

УДК 535.361:539.2:541.135:669.23

*Л.В. Фомина, С.А. Безносок,  
А.Г. Бочкарев, С.Е. Лебеденко, В.М. Сподарев***Халькогенная обработка при формировании  
выпрямляющих контактов металл VIII группы –  
полупроводник типа A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>**

Из всего многообразия технологических применений твердых тел часто используются в первую очередь их поверхностные свойства – механические свойства металлических конструкций, электрические свойства в электронике, химические в процессах катализа, оптические в приборостроении. Объем образца в этих областях приложений часто играет лишь роль подложки, которую легко заменить на иную. Когда же выбор материала диктуется его объемными свойствами, часто оказывается, что свойства естественной поверхности непригодны для намеченного использования, и возникает необходимость модифицировать их соответствующим образом или снабдить образец из выбранного материала искусственно созданными поверхностными гетероструктурами, обладающими требуемыми свойствами [1].

За последние сорок лет произошел технологический прорыв в области создания гетероструктур для высокоскоростной микроэлектроники (Нобелевская премия по физике за 2000 г.). Эти работы создали материальную основу современных информационных технологий. К базовым элементам электронных устройств относятся омические и выпрямляющие контакты, создаваемые на границах раздела фаз металл–полупроводник [2, 3]. Контакты представляют собой гетероструктуры из микрослоев полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны, металла и разделяющих их нанослоев поверхностных соединений. Параметры полупроводниковых электронных устройств, их стабильность при работе в неблагоприятных условиях во многом определяются свойствами гетероструктур металл–полупроводник. Изучение свойств контактов металл–полупроводник указывает на определяющую роль межфазной границы в формировании поверхностно-барьерных структур [3–6]. Строение границы раздела контактирующих материалов задается последовательностью технологических стадий, формирующих приграничную область. Обычно при изготовлении барьерных структур важными являются две стадии. Это, прежде всего, заключительная стадия обработки поверхности полупроводника, которая является определяющей в формировании первичной пленки поверхностных

соединений. А также стадия нанесения атомов металла на обработанную поверхность полупроводника, когда качество получаемых металлических покрытий определяется особенностями механизмов нанесения атомов металла на поверхность полупроводника и включения их в промежуточный слой создаваемых гетероструктур.

Различные виды обработок, в особенности финишное травление и отмывка, а также длительное контактирование поверхности полупроводника с воздухом способствуют образованию оксидного (гидроксидного) слоя толщиной от 0,5 до нескольких десятков нм [1, 5, 7–10]. Это ведет к химической неоднородности поверхности и определяет дальнейшие процессы взаимодействия поверхности с окружающей средой. Состав остаточного оксида на поверхности полупроводника неоднороден по глубине. Он зависит от природы и соотношения составляющих травительных компонентов [8, 11]. Окисление поверхности полупроводника – следствие действия воздуха после травления [12, 13]. Граница раздела кристалл – оксидный слой имеет значительную дефектность. На границе арсенида галлия с оксидами всегда присутствуют дефекты стехиометрического состава, участвующие в формировании поверхностных электронных состояний. Кроме состояний, расположенных на поверхности самого полупроводника, появляются поверхностные состояния внутри и на внешней поверхности оксида [14].

В последние годы широко и успешно разрабатывается халькогенная предварительная подготовка поверхности полупроводников [4, 5]. Она широко применяется при создании гетероструктур на основе p-металлов и полупроводников типа A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>. Халькогенидная обработка, модификация атомами серы или селена, рассмотренная в работах [4, 5, 15–19], позволяет осуществлять химическую и электронную пассивацию поверхности и поэтому является многообещающим методом в технологии полупроводников A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>. Использование халькогенидной пассивации, с одной стороны, позволяет улучшить характеристики различных приборов за счет существенного уменьшения плотности поверхностных состояний, концентрации ловушек [15, 16] и снижения скорости поверхностной рекомбинации, а с дру-

гой стороны, позволяет существенно замедлить процессы окисления полупроводниковой поверхности в атмосфере.

Положительный эффект халькогенирования связывают с формированием пассивирующего покрытия на полупроводнике, условно реализующегося в два этапа. На первом этапе происходит удаление с поверхности оксидного слоя, на втором – взаимодействие с элементами полупроводника. Как правило, после сульфидирования на поверхности присутствует смесь различных сульфидов (а также и оксосульфидов). Приближение к единице коэффициентов идеальности контактов металл – арсенид галлия при сульфидной обработке авторы [5, 17–19] объясняют возникновением связей S-S-; S-Ga-; S-As-, наличие которых подтверждают данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и дифракции медленных электронов. Кроме того, на поверхности остается большое количество элементарного мышьяка.

Нами проведен эксперимент [20] по изучению свойств контактов металл – полупроводник с использованием для подготовки поверхности GaAs соединений серы и селена. В качестве вещества, содержащего серу, мы использовали водный раствор сульфида натрия. Термодинамический расчет по данным [21–23] подтверждает энергетическую результативность процесса сульфидирования реальной поверхности арсенида галлия (табл. 1). В связи с большей хи-

мической ядовитостью селенидов щелочных металлов, чем сульфидов, мы предпочли использовать для химической обработки поверхности арсенида галлия раствор не селенида натрия, а селенита. Этот реагент в зависимости от партнера может проявлять как восстановительные, так и окислительные свойства [24]. Из анализа таблицы 2 следует, что селенит натрия должен быть эффективен в реакциях окисления элементарного мышьяка, присутствующего на поверхности арсенида галлия после стандартной подготовки образцов (с использованием серноперекисного травителя) и неудаляемого после обработки в растворах сульфида натрия. В то же время элементарный мышьяк может восстановить ионы  $\text{SeO}_3^{2-}$  до селенид ионов (см. табл. 2–3). Последние могут взаимодействовать с оксидами галлия и мышьяка (см. реакцию 5 в табл. 1) и со свободной от оксидов поверхностью арсенида галлия (см. реакцию 3 в табл. 1). Таким образом, действие селенит ионов (в отсутствие кинетических затруднений) должно сказаться по всем трем направлениям в процессе преобразования реальной поверхности арсенида галлия: удаление элементарного мышьяка, удаление оксидов, гетеровалентное замещение атомов мышьяка в анионной подрешетке арсенида галлия. Однако следует ожидать, что многостадийность реакций, протекающих между реальной поверхностью полупроводника и раствором селенита натрия, будет способствовать недоста-

Таблица 1

Изменение энергии Гиббса реакций в системе GaAs (InP)-раствор

| № | Уравнение реакции  | $\Delta G^{\circ}_{298}$ , кДж/(моль оксида, сульфида) |
|---|--|--|
| 1 | $2\text{GaAs} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{As}_2\text{O}_3 + 6\text{H}_2\uparrow$                                       | 1  |
| 2 | $2\text{GaAs} + 6\text{HS}^- + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ga}_2\text{S}_3 + \text{As}_2\text{S}_3 + 6\text{OH}^- + 6\text{H}_2\uparrow$         | -101   |
| 3 | $2\text{GaAs} + 6\text{HSe}^- + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ga}_2\text{Se}_3 + \text{As}_2\text{Se}_3 + 6\text{OH}^- + 6\text{H}_2\uparrow$      | -610   |
| 4 | $\text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{As}_2\text{O}_3 + 6\text{HS}^- \rightarrow \text{Ga}_2\text{S}_3 + \text{As}_2\text{S}_3 + 6\text{OH}^-$                    | -102   |
| 5 | $\text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{As}_2\text{O}_3 + 6\text{HSSe}^- \rightarrow \text{Ga}_2\text{Se}_3 + \text{As}_2\text{Se}_3 + 6\text{OH}^-$                | -610   |
| 6 | $2\text{InP} + 3\text{HS}^- + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{In}_2\text{S}_3 + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{HPO}_4^{2-} + 8\text{H}_2\uparrow$   | -544   |
| 7 | $2\text{InP} + 3\text{HSe}^- + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{In}_2\text{Se}_3 + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{HPO}_4^{2-} + 8\text{H}_2\uparrow$ | -540   |
| 8 | $\text{In}_2\text{O}_3 + 3\text{HS}^- \rightarrow \text{In}_2\text{S}_3 + 3\text{OH}^-$  | -15  |
| 9 | $\text{In}_2\text{O}_3 + 3\text{HSe}^- \rightarrow \text{In}_2\text{Se}_3 + 3\text{OH}^-$  | -11  |

Таблица 2

Нормальные окислительные потенциалы (НВЭ) [24]

| № | Реакция  | Потенциал $E^{\circ}$ , В |
|---|--|---------------------------|
| 1 | $\text{Se} + 2e = \text{Se}^{2-}$  | -0.92                     |
| 2 | $\text{H}_2\text{SeO}_3 + 4\text{H}^+ + 4e = \text{Se} + 3\text{H}_2\text{O}$    | 0.740                     |
| 3 | $\text{SeO}_3^{2-} + 3\text{H}_2\text{O} + 4e = \text{Se} + 6\text{OH}^-$        | -0.366                    |
| 4 | $\text{SeO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{SeO}_3^{2-} + 2\text{OH}^-$ | 0.05                      |
| 5 | $\text{As} + 3\text{H}^+ + 3e = \text{AsH}_3$                                    | -0.60                     |
| 6 | $\text{As} + 3\text{H}_2\text{O} + 3e = \text{AsH}_3 + 3\text{OH}^-$             | -1.37                     |
| 7 | $\text{HAsO}_2 + 3\text{H}^+ + 3e = \text{As} + 2\text{H}_2\text{O}$             | 0.247                     |
| 8 | $\text{AsO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} + 3e = \text{As} + 4\text{OH}^-$           | -0.68                     |

Изменение энергии Гиббса реакций в системе GaAs (InP)-раствор селенита натрия

| №  | Уравнение реакции   | $\Delta G^{\circ}_{298}$ кДж/моль |
|----|---|-----------------------------------|
| 1  | $\text{As}_2\text{O}_3 + 3\text{SeO}_3^{2-} \rightarrow 2\text{As} + 3\text{SeO}_4^{2-}$  | 362                               |
| 1a | $\text{As}_2\text{O}_3 + 3\text{HSeO}_3^- \rightarrow 2\text{As} + 3\text{HSeO}_4^-$  | 454                               |
| 2  | $4\text{As} + 3\text{SeO}_3^{2-} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2\text{AsO}_3^- + 3\text{Se} + 2\text{OH}^-$                             | -365                              |
| 2a | $4\text{As} + 3\text{HSeO}_3^- + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_3\text{AsO}_3 + 3\text{Se} + 3\text{OH}^-$                                 | -376                              |
| 3  | $2\text{As} + \text{HSeO}_3^- + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_3\text{AsO}_3 + \text{HSe}^-$   | -112                              |
| 4  | $\text{Se} + \text{SeO}_3^{2-} + \text{OH}^- \rightarrow \text{HSe}^- + \text{SeO}_4^{2-}$  | 132                               |
| 4a | $\text{Se} + \text{HSeO}_3^- + \text{OH}^- \rightarrow \text{HSe}^- + \text{HSeO}_4^-$  | 162                               |
| 5  | $\text{Ga}_2\text{O}_3 + 3\text{HSe}^- \rightarrow \text{Ga}_2\text{Se}_3 + 3\text{OH}^-$   | -17                               |
| 6  | $2\text{GaAs} + 6\text{HSe}^- + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ga}_2\text{Se}_3 + \text{As}_2\text{Se}_3 + 6\text{OH}^- + 6\text{H}_2\uparrow$ | -610                              |
| 7  | $6\text{InP} + 7\text{SeO}_3^{2-} + 6\text{OH}^- \rightarrow \text{Se}^{2-} + 6\text{PO}_4^{3-} + 6\text{InSe} + 3\text{H}_2\text{O}$                 | -3411                             |
| 8  | $4\text{InP} + 5\text{HSeO}_3^- + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{In}_2\text{Se}_3 + 2\text{InSe} + 4\text{HPO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$          | -2089                             |

точной селективности процесса по второму и третьему направлениям. В связи с этим применение комбинированной (сульфидно-селенитной) обработки поверхности арсенида галлия должно способствовать большей эффективности процесса преобразования его поверхности. Если применить сочетание сульфидной и селенитной обработок поверхности полупроводника, то можно ожидать более совершенной границы арсенид галлия – халькогенид галлия (мышьяка) и, следовательно, повышения стабильности параметров созданных на этой границе выпрямляющих контактов металл – полупроводник (барьеров Шоттки) к воздействию высоких температур и кислорода воздуха.

В таблицах 4, 5 сопоставляются параметры выпрямляющих контактов Ni-GaAs *n*-типа, полученные электроосаждением никеля из сульфатного электролита при плотности тока 2 мА/см<sup>2</sup>

на поверхность полупроводника, подвергнутую различным вариантам халькогенной обработки. Анализ таблиц 4, 5 позволяет сделать вывод о большей стабильности контактов, полученных после комбинированной обработки поверхности полупроводника, как при термическом воздействии, так и при хранении в течение 12 суток в сравнении с контактами, полученными после обработки только в одном из растворов.

На следующем этапе работы, используя халькогенную обработку поверхности полупроводника, проведены эксперименты по формированию выпрямляющих контактов Rh-InP *n*-типа. Реальная поверхность фосфида индия, покрытая слоем естественного окисла, содержит оксиды и фосфаты индия, но не содержит элементарного фосфора [5, 7]. Сульфидирование InP в растворах приводит к формированию на поверх-

Таблица 4

Термическая деградация контактов Ni-GaAs *n*-типа

| Обработка   | Параметры | Температура, °C |           |           |           |           |           |           |
|---|-----------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   |           | 25              | 50        | 100       | 150       | 200       | 250       | 300       |
| Na <sub>2</sub> S                                   | β         | 1.03±0.02       | –         | 1.06±0.05 | 1.12±0.05 | 1.16±0.03 | 1.16±0.03 | 1.17±0.04 |
|   | Φ, эВ     | 0.97±0.05       | –         | 0.92±0.06 | 0.91±0.09 | 0.94±0.03 | 0.90±0.08 | 0.9±0.1   |
| Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>                    | β         | 1.01±0.02       | 1.00±0.02 | 1.06±0.01 | 1.07±0.02 | 1.07±0.03 | 1.09±0.02 | 1.15±0.03 |
|   | Φ, эВ     | 0.77±0.03       | 0.76±0.02 | 0.76±0.01 | 0.75±0.04 | 0.75±0.03 | 0.74±0.05 | 0.72±0.04 |
| Na <sub>2</sub> S, Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> | β         | 1.02±0.02       | 1.03±0.02 | 1.02±0.02 | 1.02±0.02 | 1.04±0.03 | 1.05±0.03 | 1.06±0.02 |
|   | Φ, эВ     | 0.63±0.01       | 0.64±0.03 | 0.64±0.03 | 0.63±0.02 | 0.64±0.03 | 0.64±0.02 | 0.65±0.02 |

Таблица 5

Кинетика деградации контактов Ni-GaAs *n*-типа на воздухе при 25 °C

| Обработка   | Параметры | Время, час |           |           |           |           |           |
|---|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   |           | 0          | 24        | 72        | 168       | 240       | 288       |
| Na <sub>2</sub> S                                   | β         | 1.02±0.002 | 1.02±0.03 | 1.08±0.07 | 1.08±0.06 | 1.11±0.03 | –         |
|   | Φ, эВ     | 0.88±0.05  | 0.90±0.02 | 0.89±0.02 | 0.76±0.03 | 0.78±0.04 | –         |
| Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>                    | β         | 1.01±0.04  | 1.06±0.03 | 1.11±0.04 | 1.18±0.03 | 1.21±0.05 | –         |
|   | Φ, эВ     | 0.84±0.03  | 0.83±0.03 | 0.82±0.04 | 0.79±0.03 | 0.79±0.05 | –         |
| Na <sub>2</sub> S, Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> | β         | 1.01±0.02  | 1.01±0.02 | 1.02±0.02 | 1.04±0.03 | 1.05±0.01 | 1.05±0.03 |
|   | Φ, эВ     | 0.63±0.01  | 0.63±0.01 | 0.63±0.01 | 0.62±0.01 | 0.61±0.02 | 0.62±0.02 |

ности связей In-S и к отсутствию связей P-S. Сера замещает фосфор в приповерхностных монослоях полупроводника [5, 25]. В таблице 6 представлены электрофизические параметры контактов Rh-InP *n*-типа в зависимости от варианта предварительной обработки поверхности полупроводника. Электроосаждение родия проводили из сульфатного электролита при плотности тока 20 мА/см<sup>2</sup>. Измерение вольт-амперных характеристик контактов осуществляли при температуре 295–300 К. Расчет электрофизических параметров контактов проводили в рамках теории термоэлектронной эмиссии [26]. Контакты Rh-InP *n*-типа по коэффициенту идеальности уступают контактам на основе арсенида галлия. Это можно связать с особенностями токопереноса в диодах на фосфиде индия [26], особенностями электроосаждения родия. Высота барьера контактов составляет около 0.6 эВ. Время халькогенной обработки поверхности InP перед электроосаждением родия вдвое превышает таковое для поверхности GaAs [27]. Это можно объяснить меньшими константами скорости реакций взаимодействия InP с халькогенами. В случае селенитной подготовки поверхности фосфида индия контакты имели большую стабильность параметров к воздействию повышенных температур и кислорода воздуха, чем при кислотной обработке. Термодинамические расчеты процессов халькогенирования поверхности фосфида индия (табл. 1, 3) свидетельствуют об их самопроизвольности

Таблица 6  
Электрофизические параметры контактов Rh-InP *n*-типа при 25 °С

| Параметры | Вариант обработки |                       |                                      |
|-----------|-------------------|-----------------------|--------------------------------------|
|           | P-P HCl           | P-P Na <sub>2</sub> S | P-P Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> |
| β         | 1.2±0.1           | 1.4±0.1               | 1.25±0.08                            |
| Φ, эВ     | 0.60±0.04         | 0.63±0.04             | 0.60±0.01                            |

Геометрические кристаллохимические факторы при формировании многослойных структур имеют значительное влияние на дефектность, напряженность и, в конечном счете, стабильность границ разделов получаемых структур. Нами предложено объяснение улучшения характеристик барьеров Шоттки, полученных на пассивированных в сульфидных (селенитных) ра-

створах поверхностях полупроводников, на основе моделирования структуры наноскопического гетероперехода металл – халькогенид – полупроводник A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> с необходимыми полуколичественными расчетами для этих моделей. Рассмотрим это на примере арсенида галлия.

Использование халькогенирования поверхности арсенида галлия из водных растворов приводит к формированию слоя халькогенидов толщиной в несколько атомных слоев [5]. При этом возможно гетеровалентное замещение атомов мышьяка на атомы халькогена в решетке арсенида галлия или (и) образование на поверхности полупроводника зародышей новой фазы полупроводников типа A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup>, имеющих слоистую структуру.

При гетеровалентном замещении атомов мышьяка в анионной подрешетке GaAs атомами халькогена наименьшая дефектность поверхностного нанослоя будет в случае атомов селена (табл. 7). Дальнейшее электроосаждение на эту поверхность металла приведет к формированию выпрямляющего контакта, свойства которого будут зависеть, в частности, от геометрического соответствия структур полупроводника и металла. Используемые нами в эксперименте полупроводники и металлы имеют ГЦК решетки, параметры которых приведены в таблице 8. На рисунке 1 показана модель наиболее когерентного сопряжения полупроводника и металла по направлению [111]. Видна структура 3:2 точных

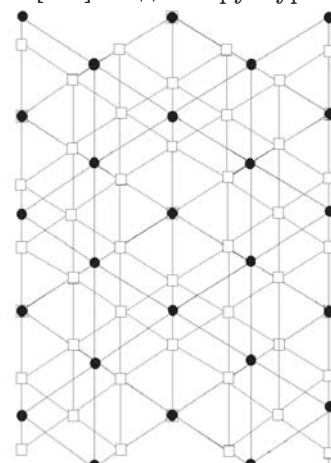


Рис. 1. Когерентное сопряжение контактирующих поверхностей (111) металл и GaX, где □ - атом Ir, Rh, ● - атом X (X = As, S, Se)

Таблица 7

Кристаллохимические и электрохимические параметры атомов граничного нанослоя контактов металл-полупроводник

| Элемент                           | Ni   | Rh   | Ir   | P    | In   | Ga   | As   | Se   | S    | O    |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ковалентный радиус, Å             | 1.15 | 1.25 | 1.27 | 1.06 | 1.44 | 1.26 | 1.21 | 1.16 | 1.04 | 0.73 |
| Атомный радиус, Å                 | 1.24 | 1.34 | 1.36 | 1.28 | 1.66 | 1.41 | 1.39 | 1.40 | 1.27 | –    |
| Электроотрицательность по Полингу | 1.8  | 2.2  | 2.2  | 2.1  | 1.7  | 1.6  | 2.0  | 2.4  | 2.5  | 3.5  |



Кристаллографические параметры веществ

| Соединение | Система   | Параметры, Å   | Углы  |
|------------|-----------|--|---|
| GaAs       | Кубич.    | a = 5.69   | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$            |
| InP        | Кубич.    | a = 5.86   | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$            |
| GaS        | Гексагон. | a = b = 3.585, c = 15.5                                    | $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ |
| GaSe       | Гексагон. | a = b = 3.755, c = 15.94                                   | $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ |
| InS        | Орторомб. | a = 3.94, b = 4.44, c = 10.64                              | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$            |
| InSe       | Гексагон. | a = 4.00, c = 16.70 ( $\epsilon$ ), c = 24.95 ( $\gamma$ ) | $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ |
| Ir, Rh, Ni | Кубич.    | a = 3.839, a = 3.803, a = 3.524                            | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$            |

периодических наложений атомов металла на атомы полупроводника. Как видно из таблицы 8, наименьшие напряжения следует ожидать для контактов используемых полупроводников с платиновыми металлами, а не с никелем.

Для построения геометрической модели гетероперехода  $A^{III}B^V - A^{III}B^{VI}$  (на примере GaAs – GaS) в модуле «Crystals» программного пакета HyperChem 7,0 использовали параметры ячейки [29] GaS и кристаллографические координаты атомов в этой ячейке. Координаты атомов в ячейке получены при помощи базы данных «Cambridge Structural Database». Структура сульфида галлия представлена на рисунке 2. При помощи графического интерфейса пакета HyperChem 7,0 построена модель гетероперехода GaAs – GaS (рис. 3).

Из рисунка 3 б видно, что каждый атом серы в нижнем слое GaS практически точно «садится» на один атом галлия в верхнем слое GaAs, за счет чего на переходе GaAs – GaS образуются ковалентные двухцентровые связи Ga – S, причем каждый атом серы в нижнем слое GaS связан с одним атомом галлия на поверхности GaAs, благодаря чему сульфид галлия прочно «прикрепляется» к поверхности арсенида. Очевидно, что ближайшие слои серы в сульфиде связаны си-

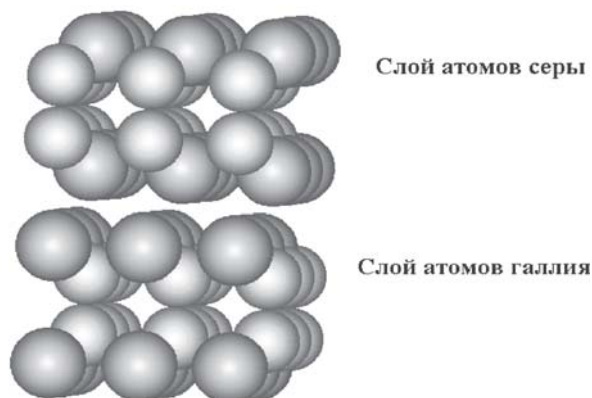


Рис. 2. Кристаллическая структура сульфида галлия (в основании лежат 9 ячеек)

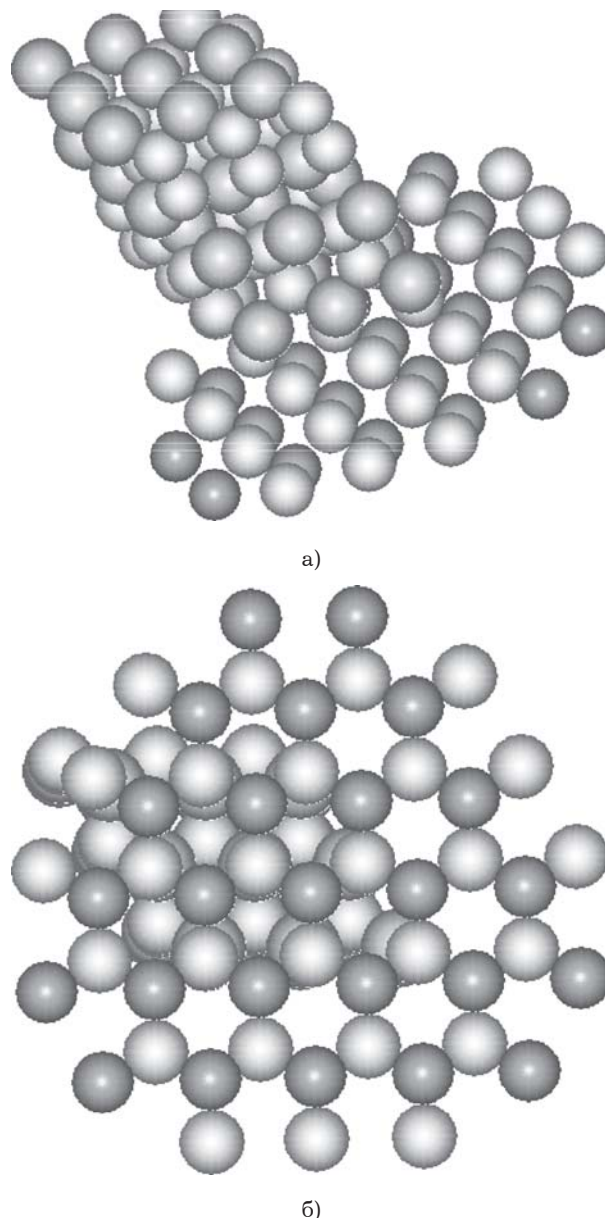


Рис. 3. Модель «посадки» сульфида галлия поверхность арсенида галлия типа (111)A; а) вид со стороны сульфида галлия, б) вид «изнутри» арсенида галлия  
лами Ван-дер-Ваальса (см. рис. 2) подобно слоям углерода в графите. Этим объясняется ограни-

ченная толщина образующегося слоя сульфида галлия, приводимая в литературе [5].

Согласно представленным моделям, при осаждении металла на пассивированную поверхность арсенида галлия на переходе металл – сульфид галлия образуются супрамолекулярные связи, типа, Ni – S [30], а решетки арсенида галлия, сульфида галлия и металла оказываются сопряженными. Эти обстоятельства облегчают переход электронов через потенциальный барьер на границе металл – полупроводник, что ведет к улучшению свойств барьера Шоттки. Исходя из оценки кристаллических решеток селенида и фосфида индия, можно ожидать подо-

бие в строении границы раздела InP – InSe – Me.

Таким образом, использование физико-химических подходов позволяет разработать технологии получения контактов с заранее заданными электрофизическими свойствами посредством выбора специфических химических и электрохимических методов нанесения материалов.

Авторы статьи выражают благодарность доценту кафедры неорганической химии АлтГУ М.К. Котвановой за научные консультации и помощь при работе с базой данных «Cambridge Structural Database».

## Литература

1. Бехштетт Ф., Эндерлайн Р. Поверхности и границы раздела полупроводников. М., 1990.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984.
3. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. М., 1991.
4. Matukas J., Meskinis S., Smetona S., «Low frequency noise in selenium passivated GaAs and InP Schottky contacts» // Proc. of 15<sup>th</sup> International Conference on Noise in Physical Systems and 1 / f Fluctuations, Ed. by C. Surya. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University. 1999.
5. Бессолов В.Н., Лебедев М.В. Халькогенидная пассивация поверхности полупроводников A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32. №11.
6. Ковалева Л.С., Каложный В.М., Цендровский В.А., Сажина Е.М. Импульсная электрохимия в технологии приборов и схем на арсениде галлия // Сб. тр. Шестого Всесоюз. совещ. по исследованию арсенида галлия. Томск, 1987. Т. 2.
7. Мокроусов Г.М. Перестройка твердых тел на границах раздела фаз. Томск, 1990.
8. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М., 1991.
9. Немошкаленко В.В., Алешин В.Г., Семашко Е.М., Сенкевич А.И. Исследование процессов окисления поверхности арсенида галлия // Поверхность. 1985. №2.
10. Белый В.И., Смирнова Т.П. Экспериментальные исследования и пути стабилизации фазового состава оксидных пленок на полупроводниках типа A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> // Материалы электронной техники. Новосибирск, 1983. Ч. 2.
11. Бузанева Е.В., Костиков Ю.П., Коротченков Г.С., Шумило А.А. Физико-химические свойства окисленной поверхности фосфида индия (100) // Поверхность. Ф.Х.М. 1983. №6.
12. Massies I., Contour I.P. Substrate chemical etching prior to molecular-beam epitaxy: an X-ray photoelectron spectroscopy study of GaAs (001) surfaces etched by the H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O solution // J. Appl. Phys. 1985. Vol. B 58.
13. Alnot P., Wyczisk F., Friederick A. An X-ray photoelectron spectroscopy study of chemically etched GaAs // Surface Science. 1985. Vol. 162.
14. Абдуррагимов Г.А. Поверхность кристалла и эпитаксия / Отв. ред. А.З. Эфендиев. Ростов-на-Дону, 1987.
15. Венгер Е.Ф. и др. Электронные свойства реальной и сульфидированной поверхности арсенида галлия // Физика и техника полупроводников. 1995. №2.
16. Кириллова С.И., Примаченко В.Е. Электронные свойства сульфидированной поверхности арсенида галлия // Поверхность. 1994. №12.
17. Берковиц В.Л., Иванцов Л.Ф. Исследование в сканирующем туннельном микроскопе поверхности арсенида галлия, пассивированной в водном растворе сульфида натрия // Физика и техника полупроводников. 1990. Т. 25. №3.
18. Ботнарюк В.М., Жилиев Ю.В., Коненкова Е.В. Сульфидная пассивация силовых GaAs-диодов // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. №6.
19. Сумец М.П. Электронные процессы на гетерогранице Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>-GaAs, сформированные обработкой GaAs в парах селена: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Воронеж, 1999.
20. Фомина Л.В. Физико-химические аспекты формирования нанослоевых структур контактов In – GaAs n-типа в условиях халькогенной пассивации поверхности полупроводника и электрохимического осаждения металла: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Барнаул, 2003.
21. Карапетьянц М.Х., Карапетьянц М.Л. Основные термодинамические константы неорганических веществ. М., 1968.
22. Верятин У.Д., Маширев В.П. Термодинамические свойства неорганических веществ: Справочник. М., 1965.
23. Термические контакты веществ / Под ред. В.П. Глушко. Вып. 2. М., 1965.
24. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М., 1977.
25. Бессолов В.Н., Лебедев М.Б., Zahn K.R.T. Ис-

следования приповерхностной области  $n$ -InP (100), пассивированного в сульфидных растворах // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. Вып. 4.

26. Слободчиков С.В., Салихов Х.М., Саморуков Б.Е. О механизме токопереноса в диодных структурах Cr- $n$ -InP и Mo- $n$ -InP // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. Вып. 8.

27. Батенков В.А., Фомина Л.В., Сарыгина Е.М. Создание выпрямляющих контактов к арсениду галлия электроосаждением платиновых металлов //

Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий: Материалы II Всерос. науч. конф. Томск, 2002. Т. 2.

28. Table of periodic properties of the elements / / Sargent-Welch Scientific Company. 1968. Catalog N S-18806.

29. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М., 1991.

30. Безносюк С.А. Электронная теория активных центров микроструктурных превращений материалов: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 1993.