

УДК 537.533

ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТРИЧНЫХ ИК-ФОТОДИОДНЫХ СТРУКТУР И ТЕХНОЛОГИЙ

В. М. Акимов, Е. А. Климанов, В. П. Лисейкин, А. А. Тимофеев,
С. В. Щукин, В. М. Юнгерман

Государственное унитарное предприятие НПО "Орион", Москва, Россия

Представлены сведения о начальной стадии развития многоэлементных полупроводниковых фотодиодных структур, связанных с изобретением в России координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом (квадрантного). Сообщается об изобретении в России схемы ВЗН на МОП-мультиплексорах. Представлены данные по развитию матричных ИК-фотодиодных структур по годам с 1975 по 1995 как за рубежом, так и в «НПО "Орион"». Указаны перспективы развития работ по ИК-фотодиодным матрицам.

Матричные фотоприемники находят широкое применение в различных оптико-электронных системах. Определяющую роль среди них играют полупроводниковые матричные ИК-фотодиоды с Si-считывающей электроникой. Начало развития этого направления относится к 60-м гг. и связано с разработкой первых фотодиодных структур на основе Si и Ge.

В 1963 г. в нашей стране В. П. Лисейкиным был изобретен координатно-чувствительный фотодиод с поперечным фотоэффектом — первый матричный полупроводниковый фотодиод. Формула изобретения — «координатно-чувствительный фотодиод с поперечным фотоэффектом, отличающийся тем, что с целью увеличения крутизны координатной характеристики и размера линейной зоны он выполнен с разделенной базой, каждая полученная часть имеет омический контакт». Изобретение относилось к координатно-чувствительным фотодиодам как на широкозонных полупроводниках, так и узкозонных при различных способах деления базы.

Кратко об истории этого изобретения. Известно, что в конце 50-х гг. были начаты работы по разработке германиевых и кремниевых фотодиодов в лаборатории А. И. Фримера [1]. Сначала были разработаны одноэлементные фотодиоды, которые только регистрировали оптическое излучение. Однако в начале 60-х гг. появилась необходимость не только регистрировать излучение, но и определять его координату. К этому моменту наиболее известным и применяемым был координатно-чувствительный фотодиод с продольным фотоэффектом [2]. Характеристики этого прибора и список литературы приведены в работе [3]. Разработка координатно-чувствительного фотодиода на кремнии с продольным фотоэффектом в 1962 г. была поручена В. П. Лисейкину. На рис. 1, а приведена структура координатно-чувствительного фотодиода с продольным фотоэффектом. Принцип действия его заключается в следующем. При освещении поверхности фотодиода световым пятном малого размера в n -базе создаются электронно-дырочные пары, которые разделяются p - n -переходом в области светового пятна и растекаются по n - и p^+ -областям. Так как p^+ -область делается сильнолегированной, она является эквипотенциальной, а в высокоомной n -базе возникают продольные фотонапряжения $U_{\phi 1}$

и U_{ϕ_2} , которые сравниваются на выходных контактах. Если световое пятно находится в центре фотодиода, то $U_{\phi_1} = U_{\phi_2}$, и сигнал на выходе равен нулю. При перемещении светового пятна по поверхности фотодиода U_{ϕ_1} и U_{ϕ_2} изменяются, и по выходному сигналу определяется его координата.

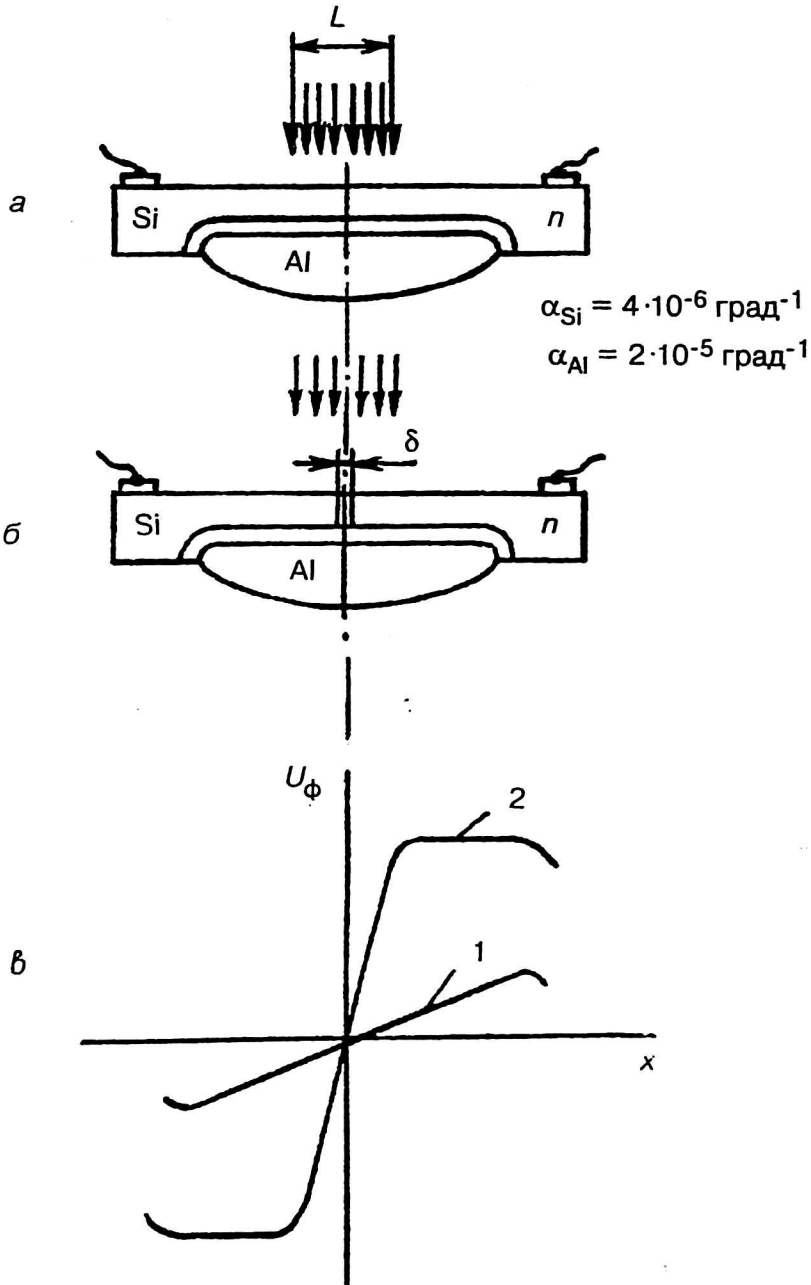


Рис. 1. Координатно-чувствительные фотодиоды:

а — структура координатно-чувствительного фотодиода с продольным фотоэффектом; б — структура координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом; δ — расстояние между элементами; α — коэффициент линейного расширения Al и Si; в — координатные характеристики фотодиодов: 1 — с продольным фотоэффектом; 2 — с поперечным фотоэффектом; L — размер светового пятна

Изготовление координатно-фоточувствительного фотодиода с продольным фотоэффектом осуществлялось сплавным методом — наиболее освоенным и распространенным в то время: p — n -переход получался при сплавлении Al в Si n -типа. Необходимо было получить Si p — n -переход большой площади с плоским фронтом сплавления и сравнительно тонкой базой для получения большой крутизны координатной характеристики. Однако получить высокую крутизну координатной характеристики, малый дрейф нулевой точки и хорошую линейность было трудно. К тому же электрический ноль не совпадал с геометрическим центром фотодиода, что затрудняло юстировку прибора. Была обнаружена крайне высокая крутизна координатной характеристики, на несколько порядков превышающая требования. Выяснение причины привело к выводу, что при изготовлении очередной технологической партии фотодиодов в процессе охлаждения с температуры 750 °С в вакууме из-за разных коэффициентов термического расширения Al и Si в центре базы фотодиода возникла трещина, которая разделила фотодиод на два фотодиода, направленных навстречу друг к другу, и это послужило основой изобретения координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом. На рис. 1, б приведена структура такого прибора.

Принцип действия координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом заключается в следующем: при перемещении светового пятна, размер которого менее или в предельном случае равен расстоянию между контактами, изменяется величина светового потока на каждом фотодиоде, соответственно этому изменяется и фото-э.д.с. на них. Сравнивая фото-э.д.с., можно судить о координате светового пятна. Основные свойства, характеристики и параметры координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом приведены в работах [4, 5]. На рис. 1, в приведены координатные характеристики фотодиода при одном и том же световом потоке и размере светового пятна.

У координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом область линейности определяется размером светового пятна, а у фотодиода с продольным фотоэффектом она порядка величины светочувствительной площади. Крутизна у фотодиода с поперечным фотоэффектом на несколько порядков выше, чем у фотодиода с продольным фотоэффектом.

Первое сообщение за рубежом о координатно-чувствительных фотодиодах с поперечным фотоэффектом появилось в 1965 г. в работах [6, 7], они получили название “квадрантные”.

Изобретение координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом привело к резкой активизации работ как в направлении разработок двухкоординатных фотодиодов различных типов, так и оптоэлектронных систем на их основе.

На рис. 2 приведены различные структурные конфигурации координатных фотодиодов, каждая из которых отвечает необходимым требованиям соответствующих оптоэлектронных систем. Изготовление фотодиодов проводилось планарно-диффузионным способом.

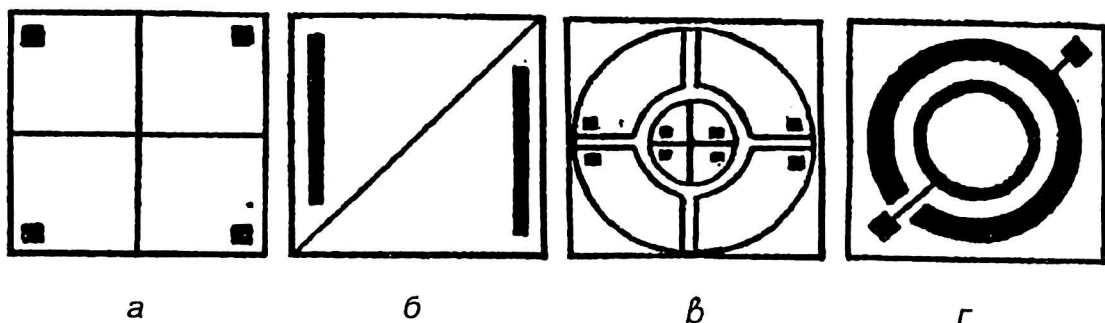


Рис. 2. Различные структурные конфигурации координатно-чувствительных фотодиодов с поперечным фотоэффектом:

а — четырехэлементные; б — диагональные; в — восьмисегментные; г — кольцевые

По исследованию характеристик, параметров и применению координатно-чувствительного фотодиода с поперечным фотоэффектом написано ряд статей и выпущено ряд каталогов [8—15].

Координатно-чувствительный фотодиод с поперечным фотоэффектом в настоящее время широко применяется также в электронной бытовой технике, например, в лазерном компакт-диске для слежения за движением дорожки лазерного диска и для автофокусировки лазерного луча на диске. Размер одного элемента составляет 60×80 мкм, а расстояние между элементами — 6 мкм [16].

Дальнейшее развитие матричных фотодиодных структур шло в направлении расширения спектральной чувствительности каждого элемента в ближнюю, среднюю и дальнюю ИК-области и увеличения числа элементов в двумерной матрице.

Расширение спектральной чувствительности в среднюю и дальнюю области, как известно, проводилось на узкозонных полупроводниках InSb и CdHgTe на диапазоны 3—5 и 8—14 мкм, соответственно. Это происходило в соответствующих подразделениях предприятия НПО "Орион" и за рубежом, а расширение спектра в ближнюю ИК-область, соответствующую импульсному лазерному излучению с $\lambda = 1,06$ мкм, проводилось в лаборатории А. И. Фримера, а затем в отделе И. И. Таубкина отделения А. А. Тимофеева.

К тому времени уже были разработаны германиевые фотодиоды с $\lambda_{\text{max}} \approx 1,55$ мкм. Но они имели большие темновые токи, большую емкость p - n -перехода, и из-за отсутствия стабильной, естественной окисной пленки были не пригодны к планарной технологии.

В работе [17] показана теоретическая возможность расширения спектральной характеристики за 1 мкм на кремнии, для чего используется кремниевая *pin*-структура с $\rho_p \approx 2000$ Ом·см. Изменением напряжения на *pin*-фотодиоде и толщины кристалла можно сдвигать спектральную характеристику в ближнюю ИК-область.

Так как высокотемпературные способы создания *p-n*-перехода при $t > 1000$ °С резко изменяли электрофизические свойства высокоомного кремния, В. П. Лисейкиным и А. И. Фримером был предложен низкотемпературный способ изготовления кремниевых *pin*-фотодиодов на основе ионного легирования. Спектральная характеристика такого фотодиода показана на рис. 3.

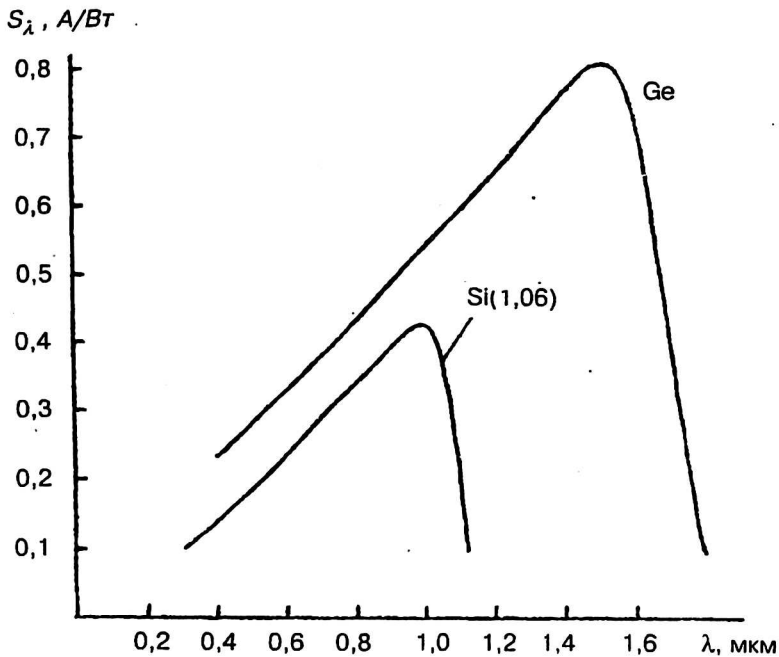


Рис. 3. Спектральные характеристики Si *pin*-фотодиода и германиевого фотодиода

Кремниевые *pin*-фотодиоды нашли широкое применение в оптико-электронных системах для приема импульсного лазерного излучения на длину волны $\lambda = 1,06$ мкм. Поэтому были проведены теоретические и экспериментальные исследования импульсных характеристик Si *pin*-фотодиодов, в том числе при больших паразитных импульсных засветках [18—24]. На основе технологии одноэлементных Si *pin*-фотодиодов были разработаны двухкоординатные (квадрантные) Si *pin*-фотодиоды вначале на высокоомном Si *p*-типа с удельным сопротивлением $\rho_p = 2000$ Ом·см, а затем и $\rho_p = 10\,000$ Ом·см. На рис. 4 приведены различные структуры разработанных Si *pin*-фотодиодов.

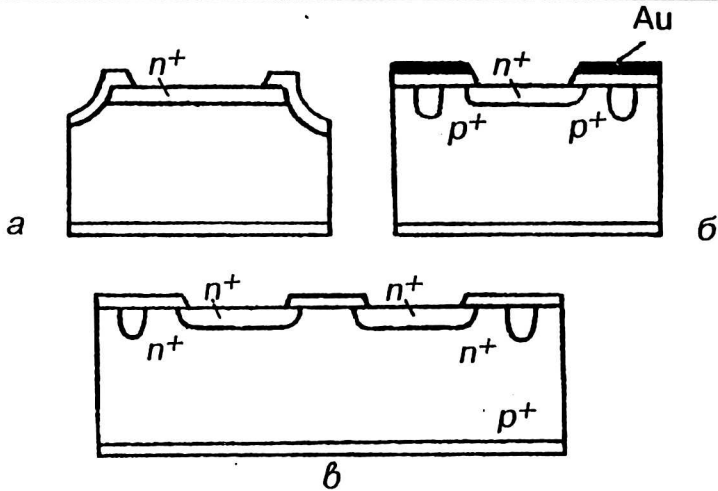


Рис. 4. Структуры Si pin-фотодиодов:

а — меза-ионная структура \varnothing 0,5 мм, $\rho_p = 2000$ Ом·см; б — планарно-диффузионная структура с p^+ -охранными кольцами и золотой диафрагмой \varnothing 0,5 мм, $\rho_p = 2000$ Ом·см; в — квадрантные планарно-диффузионные структуры с n^+ -охранным кольцом \varnothing 5 мм и \varnothing 13 мм, $\rho_p = 10$ кОм·см

Решающими факторами при разработке координатно-чувствительных Si pin-фотодиодов стали разработка 3 ТМК особо чистого высокоомного Si p -типа с удельным сопротивлением 10 кОм·см, определение режимов технологических процессов, позволяющих сохранить необходимые значения удельного сопротивления и времени жизни носителей заряда [25], а также изобретение по исключению электрически активных дефектов на тыльной поверхности Si pin-фотодиода, работающего при высоком напряжении с полным истощением, с помощью геттерирования фосфором и травления этого слоя. Экспериментальные исследования этого эффекта приведены в работе [26].

Последующее увеличение числа элементов в фотодиодной матрице было связано с необходимостью не только регистрировать источник излучения и определять его координату, но и распознавать образ в начале контура в корреляционных головках самонаведения, а затем изображения в смотрящих системах. Но изготовить фотодиодную матрицу с выводом от каждого элемента удавалось только до формата $6 \times 6 \div 10 \times 10$, и то с трудом [5]. Для матриц большего формата необходим электронный коммутатор, который считывал бы сигнал от каждого фотодиода [27]. Поэтому дальнейшее увеличение формата фотодиодных матриц зависело не только от разработки ИК-фотодиодных матриц, но и от Si-считывающей электроники и их конструкторско-технологической стыковки.

С 1975 г. полупроводниковый мир вступил в длительный многотрудный путь разработки следующего поколения матричных ИК-фотодиодных структур. При этом необходимо было делать выбор, учитывая шесть-семь или даже более альтернативных вариантов, а не два, как в предыдущих поколениях.

Необходимо учитывать:

1. Область применения, т. е. используемый спектральный ИК-диапазон 8—14, 3—5, 2—3 мкм и типы ИК-системы, в которых используются матрицы.

2. Различные фотодиодные технологии и конструкции:

ИК-фотодиодных матриц на основе КРТ, InSb, Si—PtSi, Si—IrSi, Ge_xSi_{1-x} —Si и др.;

кремниевой считывающей электроники на основе ПЗС-мультиплексоров или МОП-мультиплексоров;

конструкторско-технологической стыковки: гибридная или монолитная.

3. Параметры матриц: квантовый выход, величина электрического шума, величина фоновой засветки, величина емкости накопления, динамический диапазон, рабочая температура, частота кадров, эксплуатационные характеристики и др.

4. Стоимость матриц.

Поэтому путь, который прошли зарубежные фирмы к среднеформатным ИК-фотодиодным матрицам на собственных узкозонных полупроводниках, составил примерно 20 лет.

В табл. 1 представлены тенденции развития зарубежных матричных ИК-фотодиодов с Si-считывающей электроникой по годам. Там же для сравнения приведены ПЗИ на узкозонных полупроводниках и примесные на кремнии. Для составления таблицы использованы материалы ОНТИ НПО "Орион" [28—32].

Таблица 1

Тенденции развития зарубежных матричных ИК-фотоприемников с кремниевой считывающей электроникой

Наименование матриц	Формат матриц			Преимущества	Недостатки	Основные зарубежные фирмы
	1975—1980 гг.	1980—1990 гг.	1990—1995 гг.			
Монолитные кремниевые на основе барьера Шоттки Si—PtSi—IrtSi + ПЗС, МОП	64x128	512x512	1024x1024 640x480 (МОП) 512x512 (Si—IrSi)	Согласование с Si-технологией; высокая однородность чувствительности; низкая цена	Малая квантовая эффективность; низкий коэффициент заполнения	Eastman Kodac (США); Mitsubishi (Япония); EGG Reticon (США)
Гибридные: КРТ(8—14) +МОП КРТ(3—5) + МОП		128x128 (выпуск) 256x256 (лаб.)	320x240 (выпуск) 4x960 (ВЗН ПЗС) 6x480 (ВЗН МОП) 320x240 (выпуск) 640x480 (лаб.) 256x256 (МОП) (выпуск)	Высокая квантовая эффективность; работа при термоэлектрическом охлаждении КРТ (3—5); высокий коэффициент заполнения	Трудности конструкторско-технологической установки; высокая цена материала КРТ	Sofradir (Франция); Rockwell (США); Mullard (Англия), SBRC
InSb+ПЗС, МОП	32x32 (ПЗС)	256x256 (ПЗС, МОП)				Northrop, SBRC
Примесный кремний (Si:Ga, B, As)	32x32 (ПЗС)	58x62 (МОП)	128x128 (МОП)	Высокая квантовая эффективность	T ≤ 20 K	Hughes, Rockwell
ПЗИ на основе: InSb	64x64	256x256 (лаб.)	256x256 (выпуск)	Высокая квантовая эффективность	Плохая граница раздела диэлектрик-полупроводник	Cincinnati General Electric, Texas Instr.
КРТ	32x32	64x64 (лаб.)				

Матрицы разделены по конструктивному принципу на три группы:

1. Кремниевые на основе барьера Шоттки (Si—PtSi), (Si—IrSi) и гетеропереходов на основе Ge_xSi_{1-x} —Si.

2. Гибридные на основе КРТ, InSb и Si(Ga, As, B) с Si-считывающей электроникой на основе МОП- и ПЗС-мультиплексоров.

3. ПЗИ на основе InSb и КРТ.

Каждая из этих групп имеет свои преимущества и недостатки.

Из табл. 1 видно, что в 1975—1980 гг. закладывались основы развития этих групп и были изготовлены малоформатные матрицы со считыванием

сигнала с помощью ПЗС и ПЗИ, а ИК-фотодиодных матриц на основе КРТ еще и не было.

В 1980—1990 гг. формат матриц возрос до 512×512 , во второй группе уже разработаны фотодиодные матрицы на основе КРТ форматом 256×356 на диапазон 3—5 мкм и форматом 128×128 на диапазон 8—14 мкм с МОП-считывающей электроникой, состыкованных как с помощью In столбиков, так и “бойничной” технологией. На материале InSb формат составлял 256×256 , причем в качестве считывающей электроники использовался как ПЗС-мультиплексор, так и МОП-мультиплексор. В матрице на примесном кремнии формат составлял 58×62 , а для считывания сигнала использовался МОП-мультиплексор. Постепенно росло число элементов в матрице ПЗИ на основе InSb до 256×256 , а на КРТ— до 64×64 .

Видно, что в эти годы более интенсивно шла работа по первым двум группам ИК-фотодиодных матриц.

В 1990—1995 гг. работа велась еще более интенсивными темпами, и были достигнуты следующие результаты.

В первой группе число элементов в матрице составило 1024×1024 и для увеличения коэффициента заполнения фоточувствительной площадки в ячейке изготовлена матрица формата 640×640 с МОП-мультиплексором. Приведены работы по сдвигу спектральной чувствительности Шоттки фотодиодов в область 8—10 мкм с помощью барьера Шоттки на основе SiGe—Si и получены образцы матриц формата 512×512 .

Во второй группе значительно продвинулись работы по ИК-фотодиодным матрицам на основе КРТ как на 8—14 мкм, так и 3—5 мкм с МОП-считывающей электроникой. Созданы фотодиодные матрицы форматом 320×240 и ВЗН-матрицы с ПЗС-считывающей электроникой формата 4×960 и, наконец, матрица 6×480 с МОП-считывающей электроникой.

Формат матрицы на основе примесного кремния с МОП-считывающей электроникой достиг 128×128 .

ПЗИ матрицы на основе материала InSb достигли формата 256×256 элементов.

Из данных табл. 1 можно сделать следующий вывод: наряду с увеличением формата ИК-фотодиодных матриц по всем группам для считывания фотосигнала с элементов матриц преобладающее применение получил кремниевый МОП-мультиплексор, так как он имеет ряд преимуществ перед ПЗС-мультиплексором, а именно:

- выше выход годных;
- выше коэффициент заполнения;
- ниже величина управляющих напряжений;
- большие плотности упаковки;
- более однородные электрические характеристики при $T=77$ К;
- большой динамический диапазон;
- ниже стоимость.

Кроме того, в тепловизионных приборах, работающих в условиях сильного фона (т. е. на длинах волн больше 3—5 мкм), существенным преимуществом схем с МОП-ключами является более высокая зарядовая емкость

МОП-конденсатора по сравнению с ПЗС-ячейкой, что связано с большей допустимой напряженностью электрического поля в диэлектрике (SiO_2) по сравнению с полупроводником (Si). В то же время в условиях сильного фона сравнительно большая емкость сигнальной шины в МОП-схемах не является препятствием для реализации режима ограничения обнаружительной способности фоном.

Другим важным фактором, определяющим преимущество МОП-схем в полноформатных охлаждаемых тепловизионных приемниках, работающих на высоких тактовых частотах, являются меньшие энергозатраты (и, соответственно, тепловыделение), связанные с транспортировкой накопленных зарядов к выходным устройствам.

В табл. 2 приведено развитие Si МОП-мультиплексоров в НПО "Орион", предназначенных для считывания фотосигнала с ИК-фотодиодных матриц на КРТ и InSb.

Таблица 2

Развитие кремниевых МОП-мультиплексоров в НПО "Орион"

Наименование матриц	Формат матриц				Выпуск с 1996 г.
	1987—1990 гг.	1993 г.	1994 г.	1995 г.	
Гибридные: КРТ (8—14) + РМОП	32x32, шаг 150 мкм Регистр на 128 каналов	32x32, шаг 150 мкм	128x128, шаг 70 мкм	128x128, шаг 40 мкм 32x32, шаг 70 мкм	128x128, шаг 40 мкм 128x128, шаг 40 мкм 128x128, шаг 40 мкм
КРТ (8—14) + НМОП					
КРТ (3—5) + НМОП					
InSb + РМОП					
Монолитные кремниевые на основе барьера Шоттки Si—PtSi + НМОП	—	—	64x64, шаг 70 мкм		—

Так как первые фотодиодные матрицы на основе КРТ имели малое сопротивление, для считывания фотосигнала использовалась матрица p -МО-ключей формата 32x32 с шагом 150 мкм. Сопротивление открытого МОП-транзисторного ключа составляло 200 Ом. С помощью этой матрицы p -МОП-ключей отработывалась гибридная технология на In столбиках и "бойничная технология". Основным для этих технологий была разработка системы металлизации к истокам p -МОП-ключей. В результате проведенной работы оптимальной для гибридной технологии с использованием In столбиков явилась система Al—Mo, а для "бойничной технологии" — система Cr—Ni—Cr.

В 1989 г. была предложена схема временной задержки с накоплением (ВЗН) на МОП-мультиплексорах, и предприятием НПО "Орион" получен патент России [33]. Для этой цели был установлен специальный режим работы регистров сдвига, позволивший накапливать на МОП-емкостях фотосигналы от ИК-фотодиодов, смотрящих на одно и то же поле. Суммирование сигналов производится либо в одной емкости, либо в разных емкостях с последующим суммированием от каждой емкости. За рубежом первое сообщение о ВЗН на МОП-мультиплексоре появилось в работе [34].

В последующие годы велись работы по совершенствованию топологии и технологии МОП-мультиплексоров, связанные с увеличением сопротивления

ИК-фотодиодов на основе КРТ, включением в топологию регистров сдвига и переходом на *n*-канальную технологию. В результате разработана базовая технология кремниевых *n*-МОП-мультиплексоров с *In* столбиками для стыковки с матрицами ИК-фотодиодов. На базе этой технологии разработана матрица *n*-МОП-мультиплексоров формата 128x128 с шагом 70 и 40 мкм. С 1996 г. производится выпуск *n*-МОП-мультиплексоров с индиевыми столбиками для стыковки с матрицами ИК-фотодиодов. В результате получены гибридные матрицы на основе КРТ-фотодиодов как на 8—14 мкм, так и на 3—5 мкм, на которых получены тепловые изображения объектов.

Разработана также матрица *p*-МОП-мультиплексоров формата 128x128 с шагом 40 мкм с *In* столбиками, состыкованная с матрицей ИК-фотодиодов на основе *InSb*.

Основные параметры среднеформатных (128x128) МОП-мультиплексоров приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Параметры среднеформатных (128x128) МОП-мультиплексоров НПО "Орион"

Тип мультиплексора	Размер кристалла, мм	Шаг, мкм	$f_{\text{счит}}$, МГц	$f_{\text{упр}}$, кГц	$T_{\text{н}}$, с	Разброс $U_{\text{пор}}$, мВ	Число выводов
<i>N</i> -канальный	8,9x8,9	40	1,0	8,0	До $128 \cdot 10^{-6}$	20—30	53
<i>P</i> -канальный	8,9x8,9	40	0,02	0,15	До $5 \cdot 10^{-3}$	20—30	53

В настоящее время за рубежом и у нас в стране работы по ИК-фотодиодным матрицам ведутся по двум направлениям:

разработка полноформатных ИК-фотодиодных матриц на КРТ и *InSb* с *Si*-считывающей электроникой;

увеличение квантового выхода полноформатных ИК-фотодиодных матриц на основе Шоттки барьеров *PtSi—Si*, *IrSi—Si* и гетеропереходов $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ —*Si* также с *Si*-считывающей электроникой.

Первое направление для разработки полноформатных ИК-фотодиодных матриц требует решения вопроса увеличения диаметра пластин узкозонных полупроводников КРТ и уменьшения его стоимости на порядок ниже существующей. В работе [35] описаны современное состояние и будущее развитие охлаждаемой считывающей электроники для ИК-матричных приемников. Основой служит специальная кремниевая криогенная КМОП-технология для считывающей электроники, а в некоторых случаях ведутся работы по переходу на другой материал, например *Ge* или *GaAs*. В зависимости от требований, предъявляемых к фокально-плоскостным ИК-фотодиодным матрицам, необходимо для низкофоновых условий разрабатывать низкошумящие входные устройства, для применения в мобильных ГСН — высокую частоту кадров, для применения в высокофоновых условиях — большую емкость накопления. Кроме того, для большего разрешения теплового изображения создаются полноформатные матрицы с шагом 35 мкм, состоящие из четырех гибридных

ИК-фотодиодных матриц, расположенных на малом расстоянии. Например, в НПО "Орион" разработана и изготовлена гибридная матрица формата 384x288, содержащая кристаллы матрицы фотодиодов на основе КРТ, кремниевое матричное *n*-канальное МОП-мультиплексора и схем управления и считывания.

Проектирование топологии и конструкции кристаллов проводилось с учетом возможности формирования на общей подложке гибридной полноформатной матрицы с числом элементов 768x576.

Как уже было сказано, начаты работы по сканирующим ИК-фотодиодным матрицам в режиме ВЗН с МОП-мультиплексором [34, 36].

По второму направлению работы будут проводиться с целью увеличения квантовой эффективности Шоттки барьерных фотодиодов введением тонкого (10 нм) сильнолегированного слоя с концентрацией от $5 \cdot 10^{19}$ до $2 \cdot 10^{20}$ см^{-3} на границе PtSi—Si [37]. В этом случае квантовая эффективность увеличивается в 30 раз по сравнению с обычным PtSi—Si детектором на длину волны 5 мкм, а квантовая эффективность детектора на 8—12 мкм подобна тому, что и у обычного PtSi—Si детектора в области 4—5 мкм. Тонкое сильнолегированные слои выращиваются молекулярно-лучевой эпитаксией при 450 °С с использованием элементарного бора.

Другим способом создания ИК-фотодиодных матриц является молекулярно-лучевое выращивание на Si *p*-типа гетероструктур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ —Si разного состава в зависимости от необходимой длины волны [38]. Этим способом получены уже квантовые эффективности (3—5 %) в области длин волн 8—12 мкм на тестовых приборах, а также матрица форматом 320x244 и 400x400 элементов с ПЗС считывающей электроникой [40].

Этим двум направлениям будут составлять конкуренцию ИК-матрицы на других материалах, микроболометры, пироэлектрики, многослойные структуры с квантовыми ямами [39], халькогенидные фотодиодные матрицы [40—42], многоэлементные ИК-приборы на основе биматериалов [43], причем конструкторско-технологическая стыковка с Si-считывающей электроникой также будет определять фотоэлектрические, механические и эксплуатационные характеристики ИК-матриц. Первые принципиальные результаты по гибридной технологии на PbS-материале и Si МОП-ключачах описаны В. В. Ереминым, В. П. Лисейкиным, Е. А. Климановым и В. А. Рукавишниковым.

Литература

1. Курбатов Л. Н. К 50-летию Научно-производственного объединения "Орион" // Вопросы оборонной техники: Сер. 11. 1996. Вып. 3—4(150—151). С. 5.
2. Wallmark I. T. Photodiode with a lateral photo-effect // Proc. IRE. 1957. V.45. P. 474.
3. Таубкин И. И., Фример А. И., Лисейкин В. П., Ревкина Э. И. и др. Продольный фотоэффект в *p*- и *n*-областях кремниевых фотодиодов // Опτικο-механическая промышленность. 1983. № 5. С. 16—19.

4. Лисейкин В. П., Тришенков М. А. Координатно-чувствительный бифотозлемент // Полупроводниковые приборы и их применение. 1966. Вып. 16. С. 22—27.
5. Тришенков М. А., Фример А. И. Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с р-р-переходами // Там же. 1971. Вып. 25. С. 195.
6. Williams T. L. Development and application of position-sensitive photocells // Instrument Practice. 1965. № 8. P. 733.
7. Baker L. R. Production of position-sensitive photocells // Control. 1965. № 9. P. 545.
8. Voss V. H. Dreischicht-Photodioden // Bulletin SEV. 1965. № 6. P. 185.
9. Тришенков М. А. Инерционные свойства координатно-чувствительного бифотозлемента // Физика и техника полупроводников. 1967. Т. 1. С. 1242.
10. Тришенков М. А., Фример А. И. К исследованию механизма электрической связи многоэлементных фотодиодов // Там же. 1968. Т. 2. С. 169.
11. Лисейкин В. П., Никонов В. М., Тришенков М. А. Функциональный фотоэлектрический преобразователь на основе координатно-чувствительного бифотозлемента // Автоматика и телемеханика. 1969. № 1. С. 156.
12. Sydenham P. H. Position-sensitive photocells and their application to state and dimensional metrology // Optica Acta. 1969. V. 16. № 3. P. 377.
13. Stech H. et al. Improved fabrication method for quadrant-type deflector cells // Electronic Packaging and Production. 1974. № 5. P. 101.
14. Реклама фирмы UDT, США, июль, 1986.
15. Реклама фирмы Hamamatsu, Япония, июль, 1986.
16. Описание лазерного проигрывателя компакт-диска фирмы Sharp. 1988.
17. Love I. A., Sizilov I. R. Improvement of spectral characteristics in Schottky photodiodes by change of voltage // Appl. Optics. 1968. V. 7. № 4. P. 20.
18. Mindock R. M., Horakl. V. Temperatur effects upon partially and fully depleted silicon photodetectors: Tr. конф. "Электрооптические системы", США, май 1971. С. 357.
19. Доссон Н. И., Казарин Л. Н. Определение импульсной чувствительности фотоприемника по его частотной характеристике // Радиотехника и электроника. 1975. Т. XX. № 4. С. 806.
20. Доссон Н. И., Казарин Л. Н., Смолин О. В. Определение переходной функции фотоприемника по его импульсному фотоответу в реальной системе // Импульсная фотометрия. 1975. Вып. 4. С. 191.
21. Юнгерман В. М., Тришенков М. А. Кинетика ответа фотодиода при пролете носителей через область объемного заряда // Радиотехника и электроника. 1977. Т. XXII. Вып. 6. С. 1028.
22. Доссон Н. И., Казарин Л. Н., Смолин О. В., Тимофеев А. А. К анализу работы фотодиодов в большом диапазоне импульсной засветки // Импульсная фотометрия. 1978. Вып. 5. С. 180.
23. Доссон Н. И. Исследование импульсной характеристики Si-pin-фотодиодов при слабом поглощении излучения // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 73
24. Доссон Н. И. Исследование переходных функций Si-pin-фотодиодов в случае слабопоглощаемого излучения // Прикладная физика. В печати.
25. Воронкова Г. И., Климанов Е. А., Казарина Н. Н., Кулыманов А. В., Фамицкий В. И. Влияние термообработок, используемых при различных технологических операциях на электрофизические свойства Si // Военная техника и экономика. Сер. Общетеchnическая. 1977. № 7.
26. Климанов Е. А., Кулыманов А. В., Лисейкин В. П. О вольт-амперной характеристике кремниевых pin-диода большой площади, работающего в режиме полного истощения // Радиотехника и электроника. Т. XXI. № 9. С. 1967.
27. Тришенков М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. — М.: Радио и связь. 1992. С. 12.
28. Ушакова М. Б. Современные зарубежные матричные фотоприемники: Аналитический обзор за 1990—1992 гг. — М.: НПО "Орион", 1992.
29. Ушакова М. Б. Развитие инфракрасных матричных фотоприемников за рубежом: Аналитический обзор за 1991—1993 гг. — М.: НПО "Орион", 1993.
30. Ушакова М. Б. ИК-системы на основе InSb-матриц: Обзор по материалам зарубежной печати за 1993—1997 гг. — М., ОНТИ ГНЦ НПО "Орион", 1997.
31. Ушакова М. Б. Справочник по зарубежным ИК-системам с применением приемников оптического излучения на основе соединений кадмий-ртуть-теллур, антимонида индия, силицида платины и селенида свинца, пироэлектриков, микроболометров и многослойных структур с квантовыми ямами. — М., ОНТИ ГНЦ НПО "Орион", 1998.
32. Ушакова М. А., Борисов В. А. Справка по международной выставке AEROSPACE-98. — Орландо, США, апрель, 1998.
33. Климанов Е. А., Лисейкин В. П., Ильин Ю. К., Каттель С. Л., Ерохин В. Е. Коммутатор на МОП-транзисторных ключах: Пат. России 1667240, 17.07.89.
34. Baker I. M., Charlton D. E., Arthurs C., Crimes G. I. Advanced high performance CdHgTe multiplexed arrays // Proceedings of an ESA Symposium on Photon Detectors for Space Instrumentation. The Netherlands, 10—12 November, 1992.
35. Fosum E. R., Vedabrata P. IR readout electronic for matrix photo-diodes // Proc. SPIE. 1993. V. 2020. Infrared Technology. P. 325.
36. Arthurs C. P., Baker I. M., Crimes G. I., Bains S., Marrey D. C. CMOS/CdHgTe hybrid technology for long linear arrays with Time Delay and Integration and element deselection // Ibid, 1996. V. 2744. P. 473.
37. Lin T. L. et al. Long-wave length Infrared doping-spike Pt-Si detectors // Ibid, 1993. V. 2020. Infrared Technology. P. 429.

38. Lin T. L., Fathauer R. W., Krabach et al. SiGe/Si Heterojunction internal photoemission long-wave length infrared detectors fabricated by molecular beam epitaxy//IEEE Transactions on Electron Devices. 1991. V. 38. P. 5.
39. Tsaun B. Y., Chen C. K., Marino S. A. Heterojunction Ge_xSi_{1-x}/Si infrared detectors and focal Plane arrays//Optical Engineering. 1994. V. 33. № 1. P. 72.
- 40/ Zogg H. et al. Heteroepitaxial $Pb_{1-x}Sn_x$ in Si infrared sensor array with 12 μm outoff wave length // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 55. P. 10.
41. Maselk et al. Monolithic lead chalcogenide IR arrays on Silicon Fabrication and use in thermal imaging applications//Proc. SPIE. 1992. V. 1735. P. 235.
42. Zogg H. et al. Photo-voltaic Lead chalcogenide on silicon infrared sensor arrays//Optical Engineering. 1994. V. 33. P. 228.
43. Amantea et al. IR imager with 5 mK NEDT//Proc. SPIE. 1997. V. 3061. P. 210.

HISTORY, MODERN STATE AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF SEMICONDUCTOR MATRIX IR-PHOTO-DIODE STRUCTURES AND TECHNOLOGIES

*V. M. Akimov, Y. A. Klimanov, V. P. Liseykin, A. A. Timofeev,
S. V. Shchukin, V. M. Jungerman*

State Unitary Enterprise «RD&P Center "Orion"», Moscow, Russia

Information about the initial stage of development of multi-element semiconductor photo-diode structures referring to the invention of a position-sensitive photo-diode in Russia in 1963 with a transversal photo-effect (quadrant) is given. Communicates about the invention in Russia TDI circuit on MOS multiplexers. Data on development of matrix IR-photo-diode structures since 1975 to 1995 both abroad and in «RD&P Center "Orion"» are presented. Prospects of works carried out on IR-photo-diode arrays are given.