

УДК 621.383

Требования к перспективным фотоприемным устройствам для бортовых оптико-электронных комплексов зондирования Земли, атмосферы и космоса

П. А. Михеев, Л. А. Мирзоева, Г. А. Маковцов, Н. Г. Васильев,
Э. А. Лустберг, Г. Б. Камешков, Л. П. Амосова

Государственное унитарное предприятие «Всероссийский научный центр
«Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова»», Санкт-Петербург, Россия

На основе анализа излучательных характеристик объектов и фонов сформулированы основные требования к фотоприемным устройствам нового поколения для бортовых космических, авиационных и наземных оптико-электронных комплексов, предназначенных для зондирования и мониторинга поверхности Земли, атмосферы и космического пространства. Исходя из усложнившихся задач обнаружения слабых источников излучения, предлагается расширить работы по созданию «смотрящих» матриц и матриц, работающих в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) больших форматов.

Космические оптико-электронные комплексы, предназначенные для мониторинга Земли, атмосферы и космического пространства, работают в самых различных спектральных участках электромагнитного излучения — от ультрафиолетового до дальнего ИК-диапазона.

При зондировании поверхности Земли (рис. 1) выбор рабочего спектрального диапазона определяется коэффициентом спектрального пропускания атмосферы. Для одних целей аппаратура должна работать в окнах прозрачности атмосферы в видимом 0,4—0,7 мкм, ближнем 0,8—1,2 мкм, среднем 3—5 мкм и дальнем 8—12 мкм ИК-диапазонах. Для других целей аппаратура должна работать в полосе поглощения излучения озоновым слоем 0,22—0,25 мкм, в полосах поглощения излучения молекулами воды и углекислого газа 2,8—3; 4,1—4,5 и 5,2—7,4 мкм.

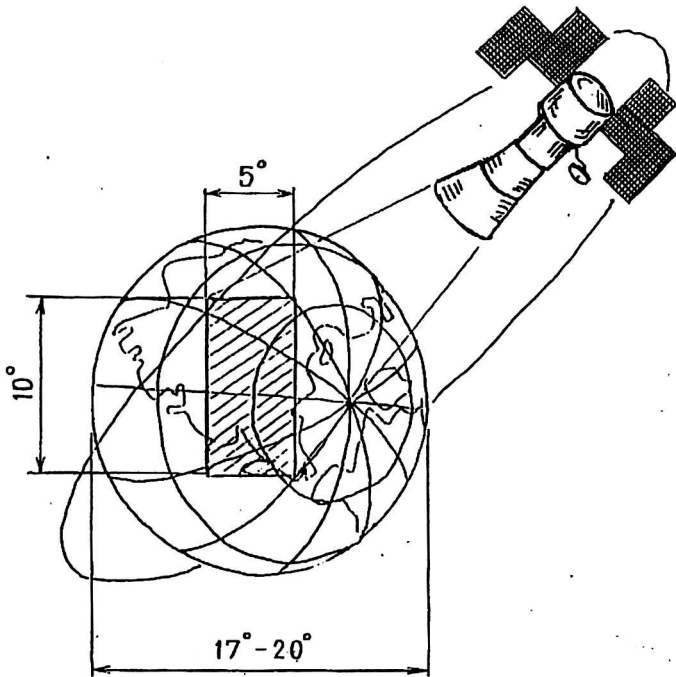


Рис. 1. Схема контроля пожароопасных регионов России с высокоэллиптической орбиты

Современные задачи мониторинга требуют от оптико-электронных комплексов все большей информативности. Это приводит к необходимости существенного повышения чувствительности при одновременном увеличении полей обзора и улучшении разрешающей способности. Например, информация об очаге лесного пожара, удаленного на большие расстояния от населенных пунктов, должна быть получена соответствующими службами не позднее чем через 20 мин после возгорания, когда эффективная площадь пожара не превышает 100 м^2 .

На рис. 2 показано изменение площади пожара, его температуры и силы излучения очага во времени.

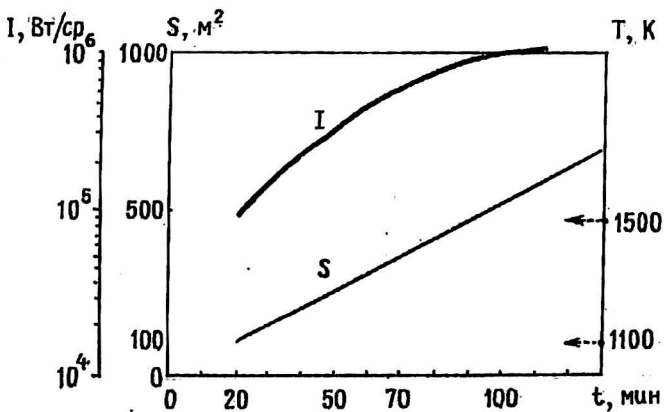


Рис. 2. Изменение во времени площади S , силы излучения I и температуры T очага лесного пожара

На рис. 3 представлены спектральная яркость лесного пожара с температурой фронта 1200 К с учетом поглощения излучения в атмосфере и экранирования кронами деревьев, яркость облаков и участка зелени, а также спектральная облученность входного зрачка аппаратуры на дальности 40 тыс. км для этих же объектов. Как видно из рис. 3, для гарантированного круглосуточного обнаружения очагов пожаров на ранней стадии возгорания требуются высокая чувствительность и помехозащищенность ОЭС [1].

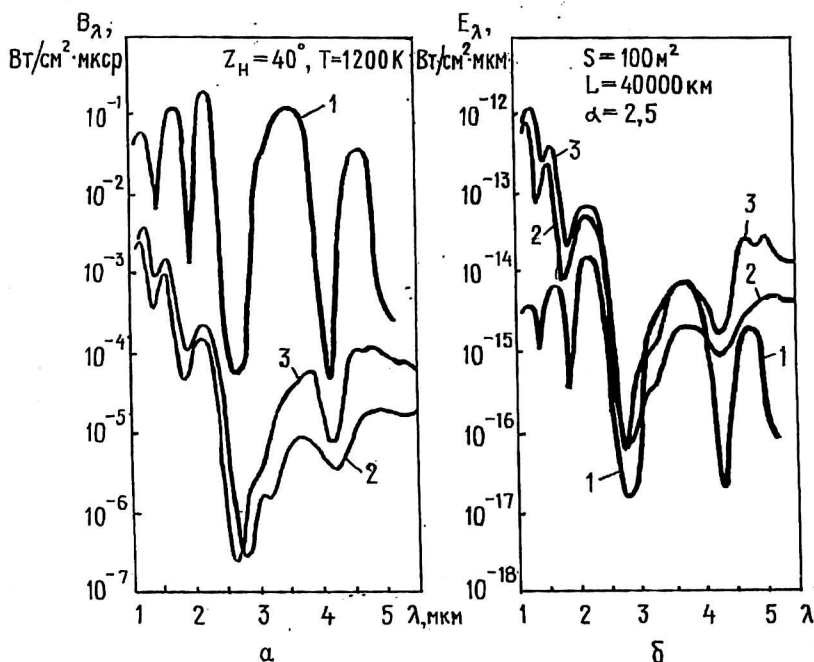


Рис. 3. Спектральная яркость излучения (а) и спектральная облученность входного зрачка аппаратуры (б) от очага лесного пожара с учетом поглощения в атмосфере (1), облаков (2) и участка зелени (3)

Высокоточная информация о слабоизлучающих объектах, таких как астероиды или метеориты, необходима для принятия соответствующих мер службой по чрезвычайным ситуациям. На рис. 4 представлена схема мониторинга околосолнечных участков космического пространства с КА, выведенного на геостационарную орбиту. Для регистрации околосолнечных и нагретых Солнцем астероидов по их тепловому излучению в спектральном диапазоне 3—5 мкм на расстоянии 200 млн. км от Земли также требуется очень высокая пороговая чувствительность ОЭС [2].

Существуют задачи обнаружения техногенных аварий, обнаружения и уничтожения космического мусора, исследования озоносферы, создания оптико-электронных систем аэрокосмической навигации, дополняющих радионавигационные системы, и др.

В зависимости от характера поставленной задачи регистрировать оптическое излучение целесообразно в различных областях спектра, а иногда одновременно в нескольких спектральных диапазонах.

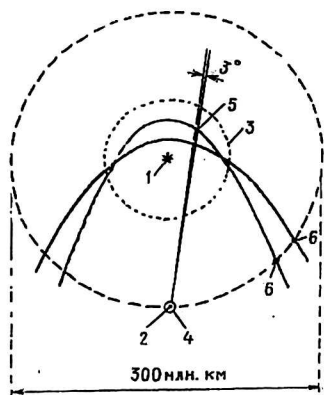


Рис. 4. Схема мониторинга околосолнечных участков космического пространства с КА на геостационарной орбите:

- 1 — Солнце; 2 — Земля; 3 — орбита Меркурия;
- 4 — КА с аппаратурой обнаружения; 5 — траектория астероида; 6 — возможная точка встречи астероида с Землей

Ограничения по габаритным размерам и массе для космических носителей не позволяют существенно увеличить площадь входного зрачка. Усложненные задачи не могут решаться только за счет повышения характеристик оптических систем, качество которых уже приближается к дифракционному. Дальнейшего улучшения характеристик космических оптико-электронных комплексов зондирования Земли, атмосферы и космоса можно добиться путем создания нового поколения фотоприемных устройств с предельно высокими характеристиками. Это реализуется в фотоприемных устройствах, работающих в режиме ВЗН и “смотрящих” матрицах [3, 4].

В ВНЦ “ГОИ им. С. В. Вавилова” имеется большой задел по созданию высокоточных прецизионных систем автоматического сканирования, что позволяет эффективно использовать ВЗН ФПУ в сканирующих ОЭС для реализации существенно больших полей обзора при высокой разрешающей способности.

- От современных матричных фоточувствительных модулей требуются: достижение предельно возможной пороговой чувствительности;
- обеспечение высокой однородности фотоэлектрических параметров;
- увеличение формата матрицы (количества элементов);
- обеспечение работы в спектральных диапазонах от ультрафиолетового до дальнего ИК-диапазона;
- возможность работы одновременно в нескольких областях спектра — “многоцветные матрицы”;
- быстродействие;
- наличие технической и инженерной возможностей создание систем охлаждения ФПУ.

В ряде оптико-электронных устройств космического базирования, непрерывно функционирующих на орбите, при достаточно больших теплопритоках к системе охлаждения 8—20 Вт требуется температура охлаждения фотослоев 173—193 К, которая может быть обеспечена бортовой радиационной системой охлаждения (РСО). В этих условиях наиболее перспективными фотоматериалами являются сернистый свинец и тройные соединения HgCdTe (КРТ), которые в требуемой области спектра могут работать при температурах ~190 К. Такие разработки на сернистом свинце имеются и широко используются в НПО “Орион”, однако большая инерционность слоев (>2 мс) ограничивает их применение и требует разработки ФПУ на КРТ [5—7].

ПЗС-матрицы видимого и ближнего ИК-диапазонов достаточно хорошо проработаны НПО "Электрон" и выпускаются серийно, например ISD-017A форматом 1040×1040 и ISD-046A форматом 1024×1024. Однако в настоящее время они не могут быть использованы в системах космического базирования, так как их эксплуатационные характеристики не доведены до требуемого уровня.

Для работы в среднем ИК-диапазоне 2—5 мкм с успехом могут использоваться арсенид и антимонид индия. Достоинствами ИК-матриц на основе фотодиодов из соединений InAs, InSb, которые достаточно успешно разрабатываются в НПП "Восток" (г. Новосибирск), являются хорошо отработанная технология, высокая однородность и дешевизна изготовления, однако для получения хороших пороговых характеристик они требуют более глубокого охлаждения — 120—77 К. Матрицы диодов на арсениде и антимониде индия могут использоваться там, где требуются высокая чувствительность и быстродействие, но не строги требования к массогабаритным характеристикам и надежности систем охлаждения (при наземном и авиационном базировании ОЭС).

В настоящее время широкое распространение получили ФПУ на основе тройных соединений $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ). Теоретически такие диоды могут работать в диапазоне от 1 до 50 мкм. Требования к однородности элементов матриц превышают современный уровень технологии $Hg_{1-x}Cd_xTe$. Из-за нестабильности материала при высоком содержании ртути очень мал процент выхода годных матриц большого формата. Чаще всего используются составы $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с $x \sim 0,2$ и $x \sim 0,3$, что соответствует диапазонам 8—12 и 3—5 мкм.

Безусловно, широкоформатная "смотрящая" матрица ИК-диапазона, обладающая предельно низкими значениями пороговой мощности сигнала на один чувствительный элемент, позволила бы в задачах зондирования не только обнаружить слабоизлучающие объекты, но и получить высокоточную координатную информацию в реальном масштабе времени. Однако на сегодняшний день технические сложности, возникающие при создании глубокоохлаждаемых широкоформатных матриц, еще довольно велики, что заставляет как за рубежом, так и в России идти по пути создания сканирующего матричного ФПУ, работающего в режиме ВЗН.

Разработчики оптико-электронных приборов в России считают необходимым более интенсивно проводить эти работы в НПО "Орион". Матрицы КРТ на средний ИК-диапазон обладают приемлемой чувствительностью при температурах $T > 173$ К, что позволяет их использовать в системах космического базирования с радиационным охлаждением [8, 9].

В сканирующих ОЭС, где используются одномерные линейчатые фотоприемники и ВЗН-матрицы, всегда ставится задача выравнивания так называемой пеленгационной характеристики, т. е. стремление минимизировать провал чувствительности при попадании изображения точечного объекта в зазор между элементами. Такое выравнивание достигается "шахматным" расположением фоточувствительных элементов в матрице.

На рис. 5 приведены варианты топологии чувствительных элементов ВЗН-матрицы. Зазор между элементами должен быть минимизирован как по вертикали, так и по горизонтали.

Довольно острая потребность имеется в двухцветных ФПУ, необходимых для ОЭС, предназначенных как для регистрации оптического излучения, так и распознавания или идентификации излучающих объектов. КРТ является удобным материалом для создания быстродействующих двухцветных сенсоров MWIR/LWIR. Подобные матрицы для областей спектра 3—5 и 6—10 мкм

разработаны компаниями Santa Barbara и Army Research Laboratory. Такие матрицы состоят из двух расположенных друг над другом детекторных матриц на соответствующий диапазон. Параметры двухцветных фотодиодов в средней и длинноволновой областях спектра сравнимы с параметрами одноцветных в этих областях [4, 5].

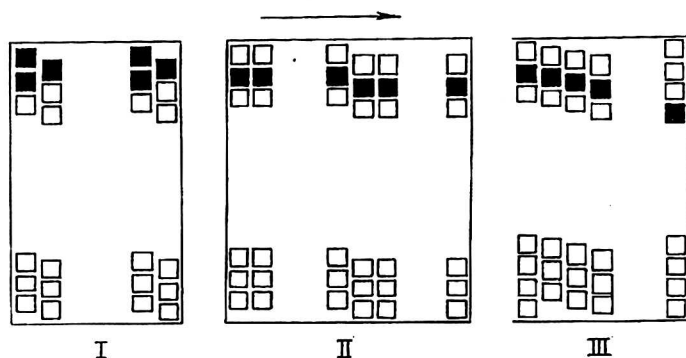


Рис. 5. Варианты топологии чувствительных элементов ВЗМ-матрицы

Для длинноволновой области спектра наиболее перспективными на сегодняшний день считается ИК-фотоприемник с квантовыми ямами (QWIP) на полупроводниковых соединениях [5, 10]. В последние годы разработки таких приемников ведутся во многих странах. К настоящему времени созданы фокальные матрицы $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ с параметрами в ИК-области, сравнимыми с параметрами матриц на КРТ. Поскольку приемники на квантовых ямах являются высокоомными резисторами, их меньшая квантовая эффективность по сравнению с КРТ (~20 %, в то время как для КРТ эта величина ~70 %) может быть скомпенсирована увеличением времени накопления. Материалы $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ сохраняют высокую однородность при уровне легирования (x), рассчитанном на работу в области спектра $\lambda \geq 14$ мкм, что обеспечивает большой выход годных матриц и, следовательно, их относительно низкую стоимость. В России работы по созданию приемников с квантовыми ямами развернуты в ИФП СО РАН, ряд задач решается в ВНИЦ "ГОИ им. С. И. Вавилова".

К числу достоинств приемников с квантовыми ямами следует отнести отработанную технологию изготовления, высокую однородность, радиационную стойкость, возможность многоспектрального детектирования, возможность монолитного интегрирования с GaAs электроникой обработки сигнала.

В процессе анализа различных задач мониторинга и зондирования нами сделана попытка сгруппировать требования к ФПУ в зависимости от вида базирования оптико-электронной аппаратуры и фона, на котором она работает. При анализе учитывалось, что за последние 10—15 лет решение поставленных задач требует от аппаратуры увеличения полей обзора в 50—100 раз, уменьшения элемента разрешения в 3—10 раз, увеличения темпа обновления информации до 10 раз. Требования по чувствительности выросли уже не в разы, а на порядки. Совершенствование оптических систем (увеличение полей обзора, уменьшение мгновенного поля зрения и т. д.), применение современных методов обработки информации не могут без современных ФПУ справиться с этой задачей.

В табл. 1 приведены основные требования, предъявляемые к параметрам фотоприемников оптико-электронных приборов, рассчитанных на базирование в составе космического аппарата, в табл. 2 — требования к фотоприемникам для оптико-электронных приборов авиационного и наземного базирования.

Таблица 1

Спектральный диапазон, мкм	Температура фотоэлемента, К	Фоновый уровень	Формат матриц	Размер элемента, мкм ²	Длительность светового импульса, мс	Период опроса (время накопления), мс	Пороговый поток, Вт
2,5—3,5	173	Фон Земли и космоса	4×256 ВЗН	40×40	1,0	0,65	1·10 ⁻¹³
2,5—3,5	173	То же	32×256 ВЗН	40×40	0,25	0,125	5·10 ⁻¹⁴
3,0—5,0	150	“	32×256 ВЗН	40×40	0,25	0,125	2·10 ⁻¹³
8,0—12,0	77—30	“	32×256 ВЗН	40×40 100×100	0,25	0,125	1·10 ⁻¹²

Таблица 2

Спектральный диапазон, мкм	Температура фотоэлемента, К	Фоновый уровень	Формат матриц	Размер элемента, мкм ²	Длительность светового импульса, мс	Период опроса (время накопления), мс	Пороговый поток, Вт
3,0—5,5	77	Фон Земли и пригориз. слоя	4×256 32×256 ВЗН	40×40	0,1—0,3	0,05—0,15	5·10 ⁻¹³
8—12	77—30	То же	4×128 ВЗН	40×40 100×100	< 0,1	< 0,05	1·10 ⁻¹²
6—16	77—30	Фон космоса	32×256 ВЗН	40×40 100×100	< 0,1	< 0,05	1·10 ⁻¹³
6—16	77—30	То же	256×256 смотрящая	40×40 100×100		40	5·10 ⁻¹⁴

Литература

1. Мирзоева Л. А., Камешков Г. Б., Лустберг Э. А., Маковцов Г. А., Захаренков В. Ф. Космическая оптико-электронная аппаратура обнаружения очагов лесных пожаров//Оптический журнал. 1992. № 8. С. 17—21.
2. Камешков Г. Б., Лустберг Э. А., Маковцов Г. А., Мирзоева Л. А. Мониторинг околосолнечных участков космического пространства для обнаружения астероидов, представляющих потенциальную опасность столкновения с Землей//Там же. 1998. № 11. С. 21—24.
3. Ерофейчев В. Г. Инфракрасные фокальные матрицы//Там же. 1995. № 2. С. 3—17.
4. Ерофейчев В. Г. Инфракрасные фокальные матрицы//Там же. 1996. № 6. С. 4—17.
5. Ерофейчев В. Г. Инфракрасные матрицы на основе фотодиодов Hg_{1-x}Cd_xTe и фотоприемников с квантовыми ямами//Там же. 2000. № 1. С. 5—19.
6. Dyer W. R., Tidrow M. Z. Applications of MTC and QWIP to Ballistic Missile Defence: Proc. SPIE, 1998. V. 3379. P. 434—440.
7. Головин С. В., Горшков А. В., Бовина Л. А., Болтарь К. О., Стафеев В. И. Свойства эпитаксиальных слоев Hg_{1-x}Cd_xTe, выращенных из паровой фазы в квазизамкнутой системе//Оптический журнал. 1996. № 6. С. 56—58.
8. Бовина Л. А., Бураков И. Д., Ильин Ю. К., Климанов Е. А., Монсчетов Н. Г., Соляков В. Н., Стафеев В. И., Тимофеев А. А. Многозарядные КРТ фотоприемные устройства для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм//Там же. С. 62—66.
9. Бовина Л. А., Болтарь К. О., Бураков И. Д., Климанов Е. А., Патрашын А. И., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И., Тимофеев А. А. Фокальные матрицы на основе КРТ фотодиодов для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм//Там же. С. 74—77.
10. Демьяненко М. А. и др. Матричные ИК-фотоприемники на основе многослойных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs: Матер. совещания по нанопотонике/Институт физики микроструктур РАН. — г. Нижний Новгород, 15—18 марта, 1999. С. 40—43.

Requirements to perspective photodetectors for on-board optical-electronic complexes of Earth, atmosphere and space sounding

*P. A. Miheev, L. A. Mirzoeva, G. A. Makovtsev, N. G. Vaciliev,
E. A. Lustberg, G. B. Kameshkov, L. P. Amosova*
State Unitary Enterprise «All-Russian Research Centre "S. I. Vavilov State Optical Institute"»,
St.-Petersburg, Russia

On the base of analysis of radiative characteristics of objects and backgrounds, main requirements to photodetectors of new generation for spaceborne, air-borne and ground-based optical-electronic complexes meant for sounding and monitoring of the Earth surface, atmosphere and outer space were formulated. Taking into account complicated tasks of weak radiative sources detection we propose to widen works on development of "looking" matrices and matrices functioning in the regime of temporal delay and accumulation (TDA) of large formats.