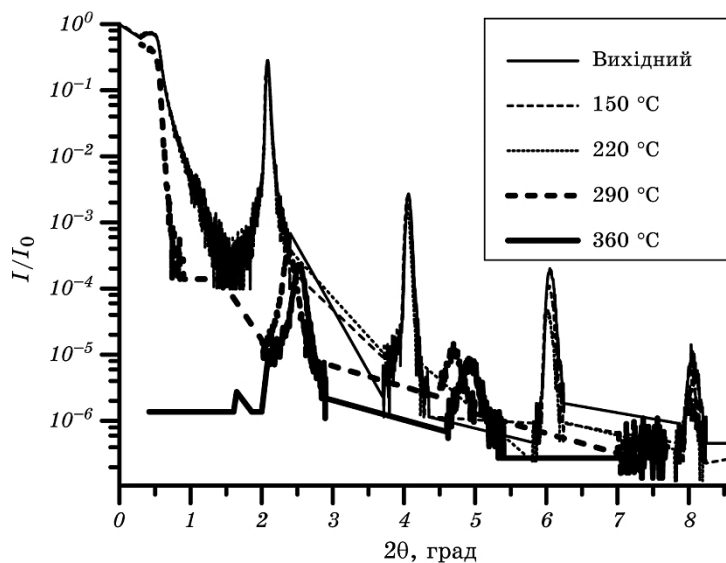
**Рис. 2.** Рентгенівська дифрактограма багатшарової періодичної композиції Sb/V<sub>4</sub>C з періодом 4,4 нм у вихідному стані, знята в CuK<sub>α</sub>-випромінненні на великих кутах. На рисунку також нанесені мітки кутів, на яких за табличними даними ICDD Powder Diffraction File мають знаходитися піки кристалічних Sb и V<sub>4</sub>C.

**Fig. 2.** X-ray diffraction pattern made with the CuK<sub>α</sub> radiation at large angles for as-deposited Sb/V<sub>4</sub>C periodic multilayer composition with period of 4.4 nm. In figure, the marking lines correspond to the angles of expected diffraction peaks from crystalline Sb and V<sub>4</sub>C according to the ICDD Powder Diffraction File.

тверджується відсутністю будь-яких піків кристалічної ґратниці на дифрактограмі даної БПК, знятій на великих кутах (рис. 2). На рис. 2 спостерігається лише широке гало з максимумом на 25°, яке відповідає аморфному стану шарів БПК Sb/V<sub>4</sub>C і скляного підложжя. Ці дані є у повній відповідності з результатами роботи [2], де було показано, що в БПК Sb/V<sub>4</sub>C, виготовлених магнетронним розпорощенням, які мають товщину шарів меншу 5 нм (як у даному випадку), речовини шарів знаходяться в аморфному стані.

Моделювання малокутової рентгенівської дифрактограми дозволило також встановити, що в багатшаровій композиції Sb/V<sub>4</sub>C густина Sb становить 5,3 г/см<sup>3</sup>, що сильно відрізняється від табличної для кристалічної сурми (6,69 г/см<sup>3</sup>). Таке значення густини близьке до літературних даних для аморфної Sb (5,3 г/см<sup>3</sup> за [7]) і узгоджується з тим, що за нашими даними шари Sb аморфні.

Було проведено серію відпалів багатшарової періодичної композиції Sb–V<sub>4</sub>C зі ступінчастим підвищенням температури. На рисунку 3 наведена частина малокутових рентгенівських дифрактограм, які знімалися у вихідному стані і після кожного відпалу при 150,



**Рис. 3.** Малокутові рентгенівські дифрактограми у  $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -випроміненні багат шарової періодичної композиції  $\text{Sb}/\text{B}_4\text{C}$  у вихідному стані і після відпалу при 150, 220, 290 та 360°C.

**Fig. 3.** Small-angle X-ray diffraction patterns recorded with  $\text{CuK}_{\alpha 1}$  radiation for  $\text{Sb}/\text{B}_4\text{C}$  periodic multilayer composition in the initial state and after annealing at 150, 220, 290, and 360°C.

220, 290 та 360°C.

Контроль за малокутовими дифрактограмами уможливує відслідкувати зміни загальної конструкції БПК: зміни товщини шарів, шерсткості меж і т.п. До 100°C картина малокутової рентгенівської дифракції не змінювалася. Як видно з рисунку 3, при подальших відпалах до 250°C зменшувалась інтенсивність піків дальніх порядків зі збереженням положення піків. Після 290°C відбулося зниження і розширення всіх дифракційних максимумів та різке зміщення їх в сторону більших кутів.

Моделювання малокутових дифрактограм показало, що такі зміни дифракційної картини пов'язані з наступними перебудовами структури БПК.

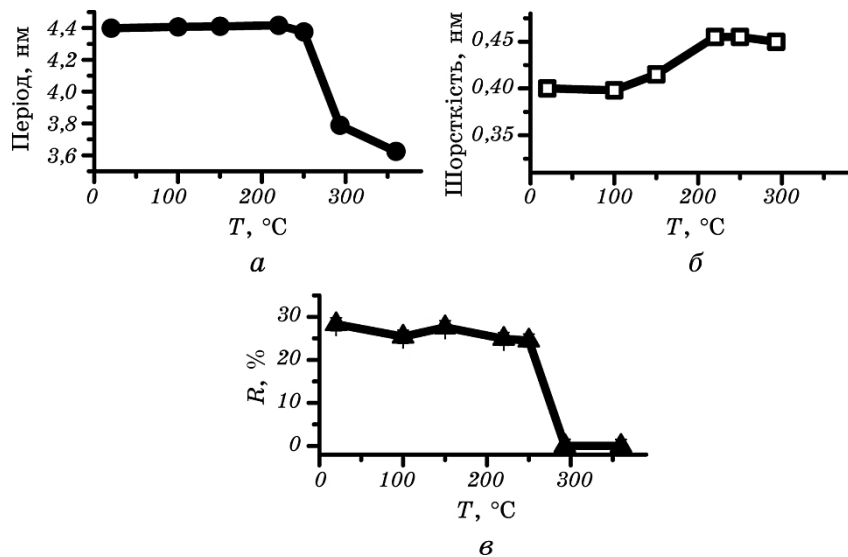
В інтервалі температур до 250°C включно період мінявся мало, помітних об'ємних змін не відбувалося. Зменшення інтенсивності піків дальніх порядків описується поступовим розвитком міжшарової шерсткості і відповідає збільшенню шерсткості від 0,4 до 0,45 нм. Відпал до 290°C супроводжувався різким зменшенням періоду БПК. Період змінився на 13,8%. Тобто зменшилася товщина шарів.

Пропорційне зменшення інтенсивності піків на дифрактограмі

після відпалу 290°C не вдається промодельювати збільшенням шерсткості. Схоже, що воно пов'язано зі зменшенням ефективною площею, з якої відбувається відбивання, — відбулася деградація структури багат шарового покриття на значній частині площі зразка БПК. Розширення дифракційних піків говорить про зменшення товщини області когерентного розсіювання, тобто когерентно розсіювати рентгенівське випромінювання стала значно менша кількість шарів композиції. За моделюванням ширина піків після відпалу на 290°C відповідає відбиттю від пакету з 20 періодів замість 100 нанесених, як було у початковому стані.

Виявлені моделюванням розвиток міжшарової шерсткості та зменшення періоду БПК Sb/B<sub>4</sub>C під термічною дією відображені на графіках на рис. 4.

Різне зменшення періоду, тобто товщини шарів Sb або B<sub>4</sub>C, після відпалу при 290°C логічно пояснити кристалізацією сурми. Зміну об'єму у зв'язку з розчиненням сурми у сусідніх шарах чи у зв'язку



**Рис. 4.** Залежності від температури відпалу величини періоду (а), шерсткості міжшарових меж багат шарової періодичної композиції Sb/B<sub>4</sub>C (б), визначені за моделюванням малокутових рентгенівських дифрактограм, і коефіцієнта відбиття багат шарової періодичної композиції Sb/B<sub>4</sub>C у першому дифракційному максимумі у CuK<sub>α1</sub>-випромінненні (в).

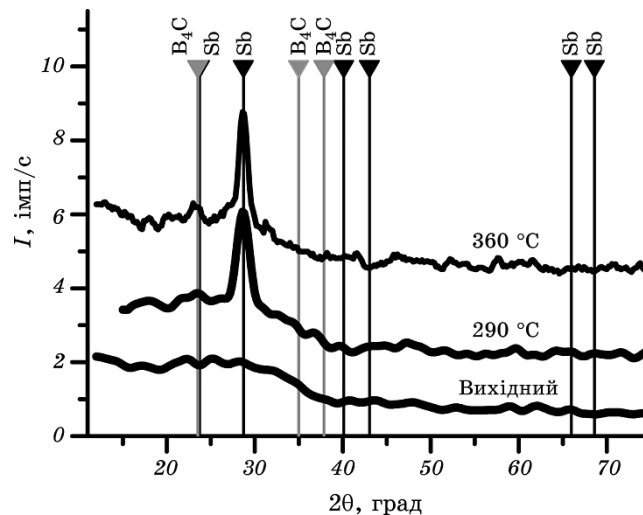
**Fig. 4.** Annealing temperature dependences of the period (а), the interlayer-boundaries roughness of a Sb/B<sub>4</sub>C periodic multilayer composition (б), determined with small-angle X-ray diffraction simulation, and the first diffraction peak reflectance of a Sb/B<sub>4</sub>C periodic multilayer composition at the CuK<sub>α1</sub> radiation (в).

з утворенням сполук можна виключити, так як за даними діаграм фазової рівноваги [8, 9] сурма не взаємодіє хемічно ні з бором, ні з вуглецем і не розчиняється в них.

Підтвердження факту кристалізації сурми дають дані рентгенівської дифрактометрії на великих кутах, наведені на рис. 5.

До відпалу  $250^{\circ}\text{C}$  ніяких змін на дифрактограмах на великих кутах не відбувалося, як і у вихідному стані спостерігалось широке гало. Після відпалу при  $290^{\circ}\text{C}$  на куті  $28,7^{\circ}$  з'явився пік. Цей пік відповідає найінтенсивнішій лінії кристалічної сурми (площини (012) ромбодричної ґратниці). При підвищенні температури відпалу до  $360^{\circ}\text{C}$  пік став вищим і з'явилися сліди його другого порядку на куті  $59,4^{\circ}$ . Відсутність інших дифракційних піків сурми говорить про текстурованість закристилізованої сурми: кристалічні зерна Sb орієнтовані так, що кристалографічні площини (012) паралельні поверхні підложжя.

При  $290^{\circ}\text{C}$  всередині композиції шари Sb перейшли з аморфного стану у кристалічний. Відповідно має змінитися густина шарів Sb (з



**Рис. 5.** Рентгенівські дифрактограми у  $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -випроміненні на великих кутах у геометрії  $\theta-2\theta$  для багатшарової періодичної композиції Sb/B<sub>4</sub>C у вихідному стані та після відпалів при  $290^{\circ}\text{C}$  і  $360^{\circ}\text{C}$ . На рисунку також нанесені мітки кутів, на яких за табличними даними ICDD Powder Diffraction File мають знаходитись піки кристалічних Sb і B<sub>4</sub>C.

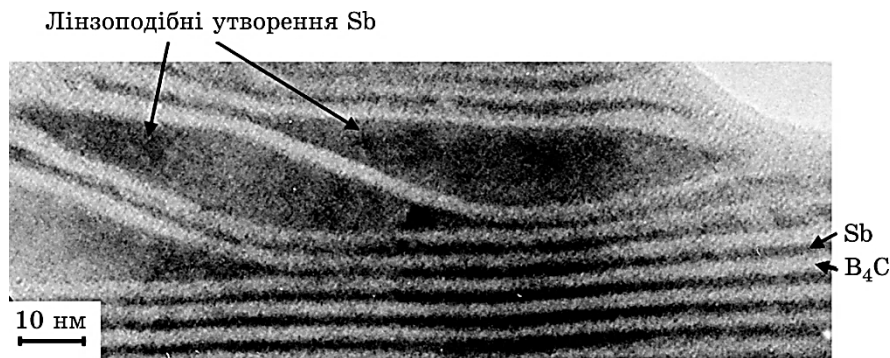
**Fig. 5.** Large-angle diffraction patterns recorded with  $\text{CuK}_{\alpha 1}$  radiation in  $\theta-2\theta$  geometry for a Sb/B<sub>4</sub>C periodic multilayer composition in the as-deposited state and after annealing at  $290^{\circ}\text{C}$  and  $360^{\circ}\text{C}$ . In figure, the marking lines correspond to the angles of expected diffraction peaks from crystalline Sb and B<sub>4</sub>C according to the ICDD Powder Diffraction File.



5,3 до 6,69 г/см<sup>3</sup>). Це відповідає зменшенню об'єму, займаному сурмою на 20,8%. При такому зменшенні товщини шарів Sb період повинен зменшитися на 12,1%, що близько до експериментального значення 13,8%. Тобто зменшення періоду зафіксоване за даними малокутової дифрактометрії відповідає очікуваному при кристалізації аморфної сурми.

Потрібно відзначити, що в багатошаровій композиції Sb/V<sub>4</sub>C кристалізація аморфних шарів Sb відбулася при досить високій температурі — вищій за 250°C. Зазвичай перехід сурми з аморфного у кристалічний стан відбувається за температури близької до 80°C [10], що відповідає 0,39T<sub>m</sub>, де T<sub>m</sub> — температура топлення. Високу стабільність аморфного стану сурми у випадку БПК Sb/V<sub>4</sub>C можна пояснити аморфізуювальним впливом V<sub>4</sub>C на тонкі нанотовщинні шари сурми. При виготовленні БПК Sb/V<sub>4</sub>C з товщими шарами Sb (> 5 нм) вплив шарів V<sub>4</sub>C стає меншим, і сурм'яні шари мають кристалічну будову вже у вихідному стані.

Причиною руйнування БПК Sb/V<sub>4</sub>C після відпалу при 290°C є поява у сурм'яних шарах вузлуватих стовщень. Сурма за рахунок дифузійних процесів стала збиратися у лінзоподібні утворення товщиною близько 12 нм, деформуючи багатошарову структуру. Такі сурм'яні лінзи між шарами V<sub>4</sub>C добре видно на електронно-мікроскопічному знімку поперечного зрізу БПК Sb/V<sub>4</sub>C після відпалу при 300°C (рис. 6). Саме поява цих лінз зумовлює різке падіння відбивної здатності БПК Sb/V<sub>4</sub>C після відпалу при 290°C, як це показано на рис. 4. На рисунку 6 видно, що такі сурм'яні утворення викривлюють шари та розділяють єдиний багатошаровий пакет на менші за товщиною ділянки. Це зменшує області когерентного розсіювання рентгенівського випромінювання як за площею, так і за то-



**Рис. 6.** Електронно-мікроскопічне зображення поперечного зрізу багатошарової періодичної композиції Sb/V<sub>4</sub>C після відпалу при 300°C.

**Fig. 6.** Cross-section electron-microscopy image of the Sb/V<sub>4</sub>C periodic multilayer composition after annealing at 300°C.

вщиною, призводить до суттєвого зменшення відбивної здатності БПК і до розширення дифракційних піків, як на робочій довжині хвилі, так і у жорсткому рентгенівському випромінненні (рис. 3).

#### 4. ВИСНОВКИ

В ході роботи була виготовлена багатошарова композиція  $\text{Sb}/\text{V}_4\text{C}$  з періодом 4,4 нм та аморфним станом шарів і за допомогою рентгенівської дифрактометрії досліджені зміни в її структурі при нагріві до  $360^\circ\text{C}$ . З результатів дослідження можна зробити наступні висновки.

1. БПК  $\text{Sb}/\text{V}_4\text{C}$  здатні працювати без втрати експлуатаційних характеристик до температури  $100^\circ\text{C}$ . Період зберігається до температури  $250^\circ\text{C}$ , але в інтервалі температур  $100\text{--}250^\circ\text{C}$  зростає міжшарова шерсткість.

2. При відпалі вище  $290^\circ\text{C}$  в багатошаровій композиції  $\text{Sb}/\text{V}_4\text{C}$  відбувається кристалізація аморфних шарів сурми. Це призводить до збільшення густини шарів сурми і зменшення періоду на 13,8%. Кристалізація сурми супроводжується утворенням сурм'яних лінз, які мають розміри, значно більші за період БПК. Такі лінзи викривлюють і руйнують шари, що призводить до різкого зниження відбивної здатності БПК і до розширення піків дифракції від багатошарової композиції. Таким чином, шляхом відпалів неможливо поліпшити оптичні характеристики БПК  $\text{Sb}/\text{V}_4\text{C}$ .

3. Встановлено, що тонкі шари  $\text{Sb}$  ( $\cong 2,5$  нм) можуть залишатися в аморфному стані до  $250^\circ\text{C}$ , що становить  $0,6T_m$ , де  $T_m$  — температура топлення, завдяки аморфізуючому впливу шарів  $\text{V}_4\text{C}$ .

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Е. А. Вишняков, М. С. Лугинин, А. С. Пирожков, Е. Н. Рагозин, С. А. Старцев, *Квантовая электроника*, **41**, № 1: 75 (2011).
2. I. A. Kopylets, V. V. Kondratenko, E. N. Zubarev, D. L. Voronov, E. M. Gullikson, E. A. Vishnyakov, and E. N. Ragozin, *Appl. Surf. Sci.*, **307**: 360 (2014).
3. M. Barthelmess and S. Bajt, *Appl. Opt.*, **50**: 1610 (2011).
4. Y. Platonov, J. Rodriguez, M. Kriese, E. Gullikson, T. Harada, T. Watanabe, and H. Kinoshita, *Proc. SPIE*, **8076**: 80760N (2011).
5. Е. А. Вишняков, Д. Л. Воронов, Е. М. Гулликсон, В. В. Кондратенко, И. А. Копылец, М. С. Лугинин, А. С. Пирожков, Е. Н. Рагозин, А. Н. Шатохин, *Квантовая электроника*, **43**, № 7: 666 (2013).
6. Source: <http://sci-progs.com/>
7. *Van Nostrand's Scientific Encyclopedia*, 10<sup>th</sup> ed. (Ed. Glenn D. Considine) (New York: John Wiley & Sons: 2008), vol. 1.
8. H. Okamoto, *J. Phase Equilibria*, **12**, No. 3: 391 (1991).
9. *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник* (Ред.

- Н. П. Лякишев) (Москва: Машиностроение: 1996), т. 1.  
 10. R. Wang, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, **1**, Iss. 1: 23 (1980).

## REFERENCES

1. E. A. Vishnyakov, M. S. Luginin, A. S. Pirozhkov, E. N. Ragozin, and S. A. Startsev, *Quantum Electronics*, **41**, No. 1: 75 (2011).
2. I. A. Kopylets, V. V. Kondratenko, E. N. Zubarev, D. L. Voronov, E. M. Gullikson, E. A. Vishnyakov, and E. N. Ragozin, *Appl. Surf. Sci.*, **307**: 360 (2014).
3. M. Barthelmess and S. Bajt, *Appl. Opt.*, **50**: 1610 (2011).
4. Y. Platonov, J. Rodriguez, M. Kriese, E. Gullikson, T. Harada, T. Watanabe, and H. Kinoshita, *Proc. SPIE*, **8076**: 80760N (2011).
5. E. A. Vishnyakov, D. L. Voronov, E. M. Gullikson, V. V. Kondratenko, I. A. Kopylets, M. S. Luginin, A. S. Pirozhkov, E. N. Ragozin, and A. N. Shatokhin, *Quantum Electronics*, **43**, No. 7: 666 (2013).
6. Source: <http://sci-progs.com/>
7. *Van Nostrand's Scientific Encyclopedia. 10<sup>th</sup> ed.* (Ed. Glenn D. Considine) (New York: John Wiley & Sons: 2008), vol. **1**.
8. H. Okamoto, *J. Phase Equilibria*, **12**, No. 3: 391 (1991).
9. *Diagrammy Sostoyaniya Dvoynykh Metallicheskih Sistem: Spravochnik* [Diagrams of Binary Metallic Systems: Handbook] (Ed. N. P. Lyakishev) (Moscow: Mashinostroenie: 1996), vol. **1** (in Russian).
10. R. Wang, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, **1**, Iss. 1: 23 (1980).