

# РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ



Е. Дмитриев

ки. Содержание первого и второго этапов традиционно. Что касается третьего и четвертого этапов, то на них накладываются отпечаток особенности методов и процессов создания конкретных видов изделий, поэтому требуется их подробный анализ применительно к исследуемой группе изделий ТФЧП.

## ФИЗИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ТФЧП отличаются достаточно широким многообразием функционального назначения, применяемых материалов и конструктивного исполнения. В результате для их реализации требуется относительно широкий спектр технологий. Учитывая, что ТФЧП являются твердотельными приборами, их технология входит в систему технологий для изделий электронной техники.

По физическому принципу ТФЧП делятся на две подгруппы:

- **фотонные** (фотоэлектрические) приемные устройства, в чувствительных элементах которых осуществляется непосредственное преобразование оптического сигнала в электрический. К ним относятся полупроводниковые *фоточувствительные приборы* (ФЧП), образующие самую многочисленную группу;
- **нефотонные** – тепловые приемные устройства на основе пирозлектриков и тепловые приемные устройства болометрического типа на основе окислов металлов, полупроводников и сверхпроводников (НТСП и ВТСП). В этой группе фотоприемников преобразование оптического сигнала в электрический происходит не непосредственно, а через тепловой сигнал.

Различие физических принципов чувствительных элементов (ЧЭ), как правило, служит причиной различия их физических структур, для реализации которых используются соответствующие технологии. Сложность самой физической структуры обуславливает сложность и точность технологии ее создания.

Физические структуры ТФЧП (см. рисунок) можно разделить на:

- **резисторные** – на основе использования эффекта собственной и примесной фотопроводимости, а также фотопроводимости, обусловленной квантово-размерными эффектами;
- **диодные** – с *p-n*, *p-i-n*- или МОП-структурой; структурой *металл-резистор-полупроводник* (МРП); оптическим резонатором с барьером Шотки (БШ) или с лавинным усилением;
- **транзисторные и тиристорные**.

В качестве материала ЧЭ полупроводниковых ФЧП могут использоваться:

- **собственные полупроводники:** Si, Ge, PbS, CdS, PbSe, GaAs, InSb, InAs,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ,  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ,  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  и т.д.;
- **примесные полупроводники:** легированный кремний (Si:Ga, Si:In, Si:Ti, Si:Se, Si:Te, Si:As, Si:Sb), легированный германий (Ge:Hg, Ge:Au) и легированный арсенид галлия (GaAs:Mn, GaAs:Cu) и т.д.;

Технический уровень и темпы развития изделий оптоэлектроники, в том числе твердотельных фоточувствительных приборов (ТФЧП), в значительной степени определяются возможностями научно-технологической базы их создания и производства.

В общем случае необходимо проводить исследование по выявлению всех значимых факторов развития ТФЧП, связанных с научно-техническими проблемами их создания и производства, и установлению взаимосвязи между ними.

Достоверная оценка состояния и динамики развития научно-технологической базы создания и производства ТФЧП может помочь сформулировать обоснованную политику развития (выраженную, например, в виде "концепции развития") этой исключительно важной как для гражданских, так и для военных применений области оптоэлектроники. В конечном результате появится возможность определить приоритеты финансирования тех или иных ее направлений, которые могли бы привести к реальным результатам за короткое время.

Публикуемый материал – первое исследование такого рода в нашем разделе, подготовленное специалистом в этой области Е.П.Дмитриевым. Ваши отклики направляйте по адресу: [nslepov@online.ru](mailto:nslepov@online.ru).

Для удобства пользования материалом все сокращения выделены и помещены во врезке.

## ОБЩАЯ СТРУКТУРА И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ТФЧП

В широком смысле технология создания – это цепочка процессов с последовательно-временными связями, которые в своей совокупности должны обеспечивать, начиная от идеи (замысла), создание какого-либо конкретного объекта. Отсюда логично вытекает общая, сложившаяся к настоящему времени, структура технологии создания: 1 этап – идея создания (замысел), 2 этап – планирование НИОКР, 3 этап – поисковые и прикладные НИР, 4 этап – разработка опытных образцов (ОКР).

Эти этапы технологии создания ТФЧП являются общими и для любого другого вида изделий электронной техники и электротехни-



**Классификация видов физических структур ЧЭ ТФЧП:**

**BIB** – структура с блокированной примесной зоной; **HIP** – приемник с внутренней фотоэмиссией и **SiGe/Si-гетеробарьером**; **QWS** – квантово-размерные структуры (**KPC**); **SL** – сверхрешетка; **SPRITE** – здесь: фоторезисторный приемник с внутренним накоплением сигнала

- классические гетероструктуры: InGaAs/InP, HgCdTe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и HgCdTe/CdZnTe;
- гетероструктуры с барьером Шотки на основе силицидов металлов: MSi/Si SiPt/Si, SiIr/Si, SiPd<sub>2</sub>/Si и SiNi/Si);
- гетероструктуры типа "сверхрешеток" на основе пар полупроводников: AlGaAs/GaAs, InAsSb/InSb (напряженные сверхрешетки), HgTe/CdTe, SiGe/Si и т.д.

Известны примеры реализации сверхрешеток на основе гомоструктур InSb с *n-i-p-i*-слоями [1]. Получены также Si-гомоструктуры – сверхрешетки на основе чередующихся нелегированных и δ-легированных слоев [2].

Физические структуры ЧЭ тепловых приемников, как правило, представляют собой многослойные гетероструктуры, в которых каждый слой выполняет свою определенную функцию (иногда происходит совмещение этих функций).

В общем случае в физической структуре теплового приемника присутствуют следующие основные слои:

- поглощающий (он же может быть одновременно и согласующим, и защитным);
- термочувствительный;
- теплоизолирующий.

Между этими слоями могут находиться переходные, так называемые буферные, или согласующие, слои, которые являются чисто технологическими.

В качестве материала термочувствительного слоя пирозлектрических приемников применяются такие ферроэлектрики, как LiTaO<sub>3</sub>, PbTiO<sub>3</sub>, SrBaTiO<sub>3</sub>, PLZT, TGS (DTGS), PVDF и др. Все они обладают достаточно высокими функциональными характеристиками и приемлемой технологичностью. Как и в случае ЧЭ с БШ, для повышения эффективности ЧЭ пирозлектрических тепловых приемников применяется структура оптического резонатора, обеспечивающая локализацию поглощения излучения в тонком термочувствительном слое.

В болометрических ВТСП-приемниках функцию термочувствительного слоя выполняют YBaCuO и DyBaCuO, а в кремниевых микроболометрах – слои окиси ванадия (VO<sub>x</sub>) с относительно высоким значением температурного коэффициента сопротивления.

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФЧП**

Фоточувствительные приборы составляют основу создания современных средств отображения видеoinформации, с помощью которых решается широкий круг как гражданских, так и *военно-технических задач* (ВТЗ), в том числе таких, как обнаружение и распознавание целей в спектральных диапазонах от УФ до дальнего ИК.

В табл.1 приведены, например, традиционные типы задач (на примере ВТЗ как более широкого круга таких задач), решение которых основано на использовании различных *оптоэлектронных средств* (ОЭС). Из названия таблицы следует, что все указанные в ней задачи отнесены к перспективным. Это можно объяснить, например, тем, что такая ВТЗ, как разведка, никогда не исчерпает себя благодаря совершенствованию существующих или использованию новых способов и методов ее осуществления. Более того, развитие ОЭС позволяет решать традиционные ВТЗ на качественно более высоком уровне, благодаря возможности эффективно осуществлять разведку в любое время суток и в сложных метеоусловиях.

Анализ приведенных в таблице видов ОЭС позволяет сделать вывод о том, что большинство из них строятся на использовании технических средств видения, реализованных в различных поддиапазонах полного оптического диапазона. Другая часть ОЭС, выполняющая функцию управления, использует принципы локации и наведения в оптическом диапазоне.

**Таблица 1. Перечень перспективных ВТЗ, решаемых с помощью ОЭС**

ВТЗ	ОЭС, обеспечивающие решение ВТЗ
Разведка в любое время суток (включая ночь) и в сложных метеоусловиях. Обнаружение: - маскировки (Camouflage detection), - личного состава (Personal detection), - подвижных целей (Vehicle detection). Наблюдение за полем боя (Surveillance). Контроль за ведением огня (Fire control). Оценка результатов действия средств поражения (Damage assessment)	Средства наблюдения и разведки оптического диапазона: активно-импульсные телевизионно-локационные системы, низкоуровневое телевидение, обзорно-прицельные ПНВ и тепловизионные приборы
Оперативное обнаружение мин (Mine detection)	ИК-обнаружитель мин
Обнаружение спутников (Satellite detection). Обнаружение запуска МБР (BM detection). Обнаружение подводных лодок (SM detection)	Комплексные оптоэлектронные системы обнаружения, в том числе космического базирования
Обнаружение заражения летучими ОБ (Gas analysis)	Оптические анализаторы газового состава
Целеуказание и наведение (самонаведение) средств поражения (снарядов, бомб и ракет) (Guidance), в т.ч. для обеспечения избирательного высокоточного поражения	Комплексные, активные, полуактивные и пассивные оптоэлектронные средства наведения УФ, видимого и ИК-диапазонов, в т.ч. мультиспектральные и интегрированные с СВЧ-каналом
Неконтактный подрыв боевых частей (снарядов, бомб и ракет) (Proximity fuses)	Неконтактные оптические взрыватели
Охрана объектов (Intrusion alarm system)	Телевизионные системы, в т.ч. низкоуровневые, и ИК-приборы
Контроль доступа (к объектам, устройствам, базам данных), в т.ч. биометрический	Оптические системы контроля отпечатков пальцев, радужной оболочки глаз, фотографий лица и т.д.
Предупреждение о пожарной опасности (Fire alarms). Контроль эффективности тепловой маскировки ВВТ и личного состава	ИК-система предупреждения пожарной опасности. ИК-измеритель радиационной температуры
Предупреждение об опасности столкновения с препятствиями (объектами) (Crash alarm)	Оптические локационные системы
Пилотаж авиационной техники в ночное время. Вождение подвижных средств (танков, БМП и т.д.) в ночное время	Системы ночного видения (низкоуровневое телевидение, ПНВ и тепловизионные приборы)
Управление полетом КЛА (Spacecraft guidance). Навигация КЛА	Телевизионные системы дневного и ночного видения. ИК-датчик горизонта

Следует подчеркнуть, что все ОЭС, приведенные в табл. 1, относятся к информационным системам (ИС) и в общем случае совершенствуются по законам развития таких систем. Рассмотрим основные тенденции этого развития.

Тенденции развития *ОЭС вооружения* (ОЭСВ) обусловлены необходимостью решения конкретных ВТЗ, которые в свою очередь постоянно усложняются.

Первая тенденция связана с совершенствованием существующих видов ОЭСВ, т.е. с повышением их тактико-технических, эксплуатационных, эргономических и экономических характеристик, таких как:

- дальность и скрытность действия;
- формат поля зрения;
- быстродействие;
- помехоустойчивость;
- снижение массы и уменьшение габаритов (объема);
- повышение надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам (ВВФ) и, в особенности, к ионизирующим излучениям, а также световому и лазерному излучению;
- удобство в эксплуатации;
- снижение затрат на эксплуатацию, снижение стоимости изготовления.

Вторая тенденция выражена в создании **мультиспектральных систем**, которые могут найти применение как в средствах видения, так и в оптоэлектронных системах управления (наведения и самонаведения), обеспечивая им высокую защищенность от действия помех искусственного и естественного происхождения.

Третья тенденция характеризуется усилением процессов автоматизации и роботизации, широким внедрением в функциональные узлы ОЭСВ микропроцессорной техники.

Четвертая тенденция заключается в комплексировании ОЭСВ и интегрировании их с другими средствами ВВТ с целью расширения функциональных возможностей ОЭСВ.

И, наконец, пятая тенденция проявляется в широком использовании методов унификации при создании ОЭСВ, в частности,

модульного принципа построения таких систем, который позволит существенно сократить стоимость, сроки разработки и освоения производства ОЭСВ.

Следует отметить, что создание перспективных ОЭСВ во многом зависит как от существующих возможностей, так и от уровня развития производства комплектующих изделий межотраслевого применения – основы элементной базы.

Более пристальным объектом исследований в рамках данной работы являются:

- две группы ФЧП, входящих в элементную базу ОЭСВ. Это ФПУ (твердотельные ФЧП) и ЭОП (электровакуумные ФЧП);
- группа ПОИ (в части миниатюрных устройств отображения видеоинформации).

Оценим существующие и потенциальные возможности каждой из вышеперечисленных групп с точки зрения создания на их основе перспективных ОЭСВ.

### СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТФЧП

Оценку технического уровня ТФЧП целесообразно проводить, пользуясь для них понятием "поколение". При этом необходимо учитывать существенное различие между изделиями военного и коммерческого назначения. Данное различие в основном проявляется в части требований к условиям эксплуатации и связано, как правило, с решением проблемы создания радиационно стойких изделий.

Применительно к ТФЧП можно условно выделить два поколения:

- первое поколение – это ТФЧП на основе однорядных и многорядных линеек ЧЭ, работающих в режиме *временной задержки и накопления* (ВЗН) сигнала;
- второе поколение – это фотоприемные устройства, в которых используются матрицы ЧЭ, так называемые *матрицы фокальной плоскости* (FPA).

Переход от поколения к поколению сопровождается увеличением количества ЧЭ, а также возрастанием функциональной сложно-

Таблица 2. Современный зарубежный научно-технический уровень кремниевой и кремний-германиевой технологии (ФППЗ, ФД БШ и МБ)

Параметры, единица измерения	Виды ФПУ				
	ФД БШ	ФП Si:Ga	ФП ВФЭ	ТЧД	МБ (VO <sub>x</sub> )
Область спектральной чувствительности, мкм	3–5	8–18	$\lambda''=10,7$	8–12	7,5–14
Формат (число ЧЭ)	1040x1040	128x128	512x512	320x240	327x245
Технология ЧЭ	10-нм слой SiPt	Метод БЗП	Фоторезистор SiGe/Si МЛЭ. 20 нм Si <sub>0,6</sub> Ge <sub>0,4</sub> :B; C <sub>B</sub> = 2·10 <sup>20</sup> см <sup>-3</sup>	9 последовательно соединенных диодов на SOI-мембране. Технология микромеханических приборов. SIMOX-технология	0,5 мкм VO <sub>x</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -мембрана. Технология микромеханических приборов
Технология МПЛ	ПЗС – CSD n-МОП 2 поли-Si/2Al	k-МОП	n-МОП 1 поли-Si/2Al	k-МОП	n-МОП 1 поли-Si/2Al
Технология сборки	Монолитная конструкция	"Перевернутый кристалл"	Монолитная конструкция	Монолитная конструкция	Монолитная конструкция
Проектные нормы литографии МПЛ, мкм	1,5	2	0,8	–	2,0
Размер ЧЭ, мкм	17x17	43 (50-шаг)	32x34	40x40	40 (46-шаг)
Коэффициент заполнения, %	53	74	59	90	48
Размер кристалла, мм <sup>2</sup>	20,6x19,4	6,4x6,4	20,6x19,4	17x17	15x16
Температурная чувствительность	9,6·10 <sup>3</sup> е/К	–	29 мВ/К	9,7 мВ/К	–
Уровень насыщения, е	1,6·10 <sup>6</sup>	–	–	–	–
Эквивалентная шуму разность температур, К (F <sub>к</sub> – 30 Гц; f/1,2; охлаждаемый фильтр)	0,100	0,025°С	0,080 (f/2)	0,120 (f/1)	0,100 (0,040 – потенциально достижимое значение) D* = 1,1·10 <sup>9</sup> см·Гц <sup>1/2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>
Рабочая температура ЧЭ, К	77	25	43	300	300 (с ТЭО)
Постоянная времени, мс	–	–	–	17	12
Неоднородность чувствительности, %	0,3	5	2,2	2	10
Тепловая проводимость, Вт·К <sup>-1</sup>	–	–	–	1·10 <sup>-7</sup>	1,7·10 <sup>-7</sup>
Квантовая эффективность	–	85%	0,155 е/В	–	–
Доля дефектных ЧЭ, %	–	1	0,002	–	–
Источник информации	[3]	[5]	[4]	[3]	[6]



**Таблица 3. Современный зарубежный научно-технический уровень ТФЧП на основе соединений  $A^3B^5$  и твердых растворов соединений  $A^2B^6$**

Параметры, единица измерения	Виды ФПУ				
	ФД InSb	ФР CdHgTe	ФД CdHgTe / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ФД CdHgTe/CdZnTe	ФД InGaAs
Область спектральной чувствительности, мкм	2–5	8,0–9,5	3–5	$\Gamma''=10,3\pm 0,4$	0,9–1,7
Страна, тип, компания	США; FPA AE187; Amber A Raytheon Company	США; FPA AE188; Amber A Raytheon Company	США; PACE-I; Rockwell Electro-Optic Center	Франция; ID TL061-XX; SOFRADIR	США; SU128-1.7RT; Sensor Unlimited, Inc.
Технология ЧЭ	ЖФЭ	ЖФЭ	ГФЭ CdTe на Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ЖФЭ CdHgTe	ЖФЭ CdHgTe на CdZnTe	ЖФЭ
Технология МПЛ	к-МОП	к-МОП	к-МОП	к-МОП	–
Технология сборки	"Перевернутый кристалл"	"Перевернутый кристалл"	"Перевернутый кристалл"	"Перевернутый кристалл"	"Перевернутый кристалл"
Проектные нормы литографии МПЛ, мкм	1,0	2,0	1,25	–	–
Формат матрицы (число ЧЭ)	512x512	128x128	640x480	288x4 (TDI)	128x128
Размер ЧЭ, мкм	19x19 (шаг 25)	43 (шаг 50)	15x15	25x28 (53/56 шаги)	40 (60 шаг)
Коэффициент заполнения, %	85	74	90	100	100
Размер кристалла, мм <sup>2</sup>	12,8x12,8	6,4x6,4	20,6x19,4	8,064x0,383	–
Уровень насыщения, е	4,0·10 <sup>6</sup>	4,0·10 <sup>6</sup>	17,1·10 <sup>6</sup>	16·10 <sup>6</sup>	5,0·10 <sup>6</sup>
Эквивалентная шуму разность температур (F <sub>к</sub> – 30 Гц; f/1,2; охлаждаемый фильтр) или удельная обнаруживающая способность	0,025°C (2·10 <sup>14</sup> фотон·см <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	Удельная обнаруживающая способность D* <sup>*</sup> =1,6·D <sup>*</sup> <sub>ВУР</sub>	0,02 К (ТЧЭ=125К) 0,013 К (ТЧЭ=78К) D* <sup>*</sup> =1·10 <sup>12</sup> см·Гц <sup>1/2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>	Удельная обнаруживающая способность D* <sup>*</sup> =1,5·10 <sup>11</sup> см·Гц <sup>1/2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>	Удельная обнаруживающая способность D* <sup>*</sup> =1·10 <sup>13</sup> см·Гц <sup>1/2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>
Рабочая температура ЧЭ, К	70–80	77	120	78	20 °С
Время накопления, с	5·10 <sup>-6</sup> ... 15·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	–	2·10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
Неоднородность чувствительности, %	5,0	10,0 (s/m)	8,0	s=±30	2
Квантовая эффективность, %	85	70	68 ± 8,5	–	65
Доля дефектных ЧЭ, %	1,0	2	0,3 ... 2,0	15 каналов из 288 (5·10 <sup>10</sup> <D* <sup>*</sup> >2,5·10 <sup>10</sup> ) и 6 каналов из 288 (D* <sup>*</sup> <2,5·10 <sup>10</sup> )	2
Источник информации	[5]	[5]	[7]	[8]	[9]

сти электроники, применяемой для обработки сигнала. Наряду с этим наблюдается стремление к интеграции ЧЭ с электроникой обработки сигналов и объединение их в монолитную конструкцию ФПУ, решаемое исключительно средствами технологии. Эти процессы следует рассматривать как устойчивую тенденцию развития ТФЧП.

Современный уровень отечественных ТФЧП специального назначения можно оценить как начало проведения разработок опытных образцов унифицированного (модульного) варианта первого поколения изделий этого вида и экспериментальных образцов второго поколения.

Как показывает анализ, в области ТФЧП наблюдается наше технологическое отставание от зарубежного уровня, особенно заметное в кремниевой технологии, на которой базируется создание ТФЧП ФД с барьером Шоттки и микроболометров.

ТФЧП на основе ФД с БШ долгое время рассматривались у нас как неперспективное направление, поэтому вплоть до начала 90-х годов по нему не велись исследования и разработки, что в итоге и обусловило столь существенное отставание от современного мирового уровня.

Современный мировой уровень технологии ИК-ТФЧП на основе SiPt вплотную приблизился к мировому уровню матричных *фото-чувствительных приборов с переносом заряда* (ФППЗ) для *телевидения высокой четкости* (HDTV).

Современные достижения зарубежной кремниевой и кремний-германиевой технологии отражены в табл.2.

В табл.3 приведены обобщенные данные по современному зарубежному научно-техническому уровню ТФЧП на основе соединений  $A^3B^5$  и твердых растворов соединений  $A^2B^6$ . Именно на этих материалах с помощью технологий *жидкофазной эпитаксии* (ЖФЭ) и *га-*

**Таблица 4. Обобщенные данные о создании ряда отечественных модулей**

Условное обозначение	Основные технические и эксплуатационные характеристики							
	Материал ЧЭ	Рабочая температура ЧЭ, К	Формат	Размер ЧЭ, мкм	$\lambda_{\text{макс}} (\lambda_p)$ , мкм	D* для $\lambda'' (\lambda_c)$ , см·Гц <sup>1/2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>	Вольтовая чувствительность, В/Вт	Назначение
Модуль-мм	KPT	77	2x10	50x50	10,0–11,5	4x10 <sup>10</sup>	3x10 <sup>4</sup>	Для ТВП 1 и 2 классов по ОТП-1
Модуль-пп	KPT	77	2x16	35x35	10,0–11,5	4x10 <sup>10</sup>	5x10 <sup>4</sup>	Для ТВП 1 и 2 классов по ОТП-1
Модуль-мм-1	KPT	77	2x16	35x35	10,0–11,5	4x10 <sup>10</sup>	5x10 <sup>4</sup>	Для ТВП 1 и 2 классов по ОТП-1
Модуль-пп-1	KPT	77	2x16	50x50	10,0–11,5	4x10 <sup>10</sup>	3x10 <sup>4</sup>	Для ТВП 1 и 2 классов по ОТП-1
Модуль-мм-2	KPT	77	2x16	50x50	10,0–11,5	4x10 <sup>10</sup>	3x10 <sup>4</sup>	Для ТВП 1 и 2 классов по ОТП-1
Модуль-пп-2	KPT	77	2x16	50x50	10,0–11,5	4x10 <sup>10</sup>	3x10 <sup>4</sup>	Для ТВП 1 и 2 классов по ОТП-1
Фоторезистор ФР-м	KPT	77	2x16	50x50	10–12	3x10 <sup>10</sup>	1x10 <sup>4</sup>	Для ТВП 1 и 2 классов по ОТП-1
Фоторезистор АП-РЛ	KPT	77	2x10	50x50	10–12	4x10 <sup>10</sup>	1x10 <sup>4</sup>	Для ТВП 1 и 2 классов по ОТП-1
Фоторезистор ФР-п	Ge:Hg	33±2	2x48	35x35	10–12	8x10 <sup>10</sup>	1x10 <sup>6</sup>	Для ТВП 1 и 2 классов по ОТП-1
Фоторезистор ФР-к	Ge:Hg	33±2	2x32	35x35	10–12	8x10 <sup>10</sup>	1x10 <sup>6</sup>	Для ТВП 1 и 2 классов по ОТП-1
Матричное ФПУ-м	KPT	77-80	4x48	35x35	9,5–10,0	5x10 <sup>10</sup>	3x10 <sup>6</sup>	Для ТВП 1 и 2 классов по ОТП-1
ФППЗ	SiPt	77	256x256	35x35	1,1–5,0	5x10 Вт/е для $\lambda$ от 3,0 до 5,0 мкм	1,5x10 <sup>9</sup> для $\lambda$ от 3,0 до 5,0 мкм	Для ТВП 1 класса по ОТП-2
Матричное ФПУ-п	KPT	80	384x288	40 (50 шаг)	$\lambda'' (\lambda_c) = 11,1$ мкм	1,43x10 <sup>6</sup> Вт·см <sup>-2</sup>	7x10 <sup>7</sup>	Для ТВП 0 и 1 класса по ОТП-2
Матричное ФПУ-к	VO <sub>x</sub>	300	64x64	46x46	8–12	2,5x10 <sup>5</sup> Вт·см <sup>-2</sup>	–	–

зофазной эпитаксии (ГФЭ) достигнуты значения показателей фотоэлектрических параметров, близкие к предельно достижимым для идеальных фотоприемников.

Первое поколение отечественных ТФЧП начиналось с разработок (1982 г.) и освоения неунифицированных фотоприемников. Однако, как указывалось выше, в настоящее время развернулись разработки унифицированных изделий, в которых заложен модульный принцип конструктивно-функционального исполнения.

В отечественном варианте относящийся к ТФЧП модуль фотоприемника и четыре других вида функциональных модулей (модуль предварительного усиления сигналов, модуль электронной обработки сигналов, модуль охлаждения фотоприемника и модуль развертывающего устройства) образуют Систему общих унифицированных узлов межвидового применения – функциональных модулей тепловизионных приборов первого поколения.

Аналогично нормативным документам на первое поколение, разработаны и утверждены Общие технические требования (ОТТ-2) на 2-е поколение этого вида изделий. Обобщенные данные о создании модельного ряда отечественных модулей ТФЧП приведены в табл.4.

Обоснование выбора приоритетных направлений развития ТФЧП должно строиться на результатах анализа общих, охватываю-

щих несколько поколений, тенденций их развития. Такими тенденциями развития для ТФЧП являются:

- увеличение общего количества ЧЭ (переход от линеек к матрицам ЧЭ и увеличение их формата) и их поверхностной плотности, что требует освоения субмикронных проектных норм для кремниевой технологии (создание ФППЗ для телевидения высокой четкости);
- интеграция либо в одной (фокальной) плоскости, либо в вертикальной структуре мультиспектральных матриц ЧЭ;
- разделение спектральных каналов на субканалы с целью дифференциации энергетических свойств объектов-мишеней для их распознавания робототехническими средствами на основе классификационных информативных признаков;
- повышение степени однородности электрофизических параметров по полю ЧЭ;
- повышение эффективности (в т.ч. квантовой) преобразования излучения в электрический сигнал;
- снижение уровня избыточных шумов: шумов ЧЭ (вида 1/f), шумов устройств считывания – мультиплексоров и усилителей;
- усложнение физических структур ЧЭ, обусловленное переходом от использования объемного (слиточного) материала к эпитаксиальным гомоструктурам и гетероструктурам, в т.ч. обладаю-

### ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

BIB – Blocked Impurity Band – (структура) с блокированной примесной зоной  
 BLIP – Background Limited Infrared Photodetector – ИК-фотоприемник, работающий в режиме ограничения, вызванного излучением фона, шумы которого обусловлены флуктуациями теплового излучения фона при заданной температуре (обычно 300K)  
 $C_B$  – концентрация легирующей примеси (B – бор)  
 CSD – Charge Sweep Device – прибор со свипированием заряда – один из типов приборов с переносом заряда  
 $D^*$  – удельная обнаруживающая способность, см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup>  
 e – число электронов или заряд, пропорциональный числу электронов  
 $F_k$  – частота кадров  
 FLIR – Forward-Looking Infrared – ИК-система переднего обзора  
 FPA – Focal Plane Arrays – матрицы фокальной плоскости  
 HDTV – High Definition Television – телевидение высокой четкости  
 HIP – Heterojunction Internal Photoemission (receiver) – приемник с внутренней фотоэмиссией и (SiGe/Si) гетеробарьером  
 $\lambda_{\text{max}}$  ( $\lambda_p$ ) – длина волны, соответствующая максимуму характеристики спектральной чувствительности  
 $\lambda''$  ( $\lambda_c$ ) – наибольшая длина волны монохроматического излучения, при которой чувствительность равна 0,1 ее максимального значения  
 OFF – Optical Fill Factor – коэффициент оптического заполнения площади пиксела  
 QWS – Quantum Well Structures – квантово-размерные структуры (KPC)  
 SIMOX – Separation by Implanted Oxygen – диэлектрическая изоляция за счет окисления имплантированным кислородом  
 SL – Super Lattice – сверхрешетка  
 SOI – Silicon-On-Insulator – кремний на изоляторе  
 SPRITE – Signal Processing In The Element – обработка сигнала внутри самого элемента (например, внутри матричного приемника изображения, понимаемого здесь как фоторезисторный приемник с внутренним накоплением сигнала)  
 TDI – Time Delay and Integration – временная задержка и накопление (B3H)  
 $\sigma/\mu$  – отношение СКВ-значения параметра к его среднему значению  
 БЗП – бестигельная зонная плавка  
 БМП – боевая машина пехоты  
 БШ – барьер Шотки  
 ВВТ – вооружение и военная техника

ВВФ – внешние воздействующие факторы  
 ВЗН – временная задержка и накопление  
 ВТЗ – военно-технические задачи  
 ВТСП – высокотемпературная сверхпроводимость  
 ВФЭ – внутренняя фотоэмиссия  
 ГФЭ – газозфазная эпитаксия  
 ЖФЭ – жидкофазная эпитаксия  
 ИК – инфракрасный  
 ИС – информационная система  
 КЛА – космические летательные аппараты  
 КРС – квантово-размерные структуры  
 КРТ – кадмий-ртуть-теллур  
 КЦП – комплексная целевая программа  
 МБ – микроболометр  
 МБР – межконтинентальные баллистические ракеты  
 МЛЭ – молекулярно-лучевая эпитаксия  
 МОС – металлоорганические соединения  
 МПЛ – мультиплексор  
 МРП – металл-резистор-полупроводник  
 НД – нормативный документ  
 НТСП – низкотемпературная сверхпроводимость  
 ОВ – отравляющие вещества  
 ОТТ – общие технические требования  
 ОЭС – оптоэлектронные средства  
 ОЭСВ – оптоэлектронные средства вооружения  
 ПЗС – прибор с зарядовой связью  
 ПНВ – приборы ночного видения  
 ПОИ – приборы отображения информации  
 ТВП – тепловизионные приборы  
 ТПУ – тепловое приемное устройство  
 ТФЧП – твердотельный фоточувствительный прибор  
 ТЧД – температурно-чувствительные диоды  
 ТЭО – термоэлектрическое охлаждение  
 УФ – ультрафиолетовый  
 ФД – фотодиод  
 ФППЗ – фоточувствительные приборы с переносом заряда  
 ФПУ – фотоприемное устройство  
 ФР – фоторезистор  
 ФЧП – фоточувствительный прибор  
 ФЭПП – фотоэлектрический полупроводниковый приемник излучения  
 ЧЭ – чувствительный элемент  
 ЭОП – электронно-оптический преобразователь



щим варизонными свойствами и квантово-размерными эффектами;

- повышение уровня монолитности конструкции ФПУ (переход от гибридных к монолитным конструкциям ФПУ, интеграция матричных ЧЭ с твердотельными мини-устройствами охлаждения, выполняющими функции локально-распределенных криогенных охладителей);
- освоение квазиобъемной технологии для создания монолитных конструкций ФПУ;
- освоение микролинзовой технологии с целью обеспечения стопроцентного коэффициента оптического заполнения площади пиксела (OFF);
- снижение притока тепла (в т.ч. радиационного) в холодную зону ФПУ;
- обеспечение более эффективного теплоотвода от тепловыделяющих элементов кристалла ЧЭ и кристалла мультиплексора на основе использования моноизотопных кремния и германия ( $^{28}\text{Si}$  и  $^{70}\text{Ge}$ ), обладающих высокими коэффициентами теплопроводности [10, 11];
- освоение технологии микротеплообменников планарной конструкции, обладающих высокой степенью стойкости к воздействию механических факторов;
- расширение функциональных возможностей электроники ФПУ (повышение степени ее функциональной сложности, создание ФПУ с цифровым выходом);
- интеграция ФПУ с другими функциональными элементами и узлами ТВП вплоть до создания в перспективе однокристалльного ТВП с локально распределенными твердотельными многокаскадными криоохладителями;
- развитие и освоение методов "конструирования материала" с заданным комплексом свойств (в том числе на разные области спектральной чувствительности) исключительно на основе Si-Ge-технологии (самой отработанной и совершенной), которая позволила бы прийти к единообразию существующих технологий;
- повышение степени унификации технологии и конструкции ТФЧП на основе разработки базовых технологий и базовых конструкций модулей для соответствующих поколений изделий;
- разработка и освоение технологии радиационно стойких изделий.

Перечисленные выше тенденции развития характерны для ТФЧП всех спектральных диапазонов моноспектральных ТФЧП. Однако следует отметить, что ТФЧП видимого диапазона по степени своего развития и совершенства опережают изделия всех других спектральных диапазонов. Последнее место в ряду ранжирования по степени развития занимают ТФЧП УФ-диапазона, диапазона 8–14 мкм и мультиспектральные.

В настоящее время (см. табл.2 и 3) ведущие зарубежные фирмы США, Западной Европы и Японии освоили суперпрецизионные технологии производства матричных монолитных и гибридных фотоприемных устройств с числом чувствительных элементов (форматом) от 128x128 до 1024x1024 (4096x4096 – для видимой области) практически для всех поддиапазонов спектральной чувствительности (0,4–20 мкм), используя жидкофазную и газофазную гомо- и гетероэпитаксию двойных и тройных полупроводниковых соединений и твердых растворов на их основе, а также субмикронную кремниевую технологию.

По степени интеграции электроника существующих ТФЧП формата 1024x1024 ( $3,2 \cdot 10^6$  транзисторов) не уступает типичным Intel Pentium микропроцессорам и использует субмикронную технологию. Кроме того, в большинстве случаев электроника ТФЧП при

указанной степени интеграции выполняет функции малошумящих аналоговых ИС, что позволяет отнести ее к области экстремума возможностей современной кремниевой технологии.

Для преодоления отставания отечественной технологии от зарубежного уровня разработаны, утверждены и приняты к исполнению ряд комплексных целевых программ (КЦП). Их основу составляют комплексы НИОКР по созданию второго (матричного) поколения ТФЧП в модульном исполнении. Их выполнение ведущими отечественными компаниями и НИИ должно к 2010 году обеспечить сокращение отставания отечественного технологического базиса фотоэлектроники до безопасного уровня. При этом будут созданы технологические возможности разработки промышленного производства отечественных лицензионно-независимых высокочувствительных ТФЧП, обладающих возможностями "технического зрения" во всех диапазонах спектральной чувствительности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. C.C.Hodge et al. NIPi superlattices in InSb: an alternative route to 10 mm detector fabrication. – Semicond. Sci. Technol, 1990, 5, p.319–322.
2. Chanho Lee, K.L.Wang. Intersubband absorption in Si d-doped molecular beam epitaxy Si quantum well structures. – J. Vac. Sci. Technol, B 10(2), Mar/Apr 1992.
3. Masafumi Kimata et al. Silicon infrared focal plane arrays. – Proc. SPIE Vol. 4288, 2001, p.286–297.
4. Hideo Wada et al. 512x512 Element GeSi/Si heterojunction Infrared FPA. – Proc. SPIE Vol. 3698, 1999, p.584–595.
5. Amber A Raytheon Company. Focal Plane Array Specifications. Product Implementation of Amber's FPA Technology. – Radiance 1 (12/94).
6. Ch.Marshall et al. Uncooled Infrared Sensor With Digital Focal Plane Array. – Proc. SPIE Vol. 2746, 1996, p.23–31.
7. L.J.Kozlowski et al. High-performance 5-mm 640x480 HgCdTe-on-sapphire focal plane arrays. – Optical Engineering, Jan. 1994, Vol. 33, No.1, p.54–63.
8. ID TL061-xx 288x4 LW IRCMOS integrated detector DEWAR cooler assembly (IDDCA) with microcooler type K508 technical specification/SOFTRADIR ID TL061-XX/06.12.99/NTC. Issue 4.
9. Sensor Unlimited, Inc. Room Temperature 0,9–1,7 Camera. (11/95) 3490 US Route 1 Princeton, NJ.
10. T.Ruf et al. Thermal Conductivity of Isotopically Enriched Silicon. – Solid State Communications, vol. 115, No.5, 2000, p.243.
11. V.I.Ozhogin et al. Isotope Effect in Thermal Conductivity of Germanium Single Crystals. – JETP Letters, vol. 63, No.6, p.9431.