

УДК 621.382.133.546.681'19

## ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ ФОТОКАТОДОВ ДО 1,1 мкм

Л. Г. Забелина, А. С. Петров

Центральный научно-исследовательский институт "Электрон", Санкт-Петербург, Россия

В ЦНИИ "Электрон" в течение многих лет ведутся разработки фотоэлектронных приборов на основе фотокатодов с отрицательным электронным сродством (ОЭСФК) со структурами из полупроводников группы АЗВ5 чувствительных в диапазоне 0,35—1,1 мкм. На основе гомоэпитаксиальных структур GaAs [Ge] была разработана серия ФЭУ — квантаконов (ФЭУ-155, -156, -157) с фотоэмиссионной чувствительностью в диапазоне до 0,9 мкм 700—1200 мкА/лм. На базе эпитаксиальных структур  $In_{0,18}Ga_{0,82}As$  — GaAs были получены ОЭСФК, которые легли в основу разработанных ФЭУ с диапазоном чувствительности 0,35—1,1 мкм, имеющие на длине волны 1,06 мкм квантовую эффективность 0,5—2 %. На получаемых методом МОС-гетеридной газовой эпитаксии структурах в системе GaAs— $Al_xGa_{1-x}$  были достигнуты значения фотоэмиссионной чувствительности ОЭС полупрозрачных ФК на стекле в диапазоне 0,5—0,9 мкм 500—1500 мкА/лм. Показано, что для расширения спектрального диапазона чувствительности полупрозрачных ОЭС ФК до длины волны 1,1 мкм для применения в приборах ночного видения возможно использовать структуры с активным слоем состава  $In_{0,18}Ga_{0,82}As$ .

С 1974 г. в ЦНИИ "Электрон" ведутся разработки эпитаксиальных методов получения слоев соединений АЗВ5, предназначенных для использования в качестве отражательных и полупрозрачных фотокатодов с отрицательным электронным сродством (ОЭСФК) чувствительных к свету в диапазоне 0,35—1,1 мкм. В качестве методов получения использовались жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ), газофазная эпитаксия (ГФЭ) на основе транспортных реакций и эпитаксия с использованием металлоорганических соединений (ЭМОС).

В процессе разработок решались задачи достижения структурных и электрофизических характеристик материалов с целью обеспечения высоких фотоэмиссионных свойств ОЭСФК, а также повышения производительности оборудования и технологий изготовления фотокатодов.

Методом ЖФЭ получали ФК с ОЭС, работающие как "на отражение", так и "на просвет". Достоинствами его являются простота аппаратного оформления и возможность получения высоких значений электрофизических и фотоэлектрических параметров. Недостаток метода — это невозможность и сложность достижения однородности свойств по площади структур большого диаметра. Так как производительность установки ЖФЭ с реактором горизонтального типа составляла 1—2 шт. за один технологический цикл, то для гомоэпитаксиальных

## FORMATION OF THIN FILMS OF SILICIDE NICKEL BY METHOD OF ANNEALING STRUCTURE Ni FILM—POLYSI

V. P. Korolkov, A. N. Yurkov, A. R. Mikertumyants  
The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion", Moscow, Russia

*The effects of vacuum furnace annealing (400–750 °C) of the conductivity — of structures Ni film-polySi layer has been investigated. Ni films (500, 1000, 1200 Å) were deposited by magnetron sputtering. The possibility to realise silicide conductivity layers with sheet resistance about 1 Ohm/□ and from "meanders" with the wide of lines about 4 μm by methods of chemical, plasmochemical and ion beam etching has been shown.*

УДК 621.382.133.546.681'19

## ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ ФОТОКАТОДОВ ДО 1,1 МКМ

Л. Г. Забелина, А. С. Петров

Центральный научно-исследовательский институт "Электрон", Санкт-Петербург, Россия

*В ЦНИИ "Электрон" в течение многих лет ведутся разработки фотоэлектронных приборов на основе фотокатодов с отрицательным электронным средством (ОЭСФК) со структурами из полупроводников группы АЗВ5 чувствительных в диапазоне 0,35–1,1 мкм. На основе гомоэпитаксиальных структур GaAs [Ge] была разработана серия ФЭУ — квантаконов (ФЭУ-155, -156, -157) с фотоэмиссионной чувствительностью в диапазоне до 0,9 мкм 700–1200 мкА/лм. На базе эпитаксиальных структур  $In_{0,18}Ga_{0,82}As$  — GaAs были получены ОЭСФК, которые легли в основу разработанных ФЭУ с диапазоном чувствительности 0,35–1,1 мкм, имеющие на длине волны 1,06 мкм квантовую эффективность 0,5–2 %. На получаемых методом МОС-гидридной газовой эпитаксии структурах в системе GaAs—Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub> были достигнуты значения фотоэмиссионной чувствительности ОЭС полупрозрачных ФК на стекле в диапазоне 0,5–0,9 мкм 500–1500 мкА/лм. Показано, что для расширения спектрального диапазона чувствительности полупрозрачных ОЭС ФК до длины волны 1,1 мкм для применения в приборах ночного видения возможно использовать структуры с активным слоем состава  $In_{0,18}Ga_{0,82}As$ .*

С 1974 г. в ЦНИИ "Электрон" ведутся разработки эпитаксиальных методов получения слоев соединений АЗВ5, предназначенных для использования в качестве отражательных и полупрозрачных фотокатодов с отрицательным электронным средством (ОЭСФК) чувствительных к свету в диапазоне 0,35–1,1 мкм. В качестве методов получения использовались жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ), газофазная эпитаксия (ГФЭ) на основе транспортных реакций и эпитаксия с использованием металлоорганических соединений (ЭМОС).

В процессе разработок решались задачи достижения структурных и электрофизических характеристик материалов с целью обеспечения высоких фотоэмиссионных свойств ОЭСФК, а также повышения производительности оборудования и технологий изготовления фотокатодов.

Методом ЖФЭ получали ФК с ОЭС, работающие как "на отражение", так и "на просвет". Достоинствами его являются простота аппаратного оформления и возможность получения высоких значений электрофизических и фотоэлектрических параметров. Недостаток метода — это невозможность и сложность достижения однородности свойств по площади структур большого диаметра. Так как производительность установки ЖФЭ с реактором горизонтального типа составляла 1–2 шт. за один технологический цикл, то для гомоэпитаксиальных

структур GaAs решить проблему производительности удалось используя методику окунания и шагового охлаждения. В специально разработанной установке УЖЭВ-1 в центральной части вертикального кварцевого реактора помещался кварцевый контейнер с перенасыщенным раствором-расплавом Ga—GaAs. В контейнер погружались вертикально поставленные шесть пар подложек арсенида галлия.

Таким образом, нами была выполнена разработка серийной технологии изготовления структур арсенида галлия, легированного германием *p*-типа проводимости для непрозрачных ОЭСФК, примененных в ФЭУ типа квантаконы.

### П а р а м е т р ы    с т р у к т у р

Толщина слоя GaAs<Ge>, мкм .....	10
Тип проводимости .....	"p"
Концентрация основных носителей заряда дырок, см <sup>-3</sup> .....	(2,5–5)·10 <sup>18</sup>
Подвижность, см <sup>2</sup> /(В·с) .....	75–95
Ориентация .....	[111]
Диффузная длина, мкм .....	4–6
Фотоэмиссионная чувствительность в СВВ-камере, мкА/лм .....	1200–3200

Теоретические расчеты интегральной чувствительности ОЭСФК "на отражение" при диффузионной длине  $L = 1-10$  мкм и вероятности выхода  $B \sim 0,8$   $S = 2400-4000$  мкА/лм.

Таким образом, нами была достигнута фотоэмиссионная чувствительность, близкая к расчетной [1].

На основе этих структур была разработана серия ФЭУ-квантаконов: ФЭУ-155, -156, -157 [2].

С целью расширения спектрального диапазона чувствительности в длинноволновую область спектра велись работы по получению эпитаксиальных слоев твердых растворов галлий арсенид — индий арсенид на подложках GaAs. Для получения красной границы спектра на уровне 1,06—1,1 мкм состав твердого раствора  $In_xGa_{1-x}As_x$  должен быть равен 0,18. При этом расхождение по величине постоянной решетки  $a$  ( $In_{0,18}Ga_{0,82}As$ ) с  $a$  (GaAs) слишком велика, чтобы выросли слои с хорошей морфологией. Поэтому применялся в этом случае ЖФЭ буферный слой и растили более сложную структуру GaAs (подложка) —  $Ga_{1-y}In_yP$  —  $Ga_{1-x}In_xAs$ .

На таких структурах "на отражение" были получены следующие характеристики спектральной чувствительности:

красная граница, мкм.....	0,92; 1,1
интегральная чувствительность, мкА/лм .....	200–400

Для повышения производительности и фотоэмиссионной чувствительности в красной области структуры с красной границей спектра 1,1 мкм GaAs (подложка) —  $In_xGa_{1-x}As$  ( $x = 0,18$ ) выращивали методом газовой эпитаксии с использованием хлоридно-гидридной технологии. Согласование решеток подложки и верхнего слоя  $In_xGa_{1-x}As$  с  $x = 0,18$  осуществлялось путем выращивания слоя переменного состава от  $x = 0$  до  $x = 0,18$ . Осаждение проводилось на стандартной установке ЭТР-100. Изменение состава производили путем увеличения потока хлористого водорода через источник индия. Производительность разработанного метода — до 7 структур диаметром 40 мм за технологический цикл.

Одна из основных проблем при разработке этой технологии — неконтролируемый рост твердого раствора на поверхности структуры после окончания

структур GaAs решить проблему производительности удалось используя методику окунания и шагового охлаждения. В специально разработанной установке УЖЭВ-1 в центральной части вертикального кварцевого реактора помещался кварцевый контейнер с перенасыщенным раствором-расплавом Ga—GaAs. В контейнер погружались вертикально поставленные шесть нар подложек арсенида галлия.

Таким образом, нами была выполнена разработка серийной технологии изготовления структур арсенида галлия, легированного германием *p*-типа проводимости для непрозрачных ОЭСФК, примененных в ФЭУ типа квантаконы.

### П а р а м е т р ы    с т р у к т у р

Толщина слоя GaAs<Ge>, мкм .....	10
Тип проводимости .....	"p"
Концентрация основных носителей заряда дырок, см <sup>-3</sup> .....	(2,5–5)·10 <sup>18</sup>
Подвижность, см <sup>2</sup> /(В·с) .....	75–95
Ориентация .....	[111]
Диффузная длина, мкм .....	4–6
Фотоэмиссионная чувствительность в СВВ-камере, мкА/лм .....	1200–3200

Теоретические расчеты интегральной чувствительности ОЭСФК "на отражение" при диффузионной длине  $L = 1-10$  мкм и вероятности выхода  $B \sim 0,8$   $S = 2400-4000$  мкА/лм.

Таким образом, нами была достигнута фотоэмиссионная чувствительность, близкая к расчетной [1].

На основе этих структур была разработана серия ФЭУ-квантаконов: ФЭУ-155, -156, -157 [2].

С целью расширения спектрального диапазона чувствительности в длинноволновую область спектра велись работы по получению эпитаксиальных слоев твердых растворов галлий арсенид — индий арсенид на подложках GaAs. Для получения красной границы спектра на уровне 1,06—1,1 мкм состав твердого раствора  $In_xGa_{1-x}As_x$  должен быть равен 0,18. При этом расхождение по величине постоянной решетки  $a$  ( $In_{0,18}Ga_{0,82}As$ ) с  $a$  (GaAs) слишком велика, чтобы выросли слои с хорошей морфологией. Поэтому применялся в этом случае ЖФЭ буферный слой и растили более сложную структуру GaAs (подложка) —  $Ga_{1-y}In_yP$  —  $Ga_{1-x}In_xAs$ .

На таких структурах "на отражение" были получены следующие характеристики спектральной чувствительности:

красная граница, мкм.....	0,92; 1,1
интегральная чувствительность, мкА/лм .....	200–400

Для повышения производительности и фотоэмиссионной чувствительности в красной области структуры с красной границей спектра 1,1 мкм GaAs (подложка) —  $In_xGa_{1-x}As$  ( $x = 0,18$ ) выращивали методом газовой эпитаксии с использованием хлоридно-гидридной технологии. Согласование решеток подложки и верхнего слоя  $In_xGa_{1-x}As$  с  $x = 0,18$  осуществлялось путем выращивания слоя переменного состава от  $x = 0$  до  $x = 0,18$ . Осаждение проводилось на стандартной установке ЭТР-100. Изменение состава производили путем увеличения потока хлористого водорода через источник индия. Производительность разработанного метода — до 7 структур диаметром 40 мм за технологический цикл.

Одна из основных проблем при разработке этой технологии — неконтролируемый рост твердого раствора на поверхности структуры после окончания



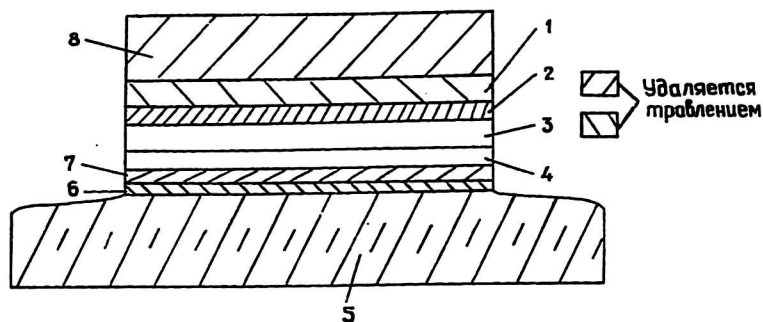


Рис. 2. Входное окно с гетероструктурой  $\text{In}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{As}-\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$  — стекло для ОЭСФК на диапазон чувствительности 0,55—1,1 мкм:

- 1 —  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$  — стопорный слой; 2 —  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  переменного состава,  $x = 0-0,18$ ;  
 3 —  $\text{In}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}$  — активный слой; 4 —  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$  — буферный слой; 5 — стекло А-54; 6 —  $\text{SiO}_x$ ;  
 7 —  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; 8 — GaAs (подложка) р-тип

раствор  $\text{In}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{As}$ . Такой слой можно получить способом МОС-гибридной эпитаксии, причем слой с 18 % In должен быть получен путем выращивания переходного слоя с постепенным добавлением In от 0 до 18 %. Подобные работы ведутся за рубежом, например в фирме Lutton Electron Devison [4] получены лабораторные образцы ЭОП на основе ОЭСФК со структурой InGaAs и на  $\lambda = 1,06$  мкм получена чувствительность в приборе 0,08—0,35 мА/Вт.

На рис. 3 показаны спектральные характеристики ОЭСФК, сдвинутые в ИК-область и полученные на образцах структур GaAs— $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ — $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ , выращенных в нашем институте на подложках из арсенида галлия с активным слоем  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  ( $y = 0,18$ ), снятые при работе ФК в режиме “на просвет”. Структура не была термокомпрессирована со стеклом. Показано,

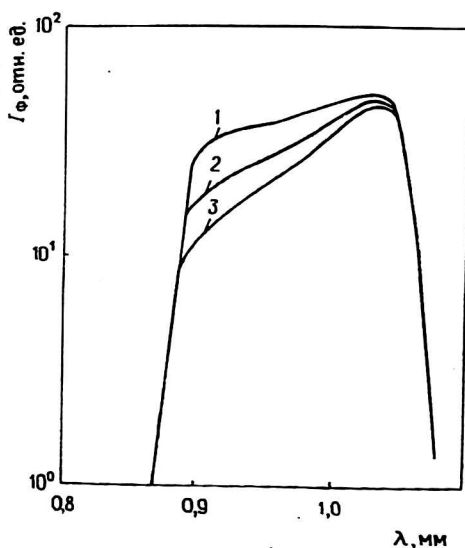


Рис. 3. Спектральные характеристики фототока на границе раздела электролит—полупроводник (активный слой гетероструктуры для полупрозрачного фотокатода), снятые в режиме “на просвет”:

- 1 —  $\text{GaAs}-\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}-\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ , толщина активного слоя  $h = 1$  мкм; 2 —  $h = 2$  мкм; 3 —  $h = 4$  мкм

что на основе гетероструктур GaAs—GaAlAs—InGaAs, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, возможно продвинуть спектральную фотоэмиссионную чувствительность ОЭСФК в ближнюю ИК-область до 1,1 мкм с перспективой использования таких катодов в приборах ночного видения.

### Литература

1. Антонов А. И., Забелина Л. Г., Ичкитидзе Р. Р., Климин А. И. и др. Арсенид-аллиевый фотокатод с интегральной чувствительностью 3200 мкА/лм//Письма ЖТФ, 1985. Т. 11. № 10. С. 602—605.
2. Александров И. Р., Вильдгрубе Г. С., Дунаевская Н. В., Пальтс Т. Н. Фооумножители с фото- и вторичными эмиттерами из материалов АЗВ5//Электронная промышленность. 1985. № 9. С. 31—33.
3. Забелина Л. Г., Петров А. С., Поляков А. Я., Саксеев Д. А., Шильбах В. А. Поверхностные свойства гетероструктур GaAs—In(x)Ga(1-x)As для ОЭС фотокатода//Электронная техника. Сер. 4. 1987. № 8. 4(257). С. 8.
4. Estreera J. P., Passmore T. W., Rector M. Development of Extended Red (1,0—1,3 мкм)//Image Intensifiers, SPIE. 1994. V. 2551. P. 135—144.

## GaAs-BASED HETEROEPITAXIAL STRUCTURES FOR THE SPECTRAL RANGE UP TO 1,1 мкм

L. G. Zabelina, A. S. Petrov

Electron Central Research Institute, St.-Peterburg, Russia

*The paper shows that Electron NRI has been developed photosensitive devices on the base of the negative—electron—affinity photocathodes (NEAPhC) with АЗВ5 structures sensitive in the spectral range from 0,35 to 1,1 мкм for a long time. The homoepitaxial GaAs(Ge) — structures underlay the quantocon PMT family (the 155, 56, 157 PMTs) featuring the luminous sensitivity from 700 to 1200 мкА/лм in the spectral range up to 0,9 мкм. The produced NEAPhC with the  $In_{0,18}Ga_{0,82}As$ —GaAs structures underlay the developed PMTs featuring the spectral response range from 0,35 to 1,1 мкм, the quantume yield from 0,5 to 2 % with the wavelength of 1,06 мкм. The semitransparent on-glass NEAPhCs based on the GaAs  $Al_xGa_{1-x}As$  epitaxial structures grown with the MOCVD method showed the luminous sensitivity 100—1500 мкА/лм in spectral range from 0,5 to 0,9 мкм. It is shown that with the purpose of extending the spectral response range for the semitransparents NEARhC to the wavelength of 1,1 мкм for an application for night vision devices, the structures with the  $In_{0,18}Ga_{0,82}As$  active layer compound can be used.*