

06;07;12

## АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫЙ ФОТОКАТОД НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ $\text{AlGaAs}/p^+-\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ , ВЫРАЩЕННОЙ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

© В.И.Сазно, А.В.Долгих, В.Г.Чубарев, И.И.Марахова,  
Ю.Г.Галицын, В.Г.Мансуров, А.С.Суранов

Фотокатоды с отрицательным электронным сродством (ФК) на основе гетероэпитаксиальных структур (ГС)  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/p^+-\text{GaAs}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$  находят широкое применение в качестве чувствительных приборов для регистрации сигналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Они используются и как эффективные источники монохроматических пучков со спин-поляризованными электронами [1].

Обычно гетероструктуры для фотокатодов получают либо из металлоорганических соединений газофазной эпитаксией, либо жидкофазной эпитаксией (ЖФЭ). Интегральная чувствительность ( $S$ ) таких фотокатодов имеет величину  $1500 \text{ мкА/лм}$  [2-3].

Сообщений о возможности получения гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) для фотокатодов нет, хотя эпитаксиальный слой  $p^+-\text{GaAs}$  (001), выращенный этим методом на подложке  $\text{GaAs}$  (001), показал интегральную чувствительность  $\sim 950 \text{ мкА/лм}$  [4]. Эта техника имеет ряд потенциальных преимуществ по сравнению с другими ростовыми методами как в контроле ростовых параметров, так и в возможности получения структуры хорошего качества с большими площадями. Кроме того, она позволяет обеспечивать заданные переходы вплоть до атомарно-резких границ и более широкие возможности в конструировании.

При изготовлении фотокатода гетероструктура подвергается различным технологическим операциям: нанесению просветляющего покрытия  $\text{SiO}_2$ , сварке со стеклом, многочисленным операциям химического травления (снятие подложки  $\text{GaAs}$ , удаление стопорного слоя  $\text{AlGaAs}$ , утонение активного слоя  $p^+-\text{GaAs}$  до необходимой толщины, финишное травление и ряд других). Кроме того, фотокатод подвергается термической обработке до  $580^\circ\text{C}$  в сверхвы-

соковакуумной камере для получения атомарно-чистой поверхности (001) GaAs с той или иной реконструкцией. В последующем на эту поверхность наносится слой активирующего покрытия (Cs, O<sub>2</sub>). Наши многолетние исследования гетероструктур, выращенных методом ЖФЭ, привели к созданию определенной технологической схемы изготовления ФК на этих полупроводниковых структурах. Типичные значения  $S$  таких ФК составляют  $\approx 1000-1100$  мкА/лм. Как и в работе [3], лучшие образцы для данной технологии достигали чувствительности  $S = 1700-1900$  мкА/лм. В рамках данной технологической схемы мы будем сравнивать ГС, изготовленные методами ЖФЭ и МЛЭ.

ГС выращивались в камере МЛЭ на полуизолирующих подложках GaAs(001) диаметром 20 Ом. Образцы проходили стандартную подготовку поверхности перед загрузкой в камеру (обезжиривание, травление в серно-кислотном травителе и промывка в деионизованной воде). Контроль за состоянием поверхности перед и во время роста осуществлялся методом дифракции быстрых электронов на отражение. ГС выращивались в условиях избытка As на As-стабилизированной поверхности с реконструкцией (2×4). В качестве легирующей примеси мы выбрали бериллий. Он является акцептором с очень хорошими свойствами: коэффициент встраивания и коэффициент электрической активности равен единице вплоть до концентрации  $2 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup> [5].

Типичная структура ГС МЛЭ:  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/p^+\text{-GaAs}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$  имела слои AlGaAs толщиной 1 мкм с составом  $x = 0.5$ ,  $y = 0.6$  и концентрацией  $p = 5 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Толщина активного слоя  $p^+\text{-GaAs}$  составляла 1.5–2 мкм, а концентрацию мы изменяли в интервале  $p = 7 \cdot 10^{18}-9 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Характерные толщины переходных слоев 7–10 Å (2–3 монослоя) в отличие от ГС с переходными слоями  $\sim 150$  Å, характерными для метода ЖФЭ [3].

Холловская подвижность ГС МЛЭ для концентрации  $p = 3 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> составляла 80–90 см<sup>2</sup>/В·с. Для такой же концентрации эпислоя авторы работы [4] получили подвижность носителей  $\mu_p \approx 69$  см<sup>2</sup>/В·с.

Контроль качества серии выращенных нами образцов осуществлялся методом краевой фотолюминесценции (ФЛ), для возбуждения которой мы использовали излучение с  $\lambda = 632.8$  нм. Как и для ГС ЖФЭ, для ГС МЛЭ образцов интегральная интенсивность ФЛ растет с увеличением концентрации акцепторов (рис. 1). Энергия максимума кривой спектра ФЛ для ГС МЛЭ на 10–15 мэВ меньше аналогичного спектра ФЛ для ГС ЖФЭ (ЖФЭ образцы легировались Zn). Существенное отличие ФЛ у ГС МЛЭ образцов от

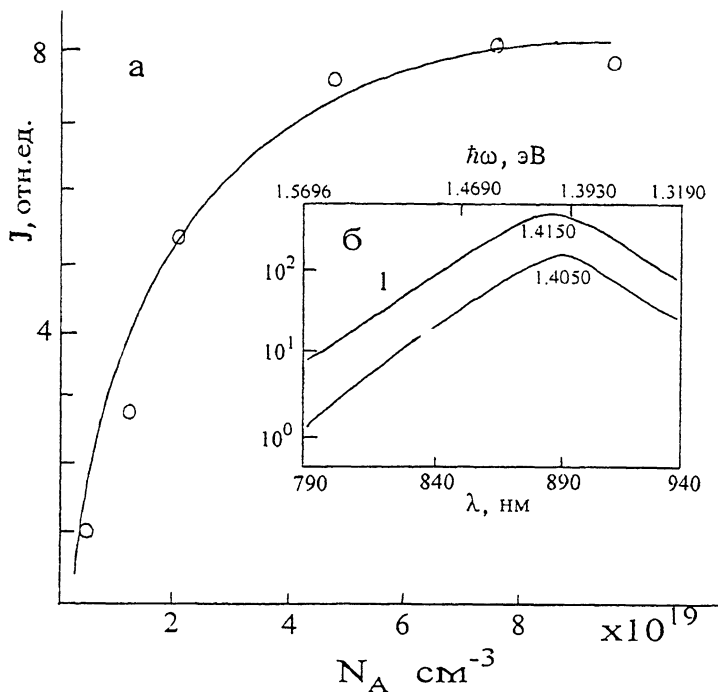


Рис. 1. а — интегральная интенсивность краевой фотолуминесценции как функция концентрации акцепторов в слое  $p\text{-GaAs}$ ; б — спектральная кривая краевой фотолуминесценции: 1 — гетероструктура, полученная методом ЖФЭ, легированная Zn; 2 — гетероструктура, полученная методом МЛЭ, легированная Be.

ЖФЭ состоит в уменьшении (4–6) раза сигнала интегральной интенсивности ФЛ (рис. 1, б).

Для установления причин столь резкого различия интенсивности требуются дальнейшие детальные исследования, однако фоточувствительность ФК МЛЭ, как мы увидим далее, практически такая же, как и для ЖФЭ образцов. Следовательно, диффузионные длины (т. е. времена жизни фотоэлектронов, слагающиеся из излучательного и безызлучательного времен жизни) у данных групп образцов близки.

Перед загрузкой ФК в СВВ камеру для фотоочувствления (активировки) образцы проходили финишное стравливание поверхностных окислов в сухом закрытом боксе по разработанной технологии, согласно работам [6–7]. Этот режим обработки позволял активировать образцы с As-стабилизированной ( $2 \times 4$ ) поверхностью в отличие от Ga-ста-

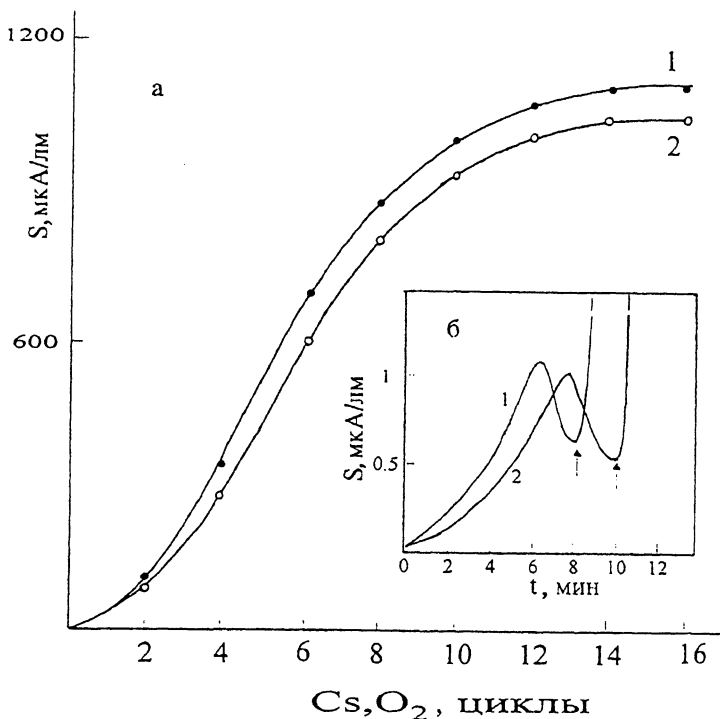


Рис. 2. Активировочные кривые для фотокатодов, изготовленных методами ЖФЭ (1) и МЛЭ (2): а — зависимость фоточувствительности от числа цезий-кислородных циклов; б — начальный участок активировочной кривой, демонстрирующий первый Cs пик; стрелками указаны моменты подачи на поверхность ФК потока кислорода.

билизированной поверхности с реконструкцией с  $(8 \times 2)$ , активированной в работе [8].

Активирование ФК осуществлялось циклическим нанесением Cs и  $O_2$  на поверхность так называемой “Уо-Уо-техники”. Число циклов ( $Cs-O_2$ ) составляло обычно 13–15. При этом мы использовали стоккеровский метод двухстадийного процесса [9]. Прирост фоточувствительности во второй стадии составлял  $\sim 40\%$  от величины  $S$  в первой стадии. Результаты фотоочувствления ФК МЛЭ представлены на рис. 2. Ход активировки и величины  $S$  образцов МЛЭ практически идентичны образцам, изготовленным методом ЖФЭ.

После активационного процесса мы исследовали стабильность ФК МЛЭ образцов в приборной реализации типа

электронно-оптического преобразователя. По сравнению с ФК ЖФЭ нет существенных особенностей в изменении  $S$ : при хранении приборов ФК МЛЭ  $S$  изменялось на 7% за 50 ч хранения, у ФК ЖФЭ  $\sim 6\%$ .

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность изготовления ГС молекулярно-лучевой эпитаксии с характеристиками, близкими к характеристикам ГС ЖФЭ. Использование МЛЭ в росте ГС для ФК с хорошими фотоэмиссионными свойствами имеет ряд преимуществ по сравнению с ЖФЭ и обещает быть перспективным.

Работа частично была финансирована по гранту РФФИ № 95-02-04618а.

### Список литературы

- [1] Kolac U., Donath M., Ertl K. // Rev. Sci. Instrum. 1988. V. 59. P. 1933-1936.
- [2] Andre J.P., Guittard P., Hallais J., Piaget C. // J. Cryst. Growth. 1981. V. 55. N 1. P. 235-245.
- [3] Болховитянов Ю.Б., Морозов Б.В., Суранов А.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 7. С. 25-29.
- [4] Narayanan A.A., Fisher D.G., Erickson Z.P. // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. P. 1886-1887.
- [5] Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры. Пер. с англ. под ред. Ж.И. Алферова. М.: Мир. 1989. Гл. 5. 582 с.
- [7] Галицын Ю.Г., Мансуров В.Г., Пошевнев В.И. // Поверхность. 1989. № 10. С. 140-142.
- [8] Besanson M., Zanders R., Jupille J. // J. Vac. Sci. Technol. A. V. 5. N 4. 1987. P. 2025-2027.
- [9] Stocker B.J. // Surf. Sci. 1975. V. 47. P. 501-513.

АООТ "Катод"  
Новосибирск  
Институт физики  
полупроводников  
СО РАН  
Новосибирск

Поступило в Редакцию  
26 августа 1996 г.