

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 631.382

Д.Л. БУДНИЦКИЙ, В.А. НОВИКОВ, И.А. ПРУДАЕВ, О.П. ТОЛБАНОВ, Т.М. ЯСКЕВИЧ

ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КОНТАКТЕ
МЕТАЛЛ – ВЫСОКООМНЫЙ GaAs:Cr¹

Представлены результаты исследований фотовольтаического эффекта в контактах ряда металлов с высокоомным GaAs:Cr. Высокоомный (ВО) GaAs был получен диффузией хрома в *n*-GaAs. В качестве металлов использованы V, Cr, Al. Для создания омических контактов применялся In. ФотоЭДС возбуждалась красным светом ($h\nu = 1,85$ эВ), интенсивность возбуждения достигала $1,5 \cdot 10^{21}$ см⁻²·с⁻¹. Измерения фотоЭДС проведены при наличии несимметричных пар контактов к ВО-GaAs: V-In, Cr-In, Al-In. Показано, что V, Cr, Al образуют в контакте с высокоомным GaAs:Cr барьеры для электронов. Величина фотоЭДС исследованных контактов определяется инверсией типа проводимости приповерхностного слоя GaAs под металлическим контактом. Концентрация дырок в инверсном слое может достигать $\approx 10^{15}$ см⁻³. Контакт из индия к высокоомному GaAs:Cr является омическим инжектирующим для электронов контактом с высотой барьера для дырок $\approx 0,9$ эВ.

Ключевые слова: высокоомный GaAs, контакт, барьер, фотовольтаический эффект.

Исследованиям омических [1] и барьерных [2] контактов металл – легированный GaAs посвящено большое количество работ. В гораздо меньшей степени исследованы контакты металлов с высокоомным GaAs (ВО-GaAs). Появление детекторов ионизирующих излучений, в которых ВО-GaAs играет роль активного элемента, и перспективы их использования [3–5] показывают актуальность и стимулируют продолжение таких исследований. Существует широкий круг методик для изучения свойств контактов. Однако использование исследований электрических свойств для определения характеристик контакта, в частности высоты барьера, требует достаточно изощренных вычислений [6]. Исследование вольт-фарадных характеристик приборов с ВО-GaAs малоинформативно. В то же время при наличии барьера на границе металла с ВО-GaAs возможно довольно простое определение его высоты, предложенное в [7]: измерение величины фотоЭДС холостого хода (U_{ϕ}) при высокой интенсивности оптического возбуждения светом из полосы собственного поглощения. Имеющиеся к настоящему времени результаты несколько противоречивы: величина U_{ϕ} получается и близкой к ожидаемой контактной разности потенциалов, и значительно отличающейся от неё – примерно до 0,2 эВ в меньшую сторону [7–9]. Тем не менее исследование фотовольтаического эффекта (ФВЭ) позволяет, по крайней мере, оценить нижнюю границу высоты барьера.

В настоящей работе представлены результаты исследований ФВЭ в контактах металлов с высокоомным GaAs:Cr, полученным диффузией хрома в *n*-GaAs. Исследовались контакты из металлов, применяемых при изготовлении детекторов рентгеновского излучения: хром, ванадий, алюминий. На первые два металла сверху напылялись Ni и Au соответственно. После напыления контакты проходили термообработку при температурах 400–450 °С в течение 10 мин в атмосфере водорода.

Тестовые измерения зависимости фотоЭДС от интенсивности возбуждения на структурах М-ВО-GaAs-М с одинаковым металлом обоих контактов показали, что её вид при засветке одного контакта радикально отличается от того, что можно было ожидать. Поэтому в дальнейших измерениях использовались структуры, которые получались при удалении одного из барьеров и замене его In-контактом. Условия сплавления индия соответствовали приведенным выше для обработки металлов. Выбор индия в качестве второго контакта был обусловлен как простотой получения такого контакта, так и тем, что In-контакты к GaAs имеют линейные характеристики в широком интервале напряжений, а при измерении ЭДС Холла и проводимости дают достоверные значения электрофизических параметров ВО-GaAs [10]. Типичные размеры образцов были следующими: площадь поверхности $\approx 1,5 \times 3$ мм², толщина образцов – от 200 до 1000 мкм. Величина U_{ϕ} измеря-

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки ГК П886, ГК П2137, ГК 16.513.11.3068.

лась прибором В7-34А, а в необходимых случаях контролировалась вольтметром-электронметром В7-30.

Для возбуждения фотоЭДС использовался лазерный диод АТС-С600-200 с источником питания ЛДД-10. Излучение диода подводилось к исследуемому объекту световодом диаметром 200 мкм. На выходе из световода оптическая мощность, оцененная с помощью калиброванного фотодиода ФДУК-13, достигала ≈ 200 мВт, что позволило получить интенсивность возбуждения до $1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ($\approx 5 \cdot 10^2 \text{ Вт/см}^2$). Интенсивность излучения регулировалась изменением тока через диод.

Использование световода с малой площадью позволяло не только создать большую плотность мощности излучения, но и значительно снизить рассеяние света: доля рассеянного света при работе лазера на максимальной мощности и расположении световода вплотную к образцу составляла $\approx 10^{-8}$, а его абсолютная интенсивность достигала $\approx 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Удаление световода от образца приводило к возрастанию доли рассеянного света на несколько порядков. Эти особенности возбуждения ФВЭ: малая площадь световода и наличие рассеянного света – обусловили возбуждение U_{ϕ} освещением грани образца при плотном контакте со световодом, а не через полупрозрачный металлический контакт. Схема измерений приведена на рис. 1. Для исключения воздействия рассеянного света второй контакт и прилегающая к нему часть образца толщиной $d \approx 150$ мкм закрывались непрозрачным экраном, плотно прилегавшим к грани. У большинства образцов расстояние от освещенной части до второго контакта составляло не менее 200 мкм. На рис. 2 представлены зонные диаграммы образца до и во время освещения. Для определённости на рисунке приведён один из возможных вариантов диаграмм. Энергии указаны в электрон-вольтах.

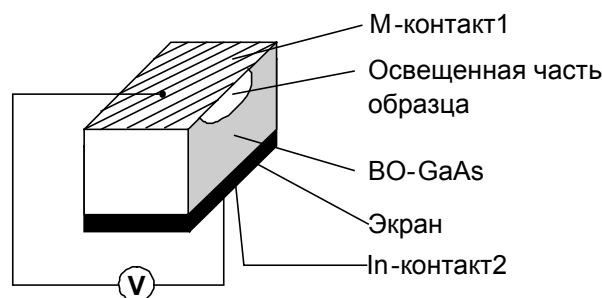


Рис. 1. Схема эксперимента

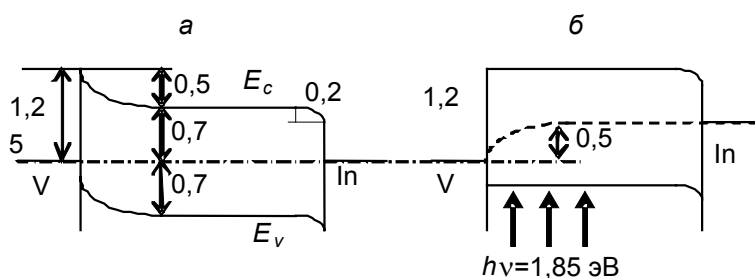


Рис. 2. Зонная диаграмма структуры: а – без освещения; б – освещён один контакт

Результаты измерений U_{ϕ} для различных видов контактов подобны, и на рис. 3 показано типичное поведение величины U_{ϕ} с ростом интенсивности возбуждения.

В таблице приведены наибольшие значения U_{ϕ} , получающиеся при измерениях на образцах с различным сочетанием контактов.

Вид структуры	Cr-BO-GaAs-In	Al-BO-GaAs-In	V-BO-GaAs-n-GaAs-Au
Величина U_{ϕ} металла, мВ	+520	+400	+500
Величина U_{ϕ} In-контакта, мВ	-370	-220	< 0

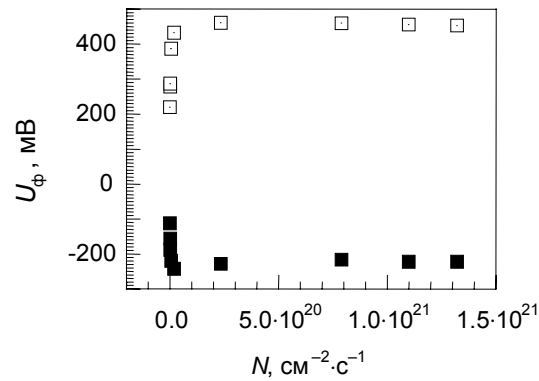


Рис. 3. Вольт-ваттная характеристика контакта М-ВО-GaAs (высокопотенциальный зонд всегда стоит на освещаемом контакте): ■ – зонд на In-контакте; □ – зонд на Cr-контакте

Обращает на себя внимание большая величина U_ϕ для всех трех металлов и отрицательный потенциал на In-контакте.

В случае контакта металл – легированный n -GaAs величина U_ϕ близка к величине барьера [7, 9]. Для ВО-GaAs, в котором уровень Ферми (F_0) лежит практически посредине запрещенной зоны, U_ϕ должна соответствовать величине изгиба краёв зон: проводимости и валентной.

Известно, что на границе n -GaAs и металлов возникает, как правило, барьер для электронов высотой 0,7–0,9 эВ [2, 11]. Для n -GaAs, в котором уровень Ферми практически совпадает с дном зоны проводимости, это означает, что изгиб зоны составляет эту же самую величину 0,7–0,9 эВ. В ВО-GaAs F_0 при комнатной температуре находится в положении $\approx E_c - 0,7$ эВ. Следовательно, придерживаясь имеющихся данных о фиксации F_0 на поверхности GaAs в положении $E_c - (0,7 - 0,9)$ эВ, можно было ожидать появления при измерениях величин U_ϕ в интервале от 0,0 до $\approx 0,2$ эВ. Однако реально измеренные U_ϕ существенно больше. Такое поведение U_ϕ может быть следствием инверсии проводимости поверхностного слоя ВО-GaAs под металлическим контактом до p -типа проводимости. По имеющимся величинам U_ϕ можно оценить положение уровня Ферми F_s на поверхности ВО-GaAs под металлом. Исходя из данных таблицы, уровень Ферми находится в положении $E_v + (0,2 - 0,3)$ эВ. Это следует из соотношения $F_s - E_v = E_g - [(E_c - F_0) + e \cdot U_\phi] \approx 1,4 - 0,7 - (0,4 - 0,5)$. Такому положению F_s соответствуют концентрации дырок $p_0 \approx (4 \cdot 10^{15} - 10^{14}) \text{ см}^{-3}$, следовательно, на границе М-ВО-GaAs вместо контакта металл – полупроводник имеем π - i -переход. Наблюдаемое при всех измерениях уменьшение величины U_ϕ при интенсивностях $N > 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ может быть связано с шунтирующим действием неосвещённой части образца, находящейся под прямым смещением от действия фотоЭДС, либо с уменьшением времени жизни носителей заряда.

При освещении индиевого контакта к ВО-GaAs наблюдается отрицательное значение U_ϕ . Величина U_ϕ меняется в достаточно широких пределах: примерно от 0,2 до 0,4 В (см. таблицу), несмотря на то, что In – вплавной контакт и можно было ожидать стабильных характеристик. Изучение In-контакта не входило в наши задачи. Следует отметить, что, насколько известно авторам, измерения такого рода ранее не проводились.

Таким образом, проведено исследование вольт-ваттных характеристик контактов нескольких металлов с ВО-GaAs:Cr. В качестве металлов были взяты V, Cr, Al, обычно применяемые при изготовлении детекторов рентгеновского излучения. Определены величины изгибов зон, которые достигают $\approx 0,4 - 0,5$ эВ, что значительно больше ожидаемых в модели неизменной поверхности GaAs [11] и указывает на инверсию проводимости приповерхностного слоя ВО-GaAs:Cr. Итак, металлические контакты к ВО-GaAs:Cr из V, Cr, Al после отжига при 400 °C приводят к появлению приповерхностного слоя p -типа проводимости. Возможно, впервые определен приповерхностный изгиб зон в ВО-GaAs при его контакте с вплавленным при 400 °C индием. Как и в предыдущем случае, эта величина меняется для использованных металлов в интервале $-(0,2 - 0,4)$ эВ. Отрицательный знак U_ϕ указывает на антизапорный характер In-контакта, т.е. In-контакт, вплавленный в ВО-GaAs:Cr при 400 °C, является омическим инжектирующим контактом, а высота барьера отличается от высоты барьера контакта In с легированным n -GaAs [12]. Если вернуться к детекто-

рам ионизирующих излучений, то из полученных результатов следует, что темновой ток может содержать генерационную составляющую π - i -перехода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдберг Ю.А. // ФТП. – 1994. – Т. 28. – № 10. – С. 1681–1697.
2. Максимова Н.К., Калыгина В.М., Воронков В.П., Вяткин А.П. // Изв. вузов. Физика. – 1993. – Т. 36. – № 10. – С. 52–62.
3. Хлудков С.С., Толбанов О.П., Будницкий Д.Л. // Изв. вузов. Физика. – 1998. – Т. 41. – № 8. – С. 39–43.
4. Ayzenshtat G.I., Budnitsky D.L., Koretskay O.B., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. – 2002. – V. A 487. – P. 96–101.
5. Ayzenshtat G.I., Koretskay O.B., Novikov V.A., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. – 2004. – V. A531. – P. 121–124.
6. Айзенштат Г.И., Толбанов О.П., Лелеков М.А. // ФТП. – 2007. – Т. 43. – № 11. – С. 1327–1328.
7. Holonyak N., Jr., Rossi I.A., Burnham R.D., et al. // J. Appl. Phys. – 1967. – V. 38. – No. 13. – P. 5422–5423.
8. Блинов Л.М., Вавилов В.С., Галкин Г.Н. // Письма в ЖЭТФ. – 1966. – Т. 3. – № 9. – С. 361–365.
9. Царенков Б.В., Гольдберг Ю.А., Львова Т.В. // ФТП. – 1974. – Т. 8. – № 6. – С. 1230–1231.
10. Будницкий Д.Л., Корецкая О.Б., Новиков В.А. и др. // Электронная промышленность. – 2002. – № 2–3. – С. 108–114.
11. Брудный В.Н., Гриняев С.Н., Колин Н.Г. // Материаловедение. – 2003. – Т. 72. – № 3. – С. 17–25.
12. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А., Константинов О.В. и др. // ЖТФ. – 2007. – Т. 77. – № 2. – С. 140–142.

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Национального исследовательского
Томского государственного университета, г. Томск, Россия
E-mail: dlbudnitsky@sibmail.ru

Поступила в редакцию 21.03.12.

Будницкий Давыд Львович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Новиков Владимир Александрович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Толбанов Олег Петрович, д.ф.-м.н., профессор, зав. отделом;
Яскевич Тамара Михайловна, мл. науч. сотр.