

ВЗАИМОДИФФУЗИЯ СЛОЕВ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ PbSe – PbS

А.Ю.Сипатов¹⁾

Харьковский государственный политехнический университет
310002 Харьков, Украина

Поступила в редакцию 8 сентября 1998 г.

Методами рентгеновской дифракции исследованы процессы диффузионного перемешивания слоев в сверхрешетках PbSe–PbS. По изменению интенсивности рефлексов-сателлитов определены коэффициенты взаимодиффузии слоев. Обнаружены два этапа диффузии – быстрая (на начальных этапах отжига) и медленная.

PACS: 68.65.+g

Сверхрешетки IV – VI открывают широкие возможности как для фундаментальных исследований в области физики твердого тела [1–4], так и для создания новых функциональных элементов микроэлектроники, ИК техники, термоэлектричества [5, 6]. Для таких структур со сверхтонкими слоями очень важное значение имеет состояние межфазных границ – их шероховатость, резкость перехода от одного слоя к другому, наличие и величина перемешанных зон, а также временная и температурная стабильность их структуры и свойств. Диффузионные процессы в таких сверхтонких слоях с большим градиентом концентраций элементов могут иметь свои особенности и отличия от массивного состояния [7, 8]. Поэтому исследования взаимодиффузии слоев в сверхрешетках (СР) имеют очень важное значение как в теоретическом, так и в практическом аспектах.

Одним из наиболее эффективных методов исследования СР является рентгеновская дифракция, которая позволяет по изменению интенсивности рефлексов-сателлитов не только проследить процессы перемешивания слоев, но и определить коэффициенты их взаимодиффузии [9, 10]:

$$Ln[I_k(\tau_2)/I_k(\tau_1)] = -8k^2\pi^2 D(\tau_2 - \tau_1)/H^2 \quad (1)$$

где: D – коэффициент диффузии, H – период сверхрешетки, k – порядок рефлекса-сателлита, I_k – относительная интенсивность рефлекса-сателлита k -го порядка, нормированная на интенсивность рефлекса нулевого порядка; τ – время отжига.

Предметом исследования данной работы являются СР PbSe–PbS, которые изготавливались в безмасляном вакууме (10^{-4} – 10^{-5} Па) путем термического испарения халькогенидов свинца из вольфрамовых лодочек и их последовательной конденсации на поверхность (001) KCl при температуре 473 К. Толщина слоев и скорость конденсации контролировались при помощи откалиброванного кварцевого резонатора, расположенного рядом с подложкой. Были изготовлены СР с равными толщинами слоев и с периодами 19 и 22 нм (число периодов – 20). Чтобы избавиться от рефлексов подложки, на дифракционной картине СР отделялись от подложек растворением KCl в дистиллированной воде и вылавливались на аморфные кварцевые

¹⁾ e-mail: sipat@kpi.kharkov.ua

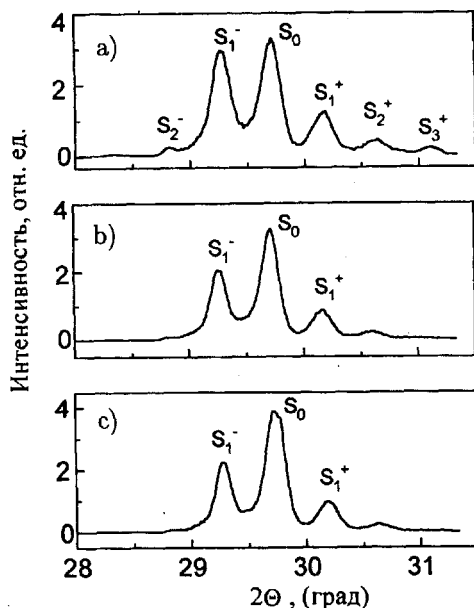


Рис.1. Рентген-дифрактограммы CP PbSe-PbS с периодом 22 нм в исходном состоянии (а) и после отжига при температуре 543 К в течение 10 ч (b) и 78 ч (c). S_n – рефлексы-сателлиты

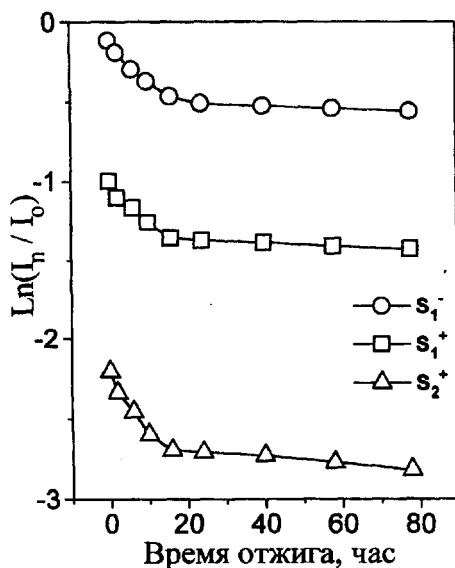


Рис.2. Изменение относительной интенсивности рефлексов-сателлитов первого (S_1) и второго (S_2) порядков отражения со временем отжига при температуре 543 К для CP PbSe-PbS с периодом 22 нм

пластины. Структурные исследования (электронная микроскопия и рентгеновская дифракция) показали, что CP PbSe-PbS состоит из монокристаллических слоев в ориентации (001) с резкими границами раздела, о чем свидетельствует наличие на рентген-дифрактограммах рефлексов-сателлитов 3-го порядка (рис.1а). Серия диффузионных отжигов проводилась в вакууме при температурах 543, 593 и 623 К. Периодически образцы вынимались для рентгеновских съемок по схеме $\Theta - 2\Theta$ в отражении (200). На рис.1 видно, что в процессе отжига интенсивность боковых рефлексов-сателлитов уменьшается, а центрального (нулевого) растет, что свидетельствует о взаимном перемешивании слоев. Более наглядно процесс перемешивания слоев при 543 К представлен на рис.2, из которого видно, что имеется два этапа диффузии – быстрая (на начальных этапах отжигов) и медленная. Аналогичные зависимости изменения относительной интенсивности рефлексов-сателлитов наблюдаются при температурах 593 и 623 К. Используя выражение (1), определим коэффициенты взаимодиффузии слоев, значения которых составляют: для быстрой диффузии $D = 3.6 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{с}$ (543 К), $2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/\text{с}$ (593 К), $4.9 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/\text{с}$ (623 К); для медленной $D = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{с}$ (543 К), $4 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{с}$ (593 К), $2.15 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/\text{с}$ (623 К).

Учитывая закон Аррениуса ($D = D_0 \exp(E/kT)$), определим значения энергии активации E и предэкспоненциального множителя D_0 для этапов быстрой и медленной диффузии: для быстрой $D_0 = 2.4 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$, $E = 0.95 \text{ эВ}$; для медленной $D_0 = 5.3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$, $E = 1.78 \text{ эВ}$.

Быстрая диффузия на начальных этапах отжига, по-видимому, связана с наличием неравновесных нестехиометрических точечных дефектов в халькогенидах свинца [11], о чем свидетельствует и низкое значение энергии активации ($E = 0.95$ эВ).

-
1. И.В.Колесников, А.Ю.Сипатов, Физ. и техн. полупроводн. **23**, 954 (1989).
 2. V.N.Lytskii, V.A.Petrov, A.S.Rylik et al., Phys. Low-Dim. Struct. **7**, 37 (1994).
 3. N.Yu.Fogel, V.G.Cherkasova, A.S.Pokhila et al., Czechoslovak. J. Phys. **46**, 727 (1996).
 4. A.Stachow-Wojcik, A.Twardowski, T.Story et al., Acta Physica Polonica **A92**, 985 (1997).
 5. D.L.Partin, Appl. Phys. Lett. **45**, 487 (1984).
 6. L.D.Hicks, T.C.Harman, X.Sun et al., Phys. Rev. **B53**, R10, 493 (1996).
 7. G.E.Henein and J.E.Hilliard, J. Appl. Phys. **55**, 2895 (1984).
 8. D.K.Arch, J.P.Faurie, J.-L.Staudenmann et al., J.Vac. Sci. Technol. **A4**, 2101 (1986).
 9. H.Krenn, E.Koppensteiner, A.Holzinger et al., J. Appl. Phys. **72**, 97 (1992).
 10. A.G.Fedorov, I.A.Shneiderman, A.Yu.Sipatov et al., Functional Materials **5**, 52 (1998).
 11. V.Leute, H.Bottner, and H.Schmidtke, Zeitschrift fur Naturforschung **34a**, 89 (1978).