

# ФОТОПРИЕМНИКИ ДЛЯ РАБОТЫ В МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

## ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ



Е.Дмитриев

О проблемах и состоянии работ в области создания элементной базы фотоприемных устройств отображения видеoinформации мы уже сообщали\*. Однако тогда речь шла об односпектральных (однооконных) системах. Как оптоэлектронные средства распознавания и обнаружения (ОЭС) они, при выполнении ряда задач, обладают привлекательностью и функциональной пригодностью, однако во многих случаях им не хватает достаточной гибкости и помехозащищенности по сравнению с мультиспектральными (многооконными) системами.

В предлагаемой статье представлен краткий обзор состояния работ по мультиспектральным системам, приведены характеристики базовых двухспектральных систем, перечислены проблемы и указаны перспективные направления исследований в этой области.

Отклики на статью присылайте по адресу: [nslepov@online.ru](mailto:nslepov@online.ru).

### ОБЩАЯ НАПРАВЛЕННОСТЬ РАБОТ

Анализируя состояние в области создания отечественных мультиспектральных систем за последние пять лет, можно отметить, что были получены следующие основные результаты:

- разработан унифицированный ряд многооконных модулей, предназначенных для использования в ОЭС различного назначения;
- созданы макетные образцы модулей матричных двухоконных фотоприемных устройств (ФПУ) на 3–5 и 8–12 мкм на основе структур с квантовыми ямами (КЯ) и матричных микроболометрических приемников излучения.

В этих работах ФПУ разрабатываются обычно как законченные устройства, оптимизированные под отдельные спектральные диапазоны/поддиапазоны. Подобный подход, хотя и не позволяет (в связи с отсутствием в РФ технологических возможностей) создавать микроминиатюрные изделия, однако дает потенциальным заказчикам и потребителям возможность надеяться на появление достаточно эффективных ОЭС различного назначения в ближайшие годы.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОЭС

В наибольшей степени требованиям на разработку многооконных систем удовлетворяют фотоприемники на основе квантово-размер-

ных эффектов (КРЭ), физические структуры которых могут быть получены методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволяющей формировать на подложке монокристаллические п/п слои с необходимыми свойствами вплоть до моноатомной толщины. В качестве технологического обеспечения для указанных работ могут быть использованы, например, результаты разработки гетероэпитаксиальных структур GaAs/AlGaAs и GaAs/CdHgTe методом МЛЭ [1, 2].

Фотоприемники на основе КРЭ, по сравнению с другими аналогичными устройствами, обладают таким уникальным свойством, как возможность варьирования области их спектральной чувствительности путем изменения ширины квантовой ямы (которая определяется толщиной слоя узкозонного полупроводника и выступает в качестве параметра размерности) и ее глубины, зависящей от величины разрыва краев зоны проводимости широкозонного и узкозонного п/п материалов.

Это свойство открывает возможность в рамках единого процесса на основе двух пар п/п материалов с различной шириной запрещенной зоны получать монокристаллические матрицы фоточувствительных элементов (ФЧЭ) по крайней мере с двумя различными окнами (областями спектральной чувствительности). При этом выбор пар материалов не имеет принципиального значения [1].

Однако подобное утверждение верно лишь теоретически, поскольку практика указывает на зависимость выбора пар материалов от степени отработанности технологии и от ее особенностей, влияющих на свойства квантово-размерных структур (КРС). Фотопроводимость в КРС определяется переходами носителей заряда (электронов и дырок, находящихся на дне КЯ) в возбужденное состояние (когда они находятся над верхом ямы, над барьером) с последующим их дрейфом во внешнем электрическом поле. При таком возбуждении поглощается фотон падающего излучения. Коэффициент поглощения в КРС для относительно глубоких квантовых ям может в 100 раз превосходить поглощение, наблюдаемое в примесных полупроводниках. Наличие потенциальных барьеров в КРС препятствует протеканию сквозного темнового тока и позволяет варьировать концентрацию легирующей примеси в широких пределах, достигая значений, соответствующих металлической проводимости.

Недостатком приемников на основе КРС является необходимость соблюдения условий ввода излучения, поляризованного вдоль слоев с расположенными в них КЯ, в чувствительный элемент (ЧЭ). То есть такие приемники не могут работать с нормально падающим излучением, как это происходит в обычных приемниках. Однако этот недостаток преодолевается применением двумерной дифракционной решетки с соответствующим периодом, благодаря которой обеспечивается достаточно эффективный ввод поляризованного излучения в поглощающий слой.

Более подробно фотоприемники на основе КРС и особенности создания матричных однооконных ФЧЭ рассмотрены в работе [1],

\* ЭЛЕКТРОНИКА, 2005, №2, с.74–79.



**Таблица 1. Современный уровень технологии мультиспектральных ФПУ на основе КРЭ**

Параметры	Виды ФПУ								
	DUALBAND Двухспектральный на основе изолированных КЯ		DUALBAND Двухспектральный на основе изолированных КЯ		TWO-COLOR Двухспектральный (двухцветный) на основе связанных пар КЯ		TWO-COLOR Двухспектральный (двухцветный) на основе изолированных КЯ		
Области спектральной чувствительности, мкм	$\lambda_{\text{макс}} = 8,3$	$\lambda_{\text{макс}} = 11,2$	$\lambda_{\text{макс}} = 8,5;$ (8–9)	$\lambda_{\text{макс}} = 14,5;$ (14–15)	$\lambda_1 = 3,8;$ $\lambda_2 = 4,1$	$\lambda_1 = 7,5;$ $\lambda_2 = 8,2$	$\lambda_{\text{макс}} = 4,3;$ $\lambda_{\text{макс}}' = 4,6$	$\lambda_{\text{макс}} = 9,4;$ $\lambda_{\text{макс}}' = 10$	
Технология	МЛЭ КРС								
	ЧЭ	Мембрана из КРС 6–8 мкм	18 периодов (40Å GaAs + 500Å Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As).	30 периодов (60Å GaAs + 500Å Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As).	10 периодов [400Å In <sub>0,52</sub> Al <sub>0,48</sub> As + (34Å In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As + 50Å In <sub>0,52</sub> Al <sub>0,48</sub> As + 34Å In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As) + 400Å In <sub>0,52</sub> Al <sub>0,48</sub> As]	20 периодов [11x(22Å In <sub>0,52</sub> Al <sub>0,48</sub> As + 20Å In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As) + (80Å In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As + 30Å In <sub>0,52</sub> Al <sub>0,48</sub> As + 80Å In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As) + 11x(22Å In <sub>0,52</sub> Al <sub>0,48</sub> As + 20Å In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As)]	20 периодов (24Å In <sub>0,35</sub> Ga <sub>0,65</sub> As + 300Å Al <sub>0,27</sub> Ga <sub>0,73</sub> As)	20 периодов (55Å GaAs + 500Å Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As)	
			Уменьшение толщины GaAs-подложки до 1300Å		2-D дифракционная решетка				
	Удаление GaAs-подложки	2-D дифракционная решетка		2-D дифракционная решетка					
	МПЛ	–		k-МОП		–		–	
Сборки	–		На In-столбиках		На In-столбиках		–		
Формат (число ЧЭ)	256x256		640x486		Тест-структуры 8x8		Тест-структуры 200x200 мкм		
Размер ЧЭ, мкм	40x40-шаг		–		100x100; ряд от 20x20 до 200x200		–		
Квантовая эффективность, %	5–40	6–20	–		6 (U = ±3В)	10 (U = ±3В)	10	13	
Токовая чувствительность, мА/Вт	320	480	500	360	18 (U = ±3В)	13,5 (U = ±3В)	650 ( $\lambda_{\text{макс}} = 4,3$ мкм)	550 ( $\lambda_{\text{макс}} = 9,3$ мкм)	
NEΔT, К (T <sub>АТТ</sub> =300К)	0,015	0,022	0,036 (T=40К)	0,044 (T=40К)	D*( $\lambda_{\text{макс}}$ ) = 8,2x10 <sup>10</sup> D*( $\lambda_{\text{макс}}$ ) = 1,7x10 <sup>10</sup>		D*( $\lambda_{\text{макс}}$ ) = 1,4x10 <sup>11</sup>	D*( $\lambda_{\text{макс}}$ ) = 1,8x10 <sup>10</sup>	
Рабочая температура ЧЭ, К	40–45		40; T*=72		78		T <sub>АТТ</sub> =800К	T*=125	
							T*=70		
Доля дефектных ЧЭ, %	1,0–2,4	1,1–1,8	–		–		–		
Источник информации	[5]		[6]		[7]		[8]		

Примечание: T\* – температура, ниже которой ФПУ работает в режиме ограничения фоном для T<sub>фона</sub>=300К; U<sub>B</sub> – напряжение смещения; NEΔT – эквивалентная шумовая разность температур; T<sub>АТТ</sub> – температура абсолютно черного тела; D\* – удельная обнаружительная способность.

откуда следует, что для получения КРС необходимо обеспечить поддержание толщины слоя с точностью не хуже 0,5 монослоя и мольного состава x твердого раствора Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As – не хуже 1,0–1,5%.

Технология создания гетероструктур ФЧЭ с КРЭ в настоящее время реализована на п/п материалах соединений A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>. Методом МЛЭ, самым низкотемпературным из существующих методов эпитаксии, на основе гетеропары GaAs-AlAs удается получить резкие границы гетеропереходов, локализацию легирующей примеси в заданных активных слоях, почти идеальное согласование параметров решеток и, как следствие, относительно высокое структурное совершенство эпитаксиальных слоев КРС.

Доказательством того, что эффективность технологии КРС стала очевидной, является то, что моноспектральные (однооконные) матричные ФЧЭ на их основе с форматами 320x256 и 640x480 уже выпускаются такими компаниями, как Sander, Lookheed Martin и QWIP Technologies [3, 4]. Данные, дающие представление о современном зарубежном уровне технологии мультиспектральных (многооконных) ФПУ, приведены в табл. 1.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ И ПРИМЕСНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Следует отметить, что мультиспектральные фотоприемники можно получить и на основе фотопоглощения как в собственных, так и в примесных п/п. Среди собственных п/п известны лишь два, которые потенциально пригодны для создания мультиспектральных ИК-приемников, – это Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te и InAs<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub> [9]. На основе Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te созданы как средневолновые, так и длинноволновые фотоприемники. При этом для длинноволновых фотоприемников получены рекордные показатели. Недостатком этого материала является его

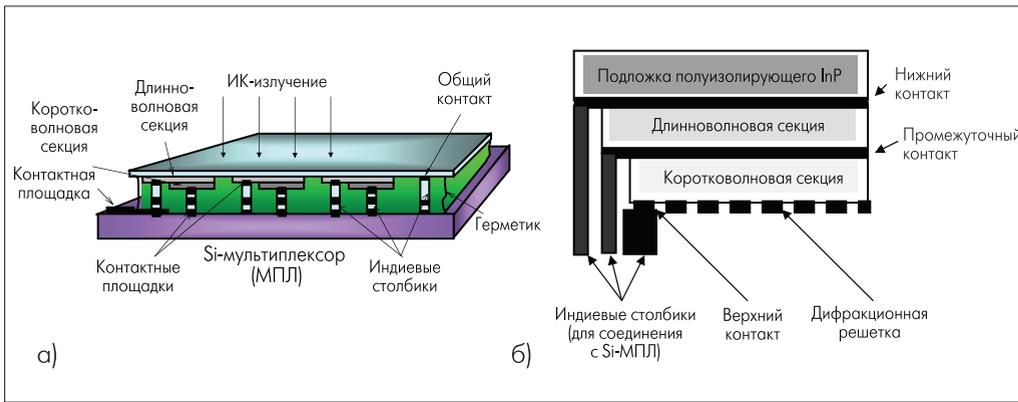
низкая механическая прочность и высокая стоимость, обусловленная технологической сложностью обеспечения высокой точности мольного состава, от которой зависит однородность чувствительности по полю ФЧЭ.

Для примесных п/п характерны два других недостатка. Первый – это более низкая, чем температура жидкого азота (77К), рабочая температура длинноволновых ФЧЭ. Например для Si:Ga она равняется 25К. Второй недостаток – относительно низкий коэффициент поглощения. Для его повышения применяется ионное легирование активной примеси. Однако повышенный уровень легирования влечет за собой появление прыжковой проводимости и, как следствие, возрастание темнового тока ФЧЭ. Подавление такой проводимости в примесных п/п осуществляется с помощью так называемой ВВБ-структуры (Blocked Impurity Band – структура с заблокированной примесной зоной), реализуемой средствами МЛЭ-технологии. В результате оказывается, что примесные п/п также мало подходят для создания мультиспектральных приемников.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХРЕШЕТОК

Другим вариантом создания мультиспектральных структур могло бы быть использование эффектов фотопроводимости в сверхрешетках (СР) [10]. Однако СР также присущ ряд недостатков. Прежде всего – это сложность получения высокоэффективных длинноволновых ФЧЭ. Например, для СР на InAs-GaSb эта сложность состоит в том, что достижение высокого коэффициента поглощения для длинноволновой области спектральной чувствительности (так как он уменьшается с ростом длины волны  $\lambda_c$ ) невозможно.

Существенным недостатком СР на InAs-In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Sb является сильная зависимость  $\lambda_c$  от толщины слоя. Так, для структур с  $\lambda_c = 11$  мкм она составляет 2/3 мкм/Å. Поэтому неточное воспро-



**Рис. 1. Схематическое представление гибридации двухспектрального ФЧЭ на КЯ с Si-МПЛ методом "перевернутого кристалла" с применением индиевых столбиков: а) фрагмент матрицы ЧЭ; б) двухспектральный ЧЭ**

изведение толщины слоя может привести к неприемлемому сдвигу  $\lambda_c$ . Все эти факторы, видимо, не позволили СР выйти на уровень их практического применения в ИК-приемниках.

**ГИБРИДНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ФПУ**

Создание монолитного двухспектрального ФПУ принципиально возможно, но существующий уровень технологии позволяет реализовать лишь гибридную конструкцию. Поэтому перед современной технологией сборки этого вида изделий стоит задача приспособить отдельные компоненты ФПУ (кристаллы ФЧЭ и Si-мультиплексора) к гибридации. При этом нужно учитывать, что число соединений между двумя кристаллами для случая двухспектральных ФЧЭ возрастает вдвое по сравнению с моноспектральным ФПУ.

В настоящее время используются два варианта гибридации двухспектральных ФПУ. Они схематично представлены на рис. 1 и 2. На рис.3 и 4 показаны физические структуры гибридируемых двухспектральных ФЧЭ. Следует отметить, что каждый из указанных вариантов в настоящее время применяется в технологии сборки моноспектральных ФПУ. Однако наибольшее распространение получил метод "перевернутого кристалла" – flip-chip (метод "индиевых столбиков").

Для метода "перевернутого кристалла" переход от моноспектрального к двухспектральному ФПУ создает дополнительные трудности, связанные с необходимостью обеспечить контакт двух кристаллов с помощью индиевых столбиков разной высоты.

Менее распространен метод "сквозного контакта" (см. рис.2). Он уступает методу "перевернутого кристалла", представленному на рис.1, по коэффициенту использования полезной площади ЧЭ (fill-factor). В варианте гибридации с помощью "сквозного контакта", показанном на рис.2, используется кристалл двухспектрального ЧЭ, полученный двусторонней эпитаксией (МЛЭ или жидкофазной эпитаксией – ЖФЭ) фоточувствительных слоев CdHgTe на подложке CdZnTe.

В варианте "перевернутого кристалла" фоточувствительные слои двухспектрального ЧЭ представляют собой структуры с КЯ, полученные на основе соединений  $A_3B_5$  методом МЛЭ. Отметим, что первое двухспектральное ФПУ было создано компанией Lockheed Martin в 1998 году. Использованный в нем метод пе-

ревернутого кристалла обеспечил высокий процент годности ЧЭ (98% от их общего числа в матрице формата 320x240). Коротковолновые ЧЭ этого ФПУ имели  $\lambda_{\text{макс}} = 4,8$  мкм, а длинноволновые –  $\lambda_{\text{макс}} = 8,7$  мкм. Шаг размещения ЧЭ составлял 40 мкм. Интересно, что в обоих вышеприведенных вариантах гибридации фоточувствительные слои ЧЭ расположены в разных, но параллельных плоскостях, образуя этажерочную, или стековую, конструкцию.

Монолитная конструкция двухспектрального ФПУ с ФЧЭ, расположенными в одной плоскости, может быть создана методами локальной эпитаксии на основе Si-Ge-технологии в ближайшее десятилетие.

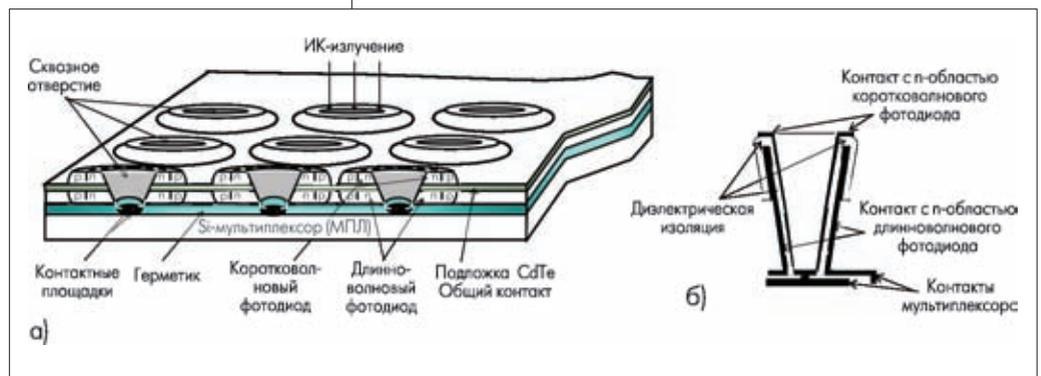
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ П/П МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГЕРМАНИЯ И КРЕМНИЯ**

В последние несколько лет наметились перспективы использования п/п материалов на основе германия и кремния, содержащих кластеры *квантовых точек* (КТ) Ge нанометровых размеров, встроенные в матрицу Si (в РФ исследования в этом направлении выполнялись в рамках НИР "Исследование путей создания семейства монолитных инфракрасных фотодетекторов для работы в спектральном диапазоне 8–12 мкм на основе гетероструктур SiGe<B>Si").

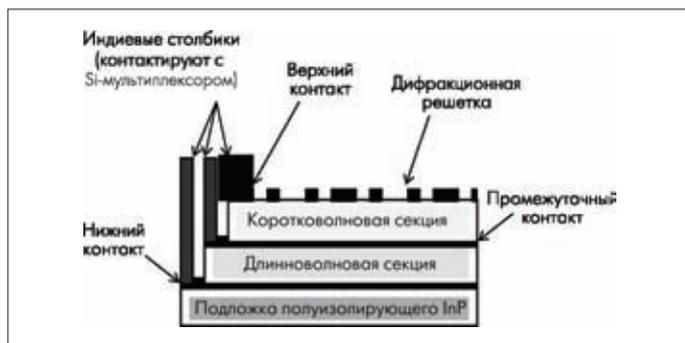
Интерес к нанокластерам Ge и Si связан с совместимостью разработанных методов с существующей кремниевой технологией изготовления ИС и успехами в разработке технологии получения достаточно однородного по размеру массива нанокластеров Ge. Причем размеры нанокластеров удалось уменьшить до величины, обеспечивающей проявление КРЭ и электрон-электронного взаимодействия при температурах вплоть до комнатных. Такие разработки, считавшиеся до последнего времени уникальными, могут привести к настоящей революции в кремниевой интегральной технологии.

**СТРУКТУРЫ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ**

С 1992 года начинают происходить изменения в технологии получения структур с *квантовыми точками* (КТ). Ранее основным способом создания таких структур была фотолитография с присущим этому методу ограничением в получении минимальных размеров.



**Рис. 2. Схематическое представление гибридации двухспектрального ИК-фотоприемника на матрице CdHgTe-фотодиодов с Si-мультиплексором методом "сквозной контакта": а) общий вид гибридной конструкции; б) конструкция сквозного контакта**



**Рис.3. Физическая структура ФЧЭ двухспектрального приемника на КЯ (технология МЛЭ InAlAs-InGaAs для ФЧЭ; технология сборки с Si-МПЛ – гибридация методом "перевернутый кристалл" с применением индивидуальных столбиков)**

Проявление эффекта упорядочения в массивах островков нанометровых размеров в гетеросистемах Ge-Si и InAs-GaAs позволило получать бездефектные КТ предельно малых размеров (10–100 нм) с плотностью  $10^{10}$ – $10^{11}$  см<sup>-2</sup>. В результате атомноподобные характеристики в электронных и оптических спектрах этих объектов стали проявляться более четко. Интерес к исследованию оптических свойств КТ обусловлен практической направленностью и рядом преимуществ таких объектов по сравнению с КЯ.

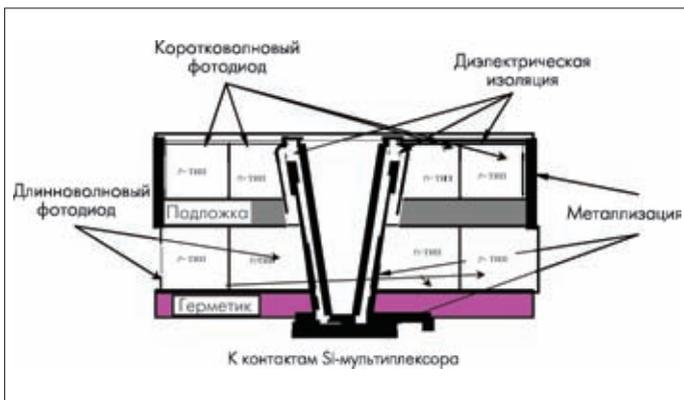
КТ имеют следующие особенности:

- возможность управления спектральной полосой фотоотклика путем предварительного заселения дискретных состояний с требуемой энергией переходов;

- наличие бокового (латерального) квантования в нульмерных системах снимает запрет на оптические переходы, поляризованные в плоскости фотоприемника, а значит, предоставляет возможность осуществлять поглощение света при нормальном падении фотонов;
- ожидаемое значительное увеличение времени жизни фотовозбужденных носителей вследствие так называемого эффекта "узкого фононного горла" (phonon bottleneck effect).

Возможность реализации фотоприемника с КТ, перестраиваемого под ближний и средний ИК-диапазоны, была показана в работе [11]. Предложенный авторами фотоприемник представлял собой кремниевый *pin*-диод, в базу которого был введен двумерный массив нанокластеров Ge. Средний боковой размер КТ составлял 15 нм, высота – 1,5 нм. В структурах с КТ наблюдались два максимума на длинах волн 1,7 мкм и 2,9 мкм. Интенсивность обоих максимумов сильно зависела от величины обратного смещения, причем эти зависимости коррелировали между собой, т.е. при увеличении смещения до 1,4 В происходило исчезновение отклика в среднем ИК-диапазоне при  $\lambda = 2,9$  мкм, а появлялся сигнал в ближнем ИК-диапазоне при  $\lambda = 1,7$  мкм.

В качестве предложений по обоснованию выбора оптимального варианта создания мультиспектральных ФЧЭ, предназначенных для интегрированных систем видения, можно указать, что многолетний зарубежный опыт исследований и разработок ФЧЭ на основе КРС позволил подойти к оптимальному варианту их создания, предполагающему использование не изолированных КЯ, а их связанных пар.



**Рис.4. Физическая структура двухспектрального приемника на CdHgTe-фотодиодах (технология ФЧЭ – двусторонняя эпитаксия Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te; технология сборки с Si-МПЛ – гибридикация по методу сквозного контакта)**

В КРС со связанными парами квантовых ям обеспечивается более высокий коэффициент поглощения, что позволяет делать эту структуру более тонкой и более совершенной с точки зрения образования дефектов, обусловленных несоответствием параметров решеток. Малая толщина слоев со связанными парами КЯ создает возможность расположить их ближе к дифракционной решетке, повысив эффективность ввода падающего излучения.

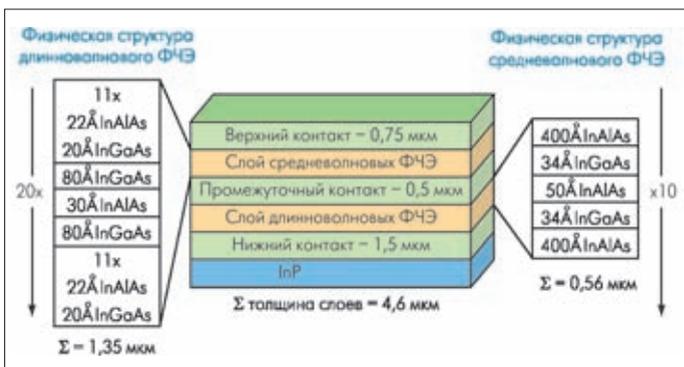
Общая толщина слоев структуры составляет 4,6 мкм (без учета толщины InP-подложки, которая затем стравливается). На рис.5 приведена физическая структура двухспектрального ФЧЭ с указанием общей толщины функциональных слоев.

Отдельным элементом, выполняющим функцию ввода излучения в поглощающие слои, является двумерная дифракционная решетка. В случае двухспектрального ФЧЭ она должна обеспечивать эффективный ввод излучения для каждого из спектральных ИК-поддиапазонов.

Сборка (гибридикация) двухспектрального ФЧЭ с кремниевым мультиплексором (МПЛ) осуществляется методом "перевернутого кристалла" с помощью индиевых столбиков разной высоты так, чтобы произошло соединение с каждым из ЧЭ, находящихся в разных слоях вертикальной структуры ФПУ.

**МОНОЛИТНЫЕ ФПУ ПЛАНАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Появление следующего поколения мультиспектральных ФПУ с КЯ будет связано с созданием монокристаллических ФПУ планарной конструкции на основе кремний-германиевой технологии. Уверенность в возможности создания таких приборов усиливается с каждым новым этапом исследований отечественных и зарубежных специалистов, проводимых в области нанотехнологий. Можно ожидать, что через 10–15 лет будут реализованы высокоэффективные монокристаллические мультиспектральные ФПУ с КТ.



**Рис.5. Физическая структура двухспектрального ФЧЭ на основе КРЭ**

**Таблица 2. Оценка реализуемости мультиспектральных систем видения**

Направления создания и развития мультиспектральных ФПУ	Период реализации
Гибридные ФПУ с ЧЭ и КЯ вертикальной (стековой) структуры активных слоев на основе МЛЭ-технологии п/п соединений A <sub>3</sub> B <sub>5</sub> и кремниевый мультиплексор (МПЛ) с проектными нормами литографии ~0,8 мкм	1–2–5 лет
Монокристаллические ФПУ с ЧЭ и КЯ планарной конструкции на основе SiGe/Si МЛЭ-технологии, интегрированные с кремниевым МПЛ и устройствами предварительной обработки сигнала изображения	5–10–15 лет
Монокристаллические ФПУ с ЧЭ и КТ планарной конструкции на основе SiGe/Si МЛЭ-технологии, интегрированные с кремниевым МПЛ, устройствами предварительной обработки сигнала изображения и распределенными многокаскадными твердотельными охладителями	10–15–20 лет
Однокристалльные мультиспектральные каналы (мультиспектральные ФПУ с ЧЭ и КТ на основе нанотехнологий и технологии микроэлектромеханических приборов – МЕМ-технологии, интегрированные с кремниевым МПЛ, устройствами электронной обработки сигнала изображения и распределенными многокаскадными твердотельными охладителями	15–20 лет

Примечание. За начало отсчета принят 2003 год.

Проблемы создания и развития мультиспектральных систем должны рассматриваться в рамках программно-целевого планирования, предусматривающего разработку долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных программ. Представляется целесообразным провести оценку реализуемости в будущем различных направлений создания мультиспектральных систем видения, увязанную с соответствующими временными периодами. Результаты такой оценки приведены в табл.2.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона / В.Н. Овсянко и др. – Новосибирск: Наука, 2001, с.243.
2. Сидоров Ю.Г. и др. Физико-химические и технические основы молярно-лучевой эпитаксии соединений CdHgTe. – В кн.: Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. – Новосибирск: Наука, 2001, с.149–176.
3. Liu H.C. et al. Proc. SPIE, 1997, v.3061, p.1156.
4. Bethea C.G. et al. – IEEE Trans. Electron. Device, 1993, v.40, p.1651.
5. M.Sundaram, S.C.Wang. 2-Color QWIP FPAs. – Proc. of SPIE, vol.4028, Infrared Detectors and Focal Plane Arrays Technology and Applications VI, ed. E.Dereniak, R.Sampson. Apr. 2000.
6. Gunapala S.D. et al. Recent Development and Applications of Quantum Well Infrared Photodetector Focal Plane Arrays. – Proc. of SPIE vol.4028, Infrared Detectors and Focal Plane Arrays Technology and Applications VI, ed. E.Dereniak, R.Sampson. Apr. 2000.
7. Little J.W. et al. A New Two-Color Infrared Photodetector Design Using InGaAs/ InAlAs Coupled Quantum Wells. – IR Materials Branch, U.S. Army Research Laboratory. Adelphi. MD 20783. Aug. 1999.
8. Tidrow M.Z. et al. A two-stack two-color high strain quantum well infrared photodetector. – Proc. of SPIE, v.3061, Infrared Technology and Applications XXIII, ed. B.F.Andersen, M.S.Scholl. Aug. 1997.
9. Osbourn Q.C. Design of III-V quantum well structures for long-wavelength detector application. – Semicond. Sci. Technol. 5 (1990), S5 11.
10. G.Bauer, H.Clemence. Physics and applications of IV-VI compound quantum well and superlattice structures. – Semicond. Sci. Technol. 5 (1990), S.122 130.
11. Yakimov A.I. et al. – Appl. Phys. Lett., 75, 1413 (1999).