

УДК 621.383

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТОК ФОТОПРИЕМНИКОВ И ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ТЕПЛОВИДЕНИЯ В ПЕРИОД 1970—1998 гг.

*Л. Н. Курбатов*

Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Орион»»,  
Москва, Россия

*Рассмотрена деятельность Государственного унитарного предприятия «Научно-производственное объединение «Орион» в области фотоприемников и организации производства полупроводниковых материалов, микроэлектронных компонентов и микрокриогенных машин. Приведен альтернативный путь решения проблемы фотоприемников для тепловидения и использования тепловых болометрических приемников. Рассмотрены некоторые экономические и коммерческие проблемы, возникшие после окончания холодной войны.*

### Введение

Данная статья представляет собой расширенное изложение выступления автора на XI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике, электронным и ионно-плазменным технологиям, проведенной 28—30 октября 1998 г. Предыдущие конференции, проводившиеся с 1962 г. в НИИ-801 и далее в НИИ прикладной физики Министерства оборонной промышленности, включали в тематику только фотоэлектронику и связанные с ней проблемы физики и технологии полупроводников, микроэлектроники, схмотехники и микрокриогеники. XV конференция охватывает всю тематику ГУП «НПО «Орион»». Прежде всего я хочу выразить удовлетворение тем, что после 10-летнего перерыва принято решение о продолжении проведения традиционных конференций с расширенной тематикой, отражающей все области деятельности НПО «Орион».

Первая конференция состоялась в 1962 г., на ней присутствовали корифеи физики полупроводников: Д. Н. Наследов, В. А. Лашкарев, Б. Т. Коломиец, С. Г. Калашников, С. М. Рывкин, а также выдающийся специалист по тепловым фотоприемникам Н. Д. Смирнов.

Вводное слово при открытии конференции произнес С. А. Зверев, вскоре назначенный на должность министра оборонной промышленности. Он отметил государственную важность работ, порученных НИИ-801, обеспечивающих многочисленные разработки оптико-электронных систем вооружения, «глазами» которых являются фотоприемники видимого и инфракрасного диапазонов спектра.

Конференции, проводившиеся с периодом два года, имели большое значение не только в аспекте научно-технической информации, но и для научного и профессионального роста молодых в ту пору сотрудников, принявших на себя ответственные, срочные и необходимые разработки в новой области фотоэлектроники. Надо отметить, что на протяжении десятков лет оптико-электронные системы вооружения и ночного видения были в центре внимания руководителей страны, и работы НИИ-801 и НИИ прикладной физики (НИИПФ) проводились под их жестким контролем при всемерной помощи. Итоги работ за 50 лет были опубликованы в ряде статей автора [1, 2]. Ниже изложены некоторые аспекты разработок с целью дополнить обзорный доклад А. М. Филачева и В. П. Пономаренко на XV конференции, в котором рассмотрены конкретные разработки новых поколений фотоприемников (ФП) и фотоприемных устройств (ФПУ) для тепловидения.

### О спектральных диапазонах и материалах чувствительных элементов ФП

Известно, что для тепловидения (термографии) в условиях поверхности Земли и ее атмосферы оптимальны диапазоны длин волн 3—5 и 8—14 мкм. Для пер-

вого из них уже в середине 60-х гг. в НИИПФ были разработаны многоэлементные ФП на основе антимионда индия, работоспособные при температуре жидкого азота (77К). Несколько позже они были применены в лаборатории П. Ф. Тимофеева в ВЭИ его сотрудником А. И. Горячевым, конструктором первого в стране тепловизора на диапазоне 3—5 мкм. Дальнейшая деятельность А. И. Горячева проходила в НИИПФ, где он создал прототип тепловизора, который мог бы послужить основой опытно-конструкторской разработки в специализированном КБ или НИИПФ. К вопросу, почему это не было сделано, мы возвратимся ниже. Фирмы США не сделали такой ошибки и за последующие 20 лет довели промышленно выпускаемые тепловизоры с ФПУ из антимионда индия до высокой степени совершенства.

Параллельно фирмы Японии вели разработки тепловизора того же спектрального диапазона с использованием линейных и матричных ФПУ с чувствительными элементами на основе силицидов металлов группы платины. Они также требуют охлаждения до температуры жидкого азота. Важным достоинством силицидов является полная совместимость технологии чувствительного элемента с хорошо развитой технологией кремниевых интегральных микросхем.

В нашей стране к разработкам ФПУ на основе силицидов приступили с большим запозданием. Его причина была такой же, как и в случае антимионда индия. О некоторых других материалах будет упомянуто в последующем изложении. Для диапазона 8—14 мкм еще в 70-х гг. в Государственном оптическом институте (ГОИ) имелись ФП, а позже и ФПУ с чувствительными элементами из германия, легированного ртутью, работоспособные при температуре 30 К, т. е. при значительно более глубоком охлаждении, чем получаемое при охлаждении жидким азотом. В конце 80-х и начале 90-х гг. в ГОИ в отделе С. П. Тибилёва, возглавлявшемся с 1989 г. А. Л. Курбатовым, были созданы ФПУ в виде линейки с 192 элементами, имевшей высокую однородность по параметрам и предельно достижимую обнаружительную способность. Такие ФПУ были успешно использованы в тепловизоре "Прогресс", дающем отличное изображение. Фирмы США ряд лет использовали аналогичные тепловизоры в бортовых авиационных системах переднего обзора, хотя в то время в США уже имелись высококачественные тепловизоры (ИК-камеры в американской терминологии) на основе антимионда индия. Рефрижераторы на температуру 30 К значительно сложнее, чем на 77 К, и отечественные конструкторы сочли тепловизоры ГОИ неперспективными для массового применения в танках и противотанковых комплексах вооружения, и достижения ГОИ остались невостребованными. Заметим, что конструкторы микрокриогенных машин в США успешно продолжили работы по их миниатюризации, снижению потребления мощности и увеличению ресурса работоспособности, и современные рефрижераторы на 30 К вполне могли бы удовлетворить конструкторов бортовой тепловизионной аппаратуры. Однако развитие тепловидения пошло другим путем.

Во время войны во Вьетнаме, когда проблема ночного видения стала крайне острой, появился поток информации об успешных разработках в США ФП для диапазона 8—14 мкм на основе полупроводникового соединения, получившего в нашей стране аббревиатуру КРТ (твёрдый раствор теллуридов кадмия и ртути). При составе 22 % по кадмию он оптимален для диапазона 8—14 мкм, а при составе 30 % — для диапазона 3—5 мкм. По причинам, которые будут пояснены ниже, длинноволновый диапазон впоследствии сократили до 8—12 мкм. КРТ был известен по публикации Лоусона с 1956 г. Уже тогда стало очевидным неблагоприятное сочетание его физико-химических свойств. Зато перспектива иметь такой "гибкий" по фотоэлектрическим свойствам материал увлекла многих ис-

следователей. Наиболее продуктивные работы велись во Франции в лаборатории мадам Родо. В НИИПФ также были начаты попытки изготовить образцы КРТ в лаборатории Ф. Ф. Харахорина, но они были прекращены в связи с опасностью отравления парами ртути, а также загруженностью текущими работами, заданными директивными документами. В 1967 г. автору этих строк довелось побывать в лаборатории Родо в Севре, где на оборудовании "самодельного" типа выращивали монокристаллы КРТ и изучали их физические и фотоэлектрические свойства в связи с проблемой изготовления ФП. По словам мадам Родо, исходные материалы сверхвысокой, по понятиям химиков, степени чистоты она приобретала у наиболее известных фирм изготовителей реактивов. В нашей стране таких изготовителей не было. Актуальность КРТ, известная по литературе, заставила начать работы по его освоению в НИИПФ. За них взялась по своей инициативе Л. А. Бовина.

Специалистам было ясно, что на разработки материала уйдут многие годы и не меньший срок для создания технологии фоточувствительных элементов. Эти предварительные программы полностью оправдались Фирмы США, имевшие практически неограниченное финансирование во время войны во Вьетнаме и возможность покупать исходные сверхчистые материалы и оборудование в любой стране мира, достигли полного успеха и справились с явлениями нестабильности свойств чувствительных элементов за 15 лет. Нашей стране для этого понадобилось 20 лет напряженной работы. После этого еще несколько лет ушло на создание технологии современных многолинейных структур и гибридных фотоматриц для тепловизоров без сканирующей системы ("смотрящие" тепловизоры). Информация о них дана в основном докладе А. М. Филачева и В. П. Пономаренко.

Не подлежит сомнению, что технология выращивания монокристаллов и пленок КРТ, равно как и изготовления многоэлементных линейных и матричных фотоприемных структур, заслуживает еще более высокой градации сложности, чем "высокая технология".

Проведение соответствующих работ в НИИПФ и на предприятиях Министерства цветной металлургии (институт "Гиредмет", завод "Чистых металлов" в Светловодске и Опытный химико-металлургический завод в Подольске) было абсолютно необходимо и соответствовало "духу времени". И все же надо признать, что была совершена крупная стратегическая ошибка. Руководители МОП не верили специалистам, называвшим длительные сроки освоения КРТ, и отвергали предложения не дожидаться, пока КРТ "созреет" для промышленности, и поручить оптико-механическим заводам доработать вместе с НИИПФ уже вполне работоспособный тепловизор на основе ФП из антимонида индия на диапазоне 3—5 мкм.

Как указывалось выше, этот прототип был создан А. И. Горячевым, перешедшим на работу в НИИПФ из ВЭИ. В нем, как и в макете, разработанном в ВЭИ, использовались многоэлементные ФП, изготовленные в лаборатории И. И. Таубкина в НИИПФ. Успешные демонстрации тепловизора руководителям МОП дали основания для высокой оценки нашей деятельности, начатой в инициативном порядке. Однако под влиянием военных, начитавшихся в доступной им литературе об успехах американцев в ФП на основе КРТ, наши руководители сочли, что если мы начнем осваивать тепловизоры на диапазоне 3—5 мкм, то не догоним американцев, уже создавших тепловизоры на 8—14 мкм. Если американцы делают ставку на КРТ, то и мы должны поступить как и они. Никакие доводы не смогли изменить точку зрения начальства. Так началась 20-летняя эпопея деятельности по КРТ в условиях постоянных обвинений, что НИИПФ

срывает важнейшие работы. Прикрываясь отсутствием фотоприемников из КРТ, никто не занимался другими сложными проблемами, прямо относящимися к созданию тепловизора, в первую очередь системой охлаждения и устройством механического сканирования. Разговоры на эту тему привели к тому, что НИИПФ сам стал заниматься проблемой рефрижераторов вместе с предприятием "Микрокриогеника" в Омске, которое не подчинялось руководству военно-промышленной комиссии и легко относилось к выпущенным им документам.

Долгий путь освоения КРТ описан в статье, опубликованной только в 1998 г. [2]. В результате напряженной работы вышеназванных предприятий поставленная сверхзадача была решена, и ФПУ для ряда средств вооружения могли бы выпускаться серийно, в их числе и тепловизор для танка.

Но настали другие времена, и начинавшееся строительство капитализма в нашей стране погубило в первую очередь военно-промышленный комплекс. У Министерства обороны основной проблемой стало сокращение численности войск и задач и как кормить оставшихся. Этот период будет позорнейшим в истории нашего государства.

В заключение этого раздела доклада добавлю, что если бы наше предложение о доведении до серийного выпуска тепловизора на диапазоне 3—5 мкм было принято, то еще во время войны в Афганистане наша армия имела бы тепловизоры для танков и вертолетов. Надо заметить, что в американской литературе высказывается мнение, что преимущества диапазона 8—14 мкм существенны в условиях Северной Европы, где часто бывает сильная дымка и туман, а в таких местах как Ближний Восток это преимущество исчезает.

Наряду с тепловизионной аппаратурой "Общий Модуль", принятой на вооружение в НАТО, фирмы США уже много лет серийно выпускают и продают превосходные тепловизоры диапазона 3—5 мкм с ФПУ на основе антимонида индия. Есть много моделей тепловизоров этого же диапазона с ФПУ на основе силицида платины. Эти аппараты хорошо изучены в нашей стране, а их использование на учениях, проводимых военными, показало блестящие результаты.

Вышесказанное подтверждает старую истину, что очень часто "лучшее — враг хорошего". Это, несомненно, знали и наши руководители, но у них, кроме научно-технических соображений, были и чисто конъюнктурные.

Тепловизор в целом представляет собой синтез высоких технологий в ряде областей, кроме фотоэлектроники, и ни в какой из них заводы оптико-механической промышленности МОП не имели нужного задела. Если бы наше предложение было принято, они оказались бы "крайними" во всей цепи предприятий со всеми последствиями, характерными для административно-командной системы руководства. Поэтому возобладал аргумент, что лучше иметь один "плохой" НИИ, не справляющийся со своей задачей, чем несколько заводов, не выпускающих продукцию. В результате наша армия имеет только ту тепловизионную аппаратуру, для которой достаточно ФПУ с десятками чувствительных элементов, но не с несколькими сотнями, что нужно для танковых тепловизоров.

Мне представляется, что дан жесткий урок за пренебрежение к мнению профессионалов, состоявшему в том, что в первую очередь следовало решить все проблемы тепловидения в диапазоне 3—5 мкм и организовать серийный выпуск аппаратуры. Одновременно надо было активно работать с предприятиями Министерства цветной металлургии и доводить материал КРТ с составом 22 % по кадмию до кондиций, позволяющих выпускать ФПУ с сотнями элементов. Есть мнение, что ажиотаж вокруг КРТ был раздут американцами в расчете, что с его технологией наша страна либо совсем не справится, либо отстанет на десятки

лет и отвлечет силы от других опасных для американцев направлений фотоэлектроники.

Первого не случилось, и недооценка способностей нашей страны разрабатывать высокие технологии не оправдалась, но отставание на 5—7 лет создалось ко времени начала известных политических событий и экономических реформ. После них широкомасштабные работы по КРТ стали невозможны, но мелкосерийный выпуск ФПУ продолжался и ведется по настоящее время,

Неизмеримо больших результатов американцы добились в тотальном разрушении нашей экономики и военной мощи, руководя действиями злонамеренных политиков и бездарных экономистов, получивших образование в США. Те же политические события привели к резкому усложнению контактов с Заводом чистых металлов, находящимся на Украине. К середине 80-х гг. он уже выпускал объемные монокристаллы КРТ нужной кондиции. Цена их была значительно выше, чем золота (несколько тысяч “догайдаровских” рублей за 1 грамм). В последние годы, когда общение с зарубежными специалистами стало возможным, оказалось, что “наш” КРТ значительно дешевле и лучше американского по параметрам. Например, время жизни неравновесных носителей заряда в образцах *л*-типа доходило до 6 мкс, что считается пределом, вычисленным теоретически, и рекордом фактически. Таков результат многомиллиардного финансирования со стороны МОП СССР завода, оказавшегося вне России. По имеющимся сведениям ныне этот завод предпочитает контакты с Китаем и другими странами. Были даже разговоры о продаже Китаю технологии, разработанной на средства МОП. Контакты с заводом в Подольске, выпускающим материал для двумерных фотоприемных структур фотодиодного типа и фотоматриц, продолжают нормально. Они представляют собой тонкие пленки КРТ на полупроводниковых подложках. Этот процесс был разработан в институте “Гиредмет” В. М. Лакеенковым. Его творческий контакт с В. И. Стафеевым позволил к середине 90-х гг. создать вполне современные фотоматрицы разных форматов вплоть до 256x256 элементов для тепловизора “смотрящего” типа (т. е. без механического сканирования) на спектральный диапазон 8—12 мкм. Обратим внимание на сокращение спектрального диапазона по сравнению с упоминавшимся выше диапазоном 8—14 мкм. Оно объясняется тем, что в предыдущем изложении имелись в виду фоточувствительные элементы резистивного типа. В фотоматрицах с высокой плотностью заполнения они не применимы в связи с трудностью создания токоведущих дорожек. Эта проблема решается использованием фотодиодных чувствительных элементов, но возникает другая проблема: фотодиоды из материала, чувствительного до длины волны 14 мкм, неизбежно имеют повышенный темновой ток и связанные с ним шумы, что снижает обнаружительную способность. Поэтому при изготовлении фотодиодов приходится использовать материал КРТ с несколько большим содержанием кадмия с границей чувствительности до 12 мкм.

В заключение раздела о материале КРТ следует уделить внимание интересному направлению работ НИИПФ и КБ машиностроения, возглавлявшегося академиком В. И. Барминым.

Выше упоминалось о сложном комплексе физико-химических свойств КРТ. Одно из них определяется резким различием плотности компонентов КРТ—теллуридов кадмия и ртути. При плавлении поликристаллического материала более тяжелый компонент — теллурид кадмия — собирается в нижней части контейнера и слиток оказывается неодинаковым по длине. Состав 22 % по кадмию получается только в узкой части слитка, т. е. выход годного материала резко снижается. Наличие ряда других причин неоднородности слитка усугубля-

ет снижение выхода годного материала. Этим и объясняется высокая цена КРТ, названная выше.

Гравитационная ликвация, так названо явление расслаивания КРТ, может быть устранено кристаллизацией в условиях орбитального полета. Длительные неудачи на заводе в Светловодске привели НИИПФ к идее поставить эксперименты по кристаллизации КРТ во время полетов космических кораблей — спутников Земли.

Инициатором некоторых космических технологий был И. В. Бармин. Взаимодействие с ним началось с экспериментов по кристаллизации германия при баллистическом полете ракеты, давших интересные результаты. Далее было решено провести эксперименты с КРТ, используя печь "Сплав-01", изготовленную под руководством И. В. Бармина. Эксперименты осложнялись тем, что при плавлении КРТ развивается давление пара ртути порядка десятков атмосфер. Поэтому кварцевые ампулы с поликристаллическим КРТ, по предложению В. С. Зиновьева, помещались в капсулы из нержавеющей стали и между капсулой и ампулой помещалась капля ртути. Давление ее пара уравнивало давление в ампуле и тем самым возможность взрыва исключалась. При медленном снижении температуры в утонченном конце ампулы начиналась кристаллизация, и ее фронт продвигался по ампуле. Эксперименты отработывались на Земле и далее проводились тремя экипажами космонавтов. Результаты, близкие к желаемым, были получены космонавтом Г. М. Гречко. Выращенный им монокристалл имел даже огранку. Его физические свойства были исследованы несколькими методами, в частности, рентгеновским микронзондовым анализом. Информация об этой работе была опубликована [3]. Общий вывод состоял в необходимости продолжения экспериментов в большом масштабе, что позволило бы использовать полученный материал для изготовления фотоприемников. Однако несмотря на интерес научной общественности и средств массовой информации, эти дорогостоящие эксперименты были прекращены. К тому же обычная "земная" технология тем временем приблизила монокристаллы КРТ к требуемым свойствам.

### Эпитаксиальные пленки КРТ

Освоение кристаллов КРТ с составом 22 % по кадмию было необходимым, но только первым этапом в решении проблемы КРТ. Создание пленок КРТ диктовалось двумя обстоятельствами. Первое из них вытекало из желания сократить количество дорогостоящего материала. Толщина чувствительного элемента должна была составлять около 10 мкм, в то же время как толщина пластинок, вырезаемых из монокристалла, не могла быть меньше 0,5 мм, так как КРТ хрупок и непрочен. Вторая причина интереса к пленкам КРТ определялась требованиями технологии фотодиодов. Только их можно разместить в тесно расположенных линейных структурах и тем более двумерных фотоматрицах. Высококачественные пленки можно получить на подложках такой же кристаллической структурой, какую имеет растущая на ней пленка (отсюда название "эпитаксиальные" пленки). В случае КРТ согласование кристаллических структур обеспечивается лучше всего подложкой из кристалла теллурида кадмия — цинка, но возможны и другие варианты. Существует несколько технологий эпитаксиального наращивания: жидкофазовая, напоминающая процесс обычного лужения металла, молекулярно-лучевая (МЛЭ), химическая, с использованием металлоорганических соединений (МОЭ) и другие. Названные технологии успешно используются при эпитаксиальном наращивании пленок КРТ. В работах В. И. Стафеева и его отделения НИИ ПФ применялись пленки, полученные жидкофазной эпитаксией В. М. Лакеенковым.

Наибольшее распространение за рубежом получила молекулярно-лучевая эпитаксия. Она дает наибольшие возможности управлять процессом роста пленки благодаря наличию комплекса диагностического оборудования, способного даже следить за последовательной укладкой слоев атомов на подложке и растущем слое и регулировать состав соседних слоев. Это особенно существенно при изготовлении структур, получивших название "квантово-размерные". Их получают нанесением чередующихся слоев двух разных полупроводников, причем каждый слой состоит из десятка моноатомных слоев. К ним мы возвратимся ниже в связи с фотоприемниками нового типа. Для обычных фотоприемников из КРТ, как было сказано, нужны слои толщиной около 10 мкм.

Сверхвысоковакуумные установки для МЛЭ еще в 70-е гг. начали выпускать несколько зарубежных фирм, освоивших технологические процессы и комплекс диагностического оборудования. Аналогичные разработки были начаты и в нашей стране на предприятиях Министерства электронной промышленности, но они не привели к цели. Несколько позже начались разработки в Институте физики полупроводников в Новосибирске. В научном центре СОАН имелась мощная техническая база, созданная при его организации, для выпуска ускорителей элементарных частиц. В СОАН было принято решение использовать ее для создания установок МЛЭ. Работы финансировались МОП и продолжались более 15 лет, пока удалось выпустить первые образцы. Несмотря на крупное финансирование со стороны МОП в прошлом, несколько установок было продано предприятиям МОП по высокой цене. Они годились только для сравнительно простых полупроводников, но не для КРТ. В середине 90-х гг. в СОАН были изготовлены специализированные для КРТ установки и получены эпитаксиальные пленки КРТ, представляющие практический интерес. Они были применены в собственных работах Института физики полупроводников и в его совместной с заводом "Альфа" работе по изготовлению многоэлементного линейного ФПУ с элементами фоторезисторного типа. Ее результаты опубликованы в статье [8]. В дальнейшей работе эпитаксиальные пленки, полученные из СОАН, использовались В. И. Стафеевым при изготовлении фотоматриц с фотодиодными чувствительными элементами.

Читатель вправе спросить, почему богатое МОП не закупило установки МЛЭ за рубежом. Ответ прост: они были включены в перечень стратегически важных объектов, строго запрещенных НАТО к экспорту в нашу страну. В ряде других объектов из того же списка удавалось обходить запрет с помощью третьих стран, но в данном случае такой путь не удался. К тому же специализированных для КРТ установок в продаже не было, они появились в середине 90-х гг., и фирма "Рибер" (Франция) даже направила на совещание в Москве своих представителей, рекламировавших свою продукцию. Видимо, запрет НАТО был смягчен или снят, но богатства МОП уже не существовало.

К тому времени в отделении В. И. Стафеева уже были созданы фотоматрицы на основе жидкофазных пленок КРТ, а в отделении А. А. Тимофеева — интегральные схемы электронного тракта. Был освоен и сложный процесс стыковки фотоматриц и кристалла с интегральной схемой. Тем самым создавалась возможность обеспечения ряда разработок в интересах предприятий, входивших ранее в систему МОП. К ним относятся фотоматрицы форматом 4x48, 32x32, 128x128 и 256x256 элементов. О них сообщалось в статье [4].

Освоение самых высоких технологий при их создании свидетельствует о высочайшей квалификации сотрудников названных отделений. ФПУ, полученные стыковкой двух идентичных по геометрии частей — фотоматрицы и матрицы электронного тракта, принято называть "гибридными". В России они впервые

были применены в стендовых макетах "смотрящих" тепловизоров, изготовленных в отделении В. И. Стафеева. Сравнение изображений, полученных в макете при помощи отечественной и имевшейся в распоряжении американской гибридных фотоматриц, показало, что существенных различий не наблюдается.

Можно выразить уверенность, что дальнейший прогресс в технологии ФП и ФПУ на основе КРТ будет зависеть от объема заказов и финансирования в большей мере, чем от научно-технической стороны дела.

При наличии достижений оптоэлектроники в виде крупноформатных ФПУ на основе КРТ и других полупроводниковых материалах заманчивой целью остаются монолитные фотоматрицы, в которых фотоприемная часть и интегральная схема электронного тракта расположены на общей подложке.

Развитие этого направления в случае КРТ стало бы возможным, если бы удалось создать полевые транзисторы на основе КРТ. Такая работа стала одним из разделов докторской диссертации В. П. Пономаренко, в которой были получены положительные результаты.

В заключении раздела приведу недавнее сведение из статьи [7] о перспективных разработках фотоматриц на основе КРТ в США. Их цель состоит в создании фотоматриц форматом  $512 \times 512$  при размере элемента менее 30 мкм. Как и в других разработках последнего времени, чувствительный элемент представляет собой гетероструктуру из слоев КРТ разного состава.

### **Прогноз сохранения лидирующей роли КРТ в развитии тепловидения**

В книге под редакцией Рогальского [5] и в его же статье [6] высказаны интересные соображения о развитии ИК-фотоэлектроники в ближайшем и в более отдаленном будущем. Прежде всего ставится вопрос, продержится ли монополия КРТ в тепловидении и других областях его применения. В части одноэлементных ФП с наивысшими параметрами для широкой области спектра и при очень малой инерционности фотоответа конкуренцию КРТ, по мнению Рогальского, смогут составить только родственные ему тройные системы с заменой кадмия на цинк или марганец. Они разработаны далеко не так детально, как КРТ, но их преимуществом является лучшая стабильность свойств при повышенных температурах. Ухудшение параметров ФП из КРТ на 20 % наступает за 48 ч нагревания при 80 °С, а у ФП из ЦРТ — при 100 °С.

КРТ может успешно применяться и в диапазоне 3—5 мкм, и есть мнение, что предприятиям, выпускающим ФП, выгодно иметь одинаковую технологию материала как при составе 22 % по кадмию, так и 30 %.

Однако для диапазона 3—5 мкм есть отлично отработанные высокостабильные полупроводниковые материалы (антимонид индия, силициды благородных металлов и отчасти селенид свинца, последний для дешевых приборов наблюдения, предназначенных для полиции и частных владельцев собственности).

Можно предположить, что каждый из материалов будет иметь свою нишу в применениях. О превосходных тепловизорах (ИК-камерах в американской терминологии) на основе антимонида индия и силицидов упоминалось выше. Квантовая эффективность в случае силицидов на два порядка меньше, чем в собственных полупроводниках, но этот недостаток отчасти компенсируется высокой степенью однородности свойств элементов и монолитной структурой в виде кремниевой подложки, на одной стороне которой находится матрица чувствительных элементов, а на другой — интегральная схема считывания и обработки сигнала излучения. Фирмы Японии давно выпускают ИК-камеры, дающие

прекрасное изображение, но при несколько меньшей чувствительности к температурным контрастам, чем при использовании ФПУ на собственных полупроводниках.

В 70-х гг., когда явления нестабильности свойств КРТ еще не были преодолены, КРТ встречал сильную конкуренцию со стороны тройных халькогенидов свинца, в особенности теллурида свинца — олова (СОТ), чувствительного в диапазоне 8—14 мкм. Однако по мере “созревания” КРТ все лидирующие фирмы отказались от СОТ. Тем не менее, исследовательские работы продолжались в ряде лабораторий мира. В статье [2] есть краткое сообщение о деятельности НИИПФ в этом направлении.

Отношение к сложным халькогенидам несколько изменилось к лучшему в последние годы, когда были опубликованы работы Цогга и соавторов, кратко рассмотренные в статье [2]. Возврат интереса к сложным халькогенидам объясняется пересмотром ценностей в процессе развития тепловидения. Недостатком СОТ и родственных соединений свинца считалась большая диэлектрическая проницаемость, приводящая к инерционности фотоответа. Но для “смотрящих” тепловизоров высокой скорости ответа не нужно, так как сигнал от каждого чувствительного элемента может накапливаться за время кадра или какой-то его части (в американских ИК-камерах время кадра составляет 1/30 с).

Высокая диэлектрическая проницаемость полезна также для повышения степени однородности свойств чувствительных элементов фотоматрицы, так как она способствует экранированию электрических полей, возникающих около дефектов структуры и примесных центров в полупроводнике. Цогг и соавторы разработали метод эпитаксиального наращивания тонких пленок халькогенидов на основе свинца на буферных слоях из фторидов кальция и стронция, выращенных на кремнии. На той же кремниевой пластинке размещается интегральная схема электронного тракта. В статье [8] имеется информация о созданной Цоггом и соавторами 2-рядной линейке с элементами из теллурида свинца и полным комплектом электроники. Теллурид свинца при температуре жидкого азота чувствителен до длины волны 5,5 мкм. Согласно Цоггу, теми же методами могут быть получены многоэлементные структуры из тройных халькогенидов, имеющих чувствительность в диапазоне 8—12 мкм. Цогг считает, что они будут иметь значительные преимущества по сравнению с аналогичными изделиями из КРТ по однородности элементов, технологичности и стоимости. Отмечается также отсутствие проблем, связанных с токсичностью ртути и металлоорганических соединений, используемых при эпитаксиальном наращивании КРТ. Ближайшее будущее покажет, будут ли достижения Цогга конкурентоспособными с технологией фотоматриц на основе КРТ.

Перейдем к событиям последних лет, резко изменившим прежнее отношение к тепловым фотоприемникам в применении к тепловидению.

Выше уже было отмечено, что для “смотрящих” тепловизоров без сканирования не нужны быстродействующие фотоприемники, так как фотосигнал может накапливаться за сравнительно долгое время. Однако тратились сотни миллионов долларов на разработки и выпуск крупноформатных фотоматриц из КРТ. Только одна фирма “Хониуэлл” сосредоточила усилия на альтернативном решении и много лет вела работы по созданию фотоматриц с чувствительными элементами в виде микроболометров, не требующих охлаждения. Другие фирмы вели работы по фотоматрицам с пироэлектрическими чувствительными элементами для ИК-камер и передающих телевизионных трубок типа видикон. Будучи тепловыми фотоприемниками, и те, и другие реагируют на нагревание сигналом излучения и поэтому чувствительны ко всему оптическому диапазону спектра.

Область чувствительности аппаратуры определяется оптическими компонентами аппаратуры и фотоматрицы. Важнейшим преимуществом тепловых фотоприемников и фотоматриц является работоспособность при обычных температурах. Отсутствие необходимости в системе охлаждения резко упрощает и удешевляет аппаратуру.

Болометры успешно применялись во время первой мировой войны в тепловизионных установках на побережье Германии для обнаружения британских кораблей по тепловому излучению их труб. В усовершенствованном виде они имели аналогичное применение во время второй мировой войны. Известно об успешном применении болометров в нашей стране на Северном флоте. Разработки фотоэлектрических полупроводниковых фотоприемников во время войны и после нее существенно повысили возможности тепловизионной и тепловые фотоприемники были вытеснены из военной техники, сохранив много применений в других областях. За последнее десятилетие тепловые фотоприемники «взяли реванш» в тепловидении.

Фирма «Хониуэлл» была пионером в создании очень сложной технологии микроболометрических фотоматриц. Лицензии на ее применение были куплены ведущими фирмами США. В первой публикации [10] сообщалось, что отсутствие системы охлаждения и сканера в тепловизоре с микроболометрической фотоматрицей позволит снизить его цену со 100 тыс. до 1 тыс. дол.

Вероятно, это было крайне оптимистической точкой зрения, но в недавних публикациях есть сообщения о тепловизорах, монтируемых на шлеме солдата, и о наличии в армии США уже 2000 таких тепловизоров. Они позволяют солдату вести огонь в полной темноте. Сообщается также о разработке аппаратуры для поиска мин с помощью тепловизора такого же типа.

Фотоматрица фирмы «Хониуэлл», имеющая около 80 тыс. чувствительных элементов размером  $50 \times 50$  мкм, представляет собой кремниевую пластинку, служащую базой и содержащую на верхней стороне чувствительные элементы, а на нижней — интегральную схему электронного тракта. Микроболометры, являющиеся чувствительными элементами, состоят из тонкого слоя окиси ванадия на пленке из нитрида кремния. Окись ванадия имеет большой коэффициент изменения электрического сопротивления с ростом температуры и преобразует оптический сигнал в электрический, передаваемый на нижнюю сторону базовой пластинки.

Важнейшим достижением технологии следует считать создание конструкции, обеспечивающей минимальную теплоемкость и минимальный отвод тепла от слоя ванадия. Такие условия реализуются подвеской пленки из нитрида кремния над углублением в базовой пластинке. На первый взгляд эта конструкция кажется очень ненадежной, но на самом деле она выдерживает механические нагрузки, предусмотренные требованиями к военной аппаратуре.

При светосиле объектива, равной 1,0, тепловизор на основе микроболометрической фотоматрицы обеспечивает обнаружение пороговой разности температур  $0,04$  °С. Аналогичная информация имеется и от других фирм.

На первый взгляд неискушенного в микрофотозлектронике человека описанная выше конструкция не кажется сложной. Но не надо забывать, что размер чувствительного элемента  $50 \times 50$  мкм, а число элементов в фотоматрице составляет сотни тысяч.

Принципиально новый подход к созданию тепловых фотоматриц описан в статье [11]. Чувствительный элемент здесь изменяет при освещении не электрическое сопротивление, а емкость микроконденсатора. Это реализуется с помощью тонкой биметаллической пленки, изгибающейся при нагревании сигналом излучения.

Большой интерес представляет недавняя реклама (1998 г.) фирмы "Рейшн" о характеристиках тепловизионной аппаратуры на основе неохлаждаемых фотоматриц. В ней утверждается, что по качеству изображения она соперничает с лучшими охлаждаемыми ИК-камерами.

Вероятность обнаружения в 70 % при прозрачности атмосферы 50 %, при оптике со светосилой 0,7 и диаметром 50 мм обеспечивается на дальности 0,6 км по человеку и 1,2—2,4 км — по танку. При диаметре оптики 100 мм дальность обнаружения соответственно увеличивается до 1,4 и 2,4—3 км.

«НПО "Орион"» не могло остаться в стороне от кардинального изменения взглядов на применение тепловых фотоприемников в военном тепловидении и уже несколько лет ведет в отделении Н. В. Кравченко соответствующие работы.

Высоко оценивая достижения фирм США в создании тепловых фотоматриц, нельзя забывать, что быстродействующие охлаждаемые фотоприемники на основе КРТ остаются незаменимыми для многих видов оптико-электронных систем вооружения, и развитию соответствующей технологии, в особенности в части эпитаксиальных пленок, нужно уделять необходимое внимание.

Обсуждение направлений фотозлектроники, альтернативных к КРТ, было бы неполным без упоминания о многослойных структурах с "квантовыми ямами" и сверхрешетками. При их использовании для средней и дальней ИК-областей спектра применяются материалы, не имеющие в ней собственной чувствительности, например, германий и кремний или арсенид галлия и арсенид галлия-алюминия. Эта интересная область физики полупроводников привлекла внимание не только в связи с ее высокой научной значимостью, но и в практическом аспекте. Еще в конце 80-х гг. были опубликованы работы по созданию фотоприемников на основе структур из чередующихся слоев арсенидов галлия и галлия-алюминия, чувствительных в диапазоне 8—12 мкм, как и КРТ. Их перспективность для практических целей вызвала полемику в литературе, но экспериментальные работы продолжались, и в статье [12] сообщалось о разработке в Центре космической микроэлектроники в США носимой ("ручной") ИК-камеры на диапазон 8—15 мкм на основе структуры с квантовыми ямами. Квантовая эффективность этой структуры мала (только 3 %) даже при охлаждении несколько ниже температуры жидкого азота, но пороговая разность температур оценивается в 0,04 °С.

На фоне достижений в тепловидении с помощью неохлаждаемых фотоматриц трудно делать предположения о промышленной технологии на основе квантово-размерных структур. Однако нужно согласиться с мнением Рогольского, что "картина отдаленного будущего может драматически измениться в результате активной исследовательской работы во всех высокоразвитых странах".

### Проблемы сбыта ФП и ФПУ в условиях рыночной экономики

Ознакомившись с научно-техническим аспектом перспектив развития ФП и ФПУ ИК-диапазона, следует рассмотреть очень важный аспект спроса на них при современной рыночной экономике.

Интересные данные о коммерческих перспективах США имеются в статье Лича и Гудманиса [13]. Некоторые из них будут изложены ниже.

Авторы отмечают резкое разграничение промышленности США на очень большой военный и очень малый коммерческий сектор. Изделия, выпускаемые этими секторами, сильно различаются по сложности, цене, качеству и технологии. В ответ на изменение военно-политической обстановки возрастает интерес к коммерческому сектору.

В США имеется около 50 продюсеров ИК-фотоприемников. Они работают по контрактам с несколькими основными фирмами—контракторами министерства обороны. К ним относятся “Хьюз”, “Тексас Инструментс”, “Лораль” и “Рокуэлл”. Эти фирмы имеют многомиллиардные годовые обороты и десятки тысяч персонала. Непосредственно ИК-тематикой занято только 3800 человек, из них 1000 на фирме “Хьюз” (Исследовательский центр “Санта Барбара”). Общее число сотрудников, занятых фотоприемниками из КРТ, составляет 2400. Общий объем продукции ИК-фотоприемников в 1990 г. составил 500—550 млн. дол. К военному сектору относилось 90 % объема.

На коммерческий сектор работало 30 сравнительно малых предприятий с общим объемом менее 40 млн. дол.

В статье имеются таблицы с перечислением объектов военной техники, включающей в себя ИК-фотоприемники.

В 1995 г. имелись контракты на 5000 систем переднего обзора и 3500 ИК-камер типа “Общий модуль”.

Среди объектов, не относящихся к тепловидению, упоминаются самонаводящиеся снаряды “Сайдвиндер” (2000 шт.) и “Стингер” (7000 шт.).

Кроме того, упоминаются перспективные противотанковые прицелы и другие объекты (7400 шт.).

На 2000-й год предполагалось заказать 123 200 изделий всех типов при резком росте по сравнению с 1996 г.

Далее в статье обсуждается неопределенность ситуации после “коллапса” Советского Союза. В ранее составленном прогнозе его авторы исходили из необходимости противостоять крупным и оснащенным “умным” оружием Советским вооруженным силам. Далее цитата: “... которые теперь не существуют”. Имеет смысл привести еще одну цитату: “Поражение Ирака было достигнуто с помощью значительно менее сложной техники, чем прогнозируемая на следующее 10-летие. Необходим анализ противостоящей техники. Встретившись с неопределенностью, компании — производители фотоприемников во всем мире начали с 1991 г. снижать их выпуск. Поэтому рост спроса, прогнозируемый с 1996 г., откладывается”.

Мы не знаем, до какого уровня снижается выпуск тепловизионной аппаратуры в США (если он вообще снижается). Однако несомненно, что объем работ в денежном выражении может сильно сократиться, так как цены на тепловизионную аппаратуру очень высоки и даже богатой Америке надо с этим считаться.

В предыдущих разделах данной статьи указывалась цена танкового тепловизора, составляющая около 100 тыс. дол. Примерно столько же стоят бортовые авиационные тепловизоры. Но они представляют собой только одну из частей всей тепловизионной системы. Из таблицы цен, имеющейся в статье [14], видно, что цена менее 10 % от цены авиационной системы прицеливания по наземным целям, стоящей 1,5 млн. дол. Как сказано в статье [14], “дальность действия стоит денег”.

Цены на другие виды аппаратуры (в тыс. дол.) по состоянию на 1993 г. следующие:

Прицельная система для командира среднего танка	— 250
Прибор водителя среднего танка	— 10
Прибор для стрелкового прицела	— 30
Вертолетная противотанковая система	— 600
Морская система, монтируемая на мачте	— 350
Система переднего обзора и посадки гражданских самолетов	— 50.

Для сравнения указана цена тепловизионной камеры на основе пироэлектрических фотоприемников для гражданских целей, равная 8 тыс. дол.

Для танковых и стрелковых прицелов полностью сохраняется значение приборов ночного видения на основе усилителей изображения, имеющих малые размеры, при цене на порядок меньше, чем на аналогичные тепловизионные приборы.

О стоимости современной системы переднего обзора военного самолета, устанавливаемой на турели и обеспечивающей обзор в пределах  $36^\circ$ , можно судить по сообщению о контракте фирмы "Локхид-Мартин" с ВМС США, заказавшими поставку 160 систем общей стоимостью от 150 до 180 млн. дол. Там же сообщается о контракте ВМС США с фирмой "Хьюз" стоимостью 169 млн. дол. на поставку самонаводящихся снарядов типа "Сайдуиндер", защищенных от искусственных помех [15].

Сокращение спроса на тепловизионные приборы военного назначения, неизбежное в отсутствие предвоенной обстановки, увеличивает интерес к коммерческому рынку, хотя, как сказано в статье [14], "перспективы создания рынка, способного поддержать спрос на изделия, разработанные по сложной технологии, необходимой для приборов военного назначения, в настоящее время неясны".

Общий вывод сводится к необходимости удешевления фотоприемников. Тогда появились бы применения большого объема в транспорте и средствах наблюдения, но в этих областях фотоэлектрические приемники на основе КРТ встретят сильную конкуренцию со стороны неохлаждаемых фотоматриц из тепловых фотоприемников. В частности, фирма "Дженерал Моторс" планирует установить в новых моделях "Кадиллак" ИК-камеры на основе пироэлектрических фотоприемников.

В дальнейшем фирмы США предполагают развивать рынок автоматизированных навигационных систем. В 1991 г. он составлял только 10 тыс. шт., но к 2016 г. может увеличиться до 2,5 млн.

Не желая заканчивать доклад в части обсуждения перспектив фотоприемников на основе КРТ на пессимистических выводах, все же придется признать, что обстановка в мире после окончания "холодной войны" приводит к переоценке ценностей в ИК-фотоэлектронике, и даже мощная экономика США нуждается в подъеме коммерческого рынка изделий "двойного применения" как в военной, так и в гражданской областях деятельности.

## Литература

1. Курбатов Л. Н. К 50-летию НПО "Орион". Краткий очерк основных работ // Вопросы оборонной техники. Сер. II. 1996. Вып. 3—4. С. 3.
2. Курбатов Л. Н. Краткий очерк истории разработок приборов ночного видения на основе ЭОП и усилителей изображения // Там же, 1994. Вып. 3—4. С. 3.
3. Курбатов Л. Н. Очерки об истории разработок полупроводниковых фотоэлектрических фотоприемных устройств // Там же, 1995. Вып. 3—4. С. 3; 1996. Вып. 3—4. С. 13; 1997. Вып. 1—2. С. 3; 1998. Вып. 1—2. С. 3.
4. Курбатов Л. Н. Лазерная тематика в работах НИИ ПФ в 1961—1980 гг. // Оптический журнал. 1996. № 6. С. 85.
5. Курбатов Л. Н., Бармин И. В., Головин Б. И., Зиновьев В. С., Изъюров А. В., Черкасов А. П., Комаров Н. В., Стафеев В. И., Холина Е. Н., Фролов А. В., Бочкарев Э. П. Эксперименты по кристаллизации твердых растворов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  в условиях невесомости на борту орбитальной станции "Салют" // Доклады АН СССР. 1983. Т. 273. С. 1380.
6. Бовина Л. А., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Климанов Е. А., Мансвентов Н. Г., Соляков В. Н., Стафеев В. И., Тимофеев А. А. Фокальные матрицы на основе КРТ-фотодиодов для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм // Оптический журнал. 1986. № 6. С. 74.
7. Rogalski A. Photon Detectors // SPIE Eng. Press, 1995.
8. Rogalski A. New trends in semiconductor IR detectors // Opt. Engin. 1994. V. 33. № 5. P. 1795.
9. Wu O. K. et al. MBE-grown HgCdTe heterojunction structure for IR FRA-S // Pros. SPIE. 1996. V. 2685.
10. Р. 16.
11. Сусов Е. В., Сидоров Ю. Г., Северцев В. Н., Комов А. А., Чеканова Г. В., Дворецкий С. А., Варавин В. С., Михайлов Н. Н., Дьяконова Л. И. Многоэле-

- ментный охлаждаемый фоторезистор на основе гетерозепитаксиальных структур HgCdTe //Автоматрия. 1996. № 4. С. 40.
9. Zogg H., Fach A., Maissen C., Masec J., Brunier S. //Opt. Eng. 1994. V. 33. P. 1440.
10. Wood R. A., Foss N. A. //Laser Focus. 1993. P. 101.
11. Amantea R. A., Knoedler C. M., Pantaso F. R., Patel V. K., Saner D. J., Tower J. R. An uncooled IR Imager //Proc. SPIE. 1997. V. 3061. P. 210.
12. Gunapala S. D., Brabad T. N., Bandara S. V., Lin J. K., Sandaram M. S. Application of longwave length 256x256. OWIP hand held camera //Ibid. P. 292.
13. Leech D. R., Gutmanis I. The US Infrared Detector Industry Prospects for commutial divcesification. //Ibid, 1996. V. 2746. P. 124.
14. Le C. G. Meswier Growth prospect for thermal imaging systems //International Defens Review. 1993. V. 17.
15. Defens News. 1997. V. 12, № 50.

## MAIN TRENDS IN DEVELOPMENT OF PHOTODETECTORS AND PHOTODETECTIVE ASSEMBLIES FOR THERMAL IMAGING IN 1970—1998

*L. N. Kurbatov*

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

*The aim of the article is providing an additional information to A. M. Filachev and V. P. Ponomarenko report on the new generation of multielement photoelectric photodetectors for thermal imaging systems. The history of the Institute of Applied Physics referring to USSR Defence Industry Ministry activity in the field of photodetectors is briefly reviewed and its role in production of semiconducting materials, microelectronic components and microcryogenic engineering is shown. At the end of the article an alternative method of solving a photodetector problem by application of thermal photodetectors is considered. In conclusion, some economical and commercial problems that appeared after the end of "cold war" are considered.*