

К. т. н. А. А. АЛТУХОВ, д. ф.-м. н. А. Ю. МИТЯГИН,
А. М. КЛОЧКОВА, к. ф.-м. н. Г. А. ОРЛОВА

Россия, г. Москва, ООО «УралАлмазИнвест»,
г. Фрязино, Институт радиотехники и электроники РАН
E-mail: info@ural-almaz.ru, alexandr-mityagin@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
28.03 2008 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

АЛМАЗНЫЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА УФ-ДИАПАЗОНА

Показана возможность создания матричных фотоприемных устройств на алмазе. На примере линейчатых фотоприемных устройств разработаны принципы и технология построения.

Многоэлементные фотоприемники — это твердотельные преобразователи изображения для систем технического зрения (тепловизоры, оптические локаторы, системы космической разведки и целеуказания). Ультрафиолетовый (УФ) диапазон излучения давно интересует ученых и разработчиков аппаратуры. Оптоэлектронные вакуумные приборы традиционно использовались для обнаружения оптического излучения, поэтому именно такие изделия были первыми применены для детектирования в УФ-диапазоне. К настоящему времени ведущим мировым производителям уже удалось разработать образцы УФ многоэлементных фотоприемных устройств (МФУ), представляющих собой фотоэлектронные умножители [1—3] электронно-оптических преобразователей [4], микроканальные фотокатодные устройства [5] и устройства на основе широкозонных полупроводников [6]. Однако у всех этих устройств имеются известные существенные ограничения и недостатки. Для фотоэлектронных умножителей это вакуум, высокое напряжение питания, большие габариты и вес. Для микроканальных это вакуум, нестабильность коэффициента умножения и чувствительности, искажение изображения. Что касается широкозонных полупроводников, то их с успехом может заменить алмаз, который по своим параметрам значительно превосходит используемые полупроводники.

Матричные фоточувствительные элементы на основе полупроводников, и в особенности алмаза, позволят создать многоэлементные УФ фотоприемные устройства — важнейший и наиболее востребованный класс приборов, работающих в «солнечно-слепом» диапазоне, чрезвычайно устойчивых к ионизирующему излучению, жестким условиям внешней среды (температура, агрессивная среда, и т. п.) и работающих в открытом космосе. В данной статье представлены результаты исследований матричных фотоприемных устройств на основе алмаза, описана конструкция и технология их изготовления.

Основные принципы построения матричных систем

Наиболее простой схемой построения матричных систем является решетчатая структура (матрица с адресным опросом). Матрица условно содержит две системы шин — горизонтальные и вертикальные (решетку); на пересечении шин к ним подключаются фоточувствительные алмазные фотоприемники (пикселы). Необходимые функции пиксела — детектирование оптического сигнала, накопление, коммутация — выполняются в «обычном» фоторезисторе. Генерированные излучением носители накапливаются в объеме фоторезистора в течение времени жизни. УФ-излучение эффективно поглощается только в приповерхностном слое порядка 10 мкм. Для того, чтобы генерированные в приповерхностной области обратной стороны матричного фотоприемника неравновесные носители заряда (электроны) смогли за время жизни продрейфовать к противоположной стороне и перетечь в накопительную емкость ячейки считывания мультиплексора, на полупрозрачный Pt-электрод необходимо подать отрицательное напряжение порядка 200 В при толщине алмазного кристалла 200 мкм. Тогда носители будут дрейфовать в режиме насыщения дрейфовой скорости $(1-2) \cdot 10^7$ см/с и за время пролета (порядка 10^{-9} с), сопоставимого со временем жизни, достигнут противоположной стороне кристалла. Чтобы приблизить область генерации носителей к рабочей стороне кристалла при засветке с обратной стороны, эту сторону можно локально утонять (создавать окна-коллоды) с помощью лазерных технологий либо посредством плазмо-химического травления в аргон-кислородной плазме. Коммутация осуществляется простой подачей питания.

К точкам пересечения шин строк и столбцов подключается только фоторезистор. По горизонтальным шинам подаются импульсы опроса, а по вертикальным шинам сигнал передается на выход.

Характеристики и технология изготовления фотоприемников на основе алмаза представлены в работах [7—10]. Общими для УФ- и ИК-матриц являются технологии сборки гибридных приборов. Матрица дискретных фотоприемников — в нашем случае алмазных — сочленяется с кремниевым кристаллом, в котором сформирована электронная схема мультиплексора. Каждый алмазный фотоприемник

с помощью индиевых столбиков подключается к электронному коммутатору. Эта компоновка гибридных матриц, собранных по технологии «флип-чип», обладает тем преимуществом, что алмазный фотоприемник устанавливается непосредственно на кремниевый кристалл, который затем монтируется в корпус. В МФУ, созданном таким образом, УФ-излучение эффективно поглощается только в приповерхностном слое толщиной порядка 10 мкм.

К недостаткам «флип-чип»-технологии компоновки гибридного МФУ следует отнести:

— высокое напряжение смещения на фоторезисторе;

— снижение квантовой эффективности (почти в два раза) из-за засветки через металлический электрод, поскольку платина толщиной 10 нм поглощает 40—60% УФ-излучения;

— ограничение шага матрицы размером 25—30 мкм за счет столбиков (для предотвращения их замыкания при стыковке с коммутатором), что уменьшает эффективный коэффициент заполнения (относительная доля фоточувствительной площади кристалла).

Тем не менее, данный вариант может стать базовым, особенно в перспективных широкоформатных МФУ (256×256 и более элементов), созданных на основе гетероэпитаксиальных алмазных структур.

Конструкция и технология изготовления фотоприемного устройства

Для изготовления матрицы 64×64 использовалась пластина из натурального алмаза *n*-типа размером 4,46×4,35×0,33 мм с концентрацией азота $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и удельным сопротивлением $9,4 \cdot 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. На одной стороне алмазной пластины формировалась матрица (из 64×64 фоторезисторов размерами 30×30 мкм и шагом 50 мкм), а также тестовые элементы для вывода сигналов от пикселей матрицы (в форме гантелек с размерами 30×30 мкм и 75×50 мкм, плечом 50×20 мкм). Элементы изготавливались таким образом: на подслое титана (хрома) толщиной 10 нм напыляли платину с последующим осаждением золота (напылением алюминия) толщиной 0,8 мкм и фотолитографией по золоту (алюминию) для открытия окон УФ-засветки. Форма тестовых элементов позволяла приваривать проволоочные выводы, а также проводить исследования зондом.

Индиевые столбики к каждому фоторезистору на другой стороне пластины изготавливались посредством напыления платины с подслоем титана (хрома) толщиной 10 нм с последующим напылением толстого слоя индия и фотолитографией по индию для формирования собственно столбиков высотой 6—8 мкм.

Поскольку нет принципиальной разницы между матричными и линейчатыми фотоприемными устройствами, далее мы рассмотрим пример линейчатого 2×64 фотоприемного устройства. Для его создания мы использовали упомянутую выше гибридную концепцию построения, при которой регистрация фотосигнала осуществляется линейчатым 2×64 фоторезистивным приемником на алмазе, а считывание

предварительно усиленного фотосигнала — кремниевым мультиплексором.

Нами был разработан и изготовлен специальный линейчатый мультиплексор МК6А. Мультиплексор имеет прямоинжекционные входные устройства (всего 128), контактные площадки которых расположены с шагом 100 мкм. Следует отметить, что мультиплексор МК6А проектировался в расчете на достаточно большие накапливаемые под затвором заряды (порядка $(1-2) \cdot 10^7$ электронов). В связи с этим он имеет не слишком большой коэффициент преобразования заряда в выходное напряжение $\approx 1,3 \text{ мкВ/электрон}$ (во избежание насыщения выходного устройства). В случае, когда полный накопленный заряд (т. е. произведение входного тока на время накопления) достаточно мал (меньше $(1,5-2) \cdot 10^6$ электронов) и не приводит к выполнению потенциальных ям в регистре переноса или к насыщению выходного устройства, нет необходимости отсекающей часть заряда до попадания в регистр и на выходное устройство. В этом случае потенциал отсекающего затвора уравниваются с потенциалом накопителя, накопленный заряд полностью перетекает в регистр, а на затвор антиблюминга подается постоянное (не импульсное) смещение.

Для соединения контактов линейки с контактами мультиплексора использовалась переходная керамическая плата «жук», необходимость которой вызвана следующими: а) контактные площадки алмазной линейки 2×64 выходят на две стороны относительно ее центральной части; б) расстояния между центрами контактных площадок — 74 мкм; в) контактные площадки мультиплексора выходят на одну сторону; г) расстояния между контактными площадками мультиплексора — 100 мкм.

Для создания указанного варианта линейки был разработан технологический процесс. После изготовления всех элементов сборка алмазной линейки вместе с мультиплексором проводилась в корпусе типа «Мамонт» с 64 выводами (рис. 1). Сначала мультиплексор наклеивался на керамическое основание корпуса. Далее непроводящим клеем наклеивалась плата «жук», а на контакты «жука» наклеивалась алмазная линейка. Контакты линейки сваривались проволокой диаметром 30 мкм с контактами «жука» (по 64 контакта на каждой стороне линейки). Затем проводилась сварка 128 контактов «жука» со 128 входными

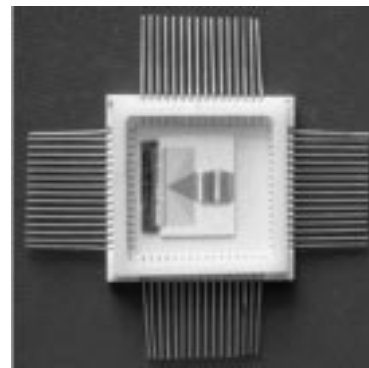


Рис. 1. Общий вид корпуса «Мамонт» с мультиплексором, «жуком» и алмазной линейкой

контактами мультиплексора, после чего — проводилась сварка 25 контактов мультиплексора с ножками корпуса. Контакт от центральной полосы линейки также сваривался с одной из ножек корпуса. После этого корпус закрывался крышкой (пластиной из плавленного кварца) толщиной 0,5 мм. Кварцевая крышка наклеивалась на корпус через промежуточную диэлектрическую рамку толщиной 2 мм (для того, чтобы не повредить проволочные соединения).

Результаты экспериментов

На основании выбранных методик и схем измерения характеристик МФУ был разработан и изготовлен автоматизированный стенд, который обеспечивал проведение измерений и определение характеристик следующих фотоэлектрических параметров полупроводниковых приемников излучения и фотоприемных устройств: темнового, общего и фототока полупроводниковых приемников излучения, спектральной характеристики чувствительности и вольт-амперной характеристики. Спектральная чувствительность линейки и матрицы определялась при засветке лампой ДДС-30 на монохроматоре МДР-23. Процесс сбора, обработки, хранения и выдачи на ПЭВМ информации, поступающей от МФУ, осуществлялся автоматически с использованием разработанного нами программного обеспечения для высокоскоростного микроконтроллера. Обработка и визуализация полученной информации проводилась с помощью ПЭВМ, входящей в состав измерительного стенда.

На **рис. 2** представлена спектральная чувствительность 122 элемента фотоприемной линейки 2×64 на основе алмаза с сопротивлением элемента 10,4 ГОм. Напряжение смещения минус 25 В. Левая граница фотоответа обусловлена спектром лампы.

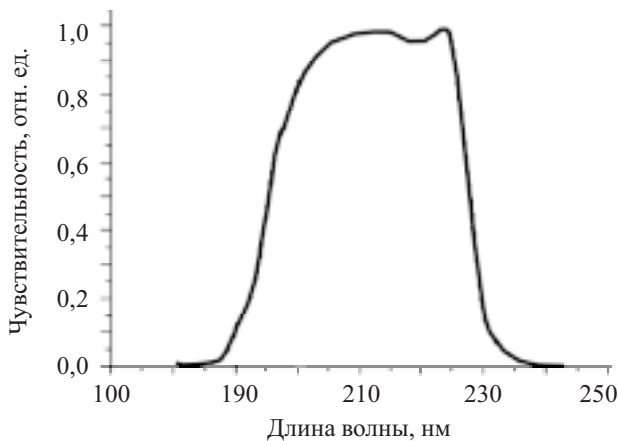


Рис. 2. Спектральная чувствительность 122 элемента фотоприемной линейки 2×64

На **рис. 3** приведена зависимость напряжения на выходе мультиплексора от напряжения на линейке, что является характеристикой светового тока линейки.

Из рисунка видно, что начиная с 85 В выходное напряжение мультиплексора не увеличивается при увеличении напряжения на линейке (хотя линейка выдерживает напряжение до 150 В). Очевидно, при данном напряжении мультиплексор насыщается тем-

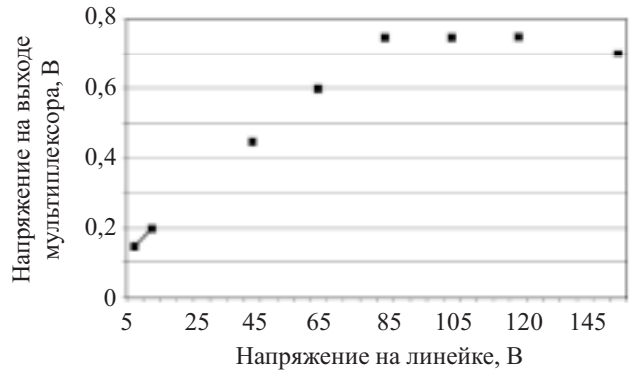


Рис. 3. Характеристика светового тока фотоприемной линейки

новым током, что и ограничивает его динамический диапазон.

Для определения однородности темнового и светового тока элементов линейки она была отделена от мультиплексора, и 20 элементов линейки были распаяны непосредственно на выводы корпуса «Мамонт».

На **рис. 4** представлены типичные вольт-амперные характеристики элементов матрицы при их засветке излучением с длиной волны 210 нм. Полярность напряжения соответствует напряжению, прикладываемому к фоточувствительному элементу матрицы. Как видим, световые ВАХ имеют резко выраженный нелинейный выпрямляющийся вид, что связано с большим отличием времени жизни генерируемых светом электронов от времени жизни дырок.

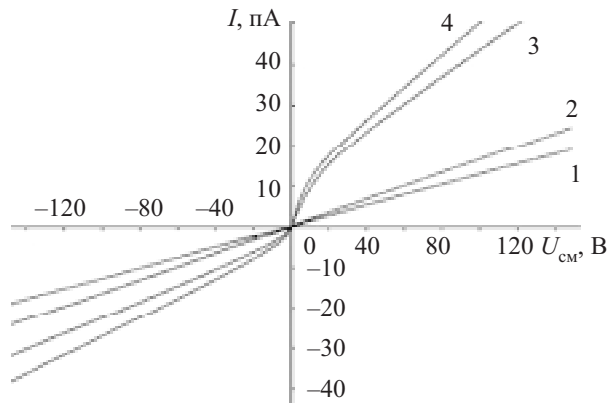


Рис. 4. ВАХ элементов матрицы 64×64: 1, 2 — темновой ток 48-го и 47-го пикселей; 3, 4 — фототок 48-го и 47-го пикселей, соответственно

Наиболее предпочтительным является вариант, когда к элементу матрицы прикладывается потенциал “+”, т. е. мультиплексор должен управлять положительными поступающими импульсами.

При изучении распределения темнового тока $I_{\text{темн}}$ по элементам матрицы 64×64 при различных напряжениях смещения установлено, что с ростом прикладываемого напряжения на некоторых элементах темновой ток растет нелинейно, и однородность его распределения по элементам уменьшается. Это, по-видимому, связано с локальными микронеоднородностями в алмазе.

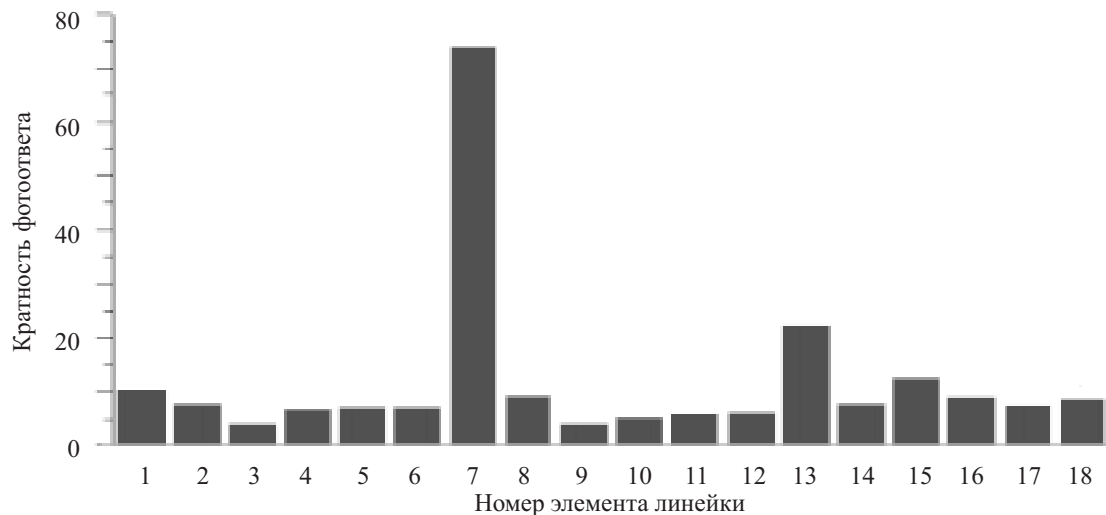


Рис. 5. Распределение кратности фотоответа элементов линейки 2×64 на основе алмаза 2а-типа при напряжении смещения –25 В

Обнаружено, что при больших напряжениях смещения фототок I_{ϕ} у большинства элементов превышал ограничения по току, заданные схемой измерения (поэтому достоверных статистических данных получить не удалось), а также что отдельные элементы матрицы обладают очень высокой фоточувствительностью с кратностью $K=60\text{—}70$ ($K=(I_{\phi}-I_{\text{темн}})/I_{\text{темн}}$), а у большинства кратность фотоответа лежит в интервале 1—10 (рис. 5). Такая неравномерность фоточувствительности также обусловлена внутренними локальными микронеоднородностями кристалла алмаза, в которых, очевидно, присутствуют центры рекомбинации, резко ограничивающие время жизни неравновесных электронов и дырок.

Оптимальный путь повышения однородности параметров матричных фотоприемников на алмазе — изготовление их на эпитаксиальных пленочных структурах, в которых возможно управление примесно-дефектным составом, влияющим на электрофизические параметры материала и, следовательно, на однородность фотоэлектрических параметров матричных фотоприемников.

Одновременно здесь в меньшей степени будет сказываться и масштабный фактор, когда не надо будет «вытягивать» носители из области генерации через весь объем кристалла толщиной 200—300 мкм. Этот эффект влияет на оптическую связь элементов матрицы и на сопротивление элемента вследствие растекания тока. Пленочные структуры с рабочим слоем 10—20 мкм обеспечили бы также приемлемые с точки зрения работы мультиплексора рабочие напряжения 5—10 В.

Впервые показана принципиальная возможность создания матричных фотоприемных устройств ультрафиолетового диапазона на алмазе, обладающих высокой чувствительностью. На примерах линейчатых (2×64) и матричных (64×64) фотоприемных устройств разработаны принципы построения и отработана их технология. Различия в фоточувствитель-

ности пикселей матрицы, связанные, в основном, со структурными неоднородностями алмаза, можно компенсировать при последующей электронной обработке сигнала. Избавиться от таких неоднородностей позволят качественные монокристаллические пленки большого размера. Однако уже сейчас можно говорить о реальных системах технического зрения в ультрафиолетовом диапазоне на основе созданных алмазных матричных устройств.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Соммер А., Фотоэмиссионные материалы.— М.: Энергия, 1973.
2. Линьков В. Локационные системы оптического диапазона, комплексов ПВО иностранных государств // Зарубежное военное обозрение.— 2001.— № 7.— Р. 665—685.
3. Груздев В. Н., Иванов В. Н., Суриков И. Н. и др. Дистанционные наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне // Оптический журнал.— 2003.— Т. 70, № 5.— С. 56—59.
4. Кувалдин Э. В., Борисов В. А. Основные характеристики и методы испытаний измерительных фотодиодов // Тез. докл. XII Всесоюз. семинара “Импульсная фотометрия”, Ленинград, 1988.
5. Hochedez J.-F. E., Sohuehle U. H., Pau J. L. et al. New UV detectors for solar observations // Proceedings of the SPIE.— 2003.— Vol. 4853.— P. 419—426.
6. Long J. P., Varadaraajan S., Matthews J. et al. UV detectors and focal plane array imagers based on AlGaN p-i-n photodiodes // Opto-electronics review.— 2002.— Vol. 10, N 4.— P. 251—260.
7. Гуляев Ю. В., Алтухов А. А., Митягин А. Ю. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе алмаза 2а типа для нового поколения аппаратуры наблюдения и распознавания объектов // Наука и технологии в промышленности.— 2006.— № 5.— С. 27.
8. Алтухов А. А., Киреев В. А., Кирилин Н. М. и др. Фотоприемники для оптоэлектронных систем УФ-диапазона на природных алмазах // Радиотехника и электроника.— 2006.— № 12.— С. 1526—1529.
9. Алтухов А. А., Клочкова А. М., Митягин А. Ю. и др. Ультрафиолетовые фотоприемники на основе природных алмазов // Радиотехника и электроника.— 2007.— Т. 52, № 3.— С. 1—4.
10. Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Горохов Е. В. и др. Алмазные фотоприемники ультрафиолетового диапазона // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2007.— № 4.— С. 29—31.