

06.2;06.3;07;11;12

©1994

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ДВУХФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ОЭС ФОТОКАТОД С ВЫСОКИМ СТАБИЛЬНЫМ КВАНТОВЫМ ВЫХОДОМ ФОТОЭМИССИИ

Ю.Ф.Бирюлин, В.Н.Каряев, О.Ф.Лепехин

Известно, что фотокатоды с отрицательным электронным сродством (ФКОЭС) на основе бинарных соединений A^3B^5 , и прежде всего на арсениде галлия, обладают существенно более высокой фоточувствительностью в красной и ближней ИК областях спектра по сравнению с традиционными фотокатодами или фотокатодами с положительным электронным сродством (ФКПЭС). Например, для арсенида галлия в условиях сверхвысоковакуумной камеры удавалось получать ОЭС фотоэммитеры со световой чувствительностью свыше 2000 мкА/лм и вплоть до значений, близких к теоретическому пределу [1].

В серийно выпускаемых приборах, однако, световая чувствительность обычно не превышает 1000 мкА/лм [2]. Но основными недостатками ФКОЭС в фотоэлектронных умножителях (ФЭУ) являются: их деградация со временем, а именно падение световой чувствительности ФКОЭС в процессе работы ФЭУ, и малые рабочие токи ($\sim 10^{-7}$ А) в режиме постоянной засветки [2].

Основными причинами нестабильности световой чувствительности во времени являются: "отравление" ОЭС фотокатода остаточными газами в колбе прибора и десорбция цезия и/или его миграция по поверхности фотокатода на основе арсенида галлия [3,4]. Как показывает анализ, эти процессы обусловлены главным образом слабой химической связью цезия с поверхностью арсенида галлия и других полупроводниковых соединений A^3B^5 .

Для снижения роли упомянутых процессов деградации ОЭС фотокатодов нами разработана технология изготовления структур для ФКОЭС с применением двойного легирования активного эпитаксиального слоя GaAs примесной парой в процессе роста (изовалентная примесь (ИВП) и акцепторная примесь (АП)), отличающаяся от известных методик [5,6] взаимосогласованным целенаправленным выбором пары ИВП и АП. Данная работа посвящена экспериментальным результатам проверки этого предположения.

Основные положения такого выбора сводятся к следующему. Необходимо в эпитаксиальный активный слой структуры для ФКОЭС — матрицу арсенида галлия — вводить ИВП III или V группы с ковалентным радиусом большим, а электроотрицательностью — меньшей, чем ковалентный радиус и электроотрицательность замещаемого элемента III или V группы матрицы кристалла. При этом в качестве параллельно вводимой акцепторной примеси следует выбирать элемент с ковалентным радиусом и электроотрицательностью меньшими, чем у выбранной ИВП. Изготовление ФКОЭС на основе структур, легированных парой ИВП и АП, удовлетворяющих указанным критериям, обеспечивает, в частности, повышение устойчивости химических связей цезия с кристаллической поверхностью GaAs.

В качестве таких пар для ФКОЭС на основе арсенида галлия нами предложены и опробованы: ИВП Sb-АП Ge и ИВП Bi-АП Zn. Эти пары удовлетворяют изложенным выше критериям отбора. При двойном легировании их применение предпочтительно, так как Ge и Zn — типичные мелкие акцепторы при изготовлении ФКОЭС на основе GaAs. В данной работе изложены результаты использования пары ИВП Sb-АП Ge.

Дополнительные преимущества применения таких пар примесей связаны с улучшением объемных свойств активного слоя ФКОЭС. Так, легирование GaAs ИВП Sb приводит к сдвигу стехиометрии в пользу вакансий As, что способствует преимущественному вхождению Ge на его места (акцептор Ge_{As} [7,8]) и, напротив, легирование GaAs ИВП Bi смещает стехиометрию в пользу вакансий Ga, и тем самым благоприятствует вхождению Zn на места вакансий Ga (акцептор Zn_{Ga} [9-11]). Как в том, так и в другом случае это снижает степень компенсации материала активного слоя.

Немаловажно и то обстоятельство, что ИВП Sb и Bi в эпитаксиальных слоях GaAs(Sb) и GaAs(Bi) имеют значительные избыточные поверхностные концентрации (по отношению к объемным) [12-14]. Это может способствовать появлению на поверхности при активировке цезием (наряду с типичным для этого случая ОЭС состоянием) стабильных химических связей, свойственных традиционным фотокатодам (ФКПЭС) типа Cs_3Sb [5] и Cs_3Bi .

Еще один положительный фактор применения пары ИВП(Sb) и АП(Ge) заключается в том, что коэффициент распределения сурьмы в GaAs превышает коэффициент распределения германия [15], что позволяет обеспечивать переменный по толщине активного слоя структуры для ФКОЭС уровень легирования акцептором Ge. В объеме активного слоя концентрация акцепторов Ge_{As} мала, что определяет

большое значение диффузионной длины неосновных носителей заряда, а у поверхности она велика, что способствует созданию узкого слоя приповерхностного изгиба зон, уменьшая тем самым долю рассеиваемых в потенциальной приповерхностной яме фотоэлектронов.

Таким образом, наряду с упрочнением химических связей Cs с поверхностью матрицы полупроводника, предлагаемый нами принцип подбора пары ИВП и АП и технология их введения в активный слой позволяют изготовить фотокатод, сочетающий достоинства ФКОЭС и стабильных, хорошо известных ФКПЭС Cs_3Sb и Cs_3Bi .

За счет этого в несколько раз увеличивается минимальное время наработки ОЭС фотокатода (испытания в течение 1000 ч не приводили к заметным изменениям чувствительности) и примерно на порядок возрастает допустимый рабочий ток в режиме постоянной засветки [16].

Перечисленные преимущества ФКОЭС на основе $GaAs(Sb, Ge)$ сохраняются при переходе от "разбавленных" твердых растворов (область изовалентного легирования) к концентрированным твердым растворам $GaAs_{1-x}Sb_x(Ge)$.

Применение квазибинарного (тройного) соединения $GaAs_{1-x}Sb_x(Ge)$ обеспечивает возможность продвижения красной границы фотоэффекта в ближнюю ИК область спектра и, более того, получения селективного фотоэффекта, используя варизонные свойства изготавливаемой структуры [16,17]. Это обстоятельство позволяет создать принципиально новый, комбинированный (или универсальный) ОЭС фотокатод, обладающий одновременно широкополосной спектральной характеристикой со сдвинутой в ИК область красной границей фотоэффекта при засветке со стороны активного слоя и селективной (узкополосной) характеристикой фоточувствительности в ближней ИК области при освещении со стороны подложки (рис. 1).

До сих пор селективность (избирательность) фоточувствительности обеспечивали путем подбора (сочетания) широкополосного фотоприемника с соответствующими фильтрами (например, интерференционными). Этот вариант достижения избирательности не лишен недостатков: потери собственно в интерференционном фильтре на длине волны селекции обычно лежат в пределах 40–80%; необходимо коллимирование пучка света и соблюдение точности нормали его падения, в противном случае изменяется длина волны селекции; фильтр обеспечивает подавление излучения только в ограниченных областях справа и слева от длины волны селекции, а не во всем интервале [18].

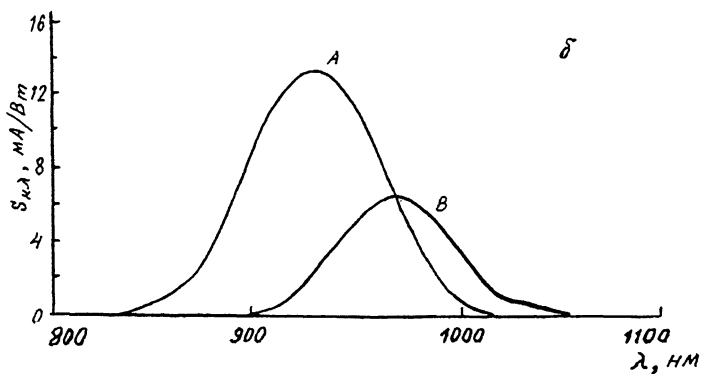
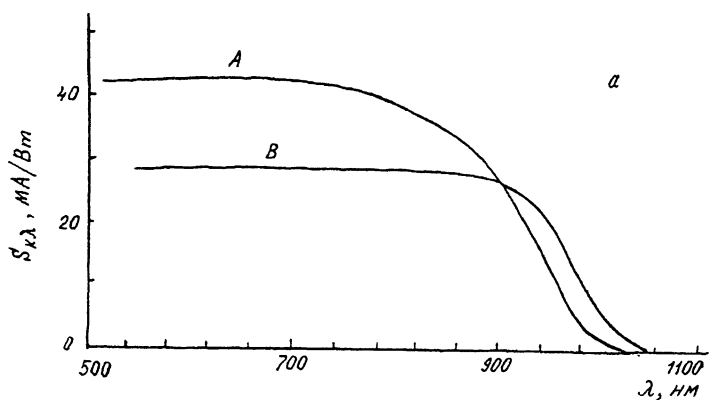


Рис. 1. Спектральные характеристики чувствительности двух фотокатодов (А и В) при работе на отражение (а) и на просвет (б).

Новый фотокатод лишен этих недостатков и демонстрирует полное отсутствие чувствительности на длинах волн больше или меньше длины волны селекции. Ширина полосы избирательной чувствительности, по понятным причинам, не может быть сделана меньше величины параметра kT , а ее уширение определяется параметрами варизонности активного эпитаксиального слоя.

Чувствительность на длине волны селекции (работа на просвет) в изготовленных ФКОЭС составляет $\sim 50\%$ от аналогичного параметра для этой длины волны при работе на отражение (широкополосная спектральная характеристика). Она определяется потерями на отражение от подложки и поглощением в ней. Применение просветляющих покрытий подложки способно довести селективную чувствительность до 85–95% от ее значения при работе на отражение, то есть практически уравнивать их.

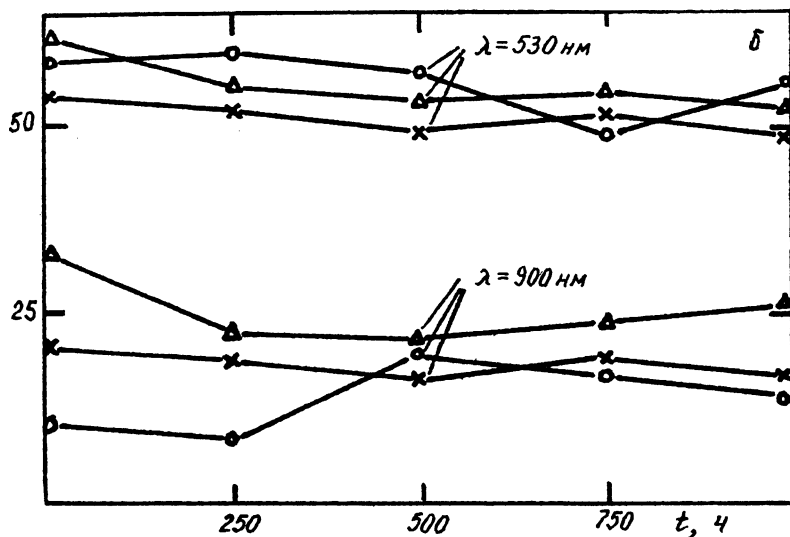
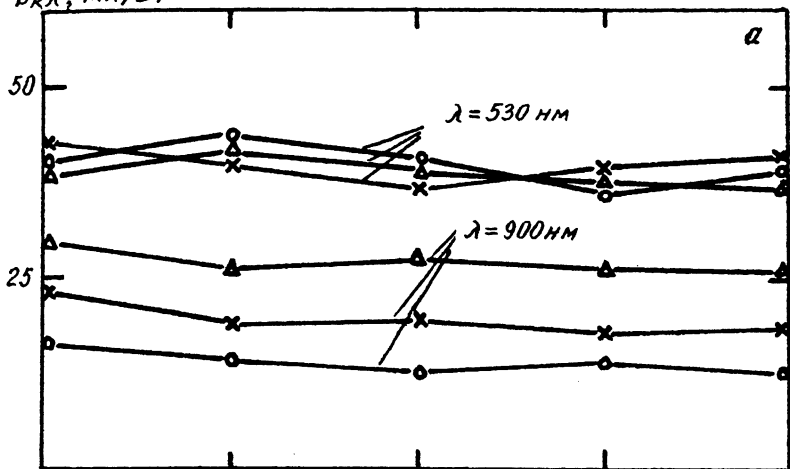
$S_{\kappa\lambda}, \text{MA/BT}$ 

Рис. 2. Чувствительность фотокатодов на двух длинах волн (530 и 900 нм) в зависимости от времени наработки в течение 1000 часов в макетах ФЭУ.

а — три фотокатода при постоянной засветке, соответствующей рабочему току 10^{-8} А;

б — три других фотокатода при постоянной засветке, соответствующей рабочему току 10^{-7} А.

Параметры двухфункциональных ФКОЭС в макетах ФЭУ

№ ФЭУ	Напряжение питания, соответственно $S_{k\lambda} = 1000 \text{ A/Вт};$ $\lambda = 840 \text{ нм};$ В	Темно- вой ток $I_T,$ нА	Спектральная чувствительность фотокаатода на отражение						Спектральная чувствительность фотокаатода на просвет		
			$\lambda = 690 \text{ нм}$		$\lambda = 840 \text{ нм}$		$\lambda = 900 \text{ нм}$		λ	мА/Вт	$\eta,$ %
			мА/Вт	$\eta, \%$	мА/Вт	$\eta, \%$	мА/Вт	$\eta, \%$			
			се- лект., нм								
1	1230	0.3	90	16	90	13.3	30	4.1	900	9.7	1.3
2	1320	0.6	60	10.6	55	8.1	28	3.9	900	9.7	1.3
3	1290	0.3	45	8.0	41	6.1	21	2.9	910	10	1.36
4	1290	0.5	36	6.4	28	4.1	23	3.2	920	8.5	1.1
5	1720	4	73	13	74	11	35	4.8	920	7.5	1.0
6	1760	1	31	5.5	27	4.0	23	3.2	930	6.8	0.9
7	1880	8	27	4.8	22	3.3	16	2.2	930	7.0	0.94
8	1930	5	40	7.2	31	4.6	20	2.8	940	7.4	0.9
9	1540	8	19	3.4	15	2.2	14	1.9	970	3.0	0.38
10	1640	0.8	13	2.3	10	1.5	9	1.2	980	3.8	0.48
11	1670	8	13	2.3	12	1.8	10	1.4	1000	3.0	0.37
12	1660	10	13	2.3	9.5	1.4	9	1.2	1020	2.4	0.20

Применение твердого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ в интервале составов x от 0 до 0.18 позволяет контролируемо получать ФКОЭС с красной границей в диапазоне 900–1080 нм. При этом селективная чувствительность может быть обеспечена на любой заранее заданной длине волны в этом диапазоне и определяется содержанием сурьмы в активном слое фотокатода. Ширина полосы селективной чувствительности может составлять от 20 до 50 нм и обычно возрастает с увеличением состава получаемого твердого раствора из-за увеличения его неоднородности.

Уверенное повышение стабильности фотоэмиссии и токоустойчивости во времени проявляется в фотокатодных структурах с объемным содержанием Sb от 0.6–1.0 ат. % и более. На рис. 2 приведены результаты испытаний на наработку некоторых экземпляров макетов ФЭУ с двухфункциональными ОЭС фотокатодами на основе $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x(\text{Ge})$.

В таблице приведены некоторые параметры двухфункциональных ФКОЭС, полученные в макетах ФЭУ.

Работа поддержана Министерством науки и технической политики РФ по проекту № 9.3–133/3.

Список литературы

- [1] Антонова Л.И., Бирюлин Ю.Ф., Вуль А.Я., Денисов В.П., Забелина Л.Г., Ичжитидзе Р.Р., Климин А.И., Козлов С.Е., Шмарцев Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 10. С. 602–605.
- [2] Александров И.Р., Вильдгрубе Г.С., Дунаевская Н.В., Пальтс Т.Н. // Электронная промышленность. 1985. В. 9. (147). С. 31–33.
- [3] Андронов А.Н. В сб.: Проблемы физической электроники-88. Л., 1988. С. 101–123.
- [4] Аристархова А.А., Волков С.С., Тимашев М.Ю., Цыганов В.П. // Тез. докл. XXI Всесоюз. конф. по эмисс. электронике. Т. 2. Л., 1990. С. 60.
- [5] Антонова Л.И., Денисов В.П., Исаева Н.А. // Тр. VI Всесоюз. симп. по ФЭЭ, ВЭЭЭ, ВИЭЭ. 10–12 сент. 1986, Рязань. С. 99.
- [6] Бирюлин Ю.Ф., Воробьева В.В., Голубев Л.В., Новиков С.В., Чалдышев В.В., Шмарцев Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 20. С. 1264–1267.
- [7] Бирюлин Ю.Ф., Ганина Н.В., Чалдышев В.В., Шмарцев Ю.В. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 6. С. 602–605.
- [8] Бирюлин Ю.Ф., Каряев Н.Н., Крещук А.М., Писаревская В.А. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 12. С. 2219–2222.
- [9] Бирюлин Ю.Ф., Голубев Л.В., Новиков С.В., Чалдышев В.В., Шмарцев Ю.В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 5. С. 949–952.
- [10] Бирюлин Ю.Ф., Воробьева В.В., Голубев Л.В. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 12. С. 2201–2209.
- [11] Бирюлин Ю.Ф., Воробьева В.В., Новиков С.В., Шелковников Д.Н. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 12. С. 2217–2219.
- [12] Аристархова А.А., Бирюлин Ю.Ф., Волков С.С., Новиков С.В., Тимашев М.Ю., Шмарцев Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 19. С. 1794–1799.
- [13] Аристархова А.А., Бирюлин Ю.Ф., Волков С.С., Каряев В.Н., Тимашев М.Ю. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 2. С. 43–47.

- [14] Аристархова А.А., Бирюлин Ю.Ф., Волков С.С., Новиков С.В., Тимашев М.Ю. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 19. С. 59-61.
- [15] Актуальные проблемы материаловедения / Под ред. Э.Калдиса. В. 2. М., 1983.
- [16] Бирюлин Ю.Ф., Вильдгрубе Г.С., Каряев В.Н., Климин А.И., Пальтс Т.Н., Чалдышев В.В., Шмарцев Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 14. С. 833-835.
- [17] Аристархова А.А., Бирюлин Ю.Ф., Каряев В.Н., Климин А.И., Пальтс Т.Н., Писаревская В.А., Тимашев М.Ю., Шульбах В.А. // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36. В. 7. С. 1362-1369.
- [18] Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. М., 1977.

Физико-технический
институт им. А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
16 мая 1994 г.