

ВЫСОТА БАРЬЕРА ШОТТКИ Au—GaAs_{1-x}Sb_x

Шаронова Л. В., Полянская Т. А., Нажмудинов Х. Г.,
Каряев В. Н., Зайцева Л. А.

По спектрам фотоответа структур Au—GaAs_{1-x}Sb_x (*n*- и *p*-типа) определены значения высоты барьера Шоттки (φ_{bn} , φ_{bp}) в диапазоне составов, отвечающих $0 \leq x \leq 0.125$. Установлено, что для GaAs_{1-x}Sb_x φ_{bn} , φ_{bp} отличны от соответствующих значений для GaAs, не зависят от x и равны $\varphi_{bn} = 0.78 \pm 0.02$ эВ при 300 К, $\varphi_{bn} = 0.88 \pm 0.03$ эВ при 77 К, $\varphi_{bp} = 0.82 \pm 0.06$ эВ при 77 К. При рассмотрении свойств контактного барьера привлечены представления о зоне поверхностных состояний.

В настоящее время можно считать экспериментально установленным, что высота барьера Шоттки в соединениях A^{III}B^V практически не зависит от химической природы контактного материала [1], и, следовательно, положение уровня Ферми на контактной границе определяется состояниями в запрещенной зоне на поверхности полупроводника. Вопрос о природе поверхностных состояний (ПС), ответственных за фиксирование уровня Ферми, широко обсуждается в литературе.¹ Экспериментальные исследования идут по двум направлениям: первое — измерение положения уровня Ферми на поверхности скола полупроводника при нанесении в высоком вакууме субмонокотомных слоев металла; второе — определение из электрофизических измерений высоты барьера Шоттки в структурах, полученных нанесением толстых (≈ 1000 Å и более) слоев металла на химически обработанные поверхности, в том числе на поверхности эпитаксиальных пленок твердых растворов A^{III}B^V. Для интерпретации результатов привлекаются две основные теоретические модели [2, 3]. Первая из них ограничивается рассмотрением фундаментальных электронных свойств контактирующих материалов, что касается второй, то она привлекает дефекты на поверхности полупроводника и потому представляется более реалистичной. Несмотря на наличие во второй модели элемента идеализации, заключающегося в учете наиболее простых типов дефектов (вакансии элементов A^{III}B^V [3], антиструктурные дефекты [4]), с ее помощью удастся объяснить не только эксперименты, проводимые на сколах в сверхвысоком вакууме [3, 5], но и ряд данных, полученных на эпитаксиальных твердых растворах A^{III}B^V [4].

Твердые растворы GaAs_{1-x}Sb_x не входят в круг веществ, в которых изучалась высота барьера Шоттки. Нам известна лишь одна работа [6] по исследованию поверхностно-барьерных структур Au—GaAs_{1-x}Sb_x на материале *n*-типа проводимости. Наши предварительные результаты были представлены в докладах [7, 8].

В настоящей работе приведены результаты определения высоты контактного барьера в структурах Au—GaAs_{1-x}Sb_x (*n*- и *p*-типа) в зависимости от состава твердого раствора в диапазоне $0 \leq x \leq 0.125$. В этом интервале составов ширина запрещенной зоны E_g уменьшается практически линейно с увеличением содержания GaSb, причем общее изменение составляет 0.23 эВ [9].

Слои твердого раствора GaAs_{1-x}Sb_x толщиной 10—15 мкм, не легированные (*n*-типа) и легированные Ge (*p*-типа) с концентрацией носителей на уровне 10^{16} — 10^{17} см⁻³, были получены жидкофазной эпитаксией на изотипных под-

¹ См., например, J. Vac. Sci. Techn., 1985, v. B3, N 4.

ложках с $n \approx 5 \cdot 10^{17}$ и $p \approx 5 \cdot 10^{18}$ соответственно. Методика выращивания эпитаксиальных слоев описана в работе [10], а методика изготовления поверхностно-барьерных структур Au—GaAs_{1-x}Sb_x — в работе [11].

Высота барьера определялась хорошо известным способом (см., например, [1]) из спектральной зависимости фототока I_ϕ в области фотоэмиссии электронов из металла в полупроводник ($\hbar\omega < E_g$) по отсечке прямой $\sqrt{I_\phi} = f(\hbar\omega)$. Измерения проводились на модулированном освещении от лампы

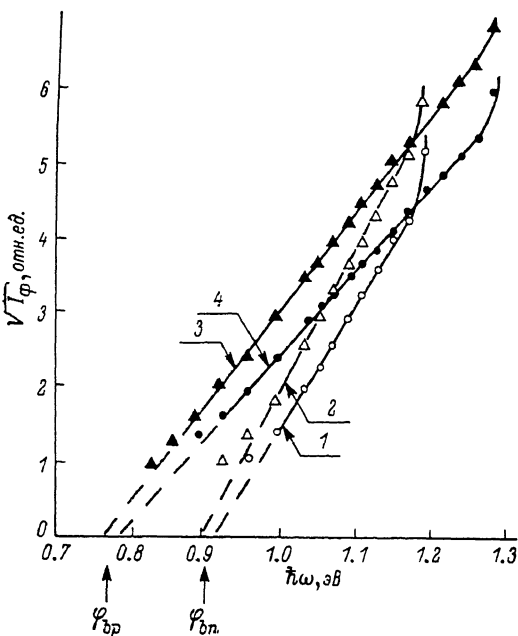


Рис. 1. Спектральные зависимости фототока в структурах Au—GaAs_{1-x}Sb_x (77 К). 1, 2 — разные образцы, материал n-типа; 3, 4 — разные образцы, материал p-типа.

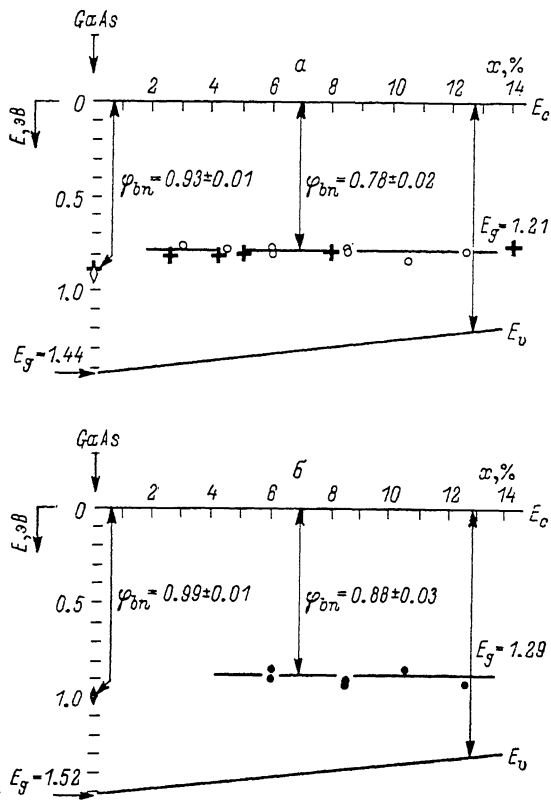


Рис. 2. Высота барьера Шоттки Au—GaAs_{1-x}Sb_x (n-тип) в зависимости от состава твердого раствора.

Крестами обозначены данные работы [6]. Т, К: а — 300, б — 77.

накалывания с помощью монохроматора SPM-2 и системы селективного усиления. Типичные спектральные зависимости показаны на рис. 1.

Значения высоты контактного барьера, полученные из измерений, приведены для структур на основе n-GaAs_{1-x}Sb_x при 300 и 77 К на рис. 2, для структур на основе p-GaAs_{1-x}Sb_x при 77 К — на рис. 3; здесь же на рис. 2, 3 показано изменение E_b в твердом растворе по мере изменения состава. Структуры на основе p-GaAs_{1-x}Sb_x при 300 К оказались нефоточувствительными. Результаты для n-GaAs_{1-x}Sb_x согласуются с данными [6] (рис. 2) и с нашими данными, полученными обработкой других электрофизических измерений, как было показано в [8].

Экспериментальные результаты сводятся к следующему.

1. Высота контактного барьера практически не зависит от состава твердого раствора и, следовательно, от ширины запрещенной зоны. Это справедливо для материалов как n-, так и p-типа.

2. В структурах на основе $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ значение высоты барьера составляет $\varphi_{bn} = 0.78 \pm 0.02$ эВ.²

3. Понижение температуры приводит к увеличению высоты барьера: при 77 К $\varphi_{bn} = 0.88 \pm 0.03$ эВ. Тенденция к увеличению φ_{bn} при охлаждении подтверждается анализом спектров туннельной проводимости контактов Au— $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ с $n \approx 6 \cdot 10^{18}$ см⁻³ (примесь Te), откуда найдено при 4.2 К $\varphi_{bn} = 1.05 \pm 0.03$ эВ [12].

4. В структурах на основе $p\text{-GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ значение высоты барьера при 77 К составляет $\varphi_{bp} = 0.82 \pm 0.06$ эВ.

5. Полученные значения φ_{bn} , φ_{bp} удовлетворяют неравенству $(\varphi_{bn} + \varphi_{bp}) - E_g \geq 0.18 \pm 0.05$ эВ, т. е. положение уровня Ферми на контакте Au— $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ для материалов n - и p -типа различно.

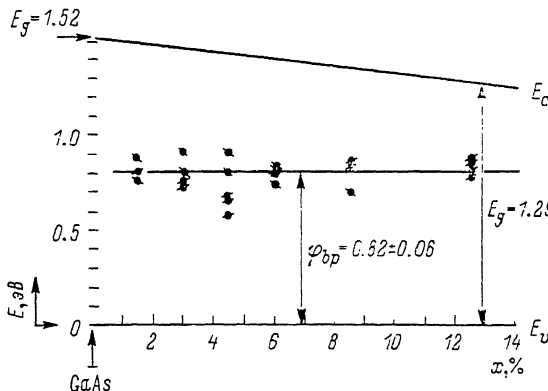


Рис. 3. Высота барьера Шоттки Au— $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ (p -тип) в зависимости от состава твердого раствора (77 К).

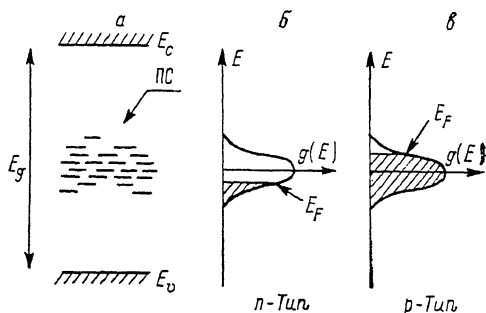


Рис. 4. Схематическое изображение ПС, формирующей примесную зону (а), распределения плотности состояний $g(E)$ в зоне (б, в).

б, в соответствуют различному заполнению примесной зоны электронами: б — на поверхности материала n -типа, в — на поверхности материала p -типа.

Не вдаваясь в анализ, обратим внимание на нетривиальность результатов, сформулированных в пп. 4, 5. Заметим к тому же, что факт независимости φ_{bn} , φ_{bp} от состава твердого раствора не находит объяснения в рамках модели [3], предполагающей изменение этих величин, коррелированное с изменением E_g (см. [5]).

Поскольку в нашем эксперименте использованы твердые растворы с малым содержанием GaSb, т. е. вблизи GaAs, целесообразно соотнести полученные на них результаты с известными данными по GaAs, которые в обобщенном виде содержатся в [13] и которые кратко можно представить следующим образом. В случае нанесения в высоком вакууме субмонослоев металла на сколы GaAs проявляются два типа уровней ПС, определяющих высоту барьера Шоттки. Расположение их в запрещенной зоне приблизительно таково: $E_c - 0.7$, $E_c - 0.9$ эВ. В одних экспериментах проявляются оба уровня: верхний — в $n\text{-GaAs}$, нижний — в $p\text{-GaAs}$, т. е. $(\varphi_{bn} + \varphi_{bp}) < E_g$, в других — уровень Ферми на поверхности один и тот же для GaAs n - и p -типа, т. е. $\varphi_{bn} + \varphi_{bp} = E_g$. Что касается барьеров Шоттки, изготовленных нанесением толстых металлических слоев на химически обработанные поверхности, то, как правило, реализуется второй вариант аналогично нашему случаю, и для контакта Au—GaAs $\varphi_{bn} \approx 0.9$ эВ. Наши результаты по Au—GaAs (n -типа) этому не противоречат: $\varphi_{bn} = 0.93 \pm 0.01$ эВ (рис. 2), а собственными данными по GaAs p -типа мы не предполагаем.

² Значения φ_{bn} , φ_{bp} получены усреднением по всем экспериментальным точкам; ошибка оценена как среднеарифметическое отклонение от среднего.

Если теперь сравнить значения контактного барьера в GaAs и твердом растворе $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, видно, что они различаются на величину, превышающую экспериментальную ошибку. Следовательно, наблюдается скачкообразное изменение свойств контактного барьера при переходе от GaAs к $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, т. е. специфика наблюдаемых свойств барьера Шоттки обусловлена особенностями материала $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$.

Вместе с тем, обратившись к свойствам твердого раствора, можно предположить существование поверхностной примесной зоны, сформированной с участием состояний, происходящих от объемных компенсирующих центров (рис. 4). Положение уровня Ферми на поверхности определяется степенью заполнения этой зоны, и оно различно для *n*- и *p*-материалов. Основанием для высказанного предположения служит высокая степень компенсации, характерная для данного твердого раствора. Как было показано в работе [14], при концентрации носителей 10^{16} — 10^{17} см⁻³ концентрация компенсирующих центров оценивается на уровне 10^{19} см⁻³. При столь большой объемной концентрации плотность ПС ($\approx 10^{12}$ см⁻²) оказывается достаточной, чтобы обеспечить фиксирование уровня Ферми на поверхности. Очевидно, такие состояния следует рассматривать не как альтернативные тем, что обычно существуют в $\text{Al}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ в отсутствие компенсации и до некоторой степени находят интерпретацию в модели [3], а скорее как дополнительные к ним.

Авторы благодарят Ю. В. Шмарцева за интерес к работе и А. Я. Шика, М. Э. Райха за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

- [1] Зи С. Физика полупроводниковых приборов, т. 1. М., 1984. 455 с.
- [2] Tersoff J. — Phys. Rev. Lett., 1984, v. 52, N 6, p. 465—468.
- [3] Spicer W. E., Lindau I., Skeath P., Su C. Y., Chye P. — Phys. Rev. Lett., 1980, v. 44, N 6, p. 420—423.
- [4] Sankey O. F., Allen R. E., Ren Sh. F., Dow J. D. — J. Vac. Sci. Techn., 1985, v. B3, N 4, p. 1162—1165.
- [5] Monch W., Gant H. — Phys. Rev. Lett., 1982, v. 48, N 7, p. 512—515.
- [6] Subramanian S., Murawala P. A., Chandvankar S. S., Arora B. M. — Appl. Phys. Lett., 1982, v. 41, N 4, p. 357—361.
- [7] Каряев В. Н., Нажмуудинов Х. Г., Полянская Т. А., Шаронова Л. В. Пиннинг уровня Ферми на поверхности твердого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. — В кн.: Тез. докл. Всес. школы по физике поверхности. Карпаты, 1986, с. 155.
- [8] Нажмуудинов Х. Г., Полянская Т. А., Тимохина Л. А., Шаронова Л. В. Свойства контактного барьера в структурах Au— $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. — В кн.: Тез. докл. Всес. конф. «Диагностика поверхности». Каунас, 1986, с. 98.
- [9] Бирюлин Ю. Ф., Ичкитидзе Р. Р., Кригель В. Г., Шмарцев Ю. В. Излучательная рекомбинация в нелегированном твердом растворе $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.3$). — ФТП, 1979, т. 13, в. 6, с. 1235—1238.
- [10] Полянская Т. А., Демичева С. Б., Каряев В. Н., Мясников С. В., Нажмуудинов Х. Г. Барьеры Шоттки на твердом растворе $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. — Электрон. техн., сер. Полупроводн. приборы, 1983, № 8, с. 19—22.
- [11] Каряев В. Н., Нажмуудинов Х. Г., Егорова М. В., Савельев И. Г. Вольтамперные характеристики поверхностно-барьерных структур Au— $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. — ФТП, 1986, т. 20, в. 9, с. 1634—1638.
- [12] Нажмуудинов Х. Г. Исследование поверхностно-барьерных структур Au— $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. — Автореф. канд. дис. Л., 1987.
- [13] Newman N., Spicer W. E., Kendelewicz T., Lindau I. — J. Vac. Sci. Techn., 1986, v. B4, N 3, p. 931—938.
- [14] Нажмуудинов Х. Г., Полянская Т. А. Вольтамперные характеристики структур Au/ $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ /GaAs в свете флуктуационной теории термополевой эмиссии в барьерах Шоттки. — ФТП, 1987, т. 21, в. 10, с. 1737—1744.