

## Химическая пассивация подложек InSb (100) в водных растворах сульфида натрия

© Т.В. Львова<sup>¶</sup>, М.С. Дунаевский, М.В. Лебедев, А.Л. Шахмин\*, И.В. Седова, С.В. Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Российская академия наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 3 октября 2012 г. Принята к печати 17 октября 2012 г.)

Методом рентгеновской фотоэмиссионной спектроскопии проведен анализ элементного состава и электронно-энергетической структуры как естественно окисленной поверхности подложек InSb (100), так и подложек, обработанных в водных растворах сульфида натрия. Установлено, что в результате обработки в 1 М водном растворе Na<sub>2</sub>S и последующем отжиге в вакууме при температуре 150°С происходит полное удаление поверхностного слоя комплексных оксидов сурьмы и индия нестехиометрического состава с образованием сплошного хемосорбированного слоя атомов серы, когерентно-связанного с атомами индия. Согласно данным атомно-силовой микроскопии, в процессе сульфидной пассивации не происходит травления основного материала подложки. Обнаружен сдвиг (на 0,37 эВ) линии объемной фотоэмиссии In–Sb в сторону больших энергий связи, что свидетельствует о сдвиге поверхностного уровня Ферми в глубь зоны проводимости.

### 1. Введение

В течение последних десятилетий большое внимание уделяется созданию приборов, работающих в диапазоне средней инфракрасной (ИК) области спектра (3–5 мкм), которая является принципиально важной как для решения глобальных экологических задач, связанных с мониторингом состояния окружающей среды и контролем процессов промышленного производства, так и для медицинских, биологических и других целей. Одним из перспективных материалов для создания подобных приборов является антимонид индия (InSb) — самое узкозонное соединение A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>, ширина запрещенной зоны которого составляет величину  $E_g = 0.17$  эВ ( $T = 300^\circ$  К). Уникальные фундаментальные свойства InSb: высокая подвижность, малая эффективная масса электронов зоны проводимости, сильное спин-орбитальное взаимодействие делают этот материал чрезвычайно притягательным как для фундаментальных, так и для важных прикладных применений. Антимонид индия используют для изготовления фотоэлементов высокой чувствительности, датчиков Холла, оптических фильтров и термоэлектрических генераторов и холодильников, а также в военной технике (индивидуальные и матричные приемники излучения для средней области ИК-спектра) и сверхвысокочастотной (СВЧ) электронике [1–3].

Ключевой проблемой технологии таких приборов является наличие на поверхности InSb трудно удаляемых нестехиометрических оксидов, химический состав и толщина которых зависят от условий окружающей среды и изменяются во времени. Присутствие на поверхности полупроводника оксидов и характер химического сопряжения их с кристаллом непосредственно определяют совокупность электронных, оптических и химических

свойств поверхности последнего, а именно — положение уровня Ферми, скорость поверхностной рекомбинации, химическое взаимодействие с агрессивными по отношению к материалу полупроводника веществами и т.д. Наличие оксидов также влияет на характер зародышеобразования на начальной стадии эпитаксиального роста и, как следствие, на плотность дефектов в эпитаксиальных слоях.

Малая ширина запрещенной зоны InSb и соответственно достаточно слабая химическая связь между атомами In и Sb, значительно затрудняют получение атомарно-гладкой и одновременно атомно-чистой поверхности путем стандартного термического высокотемпературного отжига, поскольку температура десорбции оксидов различна и близка к температуре неконгруэнтного разложения самого полупроводника (320–340°С). Для очистки поверхности InSb от слоя оксидов были разработаны различные специальные методики. Например, в работе [4] поверхность (100) InSb обрабатывали в газовой смеси HF/H<sub>2</sub>O под давлением 100 Торр при  $T = 29^\circ$ С, что позволило удалить около 90% естественных оксидов. В результате этой процедуры на поверхности полупроводника был сформирован слой сложного состава, состоящий из элементарной сурьмы, и включений, содержащих островки InF. Толщина слоя сурьмы и размеры островков InF зависели от процентного соотношения компонентов газовой смеси.

Наиболее широкое распространение получила технология удаления оксидов с поверхности InSb (100) потоком молекулярного или атомарного водорода [5,6]. Наилучшие результаты были достигнуты при сочетании химической полировки поверхности подложки и обработки ее потоком атомарного водорода в течение 20 мин, что привело к снижению температуры отжига поверхностных оксидов InSb (100) до 200°С при сохранении морфологии исходной поверхности [7].

<sup>¶</sup> E-mail: tatyana.lvova.12@mail.ru

Альтернативным методом удаления оксидов с поверхности полупроводников A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> является химическая пассивация, в результате которой на поверхности полупроводника формируется адсорбционная кристаллическая пленка химически инертного материала. Отдельное внимание уделялось разработке методики, изучению процесса и возможности применения халькогенидной пассивации в полупроводниковой технологии [8]. Исследования процессов халькогенидной пассивации концентрировались главным образом на кристаллах GaAs, GaSb, InAs [8]. Обработка водными растворами сульфида натрия (Na<sub>2</sub>S·9H<sub>2</sub>O) или аммония (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S [9–11] приводит к удалению оксидного слоя с поверхности полупроводника и формированию на ней сульфидного пассивирующего покрытия. Это обеспечивает сохранение планарности поверхности подложки в процессе отжига и не вносит дополнительных нарушений в исходный рельеф. Химическая пассивация InSb в растворе сульфида аммония исследовалась как для поверхности (100) [12], так и для (111)A [13,14]. В работе [10] было показано, что в результате обработки поверхности InSb сера адсорбируется как на атомах индия, так и на атомах сурьмы. В процессе отжига при температурах выше 310°C связь S–Sb разрушается, в результате чего пассивирующий слой в основном содержит связи In–S. Наличие углерода и кислорода на пассивированной поверхности после отжига при температурах выше 340°C не оценивалось.

В данной работе представлены результаты исследования процесса химической пассивации поверхности готовых для эпитаксии (epi-ready) подложек InSb (100) в водных растворах сульфида натрия (Na<sub>2</sub>S × 9H<sub>2</sub>O). Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) изучена морфология поверхности пассивированных и непассивированных epi-ready подложек InSb (100), в том числе и после отжига. Анализ элементного состава и химического состояния каждого элемента на поверхности осуществлялся методом рентгеновской фотоэмиссионной спектроскопии (РФЭС).

## 2. Методика эксперимента

Во всех экспериментах в данной работе использовались epi-ready подложки n<sup>+</sup>-InSb (001). Образцы обрабатывались в одномолярном (1 М) водном растворе сульфида натрия при температуре 45°C, промывались в проточной бидистиллированной воде и сушились при комнатной температуре. Для подбора оптимального режима сульфидирования время обработки поверхности варьировалось. В частности, образцы, использованные для измерения спектров РФЭС, пассивировались в течение 7 мин.

Измерения спектров РФЭС проводились с помощью рентгеновского фотоэлектронного спектрометра фирмы SPECS (Германия) при уровне вакуума в камере анализатора ~ 5 · 10<sup>-10</sup> мбар с использованием монохроматического источника AlK<sub>α</sub> (hν = 1486.6 эВ). Энергии связи

остовных уровней отсчитывались от уровня Ферми. Энергетическая шкала спектрометра калибровалась по линии золота Au 4f<sub>7/2</sub>, энергия связи которой была принята равной 84.0 эВ.

В работе проводились измерения спектров РФЭС подложек InSb: а) без какой-либо обработки, б) прошедших обработку в сульфидном растворе, в) прошедших обработку в сульфидном растворе и отожженных в условиях высокого вакуума при различных температурах. Отжиг образцов проводился с помощью галогеновой лампы, установленной в дополнительной вакуумной камере, присоединенной к камере анализатора. Уровень вакуума в камере отжига составлял ~ 2 · 10<sup>-8</sup> мбар. Температура нагрева контролировалась с помощью термпарного контроллера.

Морфология поверхности образцов на каждом этапе подготовки анализировалась методом АСМ в атмосферных условиях на отечественном приборе компании NTMDT (Москва), работающем в полуконтактном режиме с использованием зонда NSG11 с коэффициентом жесткости 5 Н/м и радиусом кривизны кончика иглы зонда 10 нм. Статистическая обработка АСМ топографии проводилась с помощью программы Nova (NTMDT). Величина среднеквадратичной шероховатости поверхности (rms) определялась путем усреднения по трем участкам поверхности 3 × 3 мкм.

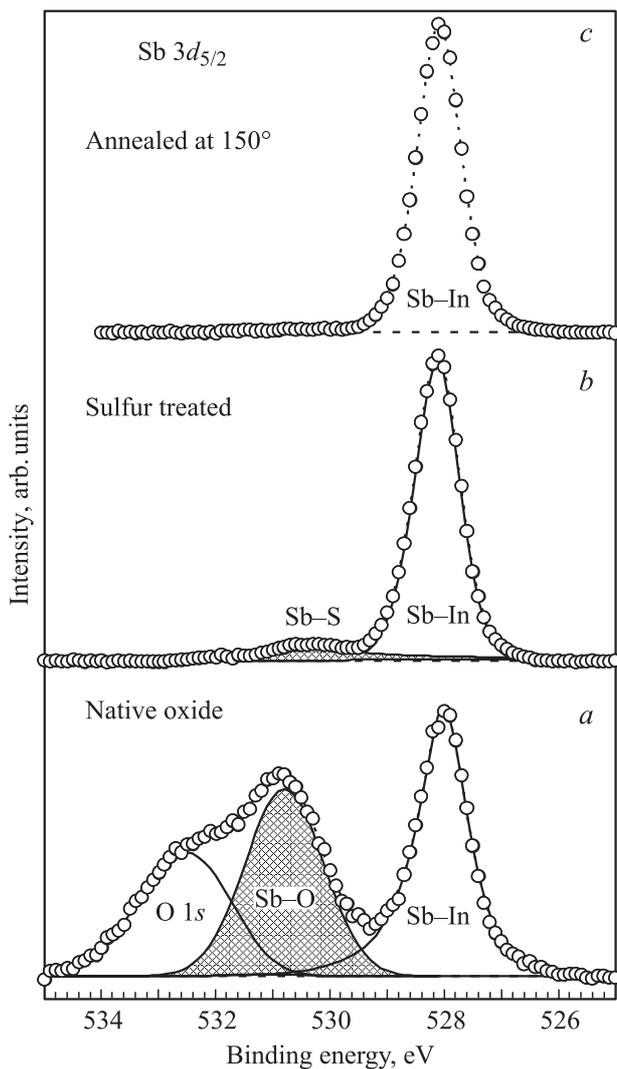
## 3. Результаты и обсуждение

### 3.1. Химический анализ поверхности (100) InSb до и после сульфидирования

Обзорные спектры РФЭС исходной поверхности InSb (100) содержат характерные пики остовных уровней индия, сурьмы и углерода, а также оже-пик кислорода O KL<sub>23</sub>L<sub>23</sub> с энергией ~ 975 эВ. Остовный уровень кислорода O 1s перекрывается с остовным уровнем Sb 3d<sub>5/2</sub> и поэтому трудно различим в обзорных спектрах фотоэмиссии. После сульфидной обработки появлялись пики остовных уровней серы, а оже-пик кислорода O KL<sub>23</sub>L<sub>23</sub> полностью исчезал.

Разложение спектров фотоэмиссии остовных уровней производилось после вычитания фонового сигнала, обусловленного неупругим рассеянием электронов. Данный фоновый сигнал моделировался полиномом. Пики отдельных компонент моделировались свертками линий Гаусса и Лоренца.

Разложение остовных спектров Sb 3d<sub>5/2</sub> представлено на рис. 1. Мы использовали данную линию, поскольку она перекрывается с остовным уровнем кислорода O 1s и тем самым позволяет следить за изменением содержания кислорода на поверхности в ходе эксперимента. Разложение спектра уровня Sb 3d<sub>5/2</sub> исходной поверхности (100)InSb, покрытой слоем естественного окисла, содержит 3 линии (рис. 1). Наряду с линией объемной фотоэмиссии сурьмы Sb–In имеются 2 компонента с большими энергиями связи. Компонента с химическим



**Рис. 1.** Эволюция фотоэмиссионных спектров поверхности (100)InSb в области, содержащей уровни  $O\ 1s$  и  $Sb\ 3d_{5/2}$ . *a* — поверхность, покрытая слоем естественного окисла; *b* — поверхность InSb после обработки в растворе сульфида натрия; *c* — сульфидированная поверхность InSb после отжига при  $150^\circ\text{C}$  в высоком вакууме.

сдвигом  $2.8\ \text{эВ}$  обусловлена наличием на поверхности оксидов сурьмы. Третья линия с энергией связи около  $532.5\ \text{эВ}$  представляет собой остовный уровень кислорода  $O\ 1s$ , поскольку в разложении другого пика  $Sb\ 3d_{3/2}$  дублета  $Sb\ 3d$  данная линия отсутствует.

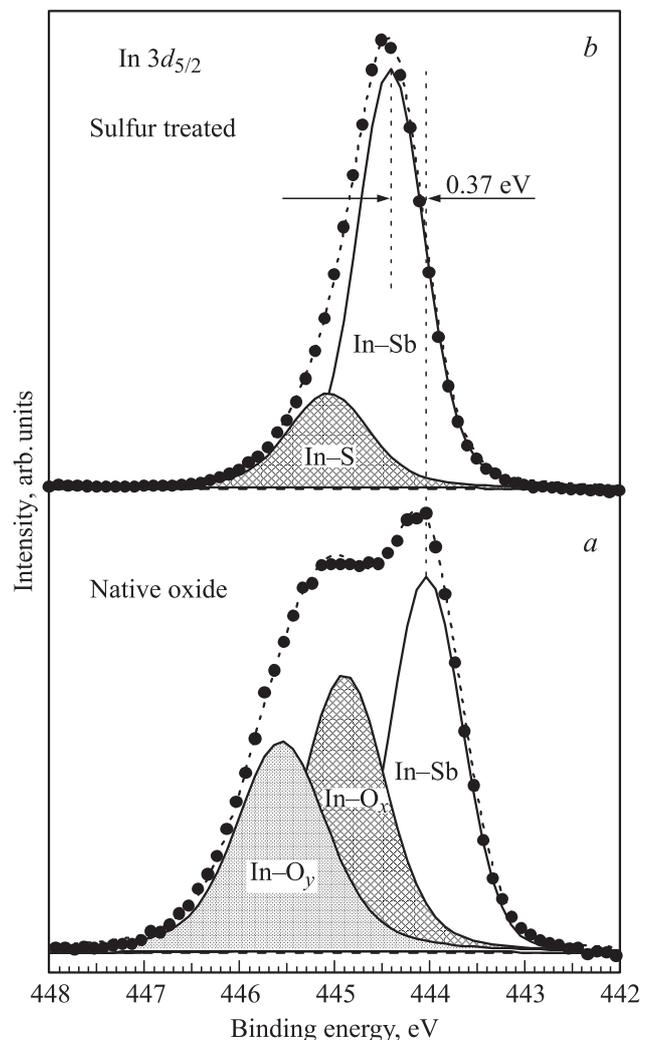
Наряду с пиком объемной фотоэмиссии сурьмы  $Sb\text{--}In$  в спектре видна небольшая компонента с химическим сдвигом около  $2.4\ \text{эВ}$ . Данная компонента может быть связана с образующимися на поверхности полупроводника сульфидами сурьмы, поскольку на сульфидированной поверхности сера обычно замещает кислород. Эта компонента полностью исчезает после отжига поверхности в вакууме при температуре  $150^\circ\text{C}$ .

После сульфидной обработки поверхности форма спектра  $Sb\ 3d_{5/2}$  существенно изменяется (рис. 1).

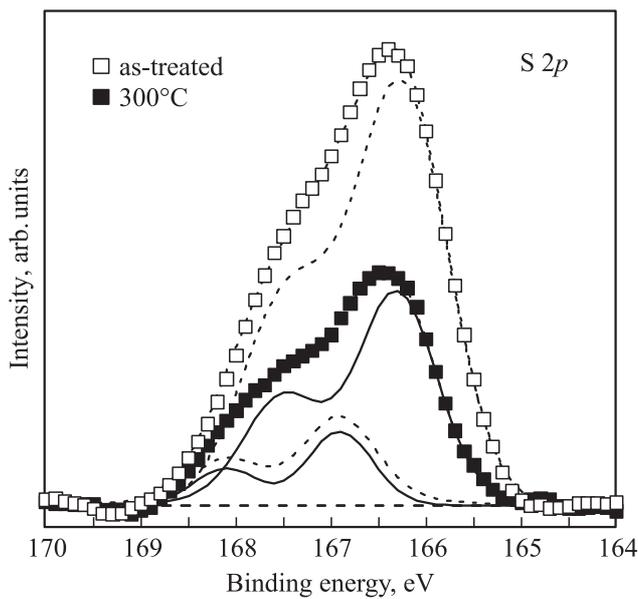
Остовный уровень кислорода  $O\ 1s$  исчезает практически полностью, что согласуется с исчезновением оже-пика  $OKL_{23}L_{23}$  из обзорного спектра. Наряду с пиком объемной фотоэмиссии сурьмы  $Sb\text{--}In$  в спектре видна небольшая компонента с химическим сдвигом около  $2.4\ \text{эВ}$ . Данная компонента может быть связана с образованием на поверхности полупроводника сульфидов сурьмы, поскольку на сульфидированной поверхности отсутствует кислород, но присутствует сера. Эта компонента полностью исчезает после отжига поверхности в вакууме при температуре  $150^\circ\text{C}$  (рис. 1).

Разложение пиков  $In\ 3d_{5/2}$  и  $In\ 3d_{3/2}$  дублета  $In\ 3d$  производилось одновременно с учетом энергии спин-орбитального расщепления ( $7.6\ \text{эВ}$ ) и соотношения интенсивностей пиков дублета ( $1.45$ ). Для наглядности на рис. 2 приведено разложение пика  $In\ 3d_{5/2}$ .

Разложение спектра уровня  $In\ 3d_{5/2}$  исходной поверхности (100) InSb, покрытой слоем естественного окисла,



**Рис. 2.** Разложение фотоэмиссионных спектров  $In\ 3d_{5/2}$  поверхности (100) InSb до и после сульфидной обработки; *a* — спектр исходной поверхности InSb, покрытой слоем естественного окисла; *b* — поверхность InSb после сульфидной обработки.

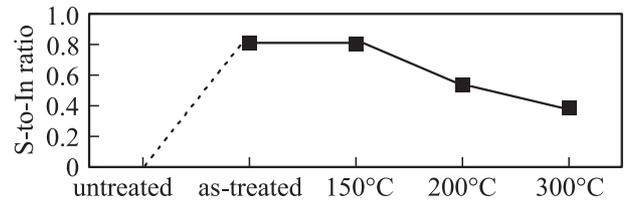


**Рис. 3.** Фотоэмиссионные спектры S 2p поверхности (100) InSb после обработки в растворе сульфида натрия и после отжига сульфидированной поверхности при 300°C в сверхвысоком вакууме. Точки — экспериментальные данные; линии — компоненты разложения спектра сульфидированной поверхности (100) InSb до (сплошные) и после отжига при 300°C (штриховые).

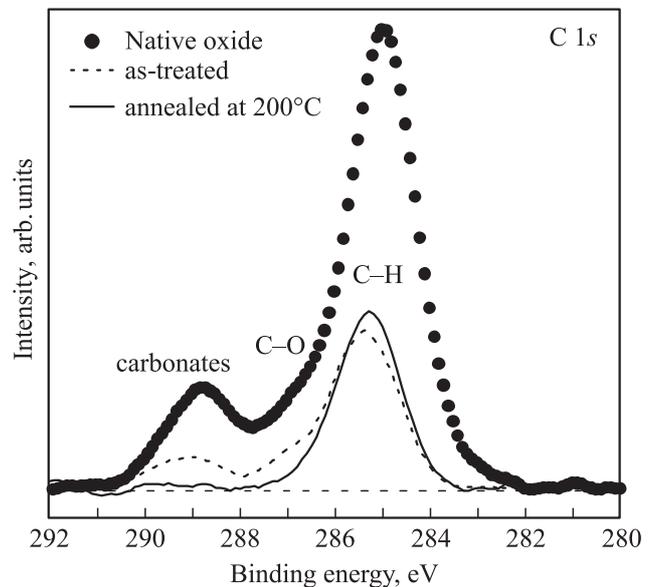
содержит 3 компоненты (рис. 2). Это линия объемной фотоэмиссии In–Sb и две компоненты, сдвинутые в сторону больших энергий связи на 0.85 и 1.5 эВ. Последние соответствуют двум фазам оксида индия с различной степенью окисления. После сульфидной обработки эти две компоненты исчезают из спектра, а вместо них появляется одна компонента с химическим сдвигом 0.65 эВ, соответствующая сульфидам индия. Одновременно происходит сдвиг линии объемной фотоэмиссии In–Sb на 0.37 эВ в сторону больших энергий связи, что свидетельствует о сдвиге поверхностного уровня Ферми в глубь зоны проводимости. Аналогичный сдвиг поверхностного уровня Ферми наблюдался после обработки поверхности (100) InSb в водном растворе сульфида аммония и отжига в вакууме при  $T = 310^\circ\text{C}$  [10]. Такой же эффект наблюдался и в работе [15] при ином способе сульфидной пассивации. Поверхность (100) InSb сначала очищали потоком атомов водорода, а затем распыляли серу. Поверхностный уровень Ферми сдвигался более чем на 0.3 эВ при температуре отжига 350°C, повышение температуры отжига до 400°C возвращало положение уровня Ферми в исходное.

Отжиг поверхности при температуре 150°C не приводит к существенному изменению формы спектра уровня In 3d<sub>5/2</sub>. После отжига при температурах 200 и 300°C интенсивность компоненты In–S в спектре уровня In 3d<sub>5/2</sub> падает примерно в 2 раза, что соответствует одновременному снижению интенсивности фотоэмиссии серы S 2p (рис. 3).

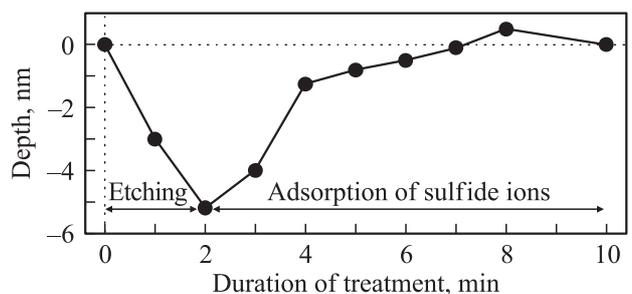
Спектры остоного уровня серы S 2p могут быть разложены на 2 компоненты с энергиями связи 166.3 и 166.9 эВ (рис. 3). Эти две компоненты наблюдаются как в спектре, полученном сразу после сульфидной обработки, так и в спектрах, полученных после отжига сульфидированной поверхности в вакууме. После отжи-



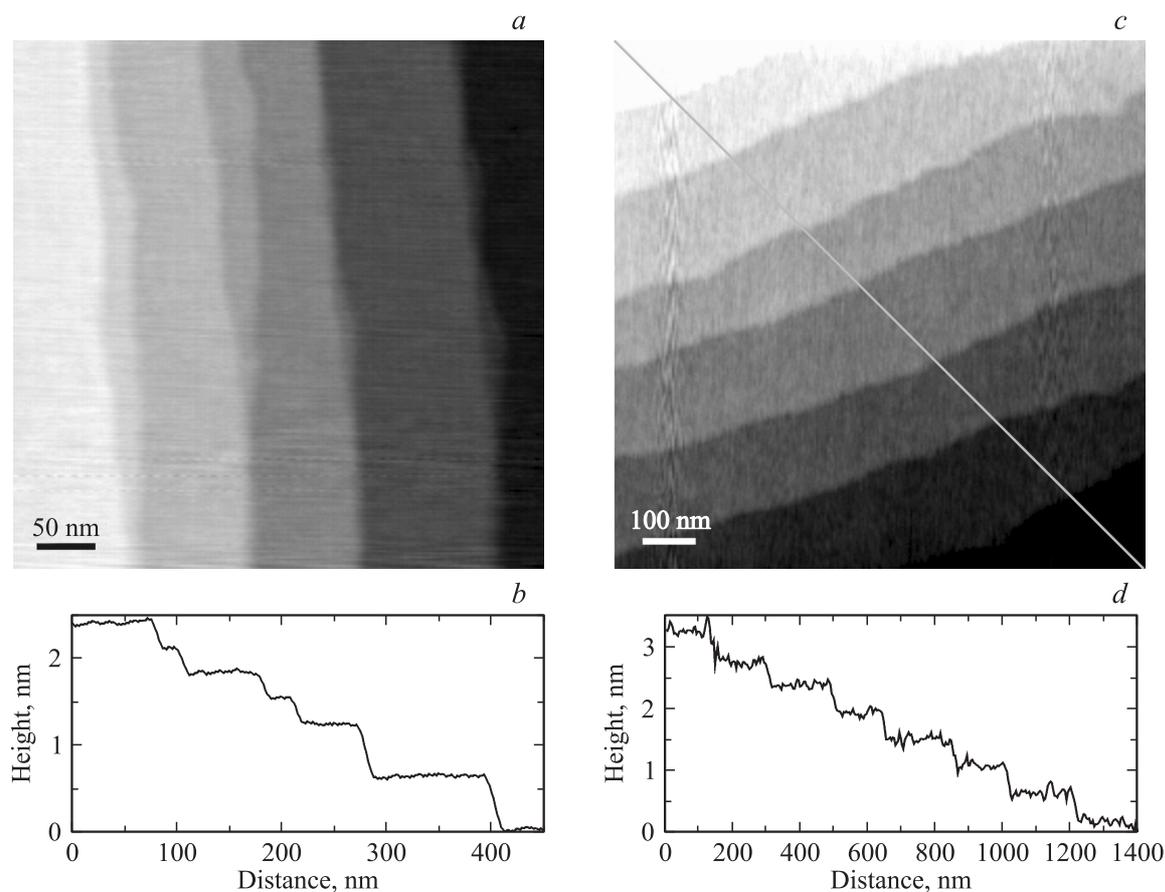
**Рис. 4.** Соотношение интенсивностей спектров фотоэмиссии серы (S 2p) и индия (In 3d<sub>5/2</sub>) на поверхности (100) InSb на разных стадиях эксперимента.



**Рис. 5.** Фотоэмиссионные спектры C 1s исходной поверхности (100) InSb, покрытой слоем естественного оксида (точки); сульфидированной поверхности (100) InSb (пунктир); и сульфидированной поверхности (100) InSb после отжига при 200°C (сплошная линия).



**Рис. 6.** Удаление окисного слоя и формирование сульфидного слоя на поверхности InSb в процессе обработки в 1 М водном растворе сульфида натрия.



**Рис. 7.** АСМ-изображения топографии и профилей поверхностей (100) InSb: *a, b* — исходная; *c, d* — поверхность после обработки в сульфидном растворе.

га поверхности при температуре  $200^{\circ}\text{C}$  интенсивность фотоэмиссии серы  $S\ 2p$  уменьшается приблизительно в 2 раза относительно сигнала индия (рис. 4), что соответствует снижению интенсивности компоненты сульфида индия в спектре уровня  $\text{In}\ 3d_{5/2}$ . При этом видно, что снижение поверхностной концентрации серы происходит, в основном, за счет снижения интенсивности низкоэнергетичной компоненты спектра  $S\ 2p$  (рис. 3).

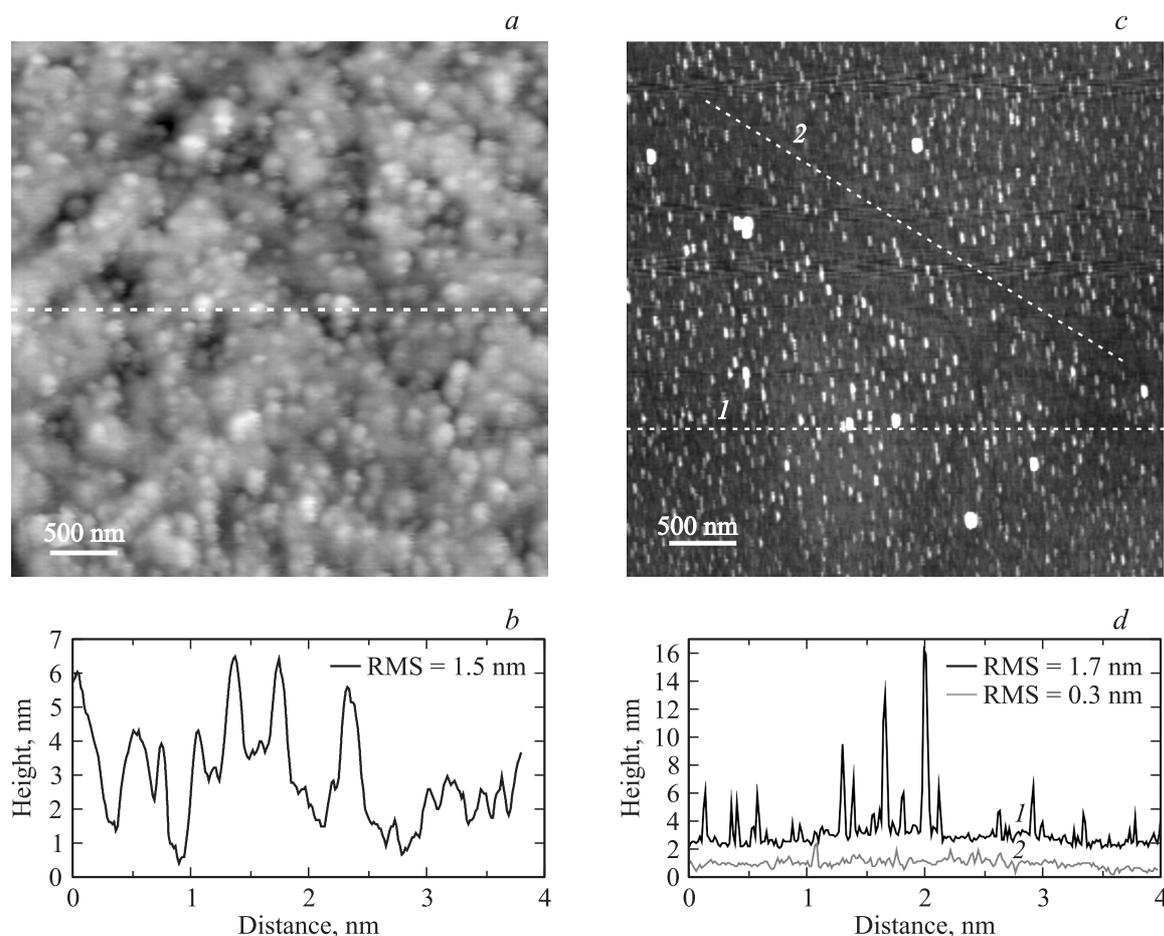
Спектр основного уровня углерода  $C\ 1s$  исходной поверхности (100)InSb, покрытой слоем естественного окисла, содержит три явных компоненты (рис. 5): пик с энергией связи  $285\ \text{эВ}$ , связанный с углеводородным загрязнением  $C-H$ ; плечо в области энергий связи  $286-288\ \text{эВ}$ , обусловленное связями атомов углерода с кислородом  $C-O$ ; пик с энергией связи  $289\ \text{эВ}$ , связанный с образованием карбонатов и карбоксилатов [16]. Обработка поверхности (100)InSb в сульфидном растворе приводит к некоторому снижению поверхностной концентрации углерода (рис. 5). Отношение интенсивности сигнала фотоэмиссии уровня углерода  $C\ 1s$  к интенсивности сигнала уровня индия  $\text{In}\ 3d_{5/2}$  уменьшается приблизительно в 4.5 раза. При этом интенсивность углеводородной компоненты уменьшается в большей степени, чем интенсивности остальных компонент (рис. 5). Наличие связей  $C-O$  и карбонатов (карбоксила-

тов) указывает на существование на поверхности после сульфидной обработки следов кислорода, несмотря на то что в спектрах фотоэмиссии отсутствует оже-пик кислорода  $O\ KL_{23}L_{23}$  и основной уровень  $O\ 1s$ . Отжиг поверхности при температуре  $200^{\circ}\text{C}$  не приводит к изменению интенсивности углеводородной компоненты  $C-H$ , но приводит к полному исчезновению компонент, связанных с карбонатами (карбоксилатами) и связями  $C-O$ , что указывает на полное исчезновение кислорода с поверхности (100) InSb. Дальнейший отжиг поверхности при температуре  $300^{\circ}\text{C}$  не приводит к изменению формы и интенсивности фотоэмиссии углерода  $C\ 1s$ .

Таким образом, обработка поверхности (100) InSb в 1-молярном водном сульфидном растворе приводит к полному удалению слоя естественного окисла, к формированию поверхностного слоя сульфида индия и к снижению содержания углерода на поверхности.

### 3.2. Влияние сульфидной пассивации на рельеф поверхности (100)InSb

Как показано в работах [17,18], при сульфидной обработке кристаллов (100)GaAs, (100)GaSb *n*-типа проводимости процесс формирования сульфидного хемосорбционного покрытия на поверхностях сопровождается



**Рис. 8.** АСМ-изображения топографии и профилей поверхностей (100) InSb после отжига в вакууме при  $T = 300^\circ$ ; (a, b) — исходная поверхность, (c, d) — сульфидированная поверхность. Профиль 1 — сечение проведено через частицы углерода; профиль 2 — сечение проведено по чистой поверхности.

ется травлением, которое может нарушать исходный микрорельеф поверхности. Слабое травление обнаружилось и в случае (100) InAs при обработке в растворе полисульфида аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$  с  $\text{pH} \approx 8$  [8]. Чтобы выяснить, происходит ли травление InSb при обработке в сильнощелочном 1-молярном водном растворе  $\text{Na}_2\text{S}$ , были приготовлены образцы, часть поверхности которых для защиты от контакта с раствором закрывалась слоем  $\text{SiO}_2$ . Образцы выдерживались в сульфидном растворе от 1 до 10 мин и промывались в деионизованной воде. Затем на каждом образце методом АСМ измерялась высота ступени от вершины полоски  $\text{SiO}_2$  до поверхности кристалла. Равномерность толщины слоя  $\text{SiO}_2$  по поверхности проверялась до сульфидной обработки.

Проведенные измерения обнаружили (рис 6), что обработка в растворе в течение первых двух минут увеличивает высоту ступени на 5 нм по сравнению с исходной поверхностью, при дальнейшем увеличении времени пассивации высота ступени приближается к исходной. Эти данные позволяют предположить, что в течение первых 2 мин происходит удаление поверхностного окисного слоя полупроводника, с увеличением времени обработки начинают преобладать процессы посте-

пенной адсорбции сульфид-ионов на чистую поверхность кристалла, т.е. собственно и происходит формирование сульфидной пленки.

Рассматривалось влияние сульфидной обработки на топографию поверхности (100) InSb. Сравнивались рельефы исходной и пассивированной поверхности до и после отжига в сверхвысоком вакууме при температуре  $T \approx 300^\circ\text{C}$ . Данные АСМ-исследований показали, что обработка подложек в 1-молярном сульфидном растворе в течение 4 мин не изменяет топографию поверхности. Рельеф поверхностей в обоих случаях представляет собой атомарно-гладкие террасы, разделенные одинарными и двойными ступенями, высота которых составляет  $\sim 0.3$  и  $\sim 0.6$  нм соответственно (рис. 7). Отжиг окисленной (исходной) поверхности InSb приводит к возрастанию величины среднеквадратичной шероховатости поверхности до 1.5 нм. На рис. 8, a, b показаны АСМ-изображение и профиль сечения такой поверхности (100) InSb после отжига в вакууме и последующего извлечения на воздух. Рельеф такой поверхности имеет выраженную шероховатость, которая не позволяет выделить планарные участки. В то же время после отжига сульфидированного образца (рис. 8, c, d) величина

среднеквадратичной шероховатости поверхности практически не изменяется и составляет  $\sim 0.3$  нм. Однако присутствие углерода в виде микрочастиц, наблюдаемое и в спектрах фотоэмиссии, приводит к увеличению этой величины до  $\sim 1.7$  нм. Этот результат ясно показывает, что как термодесорбция, так и сам процесс сульфидной пассивации InSb не вызывают искажений исходного рельефа поверхности кристаллов на наноразмерном уровне. Этот факт является еще одним подтверждением отсутствия выраженного травления кристалла InSb в 1-молярном водном растворе сульфида натрия.

#### 4. Заключение

Химический состав и морфология поверхности (100) InSb до и после обработки в водном растворе сульфида натрия исследовались методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и атомно-силовой микроскопии. Показано, что обработка в водном растворе сульфида натрия и последующий отжиг в вакууме при температуре  $150^\circ\text{C}$  приводит к полному удалению кислорода с поверхности и существенному снижению содержания углерода. При этом поверхность полупроводника покрыта слоем сульфида индия. Отмечено смещение поверхностного уровня Ферми в глубь зоны проводимости на  $0.37$  эВ. Данные атомно-силовой микроскопии позволяют сделать вывод о том, что в водном сульфидном растворе происходит травление только поверхностного оксидного слоя с последующим образованием пассивирующего покрытия.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ (№ 11-02-12045, № 10-02-00784), ОФИ-М (№ 11-02-12-249) и президиума РАН (№ 10.11).

#### Список литературы

- [1] N. Kuze, I. Shibusaki. III–Vs Review, **10**, 28 (1997).
- [2] P.J. Treado, I.W. Levin, E.N. Lewis, Appl. Spectroscopy, **48**, 607 (1994).
- [3] T. Ashley, L. Buckle, S. Dutta et al. Electron. Lett., **43**, 777 (2007).
- [4] F.L. Lie, A.J. Muscat. J. Phys. Chem. C, **115**, 7440 (2011).
- [5] L. Haworth, J. Lu, D.I. Westwood, J.E. MacDonald. Appl. Surf. Sci., **166**, 253 (2000).
- [6] R. Tessler, C. Saguy, O. Klin, S. Greenberg, E. Weiss, R. Akhvediani, R. Edrei, A. Hoffman. Appl. Phys. Lett., **88**, 031 918 (2006).
- [7] S.R. Vangala, H. Dauplaise, C. Sateufemio, C. Lynch, P. Alcorn, L.P. Allen, G. Dallas, K. Vaccaro, D. Bliss, W.D. Goodhue. CS MANTECH Conference, May 14-17, 2007, Austin, Texas, USA.
- [8] В.Н. Бессолов, М.В. Лебедев. ФТП, **32** (11), 1281 (1998).
- [9] T.V. Lvova, I.V. Sedova, V.P. Ulin, S.V. Sorokin, V.A. Solov'ev, A.A. Sitnikova, V.L. Berkovits, S.V. Ivanov. Vacuum, **57**, 163, (2000).
- [10] D.Y. Petrovykh, M.J. Yang, L.J. Whitman. Surf. Sci., **523**, 231, (2003).
- [11] Т.В. Львова, В.Л. Берковиц, М.С. Дунаевский, С.В. Иванов, А.Н. Карпенко, И.В. Седова, В.П. Улин. ФТП, **51**, 6, (2009).
- [12] S. Ichikawa, Y. Suzuki, N. Sanada, N. Utsumi, T. Yamaguchi, X.Y. Gong, Y. Fukuda. J. Vac. Technol. A, **17** (2), 421 (1999).
- [13] M.V. Lebedev, M. Shimomura, Y. Fukuda. Surface and Interface Analysis, **42**, 791 (2010).
- [14] D.M. Zhemokletov, H. Dong, B. Brennan, J. Kim, R.M. Wallace, J. Vac. Sci. Technol. B, **30**, 04E103 (2012).
- [15] P.D.C. King, T.D. Veal, M.J. Lowe, C.F. McConville. J Appl. Phys., **104**, 083 709 (2008).
- [16] S.D. Gardner, C.S.K. Singamsetty, G.L. Booth, G.-R. He, C.U. Pittman, jr. Carbon, **33**, 587 (1995).
- [17] V.L. Berkovits, V.M. Lantratov, T.V. Lvova, G.F. Shakia shvili, V.P. Ulin, D. Paget. Appl. Phys. Lett., **63**, 970, (1993).
- [18] И.А. Андреев, Е.В. Куницына, В.М. Лантратов, Т.В. Львова, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **31**, 653 (1997).

Редактор Т.А. Полянская

#### Chemical passivation of InSb (100) substrates in aqueous sodium sulfide solutions

T.V. Lvova, M.S. Dunaevskii, M.V. Lebedev, A.L. Shakhmin\*, I.V. Sedova, S.V. Ivanov

Ioffe Physicotechnical Institute  
of the Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

\* St. Petersburg State Polytechnical University,  
195251 St. Petersburg, Russia

**Abstract** X-ray photoemission spectroscopy is used to study chemical composition and electronic structure of InSb(100) substrates covered with native oxide layer, as well as treated with aqueous sodium sulfide solution. It is found that the treatment of InSb(100) with 1 M aqueous  $\text{Na}_2\text{S}$  solution and subsequent annealing in ultra-high vacuum at  $150^\circ\text{C}$  results in complete removal of the native oxide layer consisting of non-stoichiometric antimony and indium oxides and formation of the continuous layer of chemisorbed sulfur atoms bounded to indium atoms. According to atomic-force microscopy data, no etching of the substrate material proceeds in the course of sulfur passivation. After sulfur treatment the In–Sb bulk photoemission component shifts by  $0.37$  eV towards higher binding energies, which is the evidence of the surface Fermi level shift to the conduction band.