

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ ОКИСЕЛ МЕТАЛЛА—ФОСФИД ГАЛЛИЯ

Малик А. И., Грушка Г. Г.

Представлены результаты исследования гетеропереходов, образованных тонкой пленкой высоколегированного широкозонного полупроводникового соединения SnO_2 или In_2O_3 с фосфидом галлия. По результатам исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик определены значения высоты потенциального барьера и коэффициента идеальности. Значение высоты барьера находится в согласии с величиной, определенной из фотоэмиссионных характеристик по методу Фаулера. Расчет оптических характеристик гетеропереходов подтверждает экспериментально полученное значение внешней квантовой эффективности, близкое по величине к 100 %. Фотоэлектрические и электрофизические параметры исследованных гетерофотодиодов представлены в сравнении с коммерческими фотодиодами фирмы «Hamamatsu».

1. Предварительные замечания

Поверхностно-барьерные фотодиоды на основе фосфида галлия являются перспективными фотоприемниками УФ диапазона спектра. Большое значение E_g материала позволяет получить высокую пороговую чувствительность и обеспечить термостабильность детекторов. На основе данного материала могут быть изготовлены детекторы ионизирующих излучений с длительным сроком службы. Использование в качестве активного электрода полупрозрачных слоев золота [1-4] позволяет получить фотодетекторы с низким значением квантовой эффективности из-за значительных оптических потерь излучения на границе раздела. Ранее в работе [5] была показана возможность значительного увеличения чувствительности фотодетекторов при использовании в качестве активного электрода проводящих прозрачных слоев окислов металлов. Результаты исследования таких фотодетекторов представлены в данной работе.

2. Методика

Поверхностно-барьерные фотодиоды изготавливались на эпитаксиальных $n-n^+$ -структурах с концентрацией носителей в эпитаксиальном слое порядка 10^{16} см^{-3} . Толщина слоев находилась в пределах 10—15 мкм. Омический контакт к подложке создавался вплавлением индия в атмосфере водорода при температуре 500—550 °C.

Барьерный контакт на поверхности эпитаксиального слоя создавался нанесением тонких проводящих слоев двуокиси олова, легированной фтором, или смеси окислов олова и индия методом пульверизации спиртовых растворов хлоридов олова (индия) на нагретую на воздухе до 400—450 °C поверхность структуры или вакуумным магнетронным распылением в атмосфере аргона мишени, состоящей из 92 % In_2O_3 и 8 % SnO_2 (ITO). Выделение фоточувствительных площадей и контактная металлизация осуществлялись методами фотолитографии. В качестве охранного окисла использовался слой двуокиси кремния, полученный магнетронным распылением. Исследование электрофизических параметров и измерение спектрального распределения фототока короткого замыкания осуществлялись стандартными методиками.

3.1. *Характеристика ток—напряжение.* На рис. 1 приведены зависимости тока короткого замыкания от напряжения холостого хода исследованных гетеропереходов. Параметром служила освещенность от источника типа А, которая изменялась в пределах $5 \cdot 10^{-2}$ — $5 \cdot 10^2$ лк. Приведенные зависимости точнее отражают ВАХ исследованных структур в области больших токов по сравнению с темновыми ВАХ из-за возможности избежать влияния на ВАХ последовательного сопротивления. Зависимость тока короткого замыкания от напряжения холостого хода в интервале плотностей тока 10^{-10} — 10^{-4} А/см² для всех исследованных структур имеет экспоненциальный характер:

$$I_{к.з} = I_{SS} \exp(qU/nkT), \quad (1)$$

где I_{SS} — темновой ток насыщения.

Коэффициент идеальности n для разных образцов изменялся в пределах от 1.01 до 1.1. Так как значение данного коэффициента для идеальных структур с барьером Шоттки при учете сил зеркального изображения находится в пределах 1.02—1.08, можно сделать вывод об идеальности исследованных структур, т. е. отсутствии между пленкой окисла металла и полупроводником промежу-

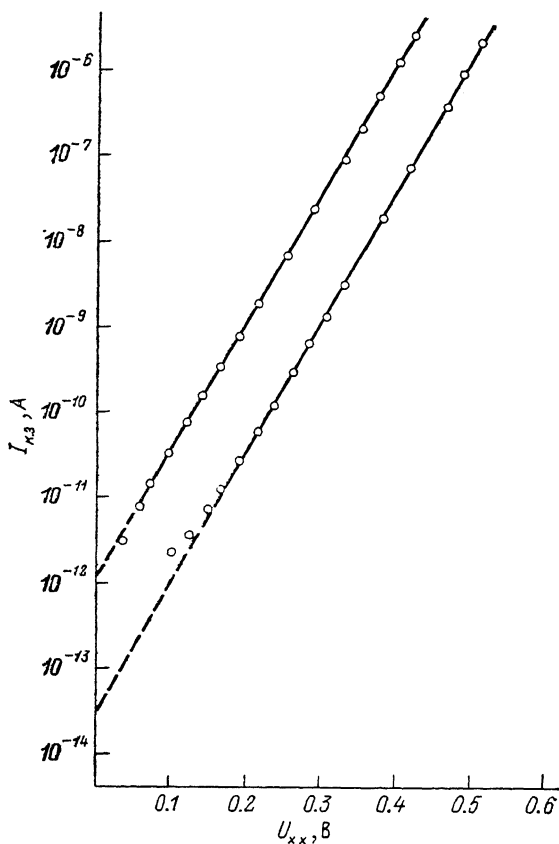


Рис. 1. Зависимость тока короткого замыкания от напряжения холостого хода, фотодиодов окисел металла—фосфид галлия.

Площадь фоточувствительного элемента — 3.14 мм^2 . $U_{хх}$ — напряжение холостого хода.

точного слоя окисла, влияющего на механизм токопереноса. Из приведенных зависимостей была определена величина темнового тока насыщения, что в свою очередь дало возможность рассчитать высоту потенциального барьера в исследованных структурах. Данное значение для различных образцов, определенное из формулы

$$I_{SS} = AST^2 \exp(-\varphi_B/kT), \quad (2)$$

где A — постоянная Ричардсона, находилось в пределах 1.023—1.112 эВ. При этом значение A принималось равным $50 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$, что соответствовало теоретическому значению для фосфида галлия [3]. Заметим, что полученное значение высоты потенциального барьера несколько меньше, чем для структур Au—GaP [1-3], что связано с более низким значением электронного сродства в пленках окислов металлов по сравнению с работой выхода для золота.

Обратные токи для напряжения смещения до 1 В не превышали значения 10^{-12} А. Важным параметром является также величина сопротивления R_0 при нулевом смещении, определяемая на практике при смещении 10^{-2} В, которая для образцов с площадью до нескольких десятков мм² была не менее 10^{10} Ом.

3.2. *Характеристика фототок—энергия фотонов.* При энергиях фотонов, меньших 1.5 эВ, фототок в исследованных структурах обусловлен фотоэмиссией электронов из пленок окисла металла. Концентрация свободных носителей в пленках составляла величину порядка 10^{21} см⁻³. Зависимость фототока короткого замыкания, отнесенного к равному числу падающих фотонов, от энергии фотонов, приведена на рис. 2. Для увеличения сигнала измерения проводились на образцах с площадью не менее 20 мм². Приведенные на рисунке зависимости соответствуют закону Фаулера [6]:

$$\sqrt{R} \sim (\hbar\omega - \varphi_B)^2, \quad (3)$$

где R — значение фототока, отнесенное к равному числу падающих фотонов с энергией $\hbar\omega$.

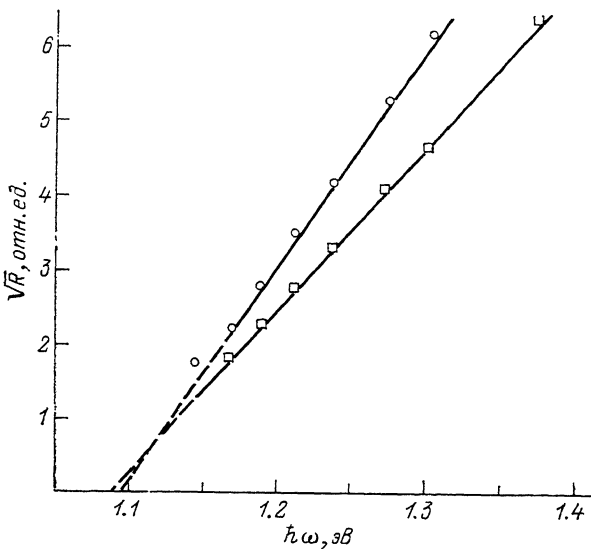


Рис. 2. Зависимости фототока короткого замыкания от энергии фотонов.

Обычно применяемая на практике экстраполяция линейного участка этой зависимости к значению $\sqrt{R}=0$ позволяет определить высоту потенциального барьера. Однако, как было показано в [7], определенная таким образом высота барьера является заниженной вследствие приближенного характера соотношения (3). Точное выражение для R

$$R = \frac{C_0}{\sqrt{C_2}} \left\{ \frac{\pi^2}{6} + \frac{1}{2} C_1^2 - \delta(\mu) \right\}, \quad (4)$$

где $C_0 = 2\sqrt{2}(mkT)^{3/2}/\hbar^3$, $C_1 = \mu = (\hbar\omega - \varphi_B)/kT$, $C_2 = E_F/kT - C_1$.

Методика поправок, описанная в [7], позволила исходя из длины участка зависимости, приведенной на рис. 2, точно соответствующего зависимости (3), т. е. при знании энергетических границ применимости соотношения (3), определить поправки к значению φ_B . Величина поправки оказалась равной $0.73 kT = 0.019$ эВ. С учетом этого значение величины потенциального барьера составило величину для зависимостей, представленных на рис. 2: 1.107 и 1.114 эВ. Данные значения хорошо коррелируют со значениями, определенными по ВАХ.

3.3. *Характеристика оптических потерь.* Основным преимуществом использования в качестве активного электрода тонких пленок окислов металлов является их высокая прозрачность в области спектра 0.35—1.1 мкм, связанная с большим значением ширины запрещенной зоны ($E_g \geq 3.8$ эВ). Кроме того, показатель преломления данных пленок соответствует выражению $n_1 = \sqrt{n_2}$, где n_1 —

показатель преломления пленки, n_2 — показатель преломления полупроводниковой подложки. При выполнении еще одного условия $t_1 n_1 = \lambda/4$, где λ — длина волны света, t_1 — толщина пленки, коэффициент отражения от границы раздела пленка—подложка может быть уменьшен практически до нуля.

Коэффициент пропускания света в полупроводниковую подложку в системе воздух—пленка ИТО—фосфид галлия можно определить при известных значениях оптических констант контактирующих материалов по формуле [8]

$$T_1 = \frac{n_2 [(1 + g_1)^2] [(1 + g_2)^2 + h_2^2]}{1 + g_1^2 (g_2^2 + h_2^2) + C \cos 2\gamma_1 + D \sin 2\gamma_1}, \quad (5)$$

где

$$g_1 = \frac{1 - n_1^2}{(1 + n_1)^2}, \quad g_2 = \frac{n_1^2 - n_2^2 - k_2^2}{(n_1 + n_2)^2 + k_2^2}, \quad h_2 = \frac{2n_1 k_2}{(n_1 + n_2)^2 + k_2^2}, \quad \gamma_1 = \frac{2\pi n_1 t_1}{\lambda},$$

$$C = 2g_1 g_2, \quad D = 2g_1 h_2.$$

Для толщины пленки ИТО 544 Å, длины волны света 0.435 мкм, $n_1 = 2.1$ и $n_2 = 3.99$ [9] величина T_1 , вычисленная по вышеприведенной формуле, равна

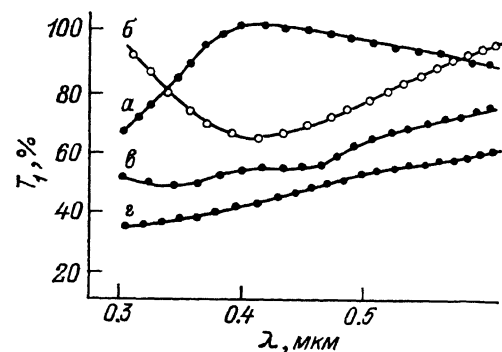


Рис. 3. Расчетные спектральные зависимости величины пропускания света в поверхностно-барьерные структуры ИТО—GaP (*a*, *б*) и Au—GaP (*в*, *г*).

Толщины слоев ИТО и Au: *a* — 0.05, *б* — 0.1 мкм, *в* — 50, *г* — 100 Å.

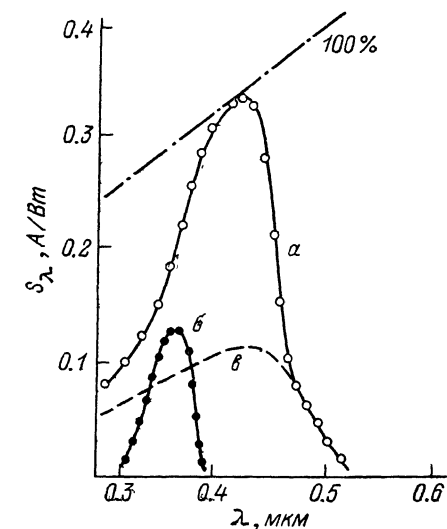


Рис. 4. Спектральные зависимости абсолютной чувствительности фотодиодов: ИТО—GaP (*a*), ИТО—GaP с УФ-фильтром (*б*), Au—GaP [*в*] (*г*).

0.996. Аналогичный расчет проведен нами и для структур с золотым электродом. Оптические константы пленки золота взяты из справочных данных [10]. На рис. 3 приведены рассчитанные спектральные зависимости величины пропускания света в полупроводниковую структуру из фосфида галлия с активным электродом из пленки ИТО (*a*, *б*) и из пленки золота (*в*, *г*). Толщины слоев указаны в подписи к рисунку. Понятно, что достаточно низкие значения коэффициента пропускания света в случае золотых электродов не позволяют получить высокие значения квантовой эффективности.

3.4. Характеристика спектральной чувствительности. Оптимизация оптических потерь позволила изготовить поверхностно-барьерные фотодиоды со значением внешней квантовой эффективности в максимуме фототовета, близком к 100 %. На рис. 4 приведена спектральная зависимость абсолютной чувствительности исследованных структур. Использование УФ-фильтра позволяет получить практически «солнечно-слепой» фотодетектор. На этом же рисунке

приведена зависимость спектральной чувствительности коммерческих фотодиодов фирмы «Hamamatsu».

Сравнение электрофизических и фотоэлектрических параметров исследованных фотодиодов с фотодиодами фирмы «Hamamatsu» [4] приведено в таблице.

В заключение отметим, что разработанная технология почти идеальных

Параметры	Фотодиод ITO — GaP	Фотодиод G 1961 [4]
Площадь, мм ²	3.14	1.0
Сопrotивление R ₀ , Ом	1.5 · 10 ¹¹	4 · 10 ¹⁰
Темновой ток насыщения, А	2.5 · 10 ⁻¹⁴	—
Обратный ток при напряжении смещения 0.01В, А, 1В, А	7 · 10 ⁻¹⁴ 2.5 · 10 ⁻¹³	2.5 · 10 ⁻¹² 25 · 10 ⁻¹²
Чувствительность в максимуме, А/Вт	0.3	0.12
Удельная обнаружительная способность, см · Гц ^{1/2} /Вт	1.8 · 10 ¹⁴	2 · 10 ¹³

поверхностно-барьерных фотодиодов на основе структур окисел металла — фосфид галлия позволяет относительно легко получать детекторы с площадью до 100 мм², а также многоэлементные линейки и матрицы. Такие фотоприемники могут найти применение в качестве пороговых детекторов УФ излучения в различных областях науки и техники.

Авторы глубоко признательны В. Г. Макаренко за высококачественные эпитаксиальные структуры, а также В. А. Гречко за методическую помощь при проведении исследований.

Список литературы

- [1] Гуткин А. А., Дмитриев Д. Н., Наследов Д. Н. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 2. С. 502—509.
- [2] Анисимова И. Д., Головин Ю. М., Дмитриева Л. А., Каляева В. П. // ОМП. 1983. № 12. С. 34—35.
- [3] Гольдберг Ю. А., Царенков Г. В. // Полупроводник. техн. и микроэлектрон. 1986. № 27. С. 33—43.
- [4] Photodiodes. Проспект фирмы «Hamamatsu Photonics K. K.» 1986. С. 19.
- [5] Малик А. И., Гречко В. А., Аникин В. Е. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 11. С. 104—105.
- [6] Fowler R. H. // Phys. Rev. 1931. V. 38. P. 45.
- [7] De Sousa Pires J. // Physica Scripta. 1978. V. 18. P. 372—374.
- [8] Heavens O. S. // Optical Properties of Thin Solid Films. London, 1955.
- [9] Соболев В. В. // Оптические фундаментальные спектры соединений группы АВ. Кишинев, 1979. 285 с.
- [10] Золотарев В. М., Морозов В. Н., Смирнова Е. В. Оптические постоянные природных и технических сред. Л., 1984. 215 с.

Черновицкий государственный университет

Получена 11.03.1991
Принята к печати 29.04.1991