

Твердотельная фотоэлектроника: сегодня и завтра

Тришеников М. А., Таубкин И. И., Филачев А. М.

Часть третья

Рассматривается современное состояние разработок квантовых и тепловых ИК-фотоприёмников на диапазон 2-14 мкм. Кратко перечислены одно- и малоканальные фоторезисторы, фотодиоды и фотоприёмные устройства на основе PbS , $PbSe$, $InSb$, четверных соединений, выпускаемых для экологического мониторинга, ИК-анализаторов, радиометров, головок самонаведения. Основные достижения в диапазоне 2-14 мкм связаны с разработкой и выпуском фокальных ИК-матриц. Приведены сведения о таких матрицах как смотрящего, так и сканирующего типа на основе $GdHgTe$, $InSb$, квантоворазмерных структур, примесных полупроводников и болометрических материалов. Достигнут впечатляющий уровень параметров матриц (формат до 1024×1024 , 2048×2048 , эквивалентная шуму разность температур 5-50 К, размер пиксела 12-50 мкм). Такие матрицы позволяют решать сложные задачи тепловидения и теплопеленгации.

4. Фотоприёмники для ближнего, среднего и дальнего ИК-диапазонов

Эти приёмники отличаются от рассмотренных в предыдущих разделах [1,2] не только спектральным диапазоном, но и тем, что они, как правило, охлаждаются для уменьшения темпа тепловой генерации в узкозонных полупроводниках и, как правило, предназначены для приёма собственного (и отражённого) теплового излучения тел.

Одно- и малоэлементные ИК-фотоприёмники. Номенклатура одно- и малоэлементных ФП рассматриваемого ИК-диапазона относительно скудна. Прежде всего, с уважением отметим одно- и малоэлементные фоторезисторы (ФР) из PbS и $PbSe$. С уважением, потому что одному из трёх химических элементов в этих материалах – селену мы обязаны открытием в XIX веке внутреннего фотоэффекта. А PbS -ФР изготавливались для регистрации теплового излучения ещё до Второй мировой войны, так что явились предтечей современных ИК-ФП [3].

В течение многих лет и сегодня одно- и малоэлементные PbS и $PbSe$ -ФП изготавливались и изготавливаются в больших количествах. PbS -ФР чувствительны в спектральном диапазоне до 3-3,5 мкм. $PbSe$ -ФР чувствительны в том же спектральном диапазоне, что и антимонид индия – до 5 мкм, но имеют несколько худшие параметры, чем $InSb$ -ФП. Однако рабочая температура $PbSe$ -ФР (как и PbS -ФР) заметно “теплее”, чем для большинства охлаждаемых ФП, она, как правило, равна 190 К. Но и при 233 К (при минус 40°C) обнаружительная способность остаётся приемлемой. Сохраняется работоспособность даже при комнатной температуре, но, конечно, при этом не приходится предъявлять претензий к обнаружительной способности.

Если PbS и $PbSe$ можно отнести к началу становления современной фотоэлектроники, то ФД на основе гетероструктур четверных соединений $GaInAsSb/GaAlAsSb$, $InGaAsP/InAs$, $GaSb/GaAlAsSb$ стоят на другом конце исторического отрезка фотоэлектроники – они разрабатывались и совершенствовались в 1990-2000-х годах и изготавливаются по современной эпитаксиальной технологии [4,5]. Эти ФД являются альтернативой PbS - и $PbSe$ -ФР. Вариацией состава обеспечивается чувствительность в тех же диапазонах 2-3 мкм и 3-5 мкм. И PbS -ФР, и $PbSe$ -ФР, и ФД на указанных четверных соединениях

могут работать при комнатной температуре. Однако ФД на четверных соединениях значительно превосходят своих коллег по быстродействию и обнаружительной способности (но уступают по этому параметру глубоко охлаждаемым ФП). Применяются рассмотренные ФД и ФР в лабораторных исследованиях, в экологическом мониторинге, в инфракрасных анализаторах содержания природных и промышленных газов, нефтепродуктов, токсических и органических соединений в воде и других средах – ведь наиболее сильные полосы поглощения этих газов и веществ лежат как раз в диапазоне 2-5 мкм. Если важна малая стоимость, то применяют *PbS*- и *PbSe*-ФР, а если важен уровень параметров – то ФД на основе указанных четверных соединений. ФД на четверных соединениях работают также в паре (в оптронной паре) со своими собратьями – излучателями на тех же четверных соединениях.

Двух- и трёхэлементные ФП и ФПУ (точнее, двух- и трёхцветные) изготавливаются для указанных в первом разделе тепловых головок самонаведения [3,6]. Популярны сочетания *InSb*-ФД и *PbS*-ФР, *InSb*-ФД и *Si*-ФД.

Самой же актуальной и почётной задачей является разработка многоэлементных ИК-ФПУ (ИК-матриц) для систем теплового видения различного назначения.

ИК-матрицы. В настоящее время практически все ИК-матрицы для рассматриваемых ИК диапазонов спектра – ближнего, среднего и дальнего являются гибридными. Ниже особо отметим состояние разработок ИК-матриц двух других типов – кремниевых с Шоттки-барьерами и на основе примесного *Si*.

Гибридные матрицы, как правило, поставляются в составе инфракрасных фотоприёмных модулей – формирователей сигналов инфракрасного изображения. Модули включают также вакуумный теплоизолирующий корпус, холодильную машину, драйверную электронику (генераторы смещений и тактовых импульсов и устройства, обеспечивающие внешнее управление модулей и контроль режимов холодильной машины). В модуль также входит электроника, осуществляющая предварительную обработку сигнала изображения. Схемы для предварительной обработки сигналов изображения обычно обеспечивают усиление фотосигналов и двухточечную коррекцию (автоматическое выравнивание чувствительности пикселей и вычитание фоновой составляющей фотосигналов), замену сигналов неработающих каналов взвешенными сигналами их соседей, оцифровку сигналов. А иногда осуществляется выделение фрагмента и специальное представление изображения – его псевдораскраска, реверсирование и другие обработки. Для сканирующих матриц можно осуществлять ВЗН-операции во внешних схемах обработки: выполнить временную задержку и сложить фотосигналы пикселей, столбцов. Драйверные функции и часть операций по предварительной обработке сигналов изображения могут выполняться непосредственно в чипе микросхемы.

Ресурс работы формирователей сигналов изображения лимитируется прежде всего криогенной системой: при современных линейных микроохладителях Стирлинга на температурный диапазон ~ 80 К можно обеспечить ресурс работы вплоть до 20 тысяч часов.

Ежегодный мировой выпуск инфракрасных фотоприёмных модулей, являющихся ключевым элементом военных систем изображения, уверенно приближается к цифре сто тысяч. При этом три четверти выпускаемых модулей представляют собой наиболее совершенные оптически сканируемые или смотрящие матричные формирователи сигналов инфракрасного изображения, использующие электронное сканирование по одному или обоим направлениям соответственно.

Известно, что при температуре объектов, близкой к нормальной температуре

300 К, оптимальным спектральным диапазоном тепловизионных ИК-матриц является диапазон 8-14 мкм. Расчёт показывает, что в этом диапазоне обеспечивается наилучшая температурная чувствительность (обнаруживается минимальная разность температур). Это и понятно, ведь на диапазон 8-14 мкм приходится максимум собственного теплового излучения тел при 300 К. Кроме того, в этом диапазоне расположено окно пропускания атмосферы, минимально рассеяние излучения в тумане, пыли и при искусственных помехах, слабее сказываются помехи от естественных и искусственных высокотемпературных источников излучения.

Сказанное отнюдь не значит, что другие диапазоны для тепловидения не нужны. Поскольку по закону Вина максимум собственного теплового излучения тел при их нагреве смещается влево, то для более нагретых тел оптимальнее диапазон 3-5 мкм (обнаружение ракеты при входе из Космоса в атмосферу, когда её корпус нагревается из-за трения) и диапазон 2-3 мкм (обнаружение запуска ракеты по её факелу).

Кроме того, при переходе от диапазона 8-14 мкм в более коротковолновый спектральный диапазон 3-5 мкм можно использовать фоточувствительные площадки с меньшими размерами, что приводит или к повышению дальности опознавания целей (лучшее разрешение при сохранении диаметра объектива), или к уменьшению габаритов всего оптикоэлектронного устройства (при сохранении его углового поля зрения и углового разрешения). Несмотря на помехи от подсвеченных солнцем облаков, тепловизионные изображения воздушных целей в спектральном диапазоне 3-5 мкм обеспечивают большие отношения сигнала к шуму и помехам. А в странах с жарким и влажным климатом тепловизионные изображения в спектральном диапазоне 3-5 мкм характеризуются большим контрастом.

Матрицы на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$. Монокристаллический кадмий-ртуть-теллур $Cd_xHg_{1-x}Te$ является и в течение ещё ряда лет останется безусловным лидером среди других полупроводниковых материалов, используемых для инфракрасных гибридных матриц. Варьируя содержание кадмия и ртути, из этого материала изготавливают матрицы для ближнего 1-3 мкм ($x \approx 0,6-0,7$), среднего 3-5 мкм ($x \approx 0,3$) и дальнего 8-12 мкм ($x \approx 0,2$) инфракрасных диапазонов.

В настоящее время происходит массовая замена инфракрасных сканирующих систем изображения на базе фоторезисторов из $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x \approx 0,2$ и числом элементов в линейке $N = 60-180$ [3,7]. Такие линейки разработаны в конце прошлого века и обеспечили в своё время улучшение пороговой чувствительности в \sqrt{N} раз по сравнению с более ранним поколением одноэлементных ФП 1960-1970-х годов. Замена указанных систем проводится на системы второго поколения с многорядными линейками (сканирующими матрицами, которые работают в режиме ВЗН) или с двумерными смотрящими матрицами. Достоинствами сканирующих матриц, работающих в режиме ВЗН, являются возможность получения изображения с большим числом строк при относительно небольшом количестве пикселей в матрице (особенно при чересстрочном сканировании) и, следовательно, умеренная цена. Эти матрицы также отличаются от обычных (однорядных) фотоприёмных линеек улучшенной однородностью и повышенной чувствительностью.

Сканирующие и смотрящие формирователи сигналов инфракрасного изображения на основе кадмий-ртуть-теллура производят фирмы *Raytheon Vision Systems, DRS Technologies, Teledyne Imaging Sensors|Rockwell Science Center, BAE Systems, L-3 Communications, Fermionics* в США, *Sofradir* во Франции, *AIM* в Германии, *SCD* в Израиле, *NEC* и *Fujitsu* в Японии, а также англо-итальянская фирма *SELEX Sensors and Airborne Systems*. Мы уже привыкли к

введению специфических параметров, как это было для ПРОМ, для ФПУ в счётном режиме. ИК-матрицы применяют в тепловизорах, а для этой аппаратуры важно регистрировать минимальный градиент температур. Поэтому для сравнения пороговых свойств инфракрасных матриц обычно используется не обнаружительная способность фоточувствительных площадок в матрице, а эквивалентная шуму разность температур (температурная обнаружительная способность или температурная чувствительность) [4]. Этот параметр характеризует матрицу в целом в составе некоторого эталонного тепловизора с определённым объективом. Обычно пропускание такого объектива принимается равным единице, а его светосила – отношение диаметра к фокусу, равной 1:1 или 1:0,7, или 1:0,5 (соответственно обозначают F/1, F/1,5, F/2). Типовые форматы и эквивалентная шуму разность температур для сканирующих и смотрящих матриц из $CdHgTe$, чувствительных в спектральных диапазонах 1-3, 3-5 и 8-12 мкм, приведены в таблице.

Фоточувствительными элементами в этих матрицах являются фотодиоды. Их получают методами жидкостной, молекулярно-лучевой или металлоорганической газофазной эпитаксии на монокристаллических подложках из $CdZnTe$ или на альтернативных подложках (например, многослойных подложках на основе Si , $GaAs$ или сапфира) [8,9]. Одна из типовых структур ИК-планарного гетерофотодиода, облучаемого со стороны прозрачной для ИК-излучения подложки [6], получена одним из описанных методов эпитаксии и состоит из двух n -областей. На поверхность более толстой n -области (назовем её базой) нанесена вторая тонкая n -область. Причём ширина запрещённой зоны базы (её состав $x = 0,2$) меньше, чем во второй тонкой n -области. Дырочная область создаётся ионной имплантацией или диффузией мышьяка через всю тонкую широкозонную n -область, так что мышьяк проникает в n -область базы. При этом p - n -переход расположен в узкозонной базе вблизи гетерограницы двух n -областей. А выход ОПЗ на поверхность кристалла расположен в более широкозонной n -области. В других случаях между $CdZnTe$ -подложкой и базой выращивают тонкую легированную n^+ -область $Cd_xHg_{1-x}Te$ также с $x > 0,2$. Эта область служит для уменьшения сопротивления общего контакта ФД. Кроме того, фотодырки отталкиваются n^+n -переходом, что уменьшает рекомбинационные потери на границе с $CdZnTe$ -подложкой и поэтому увеличивает чувствительность.

Фоточувствительные структуры пассивируются плёнкой из широкозонного $CdTe$. Затем полученная структура с помощью индиевых столбиков (методом перевёрнутого кристалла, иначе методом флип-чип) стыкуется с предварительно отобранными по параметрам кремниевыми многоходовыми микросхемами. В ряде случаев $CdZnTe$ -подложка стравливается. Это также увеличивает чувствительность. Кроме того, это увеличивает устойчивость к многократным ударам. В результате получаем много раз названный гибридный прибор. Каждый пиксел микросхемы содержит входное устройство, ёмкость накопления, повторитель, согласующий эту ёмкость с большой ёмкостью шин, ключи. В сканирующих матрицах и фоточувствительные элементы, и мультиплексор могут быть размещены на промежуточной изолирующей подложке с контактной разводкой.

Одно из основных преимуществ гибридной структуры – возможность независимой оптимизации матрицы фоточувствительных элементов и матричной кремниевой микросхемы. А в смотрящей гибридной матрице два этажа позволяют также использовать всю площадь пиксела и для приёма излучения (“этаж” $CdHgTe$), и для внутриспиксельной электроники (“этаж” Si).

Естественно, ИК-матрица должна располагаться в фокальной плоскости объектива

тепловизора. Это дало ей ещё одно имя – фокальная матрица (Focal plane array). Поскольку фоточувствительные элементы должны охлаждаться обычно до азотных температур (на диапазоны 3-5 и 8-14 мкм), а примесные даже до гелиевых, то микросхеме волей-неволей приходится тоже работать при столь низких температурах. Это одно из неприятных требований, специфичных именно для микросхем охлаждаемых фокальных ИК-матриц, ведь типичное значение предельных рабочих температур “обычных” микросхем всего лишь порядка минус 60°C.

Таблица

Типовые параметры фокальных матриц для ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов

Спектральный диапазон, мкм	Тип матриц	Материал	Форматы матриц	Шаг, мкм	Время интегрирования, мс	Параметр обнаружения
1	2	3	4	5	6	7
0,25÷0,29	Смотрящая солнечно-слепая	ФД AlGaIn/GaN	256x256	34	40	D* 3·10 ¹³
0,3÷0,4	Смотрящая видимо-слепая [17-19]	ФД AlN/AlGaIn/GaN	128x128, 320x256	38	40	1÷6·10 ¹³
0,4÷1,1	ПЗС строчно-кадровый перенос кадровый перенос [32, 33]	ПЗС-Si	768x576	4,5	≤33-40	H 0,2÷1·10 ⁻³
		ПЗС-Si	8500x8500	3		0,2÷1·10 ⁻³
1÷1,7 (2,6)	Смотрящая [22,24]	ФД CdHgTe	2048x2048 1280(1024)x1024 1000x256, 320x256	18÷40		I _T 0,03÷0,3
	Смотрящая [20, 21]	ФД InGaAs/InP	1280(1024)x1024 640x512(480) 320x240,128x128	12÷40	10÷25	D* 10 ¹² ÷10 ¹³
3÷5	Смотрящая [23,25,26]	ФД InSb	2Kx2K 1024x1024(768) 640x512(480) 320(256)x256(240) 128x128	20÷50	0,2÷2,0	NEDT 5÷30 (80K, F/2)
	Смотрящая [22-24, 27-29]	ФД CdHgTe	2048x2048 1280(1024)x1024(720) 640x512(480) 384x288, 256x256 128x128	20÷50	0,2÷2,0	NEDT 7÷50 (80K, F/2)
	Сканирующая [25,30]	ФД CdHgTe ФД InSb	786x6 512x16			NEDT 20÷40 (80K, F/2)
	Смотрящая, квантовые ямы [29,31]		2Kx2K 1024x1024 640x512 320x256			NEDT 18 (95K, F/2,5)
	Смотрящая, сверхрешётки [29]	InAs/GaSb	384x288 320(256)x256	40	5	NEDT 12 (80K, F/2)
8÷14	Смотрящая [22-24, 27-29]	ФД CdHgTe	1280x720 640x480 320(256)x256(240) 128x128	25÷50	0,02÷0,2	10÷20 (80K, F/2)
	Сканирующая [23-25, 27,29]	ФД CdHgTe	576x7, 768x8, 480x6, 288x4	20÷50	0,005÷ 0,05	NEDT 20÷50 (80K, F/2)
	Смотрящая, квантовые ямы [12]		1024x1024 640x512(480) 320x256(240)	25÷40	10÷20	NEDT 15÷35 (70K, F/2)
	Смотрящая, сверхрешётки [9,10]	InAs/GaSb	320(256)x256	40	0,23	NEDT 33 (80K, F/2)
	Смотрящая, микроболюметр [14,15]		2Kx2K, 1024x1024 640x512(480) 384(320)x288(240) 160x120	15÷50	4÷25	NEDT 30÷50 (f=30Гц)

Примечания: 1. D* [Вт⁻¹Гц^{1/2}см] – удельная обнаружительная способность;

2. H=E·t[лк·с] – экспозиция (произведение освещённости E на поверхности матрицы и времени экспозиции t);

3. I_T[электрон/с] – темновой термогенерационный ток;

4. NEDT [mK] – эквивалентная шуму разность температур.

Для ИК-матриц в скобках указана рабочая температура, параметр оптики F/2, частота кадров f.

В настоящее время микросхемы для гибридных фокальных ИК-матриц практически всеми фирмами изготавливаются по КМОП-технологии с технологическим разрешением 0,35-0,8 мкм. Как отмечалось во второй части обзора [2], КМОП-технология сегодня является стандартной для микроэлектронных фирм, тогда как ПЗС-технология требует от фирмы специального освоения. Микросхемы на основе КМОП-структур обладают лучшими высокочастотными свойствами, чем микросхемы на основе ПЗС, обеспечивают возможность произвольного доступа, большую гибкость при проектировании и лучший процент выхода при изготовлении.

Для ввода зарядов от фоточувствительных элементов в микросхему используются индивидуальные (в каждом пикселе) малолучащие входы. Обычно входной каскад работает в режиме прямой инжекции с последующим преобразованием собранного за время накопления заряда в сигнальное напряжение. Однако используются и буферизованная прямая инжекция, и режим модуляции напряжения затвора, и некоторые другие режимы.

Наиболее распространённым режимом работы смотрящих матриц является *snapshot*-режим. Термин *snapshot* (буквальный перевод “моментальный снимок”) отражает преимущества этого режима: накопление фотосигналов во всех пикселях начинается и заканчивается одновременно. Матрица подобно фотоаппарату последовательно “делает снимки”, формирует видеосигналы отдельных кадров. *Snapshot*-режим обычно обеспечивается специальной схмотехникой пиксела: кроме ёмкости накопления вводится ещё одна дополнительная ёмкость – ёмкость хранения. Эта идеология аналогична идеологии рассмотренной выше кремниевой ПЗС-матрицы со строчно-кадровым переносом, в которой пиксел разделён на две части (секции). Половина пиксела отведена фоточувствительной накопительной ПЗС-ячейке, а вторая, затенённая половина, – это ПЗС-ячейка, которая выполняет функцию ёмкости хранения. Благодаря наличию двух ёмкостей в пикселе ИК-матрицы дополнительного времени на опрос не требуется: передача фотозарядов на выход (с ёмкостей хранения) производится, когда накапливаются фотозаряды уже последующего кадра (на ёмкостях накопления).

Альтернативный *rolling*-режим применяется для ИК-матриц с одной пиксельной ёмкостью – накопительной. Это заставляет опрашивать строку сразу после завершения накопления в ней. На опрос уходит время опроса $t_{опр}$. Поэтому следующую строку ИК-матрицы можно опросить лишь через время $t_{опр}$. Так что “снимок” в этом режиме оказывается искажённым: он распадается на строчки – “снимки”, сделанные с указанной задержкой по времени $t_{опр}$ (отсюда и термин “rolling”-вращение). Очевидно, что *snapshot*-режим (но не *rolling*-режим) позволяет наблюдать быстродвижущиеся объекты, сканировать пространство в обзорных системах.

Время накопления в смотрящих матрицах ограничивается фоновым током (при большом угле поля зрения на фон) и накопительными ёмкостями в каждом пикселе. В настоящее время максимальный заряд, накапливаемый в пикселе, приближается к $10^8 \dots 10^9$ электронам. Дальнейшее существенное улучшение эквивалентной шуму разности температур смотрящих матриц из *CdHgTe* может быть достигнуто только после увеличения ёмкостей накопления и/или частоты кадров до величины, близкой к обратному времени накопления. До тех пор тепловизоры на основе сканирующих матриц из *CdHgTe* с ВЗН по эквивалентной шуму разности температур останутся конкурентоспособными с тепловизорами на основе смотрящих матриц (в спектральном диапазоне 8-12 мкм).

Наибольшее распространение получили матрицы из *CdHgTe* для спектрального диапазона 8-12 мкм. Как отмечалось, на приземных фонах они обеспечивают наилучшую

температурную чувствительность и помехозащищённость. Эти матрицы применяются, например, в указанных выше головках самонаведения для ракет «воздух-земля», противотанковых ракетах типа «выстрелил-забыл», пилотажно-навигационных системах вертолётов, авиационных и корабельных инфракрасных системах поиска и слежения, системах предупреждения о ракетном нападении и в ряде других систем.

Как отмечалось, матрицы из $Cd_xHg_{1-x}Te$ изготавливают и на диапазон 3-5 мкм. Их рабочая температура может быть повышена до 120 К. Такие температуры можно получить с помощью четырёхкаскадного термоэлектрического охладителя. Эквивалентная шуму разность температур для матриц на 3-5 мкм составляет 30-60 мК.

Матрицы на основе InSb. За последние 10-15 лет значительно усовершенствовалась технология охлаждаемых смотрящих гибридных матриц на основе монокристаллического антимонида индия, чувствительных в спектральном диапазоне 3-5 мкм. Получены крупноформатные фотодиодные матрицы с пороговой чувствительностью, приближающейся к фундаментальному пределу, обусловленному шумами фонового излучения. Матрицы характеризуются малым числом неработающих пикселей (менее 0,5-1% при формате 640×480) и малой неоднородностью сигналов от отдельных пикселей до коррекции (менее 2-5%). Достигнута частота кадров 400 Гц. При этом обеспечивается весьма высокий технологический процент выхода годных матриц (более 50%).

Формирователи сигналов инфракрасного изображения на основе антимонида индия производят фирмы *Raytheon Vision Systems*, *FLIR(Indigo)*, *L-3 Communications(Cincinnati)*, *Lockheed Martin(SBFp)* в США, *SCD* в Израиле, *QinetiQ* в Англии. В нашей стране *InSb* матрицы разработаны на фирме «Орион», в ИП РАН.

По конструктивному исполнению, по схемотехнике формирователи сигналов инфракрасного изображения на основе монокристаллического антимонида индия мало отличаются от аналогичных формирователей на основе $CdHgTe$. Форматы и эквивалентная шуму разность температур для них также приведены в таблице. Значительная часть фокальных матриц может быть использована в режиме *snapshot*, а также при высоких скоростях сканирования фрагмента кадра. Так, матрицы фирмы *Northrop Grumman* (США) форматом 640×512 при выделении окна 128×8 могут работать на чрезвычайно высоких кадровых частотах – вплоть до 9 кГц (сравните: телевизионная частота составляет всего 25 кадров в секунду). Английская фирма *QinetiQ* продемонстрировала матрицу из *InSb* форматом 1024×768 с эквивалентной шуму разностью температур 12-15 мК, полученную с использованием молекулярно-лучевой эпитаксии и работоспособную при весьма высоких рабочих температурах до 110 К.

Изготавливаются и многорядные линейки из фотодиодов на основе *InSb*-ФД, работающие в режиме ВЗН. Так, недавно американская фирма *Lockheed Martin (SBFp)* сообщила о создании такой сканирующей матрицы формата 6144×24, а это уже сопоставимо с кремниевыми ВЗН-ПЗС.

Фокальные матрицы на спектральный диапазон 3-5 мкм из *InSb* сохраняют лидирующее положение в авиационных системах навигации и точного наведения, в зенитных тепловых головках самонаведения. Используются они также в морских тепlopеленгаторах и на беспилотных летательных аппаратах.

Матрицы на основе квантоворазмерных структур [9-13]. Интенсивно ведутся разработки и производство фокальных матриц для длинноволнового и средневолнового инфракрасных диапазонов на основе различных квантоворазмерных структур, выращиваемых методами молекулярно-лучевой или металлоорганической газофазной эпитаксии. Такие матрицы рассматриваются как альтернатива фокальным матрицам из

CdHgTe и *InSb*. Фоточувствительные элементы в квантоворазмерных матрицах изготавливаются из полупроводниковых структур с множественными квантовыми ямами, квантовыми точками или из короткопериодных сверхрешёток. Общие преимущества таких фоточувствительных структур: возможность использования промышленно освоенных исходных материалов, в том числе монокристаллических подложек большого диаметра; возможность воспроизводимо получать заданный спектр чувствительности, включая длинноволновый и сверхдлинноволновый диапазоны (такая настройка спектра обеспечивается вариацией размеров структуры); возможность изготавливать матрицы большого формата с однородными по параметрам пикселями; потенциальная возможность обеспечить повышение рабочих температур, однородности и процента технологического выхода.

Наиболее отработанной является технология матричных фотоприёмников на основе множественных квантовых ям [12]. Фототок в них регистрируется при приложении к такой структуре внешнего электрического поля и обусловлен индуцированными из квантовых ям фотоносителями. Периодическую структуру с множественными квантовыми ямами можно вырастить на подложке из полуизолирующего *GaAs* методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Структура состоит, например, из 20-50 или более слоёв *n-GaAs* с толщиной 40-50 ангстрем. Эти слои легированы *Si* и являются квантовыми ямами. Они разделены барьерами – нелегированными слоями $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ толщиной порядка 400 ангстрем. Набор из квантовых ям и барьеров располагается между сильнолегированными контактными слоями *GaAs*. Кроме пары *GaAs/AlGaAs* используются также сочетания *GaAs/InGaAs*, *InGaAs/GaAs/AlGaAs*, *GaAs/GaInP* и другие.

Многослойная фоточувствительная структура разделяется на меза-пикселы. К сожалению, в квантовых ямах из *n-GaAs* инфракрасное излучение поглощается только в том случае, когда вектор его электрического поля перпендикулярен плоскости ям. Поэтому приходится на верхней поверхности меза-структур создавать ещё и различные решётчатые структуры. При нормальном падении излучения на такую решётчатую поверхность отражённое от неё излучение отклоняется от нормали, оно уже поглощается, структура таким образом очувствляется. После нанесения решётки на верхние поверхности меза-пикселов на этой же поверхности формируются индиевые столбики, затем осуществляется стыковка с *Si* микросхемой. Принимаемое излучение падает на просветлённую подложку, проходит через неё и через всю квантоворазмерную структуру, отражается от решётчатой поверхности, опять проходит через структуру (но уже отклонившись от нормали) и только тогда поглощается.

Формирователи сигналов инфракрасного изображения на основе множественных квантовых ям производят фирмы *BAE Systems*, *QmagiQ*, *Jet Propulsion Lab.*, *L-3 Communications*, *QWIP Technologies* в США, *Thales* во Франции, *AIM* в Германии, *EIOP* в Израиле, италийская фирма *SELEX*. Типовые параметры фокальных матриц на основе множественных квантовых ям, чувствительных в спектральном диапазоне 8-10 мкм, также приведены в таблице. Матрицы получаются весьма однородными (неоднородность пикселов в матрице с форматом 640x512 до коррекции менее 1-3%), при этом число работоспособных пикселов превышает 99%. Технологический выход при изготовлении матриц часто превышает 50%. Выбором состава, числа и параметров слоёв удаётся менять в широких пределах и область спектральной чувствительности (примерно от 6 до 20 мкм), и – при использовании в единой структуре разных квантовых ям – ширину спектрального диапазона (от 10 до 50% от длины волны в максимуме). Дополнительными преимуществами фокальных матриц на основе квантовых ям являются их радиационная

стойкость и малые низкочастотные шумы. Существенный недостаток таких матриц – низкая квантовая эффективность 3-15% (теоретически предельная квантовая эффективность одной ямы весьма мала из-за малого поглощения излучения в ней и не превышает 1%). Однако поскольку эквивалентная шуму чувствительность реальных длинноволновых фокальных матриц ограничена накопительными ёмкостями существующих микросхем, то низкая квантовая эффективность может быть скомпенсирована увеличением времени накопления (сказанное справедливо и для других типов фокальных матриц с малым квантовым выходом). В результате при невысоких кадровых частотах эквивалентная шуму разность температур для фокальных матриц на основе *CdHgTe* и на основе множественных квантовых ям оказывается почти одинаковой. Более серьёзным недостатком фокальных матриц на множественных квантовых ямах является указанная выше нечувствительность структур типа *n-GaAs/AlGaAs* к нормально падающему излучению. Это, как мы видели, усложняет технологию: необходимо вводить решётку. Серьёзным недостатком является и низкая рабочая температура, ниже азотной – 60-70 К. Необходимо отметить, что в последнее время опубликованы работы о создании структур на основе множественных квантовых ям, где пиксели выполнены в виде светоловушек. За счёт этого удаётся повысить квантовый выход без оптических согласователей. В этом случае можно работать уже при температурах ≥ 77 К. Отмеченные достоинства – большие форматы, малые низкочастотные шумы и радиационная стойкость обуславливают перспективность использования охлаждаемых фокальных матриц на основе множественных квантовых ям в космической аппаратуре.

Квантоворазмерные фоточувствительные структуры на основе квантовых точек [13] технологически отличаются от структур на основе квантовых ям только тем, что каждая квантовая яма заменена плоскостью, заполненной квантовыми точками (ансамблем квантовых точек). В другом варианте такой ансамбль (плоскость с квантовыми точками) размещают внутри квантовых ям. Как и в случае фоточувствительных элементов на основе квантовых ям, поглощение инфракрасных фотонов в квантовых точках вызывает внутризонные (межподзонные) переходы носителей тока из ограниченных состояний в континуум зоны проводимости или валентной зоны. Таким образом, фоточувствительные элементы на основе квантовых точек сохраняют достоинства фотоприёмников с квантовыми ямами. Однако фотоприёмники на основе квантовых точек свободны от основных неприятностей, присущих фотоприёмникам с квантовыми ямами. Из-за трёхмерного ограничения волновых функций носителей тока излучение поглощается и при нормальном падении на плоскости, заполненные квантовыми точками. При этом спектры поглощения квантовых точек с атомоподобной энергетической структурой практически не зависят от температуры. Можно надеяться и на малые темновые токи у фотоприёмников на основе квантовых точек, ведь энергия активации термоионного тока не зависит от положения уровня Ферми. Наконец, у фотоприёмников с квантовыми точками отсутствует запрещённая зона между ограниченными и неограниченными состояниями, а это приводит к существенному уменьшению времени релаксации возбуждённых носителей тока. Так что от ФП на основе квантовых точек с указанной запрещённой зоной после отработки технологии мы вправе ожидать большего: и их чувствительность, и их рабочая температура должны стать выше, чем в первых разработках.

Для получения плоского ансамбля квантовых точек обычно используется метод их самоорганизации Странского-Крастанова [13]. Например, на подложки из полуизолирующего арсенида галлия с ориентацией (001) наносят эпитаксиальный

сильнолегированный кремнием нижний контактный слой n^+ -GaAs, а затем порядка двухсот монослоёв собственного GaAs. После этого выращивается тонкая плёнка из полупроводникового материала с несколько большей постоянной кристаллической решётки (например, из InAs). Когда толщина плёнки InAs превысит критическую величину (в данном случае это примерно два мономолекулярных слоя), сжимающие напряжения в плёнке приводят к формированию из неё множества однотипных маленьких островков с диаметром 10-40 нм и плотностью в несколько единиц на 10^{10} см⁻². Формирование плоского ансамбля квантовых точек завершается выращиванием слоя собственного GaAs. Он состоит примерно из двухсот монослоёв и является верхним (капсулирующим) слоем для квантовых точек. А при создании многослойных структур этот слой является также и разделительным слоем между плоскими ансамблями квантовых точек. В некоторых случаях капсулирующий слой (примерно 30 монослоёв GaAs) наносится при меньшей температуре, чем разделительный (порядка 170 монослоёв GaAs). С целью уменьшения темновых токов разделительный слой может быть дополнен блокирующим слоем, например, из широкозонного $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$. Замена в фоторезисторах верхнего (капсулирующего) слоя из GaAs на слой $In_{0,15}Ga_{0,85}As$ такой же толщины приводит к уменьшению энергии активации в квантовых точках, обусловленному изменениями и механических напряжений в эпитаксиальной структуре, и самой зонной структуры, интерфейса между квантовыми точками и верхним (капсулирующим) слоем. При создании многослойных структур процесс выращивания ансамбля квантовых точек многократно повторяется. Наконец, выращивается сильнолегированный кремнием слой n^+ -GaAs толщиной в десятые доли микрона. Он является верхним контактным слоем фоторезистора. Последующие операции по изготовлению фотоприёмников и фокальных матриц на основе квантовых точек примерно такие же, как и в случае фотоприёмников с множественными квантовыми ямами.

Реализованы также фоторезисторы, в которых квантовые точки из InAs сформированы в квантовых ямах из $In_{0,15}Ga_{0,85}As$ между барьерами из GaAs. При этом обеспечивается дополнительное ограничение волновых функций электронов.

Разработки фоторезисторов с квантовыми точками проводятся многими группами исследователей. Уже изготовлены структуры с квантовыми точками не только из InAs/GaAs, но и на основе гетеропереходов InGaAs/GaAs, InGaAs/GaP, (InGaAl)As/InP, InGaAs/Si, Ge/Si, InSb/GaSb и других, чувствительных в спектральном диапазоне от 3 до 18 мкм. Однако ожидания повышения квантовой эффективности и малых токов, ограниченных термоионной эмиссией, еще так и остаются ожиданиями. Наилучшая обнаружительная способность в максимуме чувствительности 8-10 мкм при 77 К составляет $(3-10)10^9$ Вт⁻¹ смГц^{1/2}. Фоторезисторы, в которых квантовые точки размещены в квантовых ямах, по квантовой эффективности уже приближаются к фоторезисторам с множественными квантовыми ямами, а коэффициент фоторезистивного усиления у них значительно больше, до 20-25.

Описаны и длинноволновые фокальные матрицы с форматом 640x480, в которых квантовые точки из InAs сформированы в квантовых ямах из InGaAs между барьерами из GaAs. Эквивалентная шуму разность температур у таких матриц в максимуме их спектральной чувствительности ($\lambda_m \approx 8,1$ мкм) при рабочей температуре 60 К уже составила 40 мК.

Хотя предсказываемые теорией преимущества фотоприёмников на основе квантовых точек реализованы пока не в полной мере, интенсивное усовершенствование этих фотоприёмников позволяет надеяться на успехи этого направления.

Наиболее интересные и практически важные результаты при использовании квантово-размерных структур для изготовления инфракрасных фокальных матриц получены с короткопериодными сверхрешётками из полупроводников, образующих гетеропереходы II типа с разорванной (или смещённой) запрещённой зоной [10,11]. Как известно, в таких гетеропереходах неравновесные электроны и дырки собираются в разных слоях, а спектральный диапазон чувствительности сверхрешёток изменяется с изменением толщины слоёв. Для изготовления фокальных матриц подобного типа, чувствительных в спектральном диапазоне 8-11 мкм, использовались, например, нелегированные сверхрешётки, образованные периодами из 12 монослоёв *InAs* и 7 монослоёв *GaSb* с общей толщиной 6,5 мкм. Причём интерфейсы между *InAs* и *GaSb* слоями, состоящие из *InSb*, обеспечивали частичную компенсацию растягивающих напряжений в слоях *GaSb*, а они возникают при контакте со слоями *InAs*. Такая сверхрешётка использовалась в качестве поглощающего излучения *i*-слоя и располагалась между двумя другими сверхрешётками с толщинами около 0,5 мкм и краем собственного поглощения ≈ 5 мкм, образованными периодами из 7 монослоёв *InAs* и 11 монослоёв *GaSb*. При этом одна из широкозонных сверхрешёток (та, которая выращена на подложке) легировалась кремнием до концентрации $n^+ \approx 10^{18}$ см⁻³. А другая широкозонная сверхрешётка (та, которая выращена после узкозонной) легировалась бериллием до концентрации $p^+ \approx 10^{18}$ см⁻³. Таким образом, фоточувствительная структура представляла собой двойной *pin*-гетеропереход. Ранее было показано, что такая структура эффективно пассивируется с помощью *SiO₂*, *Na₂S+SiO₂* или полиимидных покрытий.

Для фокальных матриц на спектральный диапазон 3...5 мкм использовались также 200...330-периодные сверхрешётки. Они состоят из 10 монослоёв *GaSb* и из 9,25 монослоёв *InAs* (именно так указывается в статьях: с точностью до 0,25 одноатомного слоя).

Фокальные матрицы на сверхрешётках сохраняют все преимущества матриц на основе множественных квантовых ям, однако не имеют их недостатков:

- коэффициенты поглощения близки к значениям, получаемым в кадмий-ртуть-теллуре, в том числе при нормальном падении излучения;
- использование короткопериодных сверхрешёток приводит к существенному снижению темпа Оже-рекомбинации, в результате квантовая эффективность при сборании фотоносителей из *i*-слоя близка к единице.

В разработке фокальных матриц на основе сверхрешёток *InAs/GaSb* и *InAs/GaInSb* II-типа активно участвуют *Northwestern University*, *Raytheon Vision Systems*, *BAE Systems* (США), *AEГ Infrarot-Module* совместно с *Fraunhofer Institute* (Германия) и ряд других фирм.

Достигнутые параметры фокальных матриц на основе сверхрешёток *InAs/GaSb*, чувствительных в спектральных диапазонах 3...5 мкм и 8...10 мкм, присоединяются к параметрам других матриц в таблице. Их уровень подтверждает перспективность дальнейших работ в этом направлении. Теоретические оценки показывают возможность достижения в них предельных параметров, возможность повышения рабочих температур.

ИК-матрицы на примесных материалах, халькогенидах и селенидах свинца и на основе Шоттки-барьеров. Сверхдлинноволновые фокальные матрицы из кремния и арсенида галлия, легированных мелкими примесями, требуют глубокого охлаждения вплоть до гелиевых температур. Это эксклюзивные матрицы – они имеют ограниченное применение, главным образом, в астрономии, спектроскопии и в космических головках самонаведения некоторых стратегических систем. Так, фоторезисторы с проводимостью по примесной зоне из кремния, легированного мышьяком, чувствительные в области

спектра до 28 мкм, как правило, работают при температурах от 2 до 12 К. Матричные фотоприёмные устройства на основе этого материала с форматами до 1024x1024 изготавливаются фирмами *Raytheon Vision Systems* и *DRS Technologies* (США). Изготавливают также глубоководохлаждаемые матричные фотоприёмники на основе кремниевых структур с блокированной примесной зоной (*DRS Technologies*).

К настоящему времени разработаны и выпускаются фокальные матрицы на основе *PbS* и *PbSe* с форматами 320x240 и 160x160. Их серьезное преимущество – работа при термоэлектрическом охлаждении и при комнатной температуре. Производители – фирмы *Northrop Grumman* и отделение *BAE Systems* в США.

Еще один тип фокальных ИК-матриц, особенно популярных в 1980-х годах, – матрицы на Шоттки-барьерах. Казалось бы, что хорошо отработанная кремниевая технология и замечательная однородность пикселей в Шоттки-барьерных (*PtSi*, *IrSi*) фокальных матрицах гарантирует их продвижение на мировом рынке инфракрасных систем изображения. Однако Шоттки-барьерные матрицы не выдержали конкуренции с матрицами на основе кадмий-ртуть-теллура, антимолибдита индия и неохлаждаемых микроболлометров. В настоящее время производство кремниевых Шоттки-барьерных матриц многими фирмами свёрнуто.

Матрицы на основе тепловых приёмников излучения [14-16]. Важнейшим событием последнего десятилетия стало бурное развитие и массовое внедрение в тепловизионную аппаратуру неохлаждаемых микроболлометрических фокальных матриц для спектрального диапазона 8-14 мкм [14,15]. Они обеспечили качественное снижение габаритов, энергопотребления и стоимости этой аппаратуры. В 2007 году микроболлометрических матриц изготовлено уже больше, чем всех видов охлаждаемых формирователей сигналов инфракрасного изображения, промышленное производство которых ведётся более десятка лет.

В неохлаждаемых инфракрасных матрицах чаще всего используются микроболлометрические пиксели на основе поликристаллических слоёв из окислов ванадия, осаждённых на тонкую диэлектрическую подложку с малой теплоёмкостью (фирмы *DRS Technologies*, *L-3 Communications*, *BAE Systems*, *FLIR/Indigo* в США, *SCD* в Израиле). Однако в *ULIS* (Франция) и в одном из отделений фирмы *L-3* микроболлометры производятся из аморфного кремния. А японская фирма *Mitsubishi Electric Corporation* изготавливает полноформатные инфракрасные фокальные матрицы полностью по кремниевой технологии. В качестве термочувствительных элементов используются последовательно соединённые кремниевые *pn*-переходы.

Собственно микроболлометрическую матрицу, как правило, формируют непосредственно на кремниевых пластинах со сформированной уже в ней микросхемой – драйверной и считывающей интегральной электроникой. Конструктивно микроболлометрические пиксели представляют собой микромостики. Они расположены с шагом 15-50 мкм и опираются на кремниевую пластину с помощью двух тонких диэлектрических опор с минимальной теплопроводностью. На эти опоры нанесены и токопроводящие дорожки к микроболлометрам. Такая мостовая структура с тонкими опорами призвана обеспечить большое тепловое сопротивление между собственно боллометрическим элементом и *Si* кристаллом. Для этого же микроболлометрические матрицы помещаются в вакуумированные микрокорпуса. Тепловая развязка принципиальна: если в пикселе квантовой матрицы накапливается фотозаряд, то в микроболлометрическом элементе накапливается тепловая энергия поглощённого ИК-излучения. Так что тепловая развязка призвана предотвратить утечку тепла с

микроболометра. В конструкцию микроболометрической матрицы часто встраивали и термоэлектрические стабилизаторы температуры. Однако в последнее время ряд фирм вместо термоэлектрических стабилизаторов использует электронные схемы, обеспечивающие коррекцию температурного ухода параметров (*L-3 Communications, DRS Technologies, FLIR*).

Форматы и типовые параметры неохлаждаемых микроболометрических формирователей сигналов изображения приведены все в таблице и завершают её. При сравнительно низких частотах кадра (порядка 30 Гц) по эквивалентной шуму разности температур они почти не уступают охлаждаемым матрицам. Микроболометрические матрицы и камеры на их основе обладают функциональными возможностями, аналогичными охлаждаемым фокальным формирователям сигналов изображения, включая цифровой выход с разрядностью до 14-16 бит и микросхемы для представления изображений. Однако они существенно меньше по размерам и дешевле. Так, фирма *Indigo Systems* (США) на базе микроболометрической матрицы с форматом 160x120 собственного изготовления, работающей без термоэлектрического стабилизатора температуры, разработала микроминиатюрную тепловизионную камеру весом всего 120 г. Она используется для запускаемых с рук беспилотных летательных аппаратов-разведчиков. На основе неохлаждаемых микроболометрических фокальных матриц изготавливаются тепловизионные прицелы, очки для ночного видения, приборы для вождения транспортных средств в условиях плохой видимости и ночью, различные охранные и противопожарные системы, тепловые головки самонаведения и другие системы.

Еще один тип неохлаждаемой ИК-матрицы с тепловыми приёмниками излучения – это неохлаждаемые ферроэлектрические фокальные матрицы из титаната бария-стронция ($Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ или *BST*) [16]. Такие матрицы изготавливает, например, американская фирма *L-3*. Матрицы чувствительны в диапазоне 8-12 мкм, имеют формат 320×240 и эквивалентную шуму разность температур менее 50 мК (измерено с оптикой F/1 при частоте кадров 30 Гц). А англо-итальянская *SELEX* изготавливает ферроэлектрические фокальные матрицы из титаната свинца-скандия с форматом 256x128. Однако из-за необходимости введения термоэлектрического стабилизатора температуры и модулятора излучения (ферроэлектрические элементы реагируют только на изменение температуры), а также в связи с успехами в разработке более совершенных микроболометрических матриц объёмы производства неохлаждаемых ферроэлектрических фокальных матриц сокращаются.

5. Перспективы развития матричного направления фотоэлектроники

Новое поколение матриц завтрашнего дня будет рассмотрено в четвертой завершающей части обзора. Читайте следующий номер журнала “Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы”.

Литература

1. М. А. Трищенко, И. И. Таубкин, А. М. Филачев. Твердотельная фотоэлектроника: Сегодня и завтра. Первая часть - Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2008, с. 65-74.
2. М. А. Трищенко, И. И. Таубкин, А. М. Филачев. Твердотельная фотоэлектроника: Сегодня и завтра. Вторая часть - Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2009, с. 3-19.
3. В. П. Пономаренко, А. М. Филачев. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений (1946-2006) – М.: НТЦ Микротех, 2007, 326 с.
4. А. М. Филачев, И. И. Таубкин, М. А. Трищенко. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2007, 384 с.

-
5. XX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Тезисы докладов – Москва, 2008.
 6. XXI век. Том XI «Опτικο-электронные системы и лазерная техника». – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2005, 719 с.
 7. В. П. Пономаренко. Теллурид кадмия-ртути и новое поколение приборов инфракрасной фотоэлектроники – УФН, 2003, 6, с. 649-665.
 8. L. Mollard Destefanis, J. Barnis et al. HgCdTe FPA's by arsenic-ion implantation. - Proc. SPIE, 2008, 6940, 69400F.
 9. L. Becker. A review of advances in EO/IR FPA Technology for Space System Applications. – Proc. SPIE, 2006, 6294, 6294OR.
 10. J. W. Little et al. Thin active region type – II superlattice photodiode arrays. – J. Applied Physics Letters, 2007, 101(04), 044514.
 11. P. Y. Delauney et al. Substrate removal for high quantum efficiency back side – J. Applied Physics Letters, 2007, 91(23), 231106.
 12. K. K. Choi et al. Optimization of corrugated QWIPs for large format, high quantum efficiency and multi-color FPA. – Infrared Physics and Technology, 2007 50(2-3), p.p. 124-135.
 13. S. D. Guhapali et al. Demonstration of 640x512 pixel LWIR QDIP imaging FPA. – Infrared Physics and Technology, 2007, 50(2-3), p.p. 149-155.
 14. U. Mizraki et al. New features and development directions in SCD's microbolometer technology. – Proc. SPIE, 2008, 6940, 694020.
 15. S. Black. RVS uncooled sensor development for tactical applications. – Proc. SPIE, 2008, 6940, 694022.
 16. C. M. Hanson, H. R. Beratan, D. L. Arbutnor. Uncooled thermal imaging with thin-film ferroelectric detectors. – Proc. SPIE, 2008, 6940, 694025.
 17. Long, S. Varadaraajan, J. Matthews, J. F. Shetzina – Opto-Electronics Review, 2002, 10(4), p.p. 251-260.
 18. R. McClintok, K. Mayers, A. Yasan et al. – Applied Physics Letters, 2005, 86(011117).
 19. M. B. Rein, P. Lamarre, A. Hairston – Compound Semiconductor, 2006, 6, p.p. 27-30.
 20. D. G. Turner et al. The development of and applications for, extended response (from 0,7 to 1,7 mm) InGaAs FPA's. – Proc. SPIE, 2008, 6940, 694037.
 21. J. Martin et al. A 640x512 InGaAs Camera for Rande-Gated and Staring Application. – Proc. SPIE, 2006, 6206, 620609.