

## СВОЙСТВА ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА $\text{InAs}$ —ТОНКИЙ ПОЛУИЗОЛИРУЮЩИЙ СЛОЙ $\text{In}_2\text{S}_3$

Сысоев Б. И., Агапов Б. Л., Безрядин Н. Н., Буданов А. В.,  
Проколова Т. В., Фетисова С. В.

Методом рентгеноспектрального микроанализа изучено распределение основных компонентов соединений в пограничной области гетероструктуры  $\text{In}_2\text{S}_3$ — $\text{InAs}$ . Слои  $\text{In}_2\text{S}_3$  получали методом замещения мышьяка на серу в приповерхностной области арсенида индия.

Доказано существование переходной области ( $\text{P}'$ ) в гетеросистеме. Особенности вольт-фарадных характеристик объяснены в рамках модели МДП'П структуры участием в экранировании внешнего электрического поля свободных носителей заряда в слое  $\text{P}'$ . Показана возможность оценки параметров переходной области в гетероструктурах методом  $C-V$ -характеристик.

Авторами [1, 2] показано, что в качестве подзатворного диэлектрика в структурах типа МДП могут быть использованы широкозонные полупроводниковые слои, тонкие по сравнению с дебаевской длиной экранирования в них.

Известно, что обработка фосфида индия в парах  $\text{H}_2\text{S}$  перед нанесением двуокиси кремния почти в 10 раз повышает быстродействие полевых транзисторов со структурой типа МДП на основе  $\text{InP}$  [3, 4]. Авторами [4] показано, что в результате такой обработки между  $\text{InP}$  и  $\text{SiO}_2$  образуется слой  $\text{In}_2\text{S}_3$ . В арсениде индия подвижность электронов значительно выше, чем в  $\text{InP}$ , соответственно с точки зрения повышения быстродействия полевых транзисторов со структурой МДП представляет интерес исследование подобных слоистых систем на основе  $\text{InAs}$ .

§ Получение и исследование структуры тонких  
слоев  $\text{In}_2\text{S}_3$  на подложке  $\text{InAs}$

Технологически наиболее простым способом формирования слоев соединений  $\text{A}_2^{\text{III}}\text{B}_3^{\text{VI}}$  на поверхности  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  является метод гетеровалентного замещения компонента  $\text{B}^{\text{V}}$  в решетке  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  на  $\text{B}^{\text{VI}}$  в процессе термического отжига в парах халькогена. Обработка  $\text{InAs}$  в парах серы проводилась в квазизамкнутом объеме. Давление пара халькогена над конденсированной фазой задавалось нагревателями и составляло  $10^{-2}$ — $10^2$  Па, температура подложки варьировалась в диапазоне 470—520 К. При температурах подложки 470—520 К и давлении паров серы  $10^{-1}$ — $10^1$  Па полученные слои имеют монокристаллическую структуру, соответствующую кубической фазе  $\text{In}_2\text{S}_3$  с периодом  $a=0.5$  нм. Оценка толщины образующегося на поверхности арсенида индия слоя и качества границы раздела пленка—подложка проводилась в растровом электронном микроскопе методом скола.

Изучение характера распределения основных компонентов соединения в тонких слоях  $\text{In}_2\text{S}_3$ , выращенных на подложке  $\text{InAs}$ , проводилось методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) на приборе типа JXA-3A по клину травления. Разрешение по глубине определялось поперечным размером области выхода возбуждаемого рентгеновского излучения. Размер этой области ( $\rho z$ ) определялся по формуле [5]  $\rho z=0.007 (E_0^{1.65}-E_c^{1.65})$  мг/см<sup>2</sup>, где  $E_0$  и  $E_c$  — энергии электронного пучка и возбуждения аналитической серии исследуемого

элемента соответственно, измеренные в кэВ. Клину травления на образце формировался методом ионного распыления. В процессе измерений осуществлялось перемещение образца в плоскости клина травления по заданной программе. Абсолютное стандартное отклонение при определении серы составляло 0.07 — 0.08 вес % в диапазоне концентраций до 2 %; при определении индия — 0.52 — 0.54 вес % и мышьяка — 0.29 вес % при концентрациях индия и мышьяка, соответствующих стехиометрическому составу InAs.

Распределение интенсивности рентгеновского излучения, соответствующего линии серы  $I_{S_{K\alpha_1}}$ , в структуре  $In_2S_3$ —InAs, полученное в области малых концентраций, имеет характерный скачок (рис. 1), совпадающий с границей раздела пленка—подложка. С целью детального изучения этой переходной области количественный анализ по клину травления проведен с шагом  $\sim 9$  мкм. За начальную точку в этом случае выбиралась граница раздела

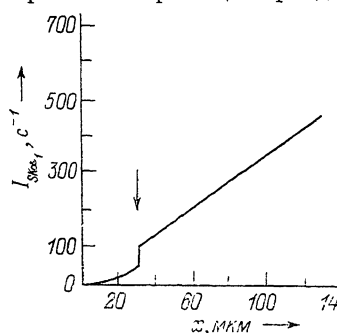


Рис. 1. Распределение интенсивности излучения  $I_{S_{K\alpha_1}}$  по клину травления в структуре  $In_2S_3$ —InAs, полученное методом РСМА.

Стрелкой показана точка по координате  $x$ , соответствующая границе пленка—подложка.

пленка—подложка ( $x=0$ , рис. 2). Результаты анализа представлены в виде концентрационных профилей распределения S, As и In по глубине  $C(x)$  (рис. 2). Глубина, на которой концентрация серы в подложке достигала величины обнаружения, рассчитанная по данным геометрических измерений на клине травления, составляла  $0.022 \pm 0.004$  мкм. При этом предел обнаружения оценивался по формуле [5]

$$C_{\text{по}} \geq \frac{3.29a}{\sqrt[3]{n\tau P} \frac{p}{b}},$$

где  $\tau$  — время каждого измерения,  $n$  — число повторений каждого измерения,  $P$  — скорость счета на чистом элементе,  $p/e$  — отношение пик—фон на чистом элементе и  $a$  — коэффициент, связывающий концентрацию и интенсивность анализируемого элемента. В данной работе предел обнаружения серы составил 0.3 ат%.

Таким образом, концентрация серы у поверхности InAs меняется примерно по линейному закону в пределах от  $\sim 0.3$  ат% на расстоянии  $\sim 22$  нм от регистрируемой в растровом электронном микроскопе границы раздела пленка—подложка до значений, соответствующих стехиометрическому составу соединения  $In_2S_3$  (рис. 1). Отметим, что методом РСМА установить вторую границу этой области не удается из-за больших по сравнению с толщиной слоя размеров области выхода возбуждаемого рентгеновского излучения.

Учитывая, что значение концентрации серы в InAs, соответствующее предельной растворимости, составляет  $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (т. е. 0.1 ат%) [6], можно пред-

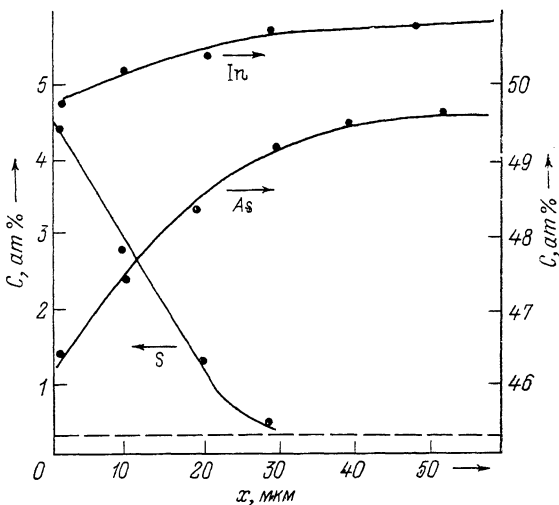


Рис. 2. Профили распределения концентраций атомов S, As и In в структуре  $In_2S_3$ —InAs, полученные методом РСМА по клину травления.

Штрихами показан предел обнаружения серы (в ат%).

положить, что регистрируемое данным методом распределение серы соответствует области переменного состава, представляющей собой твердый раствор между сульфидом индия и арсенидом индия [7].

Экранирование электрического поля в гетероструктуре  $\text{Al}-\text{In}_2\text{S}_3-\text{InAs}$  и определение параметров переходной области между  $\text{In}_2\text{S}_3$  и  $\text{InAs}$

Вольт-фарадные ( $C-V$ ) характеристики гетероструктур  $\text{Al}-\text{In}_2\text{S}_3-\text{InAs}$  (исходная концентрация электронов в  $\text{InAs}$   $n \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) измерялись в интервале частот  $10^3-10^6$  Гц в диапазоне температур  $100-300$  К.

Из экспериментальных  $C-V$ -характеристик, измеренных на частоте тестового сигнала  $10^5$  Гц при температуре  $100$  К, оценивались толщина подзатворного слоя и уровень легирования подложки  $\text{InAs}$  под сформированным слоем [8]. Рассчитанная по этим параметрам теоретическая зависимость  $C(V)$  для идеальной МДП

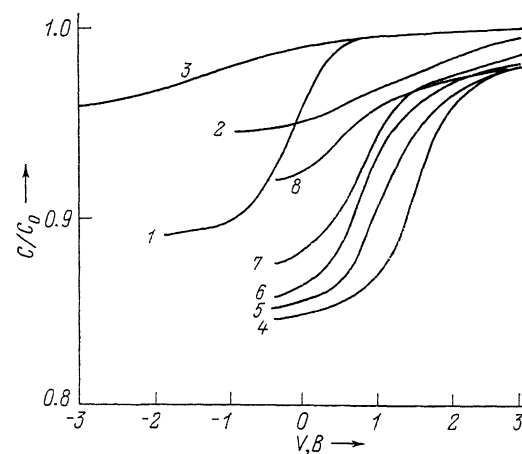


Рис. 3. Вольт-фарадные  $C(V)$ -характеристики.

1, 2 — экспериментальные кривые при  $300$  и  $100$  К соответственно; теоретические кривые 3 — для идеальной МДП структуры; 4—8 — для структуры МДП/П с концентрациями в слое П'  $10^{14}$ ,  $10^{15}$ ,  $5 \cdot 10^{15}$ ,  $10^{16}$ ,  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  соответственно.

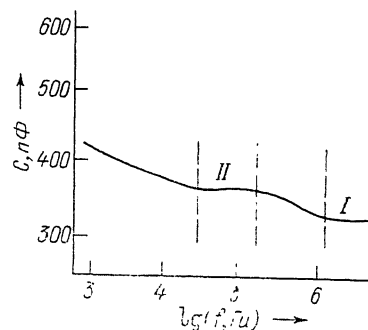


Рис. 4. Частотная зависимость емкости гетероструктуры  $\text{Al}-\text{In}_2\text{S}_3-\text{InAs}$ .

структуры по крутизне почти совпадала с измеренной при температуре жидкого азота, но оказалась существенно выше экспериментальной, полученной при комнатной температуре (рис. 3), максимальный сдвиг зависимостей по напряжению составил в этом случае  $\sim 8$  В для значений поверхностного потенциала, соответствующего плоским зонам в  $\text{InAs}$  (рис. 3, кривые 1, 3).

В [9] развита модель МП'ДП структур с тонкими слоями широкозонного полупроводника П', толщина которого меньше дебаевской длины экранирования основных носителей заряда. В рамках этой модели обоснована возможность повышения крутизны вольт-фарадных характеристик в изотипных структурах МП'ДП в области напряжений, соответствующих обеднению в полупроводниковой подложке. Соответствующий сдвиг по напряжению обусловлен разностью значений напряжений, соответствующих одному и тому же уровню емкости в структурах МД'ДМ (здесь Д' — электростатически эквивалентный слою П' слой идеального диэлектрика), и МП'ДП и не может быть больше  $\Delta E_g/2$ . Поскольку в данном случае сдвиг по напряжению составляет  $\sim 8$  В, повышенная крутизна  $C-V$ -характеристик исследуемых структур не может быть объяснена в рамках этой модели МП'ДП системы.

Особенностью используемого способа получения гетероструктур, как показано в [8] и можно предположить из измеренного распределения серы в структуре, является подлегирование серой приповерхностной области  $\text{InAs}$  у границы раздела с выращенным слоем. Существующее при этом распределение примеси в полупроводниковой подложке неоднородно и в принципе может повлиять

на вид  $C-V$ -характеристик. Расчет  $C-V$ -зависимостей в рамках модели [10] с учетом такого распределения примеси, когда концентрация свободных носителей у границы раздела с диэлектриком больше, чем в объеме полупроводника, показывает, что в этом случае происходит лишь параллельный сдвиг кривых без изменения крутизны. Если глубина подлегирования ( $l$ ) не превышает толщины обедненного слоя, то кривые сдвигаются в сторону отрицательных напряжений (для  $n$ -типа) без искажения формы. Если  $l$  больше, чем глубина ОПЗ, то одновременно со сдвигом кривых изменяется и минимальное значение емкости характеристики ( $C_{\min}$ ), так что  $C-V$ -характеристика становится более пологой [10].

Увеличение крутизны  $C-V$ -характеристики становится возможным, если концентрация свободных носителей заряда увеличивается от границы раздела в объем полупроводника. Такой характер распределения носителей заряда может быть следствием существования области переменного состава между слоем  $\text{In}_2\text{S}_3$  и подложкой  $\text{InAs}$ . Присутствие такой области в исследуемых структурах следует из приведенных выше результатов о распределении серы в гетероструктуре, полученных методом РСМА. Наличие переходной области следует также из анализа частотной зависимости емкости ( $C_0$ ), измеренной при комнатной температуре, при постоянном внешнем напряжении, соответствующем области обогащения электронами в подложке (рис. 4). Существенно, что эта зависимость имеет два пологих участка. По-видимому, при частотах, превышающих  $10^6$  Гц (область  $I$  на рис. 4), свободные носители заряда в переходной области и в верхнем слое  $\text{In}_2\text{S}_3$  не успевают следовать за изменением тестового сигнала — полная емкость структуры соответствует емкости двухслойной композиции переходная область—слой  $\text{In}_2\text{S}_3$ . Второй пологий участок (область  $I$  на рис. 4) отвечает случаю, когда период изменения тестового сигнала достигает величин времен релаксации свободных зарядов в переходной области. Тогда только верхний слой проявляет диэлектрические свойства, а свободные носители заряда переходной области участвуют в экранировании тестового сигнала и вносят вклад в полную дифференциальную емкость структуры. Таким образом, при измерении  $C-V$ -характеристики на частоте  $10^5$  Гц при  $T=300$  К вклад в емкость структуры дают свободные носители заряда в переходном слое и регистрируемая характеристика определяется модуляцией заряда в переходной области и в подложке одновременно.

С помощью растрового электронного микроскопа была определена полная толщина композиции (230 нм) на поверхности  $\text{InAs}$  в исследуемой гетероструктуре. Из значения емкости в области  $I$  находилась диэлектрическая проницаемость этой композиции ( $\sim 13.6$ ). Затем по значению емкости из области  $II$  частотной зависимости, соответствующей емкости только верхнего слоя  $\text{In}_2\text{S}_3$ , и известному значению  $\epsilon$  для  $\text{In}_2\text{S}_3$  ( $\sim 13.5$  [11]) находилась толщина слоя  $\text{In}_2\text{S}_3$  (200 нм). С учетом того, что емкость двухслойной композиции из переходной области и  $\text{In}_2\text{S}_3$  при измерении на частоте  $10^6$  Гц соответствует последовательному соединению емкостей составляющих композицию слоев, найдены значения диэлектрической проницаемости ( $\sim 13.7$ ) и толщины слоя ( $\sim 30$  нм), электростатически эквивалентного переходной области.

Простейшей моделью, описывающей электрические характеристики такой системы, является модель МДП'П структуры [12] (слой  $\Pi'$  электростатически эквивалентен переходной области в структуре, а слой  $\text{Д}$  — слою  $\text{In}_2\text{S}_3$ ). В рамках данной модели особенности вольт-фарадных характеристик гетероструктур  $\text{Al}-\text{In}_2\text{S}_3-\text{InAs}$  объясняются участием в экранировании внешнего электрического поля свободных носителей заряда не только в подложке  $\text{InAs}$ , но и в переходной области ( $\Pi'$ ). С целью определения концентрации основных носителей заряда в слое  $\Pi'$  был проведен расчет теоретических равновесных (низкочастотных, когда за изменением тестового сигнала успевают следовать свободные носители в  $\Pi$  и  $\Pi'$ ) вольт-фарадных характеристик для МДП'П структуры в рамках модели [12] для следующих конкретных параметров системы (рис. 4): толщины слоя  $\Pi'$  (переходная область) — 30 нм, толщины слоя  $\text{Д}$  ( $\text{In}_2\text{S}_3$ ) — 200 нм, относительной диэлектрической проницаемости для  $\Pi'$  и  $\Pi$  — 13.7 и 13.5 соответственно, концентрации основных носителей заряда в  $\Pi$  —  $10^{19}$  см $^{-3}$ . Здесь необходимо отметить, что переходная область, вероятно, пред-

стывает собой варизонный полупроводник с плавно меняющимися значениями концентрации основных носителей заряда и ширины запрещенной зоны. Поэтому, интерпретируя свойства этой области в рамках модели МДП'П структуры, можно говорить лишь о некоторых эффективных параметрах этой области.

В расчетах, результаты которых представлены на рис. 3, варьировалось значение концентрации основных носителей заряда в слое П'. Из полученного набора теоретических зависимостей  $C(V)$  по крутизне характеристики и отношению  $C_{\min}/C_0$  наиболее полно совпадала с экспериментальной кривая, рассчитанная при значении концентрации основных носителей заряда в слое П'  $\sim 10^{16}$  см $^{-3}$  (рис. 3). Сдвиг экспериментальных и теоретических зависимостей  $C(V)$  по напряжению, вероятно, обусловлен присутствием в данной гетероструктуре локализованных зарядов. Предполагаемая варизонность переходной области, встроеной в гетероструктуру таким образом, что концентрация основных носителей увеличивается от границы ДП' к подложке П, видимо, обуславливает неполное совпадение наклонов экспериментальной  $C-V$ -характеристики при  $T=100$  К и теоретической, рассчитанной в рамках модели идеальной МДП структуры (кривые 3 и 2 на рис. 3). Именно повышенная крутизна экспериментальных зависимостей может быть следствием предполагаемой варизонности переходной области.

Таким образом, в полученных гетероструктурах наблюдается модуляция ОПЗ в InAs внешним электрическим полем. Однако существенная часть модулируемого подвижного заряда оказывается сосредоточенной в переходной области, образуемой в структуре в процессе получения методом гетероэпитаксиального замещения. Существование переходной области доказано методом РСМА в совокупности с разработанной методикой определения параметров переходных слоев из анализа зависимостей  $C(V)$  и сравнения экспериментальных характеристик с теоретическими, рассчитанными в рамках модели МДП'П структуры. Последняя методика может быть использована самостоятельно в качестве экспрессной при отработке технологии формирования подобных гетероструктур и, в частности, с целью поиска оптимальных технологических режимов, обеспечивающих минимальные размеры переходной области в гетероструктуре, когда основная часть модулируемого внешним электрическим полем свободного заряда сосредоточена в подложке с высокой подвижностью основных носителей заряда. В частности, в системе  $\text{In}_2\text{S}_3\text{-InAs}$  с применением данной модификации  $C-V$ -метода найдены технологические режимы, соответствующие получению гетероструктуры с переходной областью  $\sim 5.0$  нм.

#### Список литературы

- [1] Сысоев Б. И., Сыноров В. Ф. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 10. С. 1856—1859.
- [2] Сысоев Б. И., Лихолет А. Н., Сыноров В. Ф., Ровинский А. П. // Микроэлектроника. 1977. Т. 6. В. 6. С. 454—457.
- [3] Descout B., Durand J., Cot L. et al. // Thin Sol. Films. 1985. V. 131. P. 139—148.
- [4] Dimitriou P., Post G., Scavennec A. et al. // Physica. 1985. V. 129 B. P. 399—402.
- [5] Голдштейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. и др. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. М., 1984. 348 с.
- [6] Полупроводниковые соединения АШВУ / Под ред. В. Виллардсона, Х. Геринга. М., 1967. 728 с.
- [7] Горюнова Н. А. Сложные алмазоподобные полупроводники. М., 1968. 218 с.
- [8] Postnikov V. S., Sysyov B. I., Budanov A. V., Bezryadin N. N. // Phys. St. Sol. (a). 1988. V. 109. P. 463—467.
- [9] Сысоев Б. И., Ровинский А. П., Сыноров В. Ф., Безрядин Н. Н. // Микроэлектроника. 1978. Т. 7. В. 2. С. 163—167.
- [10] Баранов Л. И., Гаманюк В. Б., Юдович М. В. // Межвуз. науч. сб. Саратовского университета. 1977. № 8. С. 131—133.
- [11] Rehwald W., Harbeke G. // J. Phys. Chem. Sol. 1965. V. 26. P. 1309—1324.
- [12] Сыноров В. Ф., Лихолет А. Н., Сысоев Б. И. // Микроэлектроника. 1976. Т. 5. В. 6. С. 540—546.