

Разработка и исследование приемников изображений ультрафиолетового диапазона

© В.А. Беспалов,¹ В.М. Глазов,¹ Э.А. Ильичев,² Ю.А. Климов,² С.В. Куклев,³ А.Е. Кулешов,¹
Р.М. Набиев,² Г.Н. Петрухин,² Б.Г. Потапов,¹ Г.С. Рычков,² Д.С. Соколов,³ В.В. Фандеев,²
Е.А. Фетисов,¹ С.С. Якушов³

¹ Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,
124498 Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В. Лукина,
124498 Москва, Россия

³ Общество с ограниченной ответственностью „МЭЛЗ ФЭУ“,
124498 Москва, Россия
e-mail: edil44@mail.ru

(Поступило в Редакцию 17 марта 2014 г. В окончательной редакции 26 июня 2014 г.)

Представлены результаты разработок и исследований приемников оптических изображений наиболее проблемной области спектрального диапазона — длин волн близкого к вакуумному ультрафиолету. С целью более значимого снижения порога чувствительности, а также возможности реализации компьютерной обработки информации изучалась возможность использования двухкаскадной схемы регистрации изображений. Исследована возможность интеграции ультрафиолетового модуля в широкодиапазонное приемное устройство изображений.

В последние годы значительно возрос интерес к освоению ультрафиолетовой (УФ) части спектра оптического диапазона. Успешное освоение спектрального диапазона 0.12–0.45 μm позволит решить широкий спектр важных физических и технических задач. В их числе задачи, связанные со спектрально-аналитическими исследованиями Солнца и Земли, с регистрацией и распознаванием объектов в условиях космоса, с оптической локацией движущихся объектов в условиях плотного тумана и сильной „задымленности“, с диагностикой (в режиме „on line“) содержания жидких и твердых фракций углеводородов при проведении буровых работ. Большинство из перечисленных задач требует использования эффективных оптоэлектронных пар УФ-части спектрального диапазона. Определенные успехи освоения указанного диапазона длин волн достигнуты благодаря успешным разработкам твердотельных УФ-сенсоров, выполненных на основе кремниевых лавинных фотодиодов с мелким канальным слоем (*p-n*-переходом) приемной области (например, разработки фирмы Hamamatsu, серии S1336, S2684-254) [1–4]. Однако в силу низкой радиационной стойкости кремниевых УФ-фотоприемников и малых значений величин рабочих температур их использование в технических системах для решения большинства из вышеперечисленных задач оказывается недопустимым. Достигнутые успехи в разработках твердотельных излучателей [5] и фотоприемников [6,7] на широкозонных материалах, например на твердых растворах GaN–AlN либо SiC, вселяют надежду на возможность в ближайшее время создать миниатюрные фотоприемники излучений, чувствительные в УФ-диапазоне, и оптоэлектронные пары, удовлетворяющие основным требованиям со стороны технических систем. Однако на пути разработок приемников изображений

для указанного спектрального диапазона существует ряд технически трудно решаемых проблем, связанных с наличием в широкозонных материалах структурных дефектов и высокого уровня фоновых загрязнений глубокими энергетическими и легирующими примесями. В нитриде галлия примесный фон хотя и удается понизить до $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, однако при попытках существенно сдвинуть „красную“ границу фоточувствительности от значения $\lambda_{\text{red}} \approx 0.37 \mu\text{m}$ в более коротковолновую область (посредством увеличения мольной доли нитрида алюминия в твердом растворе Ga_{1-x}Al_xN) концентрации фоновой глубокой и легирующей примесей существенно возрастают. Все это неизбежно сказывается на токовой чувствительности твердотельных фотоприемников (барьерных и резистивных), на величине отношений сигнальной и „темновой“ компонент токов, на их динамических характеристиках (на частоте среза). Так, токовая чувствительность барьерных фотоприемников, созданных на основе GaN, не превышает $\sim 15 \text{ mA/W}$.

В разработках вакуумных фотоприемников УФ-излучений в спектральном диапазоне 250–350 nm с фоточувствительными слоями на основе тех же твердых растворов GaN–AlN при активации фотокатодов щелочными металлами удается достичь значений токовой чувствительности $\sim 50 \text{ mA/W}$ (квантовой эффективности 15%), при „темновом“ токе не превышающем 1 nA (приемная площадь $\sim 3\text{--}5 \text{ mm}^2$) и постоянной времени $\sim 1\text{--}10 \text{ ns}$ [8,9]. В фоторезистивных приемниках излучений на основе GaP и его твердых растворах стабильность характеристик также не столь убедительна. Наблюдается значительная дисперсия фоточувствительности от частоты, токовая чувствительность падает \sim в 2 раза, при росте частоты сигнала от 100 Hz

Разработка и исследование приемников изображений ультрафиолетового диапазона

Кодовые обозначения	Материал фотокатода	Материал входного окна	Интегральная фото-чувствительность, $\mu\text{A}/\text{lm}$	Спектральные характеристики				
				Спектральный диапазон, nm	При длине волны, соответствующей максимальному значению параметра			
					фото-чувствительность		квантовая эффективность	
mA/W	nm	%	nm					
150M	Cs-1	MgF ₂	—	115–200	25.5	135	26	125
250S	Cs-Te	Кварцевое стекло	—	160–320	62	240	37	210
250M	Cs-Te	MgF ₂	—	115–320	63	220	35	220
350K (S-4)	Sb-Cs	Боросиликатное стекло	40	300–650	48	400	15	350
350U (S-5)	Sb-Cs	UV	40	185–650	48	340	20	280
351U (Extd S-5)	Sb-Cs	UV	70	185–750	70	410	25	280
425U	Бищелочной	UV	120	185–750	90	420	30	260
456U	Бищелочной с низким уровнем темнового тока	UV	60	185–680	60	400	19	300
552U	Мультищелочной	UV	200	185–900	68	400	26	260
555U		UV	525	185–900	90	450	30	260
650U	GaAs(Cs)	UV	550	185–930	62	300–800	23	300
650S	GaAs(Cs)	Кварцевое стекло	550	160–930	62	300–800	23	300
851K	InGaAs(Cs)	Боросиликатное стекло	150	300–1040	50	400	16	370
—	In/InGaAsP(Cs)	То же	—	300–1040	10	1250	1.0	1000–1200
—	In/InGaAsP(Cs)	" "	—	300–1700	10	1550	1.0	1000–1200

до 1 kHz [10]. Таким образом, достигнутая степень совершенства приборных структур на основе твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ и $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$ позволяет в настоящее время „закрыть“ спектральный диапазон 0.31–0.40 μm , при токовой чувствительности $\sim 10\text{--}15\text{ mA/W}$ (однако со значительным ограничением динамического диапазона по частоте, как правило, не выше 10 kHz). Что касается фотоприемников на основе природных алмазов и эпитаксиальных алмазных пленок, то для фоторезистивных и фотодиодных приемников площадью $\sim 16\text{ mm}^2$, изготовленных на основе природного алмаза, уже сегодня достигнута токовая чувствительность 80–100 mA/W и 30–80 mA/W соответственно, а их спектральный диапазон чувствительности составляет значения $\sim 0.12\text{--}0.35\ \mu\text{m}$, при „темновом“ токе не превышающем значений 10^{-11} A [11–14]. Однако природные алмазы являются дорогостоящим исходным материалом, размеры изготовленных на их основе кристаллов и эпитаксиальных структур малы (не более $\sim 10\text{--}30\text{ mm}^2$), что приводит к значительным усложнениям при изготовлении на их основе фотоприемных схем. Синтетические алмазы „микрорелектронного“ качества обладают характеристиками, существенно худшими, нежели их природные аналоги.

Несмотря на известные успехи, достигнутые в разработках твердотельных приемников УФ-излучений на основе широкозонных полупроводниковых материалов, реализовать на их основе твердотельные приемники УФ-изображений проблематично. Основная причина от-

сутствия их промышленной реализации, несмотря на острую востребованность, — высокий уровень фоновых загрязнений.

Развивается направление, позволяющее частично компенсировать трудности, связанные с влиянием на предельные характеристики твердотельных УФ-приемников изображений повышенного уровня фоновых загрязнений широкозонных материалов. Связано оно с использованием альтернативных конструкций УФ-приемников и физических процессов, положенных в основу их работы. Таковыми является использование внешнего фотоэффекта и конструкций в архитектуре вакуумных электронно-оптических преобразователей (ЭОП) и фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) (см. таблицу).

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию вакуумных приемников изображений, чувствительных в УФ-диапазоне (включая вакуумный ультрафиолет). Исследуемые экспериментальные образцы приемников изображений реализованы нами в архитектуре ЭОП в конструкциях „на просвет“ и „на отражение“. В работе изучались УФ-приемники изображений с фотокатодами на основе сетчатых и сплошных пленок поликристаллического алмаза, слабо легированных акцепторами (бором). В случае сплошных поликристаллических алмазных пленок рабочая поверхность фотокатода активируется атомами цезия в процессе работы из встроенного источника цезия. Площадь чувствительного элемента в конструкции „на просвет“ составила $\sim 25\text{ mm}^2$, а в конструкции „на отражение“ $\sim 300\text{ mm}^2$.

Поликристаллические алмазные пленки для сенсоров УФ-фотоприемников выращены с использованием PECVD-метода роста [15,16]. Толщины поликристаллических алмазных пленок составили значения 2–4 μm при размерах алмазных кристаллитов $\sim 1 \mu\text{m}$; сами пленки легировались в процессе роста бором до концентраций $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, а подвижность дырок в них не превышала значений $\sim 1-10 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$.

При исследовании фазового состава поликристаллических алмазных пленок (ПАП), используемых для ультрафиолетовых фотокатодов (ФК), изучались их спектры комбинационного рассеяния. На спектрах регистрируется присутствие линий 1333.46 и 1502.28 cm^{-1} , которые описаны в научной литературе: пик 1333.46 cm^{-1} соответствует sp^3 -переходам, типичным для алмаза, а пик 1502.28 cm^{-1} соответствует sp^2 -переходам и, как правило, не наблюдается в монокристаллических образцах алмаза. В нашем случае он, вероятно, может быть связан с энергетическими переходами в аллотропных модификациях углерода, локализованных на границах раздела кристаллических зерен, вклад от которых в случае поликристаллических пленок может оказаться существенным. Следует заметить также, что линий, соответствующих переходам в карбидах бора, не обнаружено, что позволяет надеяться на правильность выборов режимов легирования пленок атомами бора. Независимо фазовый состав поликристаллических алмазных пленок был исследован посредством микрофазового анализа с использованием просвечивающей электронной микроскопии. Изучение картин микродифракции показало, что в исследуемых кристаллитах поликристаллической алмазной пленки нередко наблюдаются дефекты в виде „двойников“, а на границах между кристаллитами регистрируется наличие углеродных включений с sp^2 -связями и включений атомов легирующей примеси (бора). Исследованы несколько партий образцов, в процессе которых изучался фазовый состав как нелегированных пленок, так и пленок, легированных в процессе выращивания бором. При выращивании алмазных пленок использовались исходные реагенты, основу которых составляли навески из смеси этилового спирта с раствором в нем до насыщения борной кислоты, которая затем разбавлялась в требуемое (в зависимости от задачи) число раз, и приготовление навески завершалось заключительным введением в смесь раствора тремитила бора в борной кислоте в различных концентрациях.

Как уже отмечено было выше, в качестве базового материала чувствительного слоя фотокатода использовались два типа пленок — сплошная поликристаллическая алмазная пленка и поликристаллическая пленка, выполненная в виде алмазной сетки. Толщины сплошных поликристаллических алмазных пленок ($\sim 2-3 \mu\text{m}$) для фотокатодов мембранных конструкций выбирались с учетом малости в них величины диффузионных длин неравновесных носителей (порядка размеров зерна, $\sim 1 \mu\text{m}$), а также их прочностных характеристик. Конструкция мембраны фотокатода в виде алмазной сетки предложена с целью увеличения коэффициента преобразования

потока фотонов в поток „фотоэлектронов“. При этом минимальный период алмазных сеток взят равным приблизительно четырем значениям диффузионной длины, а минимальный размер ячейки сетки составил $\sim 5 \mu\text{m}$. Использовались также алмазные сетки и с более крупным шагом (периодом). В преобразователе такой конструкции родившиеся (в процессе собственного поглощения фотонов в объеме пленки) неравновесные электроны имеют возможность выйти в вакуум как через открытую поверхность (с глубин, меньших диффузионной длины носителей), так и через боковую поверхность колодцев ячеек сетки. В случае мембранного ФК в виде алмазной сетки допускается увеличение толщины алмазного сенсорного слоя до 4–5 μm . При нанесении на поверхность алмазной сетчатой мембраны прозрачных для излучения проводящих электродов из металл-углеродной пленки наноразмерной толщины и приложении к электродам мембраны тянущего поля эффективная толщина алмазной сетки может достигать 50–100 μm . В такой конструкции ФК будет реализоваться не только преобразование фотонов УФ-диапазона в фотоэлектроны, но и внутриканальное (на стенках колодца сетчатой ячейки) умножение их числа. Размеры ячеек сетки и ее период определяют пространственное разрешение фотокатода сетчатой формы.

На рис. 1 приведены РЭМ (растровая электронная микроскопия) изображения исследуемых сенсорных мембран сетчатой и сплошной конструкций. Мембрана, представленная на рис. 1, *a*, получена с использованием технологии выращивания алмазной пленки (сетки) по заданному рисунку [15].

Напротив, на рис. 1, *b* дано РЭМ-изображение мембраны также сетчатой конструкции, но полученной уже посредством плазмохимического травления (ПХТ), в атмосфере кислорода, азота и аргона, сплошной поликристаллической алмазной пленки по маскирующему покрытию в виде сетчатого рисунка.

На рис. 1, *c* представлено РЭМ-изображение кремниевой мембраны в виде сетки с пологими стенками, на которых посредством PECVD-метода выращен сенсорный слой из поликристаллической алмазной пленки, так что конструкция позволяет реализовать УФ-фотокатод с режимом работы сенсора по схеме „на отражение“, но в конструкции ЭОП „на прострел“.

Оптоэлектронные характеристики экспериментальных образцов сенсорных пленок (сеток) для УФ-фотокатодов мембранной конструкции изучались в процессе стендовых исследований. В качестве источника света использовалась дейтериевая лампа ДДС-30. Ее спектральный диапазон составил $\sim 0.18-0.30 \mu\text{m}$. Схема измерений представлена на рис. 2, где введены следующие обозначения: 1 — УФ-сенсор на контактной плате, 2 — коллектор фотоэлектронов, 3 — металлическая сетка, ускоряющая фотоэлектроны, 4 — входное окно (сапфир). УФ-излучение, генерируемое дейтериевой лампой ДДС-30, расположенной на расстоянии $\sim 5.5 \text{ cm}$, вводится через сапфировое окно в измерительную камеру. Телесный угол, под которым виден приемник с

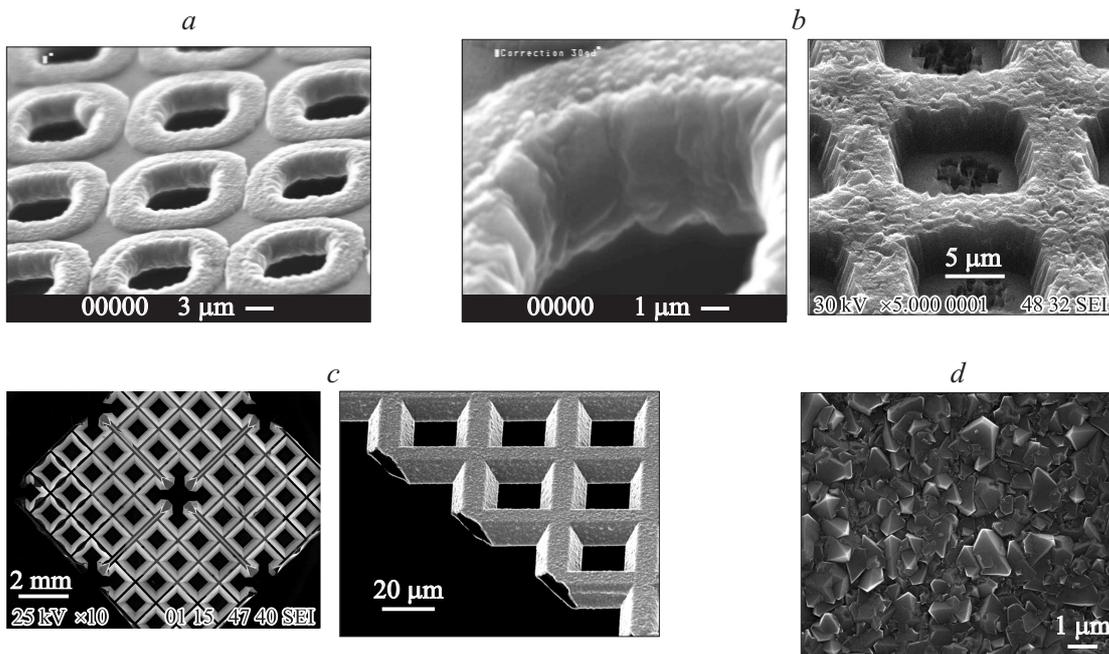


Рис. 1. *a* — РЭМ-изображение алмазной мембраны сенсора сетчатой формы, выращенной по заданному рисунку; *b* — РЭМ-изображение алмазной мембраны сенсора сетчатой формы, полученной с использованием ПХТ; *c* — РЭМ-изображение алмазной мембраны сетчатой формы для УФ ФК режима „на отражение“ в конструкции ЭОП „на прострел“; *d* — РЭМ-изображение поверхности мембраны сенсора УФ ФК на основе сплошной поликристаллической алмазной пленки.

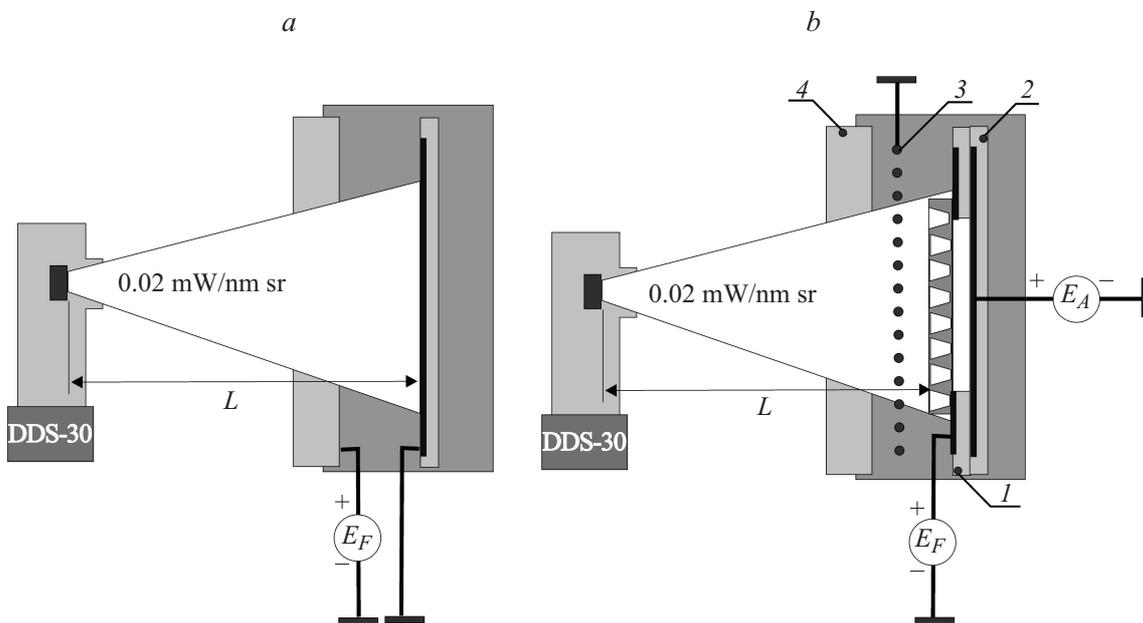


Рис. 2. Блок-схема для измерений характеристик мембран на основе сплошной (*a*) и (*b*) сетчатой поликристаллических алмазных пленок.

позиции источника УФ-излучения, равен 0.019 sr. Знание особенностей спектральных характеристик лампы ДДС-30 и результатов регистрации образцовым фотодиодом мощности позволили оценить плотность излучения на уровне $\sim 0.02 \text{ mW/sr nm}$ и его постоянство в диапазоне 185–300 nm. С учетом геометрии

эксперимента и потерь при вводе излучения через сапфировое окно определена квантовая эффективность сенсорных мембран. Для сенсорной мембраны на основе сплошной алмазной пленки квантовая эффективность составила $\sim 11\text{--}12\%$ при мощности излучения на образце $\sim 8 \mu\text{W}$. Напряжение на аноде (E_F) составля-

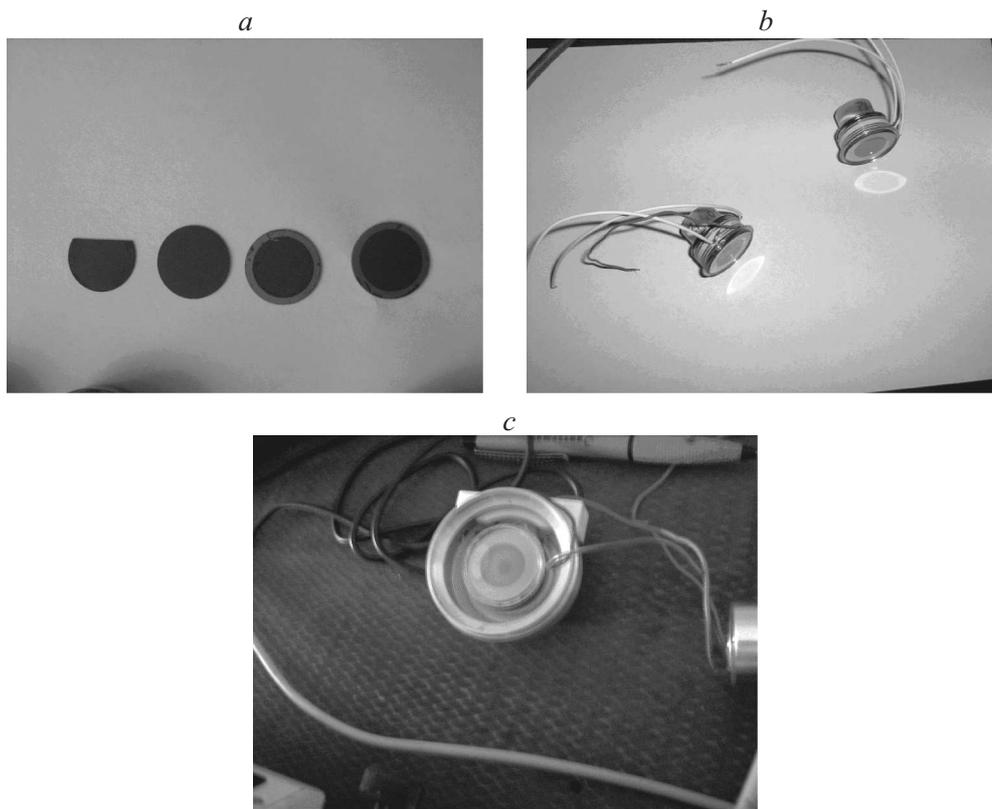


Рис. 3. *a* — фотоизображения заготовок и образцов типичных мембранных фотокатодов на основе сплошной поликристаллической алмазной пленки; *b* — фотоизображения ЭОП с фотокатодами на основе сплошных поликристаллических алмазных пленок мембранной и объемной конструкций.

ло ~ 100 V, регистрируемый фототок ~ 160 – 165 nA при токах утечки измерительной схемы, меньших 0.1 nA. Для сетчатой конструкции сенсора ФК квантовая эффективность составила величину ~ 14 – 16% при падающей мощности излучения ~ 0.6 μ W и 30%-ных потерях на сеточный ток (напряжение E_F на мембране при этом составило ~ 15 V, напряжение E_A на коллекторе ~ 100 V).

Спектральная чувствительность сенсорных мембран на основе сплошных поликристаллических алмазных пленок изучалась в составе ЭОП в режимах „на просвет“ и „на отражение“. Для повышения квантовой эффективности в ЭОП устанавливался источник цезия, который распылял цезий сразу же по завершению процесса монтажа ЭОП; в результате в процессе работы ЭОП поверхность фотокатода постоянно активировалась в режиме „on line“ атомами цезия. Давление остаточной атмосферы в колбах ЭОП не превышало 10^{-10} mm Hg. Фотоизображения измеряемых образцов представлены на рис. 3. В частности, на рис. 3, *a* представлены фотоизображения заготовок и образцов типичных мембранных фотокатодов на основе сплошной поликристаллической алмазной пленки. На рис. 3, *b* даны фотоизображения ЭОП с фотокатодами мембранной (для режима „на просвет“) и объемной (для режима „на отражение“) конструкций на основе сплошных поликристаллических алмазных пленок.

Стендовые измерения спектральной чувствительности проводились в геометрии оптических схем „на просвет“ и „на отражение“ с использованием монохроматора МДР206. Использовались дейтериевый источник (ДДС-30) и галогеновая лампа (КГ-70). Спектральное разрешение составляло 10 nm.

Калибровка источников излучений заключалась в измерении спектральной мощности оптического сигнала на выходе монохроматора кремниевым калибровочным фотодиодом с известной характеристикой спек-

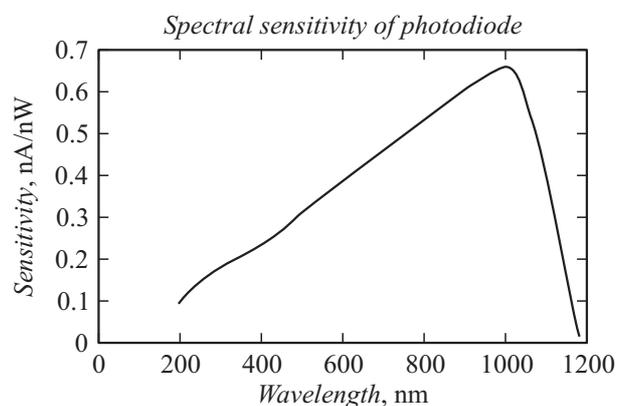


Рис. 4. Кривая спектральной чувствительности фотодиода.

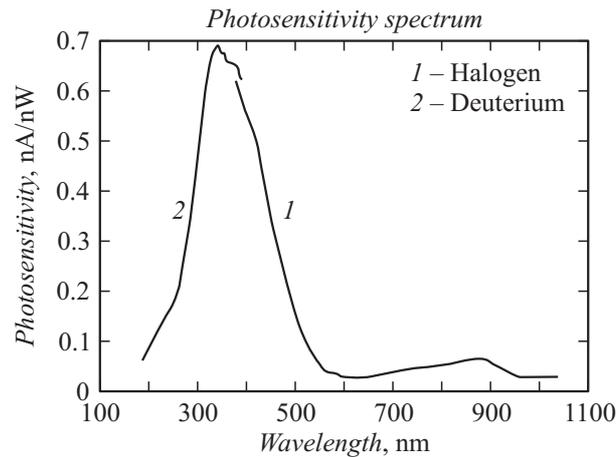


Рис. 5. Спектральная чувствительность УФ ЭОП с ФК на основе мембран из поликристаллических алмазных пленок, легированных бором.

тральной фоточувствительности. Кривая спектральной чувствительности фотодиода представлена на рис. 4. Коэффициент преобразования входной ток–напряжение определяется резистором в цепи обратной связи преобразователя ток/напряжение, его величина составляла $\sim R_o = 22 \text{ M}\Omega$, разрядность АЦП — 24 двоичных разряда. Опорное напряжение АЦП составило $V_{\text{ref}} = 4.096 \text{ V}$, код АЦП — $V_{\text{ref}} = 22^4 = 1.68 \cdot 10^7$. Пересчет кода АЦП в фототок диода выполнен в соответствии с $J_{\text{in}} [\text{nA}] = 4.096 / 2.2 \cdot 10^{-2} / 1.68 \cdot 10^7 \text{ Код} = 1.11 \cdot 10^{-5} \text{ Код}$. Сигнал с фотодиода (фототок) усиливался и после преобразования в цифровую форму вводился в ЭВМ. Так как диаметр приемной области калибровочного фотодиода составлял 7 mm, а диаметр приемной области мембранного фотокатода $\sim 5 \text{ mm}$, то при оценках полагали, что мощность, измеряемая фотодиодом, примерно равна мощности, попадающей на фотокатод.

Измерения проводились с использованием сервисной программы, поставляемой вместе с монохроматором МДР206, и выполнялись при следующих его параметрах: ширина входной и выходной щелей монохроматора $d = 1 \text{ mm}$, перестраиваемый спектральный диапазон $\lambda = 190\text{--}700 \text{ nm}$, шаг при перестройке спектра $\sim d\lambda = 10 \text{ nm}$. Экспериментальные данные экспортируются в среду Matlab. „Сшивка“ результатов, полученных с использованием галогенного и дейтериевого источников, производилась в области перекрытия спектральных диапазонов излучений указанных ламп.

Результаты исследований спектральной чувствительности фотокатодов на основе сплошных поликристаллических алмазных пленок (с поверхностью, активируемой атомами цезия) в составе ЭОП представлены на рис. 5. По результатам измерений с использованием калибровочного фотодиодного кремниевое фотоприемника были определены токовая чувствительность фотокатодов и пороговая мощность УФ ЭОП, которые оказались не хуже 70 mA/W и $10^{-11} \text{ W/Hz}^{0.5}$ соответственно, что

не уступает лучшим мировым достижениям для фотоприемников УФ-изображений. Величина квантовой эффективности составила $\sim 25\text{--}27\%$, что для приемников изображений УФ-диапазона является высоким результатом.

Из всех возможных компонент „темновых“ токов, ограничивающих чувствительность фотокатода ЭОП (токи термоэлектронной и автоэлектронной эмиссии $\sim 1 \text{ fA}$, токи дробового шума, связанные с бомбардировкой фотокатода ионами остаточной атмосферы $\sim 100 \text{ fA}$, и др.), наибольшими являются токи утечки по внутренним поверхностям керамических прослоек ЭОП. В ЭОП большинства известных фирм упомянутые утечки не превышают $\sim 10^{-12} \text{ A}$. Используемые нами измерительные средства позволяют утверждать, что ток утечки в исследованных УФ ЭОП не превышает 0.01 nA . Знание величины определенного в экспериментах значения фоточувствительности УФ ЭОП и типичной величины токового ограничения позволяет нам корректно получить оценку на предельно малую величину мощности, которую позволяет регистрировать исследуемый УФ ЭОП. Действительно, исходя из того, что токовая чувствительность составляет $\sim 0.07 \text{ A/V}$, а „темновые“ токи $\sim 10^{-12} \text{ A}$, при времени измерений (постоянная времени интегрирования сигнала) $\sim 1 \text{ s}$ для предельной чувствительности по мощности для исследуемого приемника, получаем значение $\sim 10^{-11} \text{ W/Hz}^{0.5}$.

Примечательным является следующий результат. В процессе спектральных исследований ЭОП с ФК на основе поликристаллических алмазных слабо легированных бором пленок, поверхность которых активирована атомами цезия, к процессу выхода фотоэлектронов было обнаружено расширение их области спектральной чувствительности до $\sim 0.45 \mu\text{m}$. Ограничения со стороны вакуумного ультрафиолета ($\sim 0.19 \mu\text{m}$) связаны, очевидно, с диапазоном прозрачности используемого материала входного окна (MgF_2). Что же касается смещения „красной границы“ с $0.25 \mu\text{m}$ (для поликристаллической

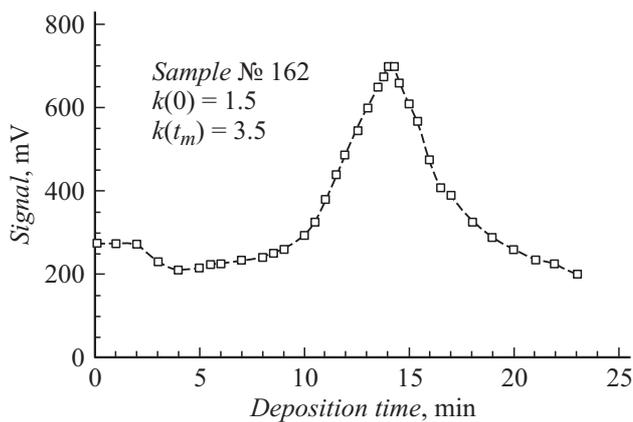


Рис. 6. Динамика изменения коэффициента вторичной эмиссии электронов из поликристаллической алмазной пленки в режиме „на просвет“ при термическом осаждении на эмитирующую поверхность атомов цезия.

алмазной пленки с поверхностью, не активированной атомами цезия) к $0.45 \mu\text{m}$, то причина тому может быть связана с существенным понижением для фотоэлектронов потенциального барьера из-за совокупного влияния глубоких энергетических центров (ГЭЦ) акцепторного типа и адсорбированного на поверхности пленки цезия. Малые значения подвижности дырок в ПАП и большая суммарная площадь границ между кристаллитами могут быть косвенным свидетельством и причиной тому. Судя по особенностям спектральных характеристик, энергии указанных ГЭЦ должны быть локализованы в запрещенной зоне на глубине $\sim 1.5\text{--}1.7 \text{ eV}$ от потолка валентной зоны. Для определения природы образования упомянутых ГЭЦ и поиска способов технологического управления параметрами указанных центров необходимо проведение специальных исследований. Насыщение поверхности ПАП атомами цезия должно понизить энергию сродства, а значит, и работу выхода фотоэлектронов из пленок в вакуум, что с учетом полевого фактора может облегчить условия взаимодействия электронов с участием ГЭЦ со сплошным спектром электронных состояний по ту сторону поверхностного барьера. Результатом является смещение „красной“ границы чувствительности в длинноволновую область. Повышение квантовой эффективности при активации поверхности алмазной пленки атомами цезия демонстрирует рис. 6, на котором представлена динамика изменений коэффициента вторичной эмиссии электронов в процессе осаждения термически испаряемых атомов цезия. При необходимости реализовать „солнечно-слепые“ фотокатоды необходим подбор материалов покрытий (например, MgO), активирующих алмазную поверхность, увеличивающих длинноволновую границу спектральной чувствительности до $\sim 0.40 \mu\text{m}$. Однако как альтернатива для УФ ЭОП с исследуемыми алмазными фотокатодами с поверхностью, активированной атомами Cs ($0.19\text{--}0.45 \mu\text{m}$), „красную“ границу можно ограничить указанным пределом (до $0.40 \mu\text{m}$), используя и полосовые фильтры.

С целью более значимого снижения порога фоточувствительности (величины регистрируемой мощности излучения), а также для реализации компьютерной обработки информации изучалась возможность использования двухкаскадной схемы регистрации изображений. При этом первый каскад представлял собой регистрационно-преобразовательный блок (РПБ), выполненный в архитектуре ЭОП, а второй каскад являлся цифровым ЭОП. Функция первого каскада — преобразовать изображение УФ-части спектра в изображение видимого диапазона. Второй каскад, принимая изображение видимого диапазона, выводимое из РПБ через выходное оптическое стекло, преобразует его в выходной нормализованный цифровой электрический сигнал USB-формата. Для корректной передачи изображения со слоя люминофора экрана первого каскада через входное окно на фотокатод второго каскада нами использовалась оптическая система из двух объективов Индустар-61. Использование двух последовательно расположенных объективов позволяет сделать проекционную систему 1:1 более короткой по сравнению с использованием одного объектива и увеличить в 4 раза светосилу, что особенно важно для регистрации сверхмалых оптических сигналов.

Таким образом, УФ-изображение, проходя указанный выше оптический тракт, претерпевает цепочку последовательных преобразований. Входное изображение в потоках фотонов УФ-диапазона проецируется УФ-оптикой на УФ-фотокатод и преобразуется в изображение в потоке вторичных электронов; затем, полученное изображение во вторичных электронах направляется в ускоряющий промежуток между фотокатодом и люминофором и проецируется на экран с люминофором, где преобразуется в изображение в потоке фотонов видимого диапазона; последнее собирается с плоскости оптического стекла люминофора при помощи оптической системы (Индустар-61) на фотокатод цифрового ЭОП-усилителя (ЦЭОПУ), в котором оптическое изображение преобразуется в аналоговый электрический сигнал и усиливается ПЗС-матрицей. И наконец, аналоговый электрический сигнал с ПЗС преобразуется в нормализованный цифровой код USB-формата и через USB-вход вводится в персональный компьютер.

Что касается пространственного разрешения, то со стороны собственно фотокатода для случая сплошных поликристаллических алмазных мембран оно формально определяется размером зерна поликристаллической алмазной пленки ($\sim 1\text{--}2 \mu\text{m}$). Пространственное разрешение регистрационно-преобразовательного блока (РПБ) будет определяться геометрией УФ ЭОП, размером зерна люминофора и параметрами ячеистой структуры выходного оптического стекла. В нашем случае (в случае полного УФ-цифрового тракта) измерения показали, что пространственное разрешение определяется параметрами ячеистой структуры выходного оптического стекла и составляет $30\text{--}35 \text{ line/mm}$. При измерениях пространственного разрешения нами использовалась мира с массивом точек размером в $120 \mu\text{m}$ с периодом

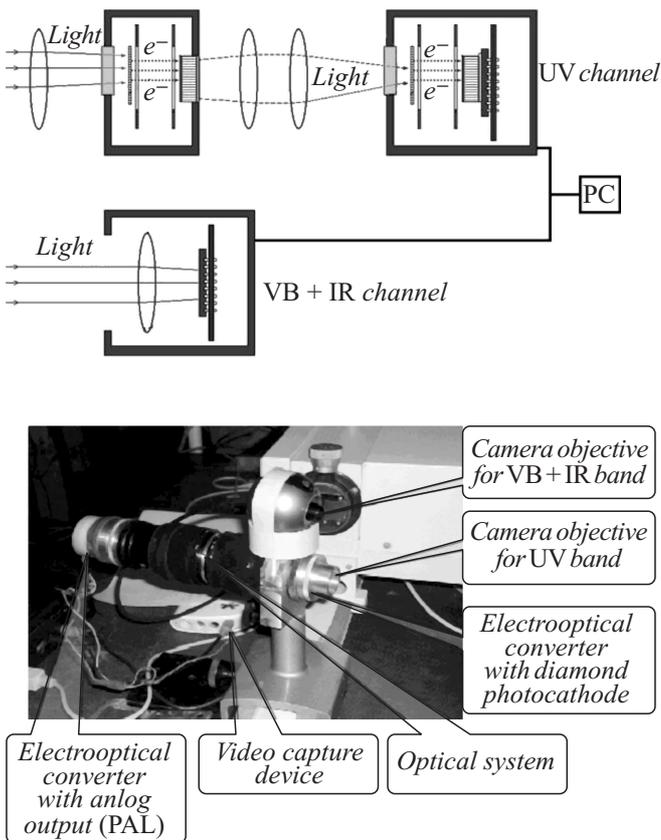


Рис. 7. Схематическое изображение макета широкодиапазонного приемника изображений и его фотоизображение.

их следования в $240 \mu\text{m}$. Характер картины размытости краев точек мира и проекций ее дефектов позволяет оценить пространственное разрешение собственно ФК на основе поликристаллической алмазной пленки в $\sim 60\text{--}70 \text{ line/mm}$.

Интеграция по параллельной схеме законченных функциональных блоков — исследованного выше УФ-тракта и тракта видимого диапазона на основе традиционного цифрового ЭОП видимого и ИК-диапазона, либо цифровой видеокамеры, позволяет создать широкодиапазонный приемник изображений (ШДПИ, $0.19\text{--}1.2 \mu\text{m}$). Архитектура приемников в виде электронно-оптических преобразователей, сенсорными элементами которых являются фотокатоды ультрафиолетового и видимого диапазонов, нами выбрана по причине необходимости в ряде актуальных задач регистрировать изображения малой интенсивности. Схематическое изображение оптической схемы макета ШДПИ и фотоизображение его реализации представлены на рис. 7.

В оптическом тракте диапазона $0.6\text{--}1.2 \mu\text{m}$ (ВД + ИК) нами использовалась видеокамера с модернизированной DCM130BW ПЗС-матрицей, которая, как показали калибровочные измерения, позволяет получить для предельно малой величины регистрируемой мощности значение $\sim (3\text{--}5) \cdot 10^{-10} \text{ W/Hz}^{0.5}$ и расширить красную границу до $\sim 1.2 \mu\text{m}$. Представленный выше

макет был использован для проверки эффективности предлагаемого подхода при реализации ШДПИ. В случае организации производства ШДПИ, на наш взгляд, более предпочтительно использование в его УФ-тракте однокаскадного УФ ЭОП, в котором устранена функция двойного преобразования, посредством замены таких базовых узлов, как ускоряющий промежуток, экран с люминофором и оптическое выходное стекло на мультианодный электронно-чувствительный приемник изображений с цифровым преобразованием аналогового сигнала.

Созданный нами макет широкодиапазонного приемника изображений имеет два тракта. Первый тракт обрабатывает видеоизображение в УФ-диапазоне и выполнен в архитектуре ЭОП (см. выше); второй тракт — тракт ВД + ИК-части оптического диапазона, — реализован на основе видеокамеры с модернизированной DCM130BW ПЗС-матрицей. Каждый тракт имеет независимые объективы и приемники изображений. Камеры, в наших экспериментах были закреплены на одном держателе и юстированы так, чтобы их поля зрения совпадали. В виду того, что в камерах используются различные приемники изображений и объективы, точно совместить два изображения не представляется возможным. Поэтому потребовалась разработка программы масштабирования и совмещения изображений на экране монитора. Программное обеспечение было разработано на базе среды программирования Matlab и предназначено для работы на ПЭВМ IBM PC и совместимых с ней в операционной системе Windows XP/Vista/7. Использовался пакет Matlab версии не ниже 2009. К ПЭВМ были подключены два приемника изображений, имеющие RGB 640×480 форматы выводов изображений, и установлены соответствующие драйверы. Для точного вычисления параметров совмещения изображений была использована программа CamAdj. Ее выходными параметрами являются: коэффициент масштабирования УФ-изображения, угол поворота УФ-изображения и две координаты позиционирования УФ-изображения на изображении ВД + ИК-диапазона. Программа CamOper предназначена для получения изображений с двух матричных фотоприемников, для математической обработки полученных изображений, наложения одного изображения на другое и вывода полученного изображения на экран монитора в режиме реального времени и последующей записи видеоролика в avi-файл.

Таким образом, в процессе комплексных исследований фотокатодов на основе сплошных и сетчатых мембран из поликристаллических алмазных пленок, слабо легированных бором, удалось установить:

- спектральный диапазон фотокатодов на основе ПАП составляет $\sim 0.19\text{--}0.25 \mu\text{m}$,
- токовая чувствительность (фоточувствительность) $\sim 40 \text{ mA/W}$, а квантовая эффективность достигает $\sim 11\text{--}12\%$,
- спектральный диапазон чувствительности фотокатодов на основе поликристаллических алмазных пленок

с поверхностью, активированной атомами цезия, составляет $\sim 0.19\text{--}0.45\ \mu\text{m}$, токовая чувствительность достигает $\sim 70\ \text{mA/W}$, квантовая эффективность $\sim 25\text{--}27\%$ при пороговой величине регистрируемой мощности $\sim 10^{-11}\ \text{W/Hz}^{0.5}$.

Показана возможность гибридной интеграции УФ и ВД + ИК-фотоприемников изображений в 2-канальный широкодиапазонный приемник изображений со спектральным диапазоном fotocувствительности $\sim 0.19\text{--}1.2\ \mu\text{m}$.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела ИЯФ МГУ, возглавляемого профессором А.Т. Рахимовым, за помощь в изготовлении алмазных пленок.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 14.427.11.0003 и ГК № 14.578.21.0059).

Список литературы

- [1] Садыгов З.Я., Сулейманов М.К., Бокова Т.Ю. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 7. С. 75.
- [2] Sadygov Z.Y., Jejer V.N., Musienko Yu.V., Sereda T.V., Stoikov A.V., Zheleznykh I.M. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. Vol. 504. P. 301–303.
- [3] Korde R. et al. // Proc. SPIE. 1988. Vol. 932. P. 153.
- [4] Talmi Y., Simpson R.W. Appl. Opt. 1980. Vol. 19. P. 1401.
- [5] Кудряшов В.Е., Мамакин С.С., Юнович А.Э. и др. // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 7. С. 861–868.
- [6] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/7675/4/фотопр%20на%20осн%20внутри%20фотоэфф.pdf>
- [7] Munoz E. et al. // J. Phys. Condens. Matter. 2001. Vol. 13. P. 7115.
- [8] Khan M.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 60. P. 2917.
- [9] Uchiyama S. et al. Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86. P. 103 511.
- [10] Электронный ресурс. Режим доступа: http://eicom.ru/news_industry/2006/02/1364
- [11] Ulmer M.P. // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6189. P. 61 890.
- [12] Электронный ресурс. Режим доступа: http://uralalmazinvest.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=57:2010-06-23-05-39-43&catid=39:2010-06-23-05-05-07&Itemid=&lang=ru%3E
- [13] Marchywka M. et al. // Appl. Opt. 1991. Vol. 30. P. 5010.
- [14] Conte G. et al. // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6189. P. 618 910-1.
- [15] Gavrilov S.A., Dzbanovsky N.N., Il'ichev E.A., Minakov P.A., Pal A.F., Poltoratsky E.A., Rychkov G.S., Suetin N.V. // Proc. of the sixth Applied Diamond Conferent. Second frontier Carbon Technology joint Conference (ADC/ACE 2001).
- [16] Dvorkin V.V., Dzbanovsky N.N., Suetin V.N., Poltoratsky E.A., Rychkov G.S., Il'ichev E.A., Gavrilov S.A. Diam. Relat. Mater. 2003. P. 2208–2218.