

Исследования приповерхностной области n -InP (100), пассивированного в сульфидных растворах

© В.Н. Бессолов, М.В. Лебедев, D.R.T. Zahn*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
*Institut für Physik, TU-Chemnitz,
D-09107, Chemnitz, Germany

(Получена 1 октября 1998 г. Принята к печати 5 октября 1998 г.)

С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, метода Кельвина и рамановского рассеяния изучались свойства поверхности n -InP (100), пассивированной сульфидом аммония, растворенным в воде или в трет-бутиловом спирте. Показано, что обе обработки приводят к уменьшению глубины приповерхностной обедненной области, к смещению поверхностного уровня Ферми в направлении зоны проводимости и к увеличению работы выхода электронов с поверхности и энергии ионизации полупроводника, причем обработка в спиртовом растворе дает более сильный эффект, чем обработка в водном растворе. При сульфидировании в спиртовом растворе поверхностный уровень Ферми смещается на 0.2 эВ, а энергия ионизации увеличивается на 0.53 эВ.

1. Введение

Фосфид индия из-за высокой подвижности и относительно широкой запрещенной зоны является важным материалом, применяемым в высокочастотных полевых транзисторах, солнечных элементах и оптоэлектронных интегральных схемах. Пассивация поверхности InP атомами серы заметно модифицирует его электронные свойства [1–4], в частности, приводит к снижению плотности поверхностных состояний на границе InP/диэлектрик [1,2], к появлению зависимости высоты барьера Шоттки от работы выхода металла [3] и к возрастанию интенсивности фотолюминесценции [4], а также к улучшению характеристик лазерных диодов на основе InGaAlP [5] и InGaAsP [6].

Модификация электронных свойств поверхности инициировала исследования как химического состава, так и атомной и электронной структуры поверхности InP, покрытой атомами серы. Было установлено, что при обработке InP в сульфидных растворах сера на поверхности связана только с атомами индия [7], при этом сера на поверхности находится по крайней мере в трех валентных состояниях [8], соответствующих: а) элементарной сере, б) сере, связанной с индием на поверхности, и в) сере, занимающей место фосфора в приповерхностной области полупроводника. Было показано, что адсорбция серы на поверхности p -InP и последующий отжиг при температуре $200 \div 300^\circ\text{C}$ в ряде случаев приводит к сдвигу поверхностного уровня Ферми в направлении зоны проводимости [9,10], в то время как на сульфидированной поверхности n -InP уровень Ферми слабо сдвигался в направлении валентной зоны, а при последующим отжиге возвращался в исходное положение [10].

Сульфидирование поверхности InP проводилось в основном либо из газовой фазы [9], либо из водных растворов сульфида натрия [4], или сульфида аммония [1–3,7,8,10]. С другой стороны, свойства сульфидного раствора оказывают существенное влияние на

химический состав и электронную структуру сульфидированной поверхности. Так, например, показано, что использование в качестве растворителей спиртов приводит к повышению эффективности формирования сульфидного покрытия на поверхности GaAs [11], что позволило существенно повысить интенсивность фотолюминесценции [11] и уменьшить приповерхностный изгиб зон [12]. Пассивация в спиртовых сульфидных растворах позволила повысить эффективность лазерных диодов InGaAs/AlGaAs [13] и InGaAsP/InP [14].

В данной работе с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, метода Кельвина и рамановского рассеяния проводилось сравнение химического состава и электронных свойств поверхности n -InP (100), сульфидированной в водном и спиртовом растворах сульфида аммония.

2. Эксперимент

В качестве объектов исследований использовались пластины n -InP (100) с концентрацией электронов $n \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Перед сульфидированием пластины травились в HF в течение 1 мин при комнатной температуре.

Сульфидирование проводилось в двух различных растворах: во-первых, в водном растворе сульфида аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$ (1:10) в течение 1.5 мин; во-вторых, в растворе сульфида аммония в трет-бутиловом спирте $(\text{NH}_4)_2\text{S} + t\text{-C}_4\text{H}_9\text{OH}$ (1:100) в течение 30 с. Для удаления с поверхности сульфидного раствора после окончания процесса сульфидирования образец помещался в центрифугу и раскручивался на воздухе со скоростью 1000 об/мин.

Рентгеновские фотоэлектронные спектры поверхности InP снимались на спектрометре Perkin-Elmer PHI 5400 с использованием рентгеновского излучения Mg-K_α (энергия $h\nu = 1253.6 \text{ эВ}$) мощностью 300 Вт. Образцы помещались в вакуумную камеру не позднее, чем через 10 мин после окончания процесса сульфидирования.

Энергетическое положение пиков измерялось относительно положения пика углерода C 1s (285.5 эВ) [15].

Работа выхода электронов с поверхности полупроводника до и после сульфидирования определялась методом Кельвина путем измерения с помощью динамического конденсатора контактной разности потенциалов между полупроводником и пленкой золота толщиной 500 нм, нанесенной на подложку SiO₂ [16]. Металлический пробник был 40 мкм диаметром, а его работа выхода в ходе измерений изменялась не более чем на 15 мэВ. Работа выхода золота принималась равной 5.4 эВ [17].

Рамановские спектры регистрировались при комнатной температуре в диапазоне от 150 до 800 см⁻¹ на спектрометре Dilor XY, оборудованном многоканальным детектором и оптическим микроскопом, обеспечивающим фокусировку лазерного луча в пятно диаметром 1 мкм [18]. Возбуждение осуществлялось излучением линии с длиной волны $\lambda = 457.9$ нм Ar⁺-лазера (глубина проникновения излучения в InP 54.7 нм [19]); мощность лазера составляла 2.5 мВт. В соответствии с правилами отбора [20] в спектрах должны наблюдаться только оптические LO-фононы. Спектры снимались на воздухе.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Исследования сульфидированной поверхности *n*-InP (100) рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией и методом Кельвина

Обзорные рентгеновские фотоэлектронные спектры всех поверхностей содержат пики In, P, S, O, а спектры сульфидированных поверхностей еще и пик Si. Интенсивности пиков кислорода и углерода остаются практически неизменными при сульфидировании в водном растворе, а при сульфидировании в спиртовом они заметно уменьшаются. Толщина сульфидного покрытия, в единицах монослоев (МС), оцененная согласно [21], представлена в таблице. Все поверхности были обогащены индием. Самое высокое отношение In/P (1.61) наблюдалось у поверхности, обработанной в растворе (NH₄)₂S + *t*-C₄H₉OH, а самое низкое (1.43) у поверхности нессульфидированного полупроводника.

Поверхность	Толщина сульфидного покрытия, МС	Работа выхода, эВ	δ , нм	V_b , эВ
Несульфидированная (травленая в HF)	—	4.885	13.8	0.14
Сульфидированная в (NH ₄) ₂ S + H ₂ O	3.9	5.063	11.2	0.09 ÷ 0.14*
Сульфидированная в (NH ₄) ₂ S + <i>t</i> -C ₄ H ₉ OH	1.5	5.210	9.2	-0.06**

Примечание. *Разброс из-за различного сдвига пиков In 3d_{5/2} и P 2p.
**Отрицательная величина барьера означает изгиб зон вниз.

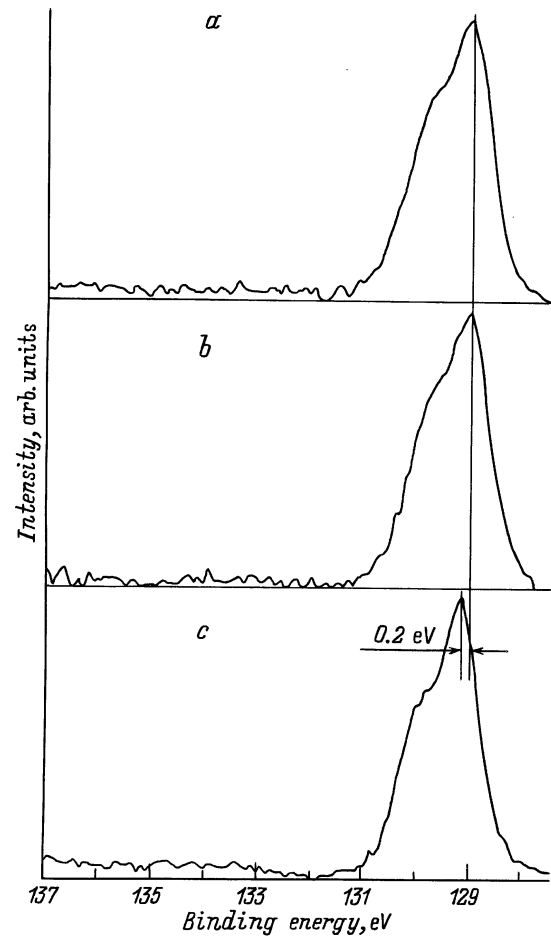


Рис. 1. Фотоэлектронные спектры P 2p трех различных поверхностей *n*-InP (100), предварительно травленных в HF: *a* — нессульфидированная поверхность; *b* — сульфидированная в водном растворе сульфида аммония (NH₄)₂S + H₂O; *c* — сульфидированная в растворе (NH₄)₂S + *t*-C₄H₉OH.

На рис. 1 и 2 представлены рентгеновские спектры P 2p и In 3d_{5/2}. Все спектры нормированы на максимальную высоту пика. Спектр P 2p нессульфидированного InP после травления в HF (рис. 1, *a*) содержит дублет, связанный с фосфидом индия в объемном полупроводнике, энергия P 2p_{3/2} которого составляет 129.0 эВ по отношению к положению уровня Ферми на поверхности. Принимая во внимание, что пик P 2p_{3/2} отстоит от края валентной зоны InP на 127.8 эВ [22], можно оценить исходный изгиб зон нессульфидированного полупроводника как 0.14 эВ. Спектр In 3d_{5/2} нессульфидированного полупроводника (рис. 2, *a*) содержит пик, связанный с объемным InP (с энергией 444.8 эВ), и небольшой пик около 445.5 эВ, связанный с окислами индия. Отметим, что кислород, наблюдаемый в обзорных спектрах, находится в основном в физсорбированном состоянии, так как его количество существенно превышает обнаруженное количество окислов индия, при этом окислов фосфора не наблюдалось совсем.

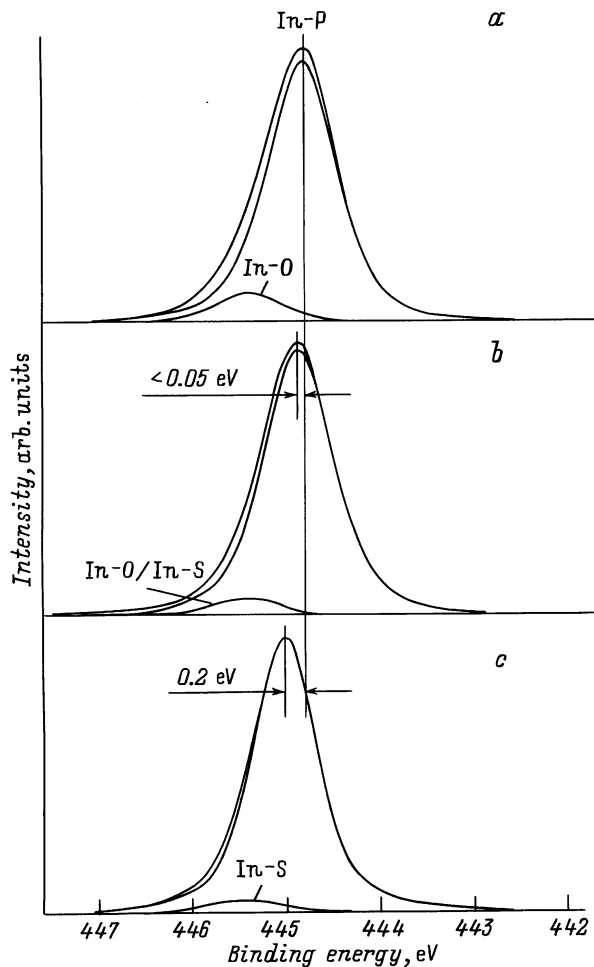


Рис. 2. Фотоэлектронные спектры $\text{In } 3d_{5/2}$ трех различных поверхностей n -InP (100), предварительно травленных в HF: *a* — несulfидированная поверхность; *b* — sulfидированная в водном растворе сульфида аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$; *c* — sulfидированная в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{S} + t\text{-C}_4\text{H}_9\text{OH}$.

При sulfидировании в водном растворе сульфида аммония спектр $\text{P } 2p$ практически не изменяется (рис. 1, *b*), а в спектре $\text{In } 3d_{5/2}$ немного уменьшается интенсивность пика 445.5 эВ, обусловленного оксидами (рис. 2, *b*). При этом наблюдался слабый сдвиг в высокоэнергетичную область (сдвиг < 0.05 эВ, т.е. меньший, чем точность определения энергии).

При sulfидировании с использованием раствора сульфида аммония в трет-бутиловом спирте положение пиков как $\text{P } 2p$ (рис. 1, *c*), так и $\text{In } 3d_{5/2}$ (рис. 2, *c*) смещается на 0.2 эВ относительно положения пиков несulfидированного полупроводника в сторону больших энергий связи, что свидетельствует о сдвиге поверхностного уровня Ферми в сторону зоны проводимости. Принимая во внимание величину изгиба зон на поверхности несulfидированного полупроводника (0.14 эВ), можно заключить, что после sulfидирования в растворе суль-

фида аммония в трет-бутиловом спирте поверхностный уровень Ферми находится выше дна зоны проводимости.

Форма спектра $\text{P } 2p$ при sulfидировании InP в растворе сульфида аммония в трет-бутиловом спирте не изменяется и никаких особенностей в области больших энергий связи, обусловленных образованием оксидов и сульфидов фосфора, не наблюдалось. Это обстоятельство свидетельствует в пользу того, что соединения со связями P-S хорошо растворимы в спиртовых растворах, так же, как и в водных [23].

В спектре $\text{In } 3d_{5/2}$ (рис. 2, *c*) InP, sulfидированного в растворе сульфида аммония в трет-бутаноле, химический сдвиг между двумя пиками уменьшается на 0.2 эВ по сравнению со спектром несulfидированного InP (рис. 2, *a*) или sulfидированного в водном растворе сульфида аммония (рис. 2, *b*). Как известно [24], оксиды и сульфиды индия трудно различимы средствами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, в отличие от оксидов и сульфидов галлия, где положение соответствующих пиков различается на $\sim 0.4 \div 0.6$ эВ [25]. Тем не менее, по аналогии с галлием, уменьшение химического сдвига высокоэнергетичной компоненты спектра $\text{In } 3d_{5/2}$ свидетельствует в пользу того, что эта компонента обусловлена главным образом сульфидами индия. Отметим, что аналогичный химический сдвиг для связей In-S наблюдался в [23].

На рис. 3 представлены спектры $\text{S } 2p$ InP, sulfидированного в растворах сульфида аммония в воде (рис. 3, *a*) и в трет-бутиловом спирте (рис. 3, *b*). Разложение спектров проводилось аналогично [8] с использовани-

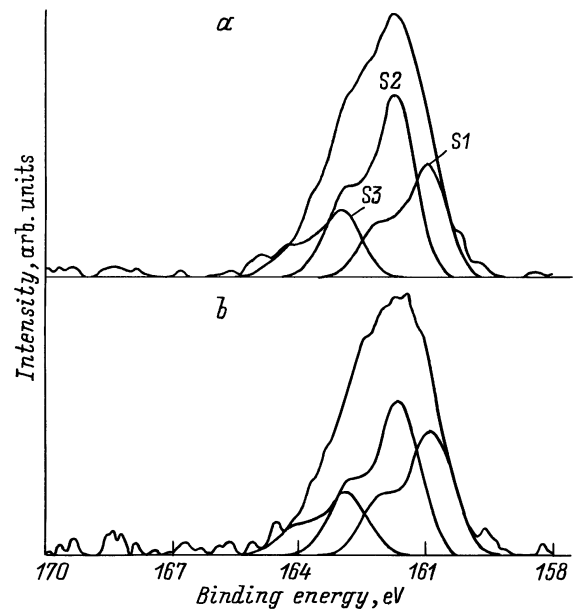


Рис. 3. Фотоэлектронные спектры $\text{S } 2p$ двух различных поверхностей n -InP (100), предварительно травленных в HF: *a* — sulfидированная в водном растворе сульфида аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$; *b* — sulfидированная в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{S} + t\text{-C}_4\text{H}_9\text{OH}$.

ем следующих параметров: отношение интенсивностей $2p_{3/2}:2p_{1/2} = 2:1$, энергия между $2p_{3/2}$ и $2p_{1/2}$ 1.08 эВ и полуширина пиков 1.2 эВ. В спектрах были выделены три различных состояния серы с энергиями пиков $p_{3/2}$ относительно потолка валентной зоны: 160.90 эВ (S1), 161.65 эВ (S2), 162.90 эВ (S3). Согласно [10] состояние S1 обусловлено серой, связанной с индием на поверхности, S2 — серой, занимающей место фосфора в приповерхностной области полупроводника, а S3 — элементарной серой на поверхности, адсорбированной на сульфидном покрытии.

Интенсивность пика S3 одинакова при сульфидировании в обоих растворах, а соотношение пиков S1 и S2 различно. Для InP, сульфидированного в водном растворе сульфида аммония, отношение интенсивностей S1:S2:S3 = 1.65:2.70:1, а для InP, сульфидированного в растворе сульфида аммония в трет-бутиловом спирте, это отношение 2.00:2.45:1.

Работа выхода n -InP (100) возрастает при сульфидировании как в водном, так и, еще в большей степени, в спиртовом растворе сульфида аммония (таблица).

3.2. Исследования приповерхностной обедненной области сульфидированного n -InP (100) рамановским рассеянием

Глубина приповерхностной области полупроводника может быть оценена с помощью анализа спектров рамановского рассеяния [26].

Принимая во внимание, что величина приповерхностного изгиба зон составляет $V_{b0} = 0.14$ эВ для нессульфидированного полупроводника, оценим глубину обедненной области δ по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0V_{b0}}{eN}},$$

где ε_0 — электрическая постоянная, $\varepsilon_s = 12.4$ — статическая диэлектрическая проницаемость InP, e — заряд электрона, N — концентрация доноров в InP. Произведенная таким образом оценка дает величину $\delta = 13.8$ нм.

Поскольку δ меньше глубины проникновения лазерного излучения в полупроводник, в рамановском спектре должны присутствовать как поверхностные, так и объемные моды рассеяния. Действительно, в рамановских спектрах (рис. 4) хорошо видны два пика. Пик L^- (303.7 см^{-1}) обусловлен рассеянием на спаренной фонон-плазмонной моде в объеме полупроводника на свободных носителях. Пик LO (341.9 см^{-1}) связан с обедненным слоем на поверхности полупроводника. В нессульфидированном InP интенсивность пика LO в 2 раза меньше интенсивности пика L^- (рис. 4, *a*).

Сульфидирование полупроводника в различных растворах приводит к изменению соотношения между объемным (L^-) и поверхностным (LO) пиками. При сульфидировании в водном растворе сульфида аммония пик (L^-) становится в 3 раза больше пика LO (рис. 4, *b*),

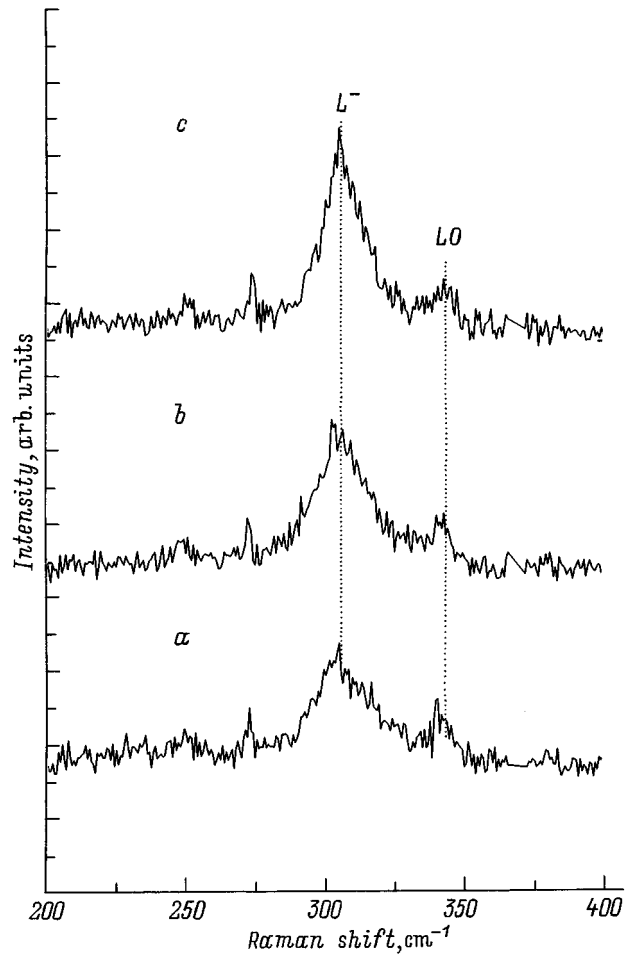


Рис. 4. Рамановские спектры трех различных поверхностей n -InP (100), предварительно травленных в HF: *a* — нессульфидированная поверхность; *b* — сульфидированная в водном растворе сульфида аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$; *c* — сульфидированная в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{S} + t\text{-C}_4\text{H}_9\text{OH}$.

а при сульфидировании в растворе сульфида аммония в трет-бутиловом спирте — в 4.5 раза (рис. 4, *c*). Таким образом, сульфидирование InP приводит к уменьшению глубины обедненной области полупроводника, причем к более существенному в растворе сульфида аммония в трет-бутиловом спирте.

Из отношения интенсивностей пиков $I(LO)/I(L^-)$ в соответствии с [12,26] вычислялась глубина обедненной области δ . Результаты представлены в таблице. В таблице приведены также величины приповерхностного изгиба зон V_b , полученные из данных рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Итак, при обработке поверхности n -InP (100) в водном растворе сульфида аммония поверхностный уровень Ферми E_{Fs} слабо сдвигается в направлении зоны проводимости; при этом слабо уменьшается глубина обедненной области полупроводника и увеличивается работа выхода электронов. Обработка поверхности n -InP (100) в растворе сульфида аммония в трет-бутиловом спирте

приводит к сдвигу поверхностного уровня Ферми в зону проводимости полупроводника, к более значительному уменьшению глубины обедненной области и увеличению работы выхода; при этом возрастает доля серы, связанной с атомами индия на поверхности полупроводника, по отношению к сере, занимающей место фосфора.

4. Обсуждение результатов

Из данных рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии вычислялась константа скорости реакции формирования сульфидного покрытия как отношение толщины сульфидного покрытия к концентрации серы в растворе и времени сульфидирования. Оказалось, что константа скорости примерно на порядок выше при сульфидировании n -InP в спиртовом растворе сульфида аммония, чем при сульфидировании в водном растворе. Аналогичные результаты были получены при сульфидировании GaAs в различных растворах сульфида аммония [27].

Анализируя разложение спектров $S2p$ (рис. 3), можно сделать вывод, что при увеличении константы скорости реакции формирования сульфидного покрытия доля состояния $S1$ возрастает по отношению к доле состояния $S2$, т.е., как и при отжиге сульфидированной поверхности [12,14], возрастает соотношение между серой, связанной с индием на поверхности, и серой, замещающей фосфорные вакансии в приповерхностной области полупроводника.

Константа скорости реакции сульфидирования, согласно уравнению Аррениуса, характеризует энергию, выделяющуюся при адсорбции атомов на поверхности полупроводника. Тот факт, что константы скорости при сульфидировании в растворах сульфида аммония в трет-бутиловом спирте и в воде различаются примерно на порядок, позволяет оценить разницу энергий адсорбции при сульфидировании в этих растворах. При сульфидировании в растворе сульфида аммония в трет-бутиловом спирте энергия, выделяющаяся при адсорбции атома серы, примерно на 0.06 эВ выше, чем при сульфидировании в водном растворе. Теоретические исследования поверхности InP (100), покрытой атомами S [28], показали, что существует несколько возможных атомных структур такой поверхности, отличающихся взаимным расположением атомов серы и фосфора, причем разница в энергиях между некоторыми структурами менее 0.1 эВ. При этом указывалось, что реальная атомная структура поверхности InP (001)-S будет являться статистической суммой различных близких по энергии структур и особо подчеркивалась важность кинетических процессов при установлении структуры поверхности. Разложение спектров $S2p$ (рис. 3) свидетельствует в пользу того, что кинетические процессы могут оказывать существенное влияние на атомную структуру поверхности.

С другой стороны, увеличение константы скорости реакции формирования сульфидного покрытия ведет к уменьшению глубины обедненной области, а также к

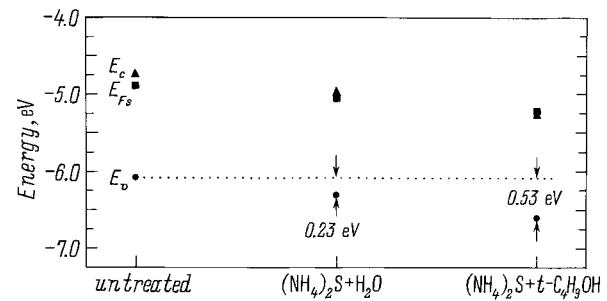


Рис. 5. Положение поверхностного уровня Ферми (E_{Fs}) и края зоны проводимости (E_c) и валентной зоны (E_v) относительно уровня вакуума для трех различных поверхностей n -InP (100) — нессульфидированной (травленной в HF), сульфидированной в $(NH_4)_2S + H_2O$ и в $(NH_4)_2S + t-C_4H_9OH$.

сдвигу поверхностного уровня Ферми в направлении зоны проводимости, что является следствием изменения электронной структуры поверхности и может служить еще одним косвенным свидетельством в пользу изменения атомной структуры сульфидированной поверхности InP (100).

Из данных рамановской спектроскопии видно, что уменьшение глубины обедненной области после пассивации в водном растворе должно свидетельствовать об уменьшении приповерхностного барьера (на 0.05 эВ). Однако данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии этого не подтверждают. Наблюдаемое противоречие свидетельствует о том, что при анализе рамановских спектров необходимо учитывать увеличение уровня легирования приповерхностной области полупроводника, поскольку количество серы, занимающей фосфорные вакансии, (компонента $S2$) довольно велико. Количество серы, связанной с компонентой $S2$, вполне позволяет обеспечить такое возрастание концентрации доноров в приповерхностной области полупроводника. Отметим, что возрастание концентрации доноров при сульфидировании наблюдалось при обработке GaP в водном растворе сульфида аммония [29].

Вместе с тем изменение глубины обедненной области при сульфидировании в растворе сульфида аммония в трет-бутиловом спирте уже не может быть объяснено только дополнительным легированием приповерхностной области полупроводника, так как и количество серы на поверхности, и количество серы, связанной с компонентой $S2$, — меньшее, чем при сульфидировании в водном растворе.

Из совокупности данных рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и метода Кельвина видно, что сульфидирование приводит к возрастанию энергии ионизации полупроводника: в водном растворе на 0.23 эВ, а в спиртовом — на 0.53 эВ (рис. 5). Согласно [30], изменение энергии ионизации полупроводника происходит вследствие изменения дипольного момента на поверхности. Два факта — большее изменение энергии ионизации,

а следовательно, величины дипольного момента на поверхности *n*-InP (100), сульфидированного в спиртовом растворе, чем при сульфидировании в водном растворе, и большее при этом количество серы, связанной с атомами индия (состояние S1), — свидетельствуют в пользу того, что дипольный момент обусловлен атомами серы, связанными с поверхностными атомами индия. С другой стороны, больший дипольный момент может быть обусловлен и большей эффективной электроотрицательностью иона серы в спиртовом растворе [31].

5. Заключение

С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, метода Кельвина и рамановского рассеяния показано, что при обработке *n*-InP (100) в растворе сульфида аммония в трет-бутиловом спирте поверхностный уровень Ферми смещается в направлении зоны проводимости, а при обработке в водном растворе остается практически неизменным. Уменьшение глубины обедненной области при сульфидировании может быть обусловлено как увеличением уровня легирования приповерхностной области за счет заполнения серой фосфорных вакансий, так и изменением приповерхностного барьера полупроводника. Более сильное увеличение энергии ионизации полупроводника происходит при сульфидировании *n*-InP (100) в спиртовом растворе, чем в водном.

Список литературы

- [1] H. Ishimura, K. Sasaki, H. Tokuda. *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **106**, 405 (1990).
- [2] R. Iyer, D.L. Lile. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 437 (1991).
- [3] H. Oigawa, J. Fan, Y. Nannichi, H. Sugahara, M. Oshima. *Japan. J. Appl. Phys.*, **30**, L322 (1991).
- [4] T.K. Paul, D.N. Bose. *J. Appl. Phys.*, **70**, 7387 (1991).
- [5] A.J. Howard, C.I.H. Ashby, J.A. Lott, R.P. Schneider, R.F. Corless. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **12**, 1063 (1994).
- [6] L.F. DeChiaro, C.J. Sandroff. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **39**, 561 (1992).
- [7] C.W. Wilmsen, K.M. Geib, J. Shin, R. Iyer, D.L. Lile, J.J. Pouch. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **7**, 851 (1989).
- [8] Y. Fukuda, Y. Suzuki, N. Sanada, S. Sasaki, T. Ohsawa. *J. Appl. Phys.*, **76**, 3059 (1994).
- [9] R.W.M. Kwok, W.M. Lau. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **10**, 2515 (1992).
- [10] T. Chassé, H. Peisert, P. Streubel, R. Szargan. *Surf. Sci.*, **331–333**, 434 (1995).
- [11] V.N. Bessolov, E.V. Konenkova, M.V. Lebedev. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14**, 2761 (1996).
- [12] V.N. Bessolov, M.V. Lebedev, D.R.T. Zahn. *J. Appl. Phys.*, **82**, 2640 (1997).
- [13] V.N. Bessolov, M.V. Lebedev, Yu.M. Shernyakov, B.V. Tsarenkov. *Mater. Sci. Eng. B*, **44**, 380 (1997).
- [14] R. Hakimi, M.-C. Amann. *Semicond. Sci. Technol.*, **12**, 778 (1997).
- [15] C.S. Sundararaman, S. Poulin, J.F. Currie, R. Leonelli. *Can. J. Phys.*, **69**, 329 (1991).

- [16] R. Maeckel, H. Baumgaertner, *J. Ren. Rev. Sci. Instrum.*, **64**, 694 (1993).
- [17] D.R. Lide. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, 1995).
- [18] G. Bauer, W. Richter. *Optical Characterization of Epitaxial Semiconductor Layers* (Springer, Berlin, 1996).
- [19] D.E. Aspnes, A.A. Studna. *Phys. Rev. B*, **27**, 985 (1983).
- [20] W. Haes, R. Loudon. *Scattering of Light by Crystal* (Wiley, N.Y., 1978).
- [21] M.S. Carpenter, M.R. Melloch, B.A. Cowans, Z. Dardas, W.N. Delgass. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **7**, 845 (1989).
- [22] W.M. Lau, R.W.M. Kwok, S. Ingre. *Surf. Sci.*, **271**, 579 (1992).
- [23] Y. Tao, A. Yelon, E. Sacher, Z.H. Lu, M.J. Graham. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2669 (1992).
- [24] I.K. Han, E.K. Kim, J.I. Lee, S.H. Kim, K.N. Kang, Y. Kim, H. Lim, H.L. Park. *J. Appl. Phys.*, **81**, 6986 (1997).
- [25] H. Sugahara, M. Oshima, H. Oigawa, H. Shigekawa, Y. Nannichi. *J. Appl. Phys.*, **69**, 4349 (1991).
- [26] J. Geurts. *Surf. Sci. Rep.*, **18**, 1 (1993).
- [27] V.N. Bessolov, E.V. Konenkova, M.V. Lebedev. *Mater. Sci. Eng. B*, **44**, 376 (1997).
- [28] Z. Tian, M.W.C. Dharma-wardana, Z.H. Lu, R. Cao, L.J. Lewis. *Phys. Rev. B*, **55**, 5376 (1997).
- [29] L. Jedral, H.E. Ruda, R. Sodhi, H. Ma, L. Mannik. *Can. J. Phys.*, **70**, 1050 (1992).
- [30] W. Mönch. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **7**, 1216 (1989).
- [31] V.N. Bessolov, A.F. Ivankov, M.V. Lebedev. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **13**, 1018 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

Surface of *n*-InP (100) passivated in sulfide solutions

V.N. Bessolov, M.V. Lebedev, D.R.T. Zahn*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia
*Institut für Physik, TU-Chemnitz,
D-09107 Chemnitz, Germany

Abstract Using x-ray photoelectron spectroscopy, the Kelvin probe method, and Raman scattering spectroscopy the properties of *n*-InP (100) passivated in aqueous and tert-butanol-based solutions of ammonium sulfide have been studied. It is shown that both treatments result in the decrease of the depletion layer width, in a shift of the surface Fermi level position towards the conduction band, and in an increase of the electron work function and the ionization energy of the semiconductor. The treatment in the alcoholic sulfide solution has a stronger effect than that in the aqueous one. The treatment in the tert-butanol based sulfide solution leads to a surface Fermi level shift to 0.2 eV and an increase of the ionization energy by 0.53 eV.

E-mail: mlebed@triat.ioffe.rssi.ru (M.V. Lebedev)