

А. А. БАЛИЦКИЙ

Украина, Львовский национальный университет им. Ивана Франко  
E-mail: balitskii@electronics.wups.lviv.uaДата поступления в редакцию  
22.11.2005 г.Оппоненты О. Я. МРУЗ  
(НПП "Карат", г. Львов),  
д. х. н. В. Н. ТОМАШИК  
(ИФП им. В. Е. Лашкарева, г. Киев)ОСОБЕННОСТИ ТОПОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ  
СЛОИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ  $\text{In}_4\text{Se}_3$ 

*Шероховатость поверхности практически идеальна для формирования резких гетеропереходов в качестве подложки. Перспективы использования  $\text{In}_4\text{Se}_3$  в качестве газовых сенсоров не столь обнадеживающие.*

Слоистый кристалл  $\text{In}_4\text{Se}_3$  является перспективным материалом для формирования поляризационно-чувствительных гетероструктур [1, 2]. С другой стороны, поверхность кристалла обладает высокой селективной адсорбционной способностью к монооксиду углерода [3, 4], что позволяет также рассчитывать на использование  $\text{In}_4\text{Se}_3$  в газовых сенсорах. В обоих случаях топология поверхности кристалла играет определяющую роль в формировании его физических свойств. Однако если в случае использования кристалла в гетероструктурах флуктуации поверхностного рельефа приводят к негативным последствиям (существенно уменьшая "резкость" гетероперехода), то при его использовании в газовых сенсорах шероховатость рельефа заметно увеличивает активную поверхность, а следовательно, и чувствительность активного элемента.

Целью данной работы является исследование топологии поверхности сколов слоистого кристалла  $\text{In}_4\text{Se}_3$  с точки зрения использования его для элементов нанозлектроники.

В работе исследовались поверхности сколов слоистых кристаллов (100)  $\text{In}_4\text{Se}_3$  (перпендикулярно кристаллографической оси  $c$ ), выращенных методом Чохральского из расплава со сверхстехиометрическим ( $\approx 10$  ат. %) индием. Скалывание проводилось непосредственно перед помещением кристалла в высоковакуумную камеру микроскопа. Профили сканирующей туннельной (СТМ) и сканирующей электронной (СЭМ) микроскопии получены с помощью зондового микроскопа Omicron Micro UHV-STM/AFM (в режиме СТМ при постоянном туннельном токе 200 пА) и растрового электронного микроскопа ISM-6100 Scanning Microscope (с энергией электронного пучка 20 кэВ).

На рис. 1 представлена топология поверхности кристалла  $\text{In}_4\text{Se}_3$ , полученная с помощью растрового электронного микроскопа. Обзорные снимки СЭМ (рис. 1, а, б) указывают на относительно небольшие флуктуации рельефа с незначительным количеством

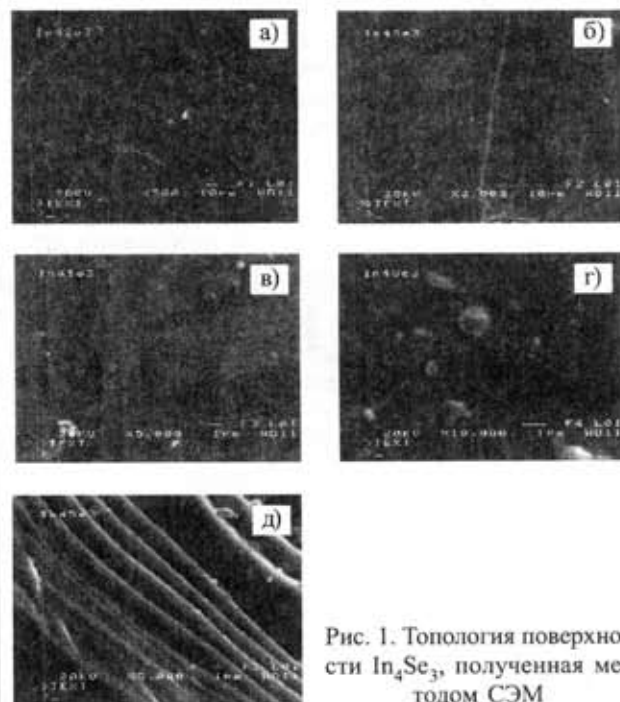


Рис. 1. Топология поверхности  $\text{In}_4\text{Se}_3$ , полученная методом СЭМ

объемных дефектов (со средней поверхностной концентрацией  $2...3 \cdot 10^{-2}$  мкм<sup>-2</sup>). Также наблюдаются протяженные ступеньки длиной до нескольких сотен микрометров, образованные вследствие одновременного скалывания кристалла по нескольким параллельным плоскостям. На рис. 1, в показана увеличенная правая верхняя область рис. 1, б, содержащая максимальную поверхностную концентрацию объемных дефектов. Видно, что объемные дефекты представляют собой кластерные агрегаты металлического индия (присутствие которого также подтверждено локальным микронзондовым анализом) с разбросом величины поперечного диаметра от 0,01 до 1 мкм. Обнаружена также серия линейных контуров разной интенсивности (см. среднюю часть рис. 1, а), связанных, по всей вероятности, с дефектами упаковки или линейными дислокациями. Увеличение этой области (рис. 1, д) указывает на большое количество (более десятка) параллельных «дислокационных» контуров разной интенсивности. Корректно оценить их размеры не удалось из-за значительного искажения размеров, т. к. в рассеянии электронного пучка в преобладающей степени принимают участие механические напряжения вокруг возникающих дислокаций [5].

Автор благодарит сотрудников Технического университета Дармштадта В. Ягермана и Б. Жекеля за помощь в измерениях СТМ.

Количественный элементный анализ поверхности кристалла  $\text{In}_4\text{Se}_3$  [4] указывает на существенное преобладание концентрации индия относительно селена по сравнению со стехиометрическим составом. Участков с кластерными агрегатами металлического индия значительно больше, чем участков, связанных с линейными дислокациями, в связи с чем можно предположить, что сверхстехиометрический индий выделяется на поверхности в основном с помощью диффузионного механизма.

СЭМ, обладая относительно небольшим разрешением, тем не менее позволяет наблюдать общую картину расположения дефектов на поверхности. Методики зондовой микроскопии имеют существенно большее разрешение (как в плоскости скола образца, так и по его глубине), ограниченное в основном размерами сканирующего элемента [6]. В случае диэлектриков единственным применимым зондовым методом является атомная силовая микроскопия [7]. Для полупроводников с достаточно низким удельным сопротивлением идеальным является метод СТМ с площадью зонда на порядок меньше.

На рис. 2 представлены профили СТМ поверхности  $\text{In}_4\text{Se}_3$ . Рисунки а и б (из разных областей поверхности скола кристалла) зеркально отображают друг друга. Если на одном из них наблюдается довольно упорядоченная (вдоль воображаемых прямых) структура нанокластеров, то на другом — такая же структура "отрицательных" кластеров, нанопор. В таблице приведены характеристики профилей СТМ топографии поверхностей а и б ( $\bar{R}$  — средний радиус,  $S$  — средняя площадь кластера (поры),  $\Delta R$  и  $\Delta S$  — дисперсии соответствующих величин).

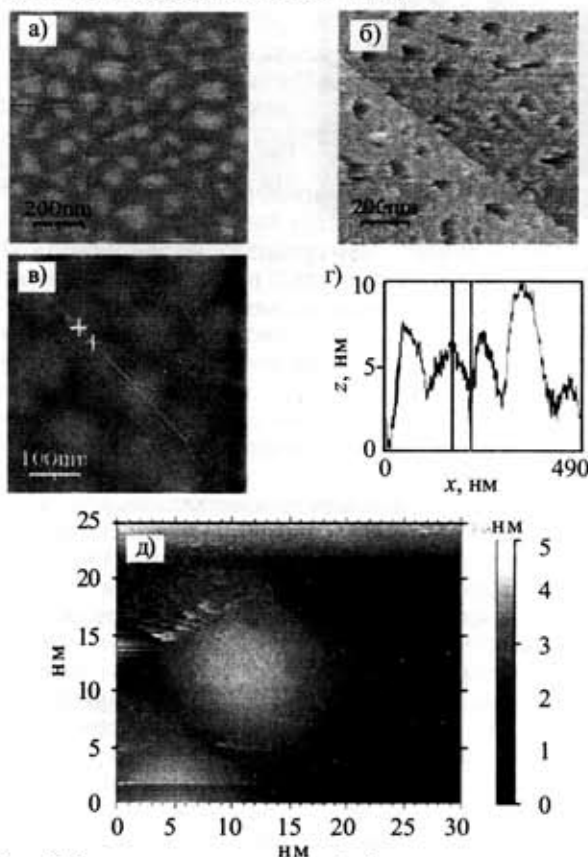


Рис. 2. Топология поверхности  $\text{In}_4\text{Se}_3$ , полученная методом СТМ

| Объекты             | $\bar{R}$ , нм | $\Delta R$ , нм | $\bar{S}$ , нм <sup>2</sup> | $\Delta S$ , нм <sup>2</sup> |
|---------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|
| Кластеры, рис. 2, а | 32,9           | 3,4             | 3317                        | 275                          |
| Нанопоры, рис. 2, б | 39,9           | 3,8             | 5302                        | 426                          |

Из таблицы видно, что нанопоры характеризуются незначительно большими размерами, а обе структуры обладают довольно небольшими дисперсиями как линейных размеров, так и площадей. Что касается поверхности, представленной на рис. 2, б, то ее вид внешне очень напоминает участок по линии излома на рис. 1, б. Дальнейшее изучение этого участка было невозможно вследствие физического выхода из строя зонда на ранних этапах детализированного сканирования (система обратной связи СТМ не успевала реагировать на резкое изменение вертикальной составляющей рельефа на стенке поры, что приводило к излому острого).

Топология, представленная на рис. 2, а, была подвергнута последующей детализированной обработке, что изображено на рис. 2, в. На рис. 2, г представлена ее вертикальная развертка вдоль прямой на рис. 2, в (развертка в двух местах, помеченных на прямой, на рис. 2, г отмечена вертикальными линиями). Видно (рис. 2, г), что на протяжении значительного участка поверхности ее шероховатость не превышает 5 нм. Максимально детализированный профиль СТМ (полученный на "вершине" кластера) представлен на рис. 2, д. На этом участке шероховатость еще меньше ( $\approx 3$  нм). По виду кластер имеет характерные черты застывающего металла, что является подтверждением его физической природы.

### Выводы

Исследования поверхности (100) слоистого кристалла  $\text{In}_4\text{Se}_3$  показали, что с помощью скалывания удается получить практически идеальную поверхность (в большинстве участков скола), что, в свою очередь, позволяет использовать данный кристалл для разработки элементов нанoeлектроники: оцененная шероховатость поверхности практически идеальна для формирования резких гетеропереходов в качестве подложки.

Из-за недостаточной эффективной площади активной поверхности перспективы использования  $\text{In}_4\text{Se}_3$  в качестве газовых сенсоров не столь обнадеживающие.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Савчин В. П. Поляризация та позиційна фоточутливість гетероструктури  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-In}_4\text{Se}_3$  // УФЖ. — 2000. — Т. 45, № 10. — С. 1211—1215.
2. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З., Огородник А. Д. Гетероструктуры на основе селенидов индия // Изв. РАН: Неорг. матер. — 1996. — Т. 32, № 8. — С. 937—940.
3. Balitskii O. A., Savchyn V. P., Jaeckel B., Jaegermann W. Surface characterization of  $\text{In}_4\text{Se}_3$  single crystals // Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures. — 2004. — Vol. 22, N 4. — P. 921—923.
4. Galiy P. V., Musyanovych A. V. X-ray photoelectron spectroscopy of the interface phase on cleavage surface of the layered semiconductor  $\text{In}_4\text{Se}_3$  crystals // Functional Materials. — 2005. — Vol. 12, N 3. — P. 467—473.
5. Newbury D. E., Williams D. B. The electron microscope: the material characterization tool of the millennium // Acta Mater. — 2000. — Vol. 48, N 1. — P. 323—346.
6. Wickramasinghe H. K. Progress in scanning probe microscopy // Ibid. — P. 347—358.
7. Панфилов Ю. В., Самойлович М. И., Булыгина Е. В. Нанесение тонких пленок в вакууме на подложки из синтетического опала // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2005. — № 2. — С. 49—52.