

## Photodetectors with internal injection amplification

V. I. Stafeev

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*Physical mechanisms of photo-electric amplification in long diodes or injection photodiodes at direct bias are investigated. High photosensitivity of injection photodiodes in ultra-violet, visible, infrared and submillimetric spectral ranges have been shown. Different semiconductor materials injection photodiodes investigations are presented.*

УДК 621.383

## Широкоформатные матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона спектра

А. В. Борошнев

ФГУП «ЦНИИ "Комета"», Москва, Россия

*Рассмотрены состояние и проблемы совершенствования матричных фотоприемных устройств инфракрасного (ИК) диапазона.*

Матричные фотоприемные устройства (МФПУ) ИК-диапазона спектра представляют интерес для использования в различных областях [1—10]. В частности, такие устройства востребованы в оборонных системах, в системах по обнаружению и предотвращению чрезвычайных ситуаций, метеорологии, астрономии и др. Важнейшими характеристиками МФПУ являются величина порогового потока, спектральный диапазон фоточувствительности, размер пикселей, составляющих матрицу, и число этих пикселей, определяющих формат матрицы. Ключевым элементом функционирования фотоприемных матриц является мультиплексор, обеспечивающий процесс управления и преобразование параллельного изображения входной за светки в последовательность электрических сигналов.

В настоящее время для ИК-диапазона спектра промышленно освоенным можно рассматривать формат МФПУ 256×256 элементов. Проводятся исследования путей увеличения формата до 1000×1000 элементов и более. Работы в этом направлении связаны с необходимостью решения ряда задач как функционально-эксплуатационного, так и конструктивно-технологического характера. К первым можно отнести необходимость обеспечения высокого уровня пороговой чувствительности и детализации входных регистрируемых изображений полей яркости в заданном спектральном интервале, большого динамического диапазона входных сигналов, а также длительного ресурса при заданном режиме (стационарный либо

мобильный) и условиях (наличие внешних воздействий, температурный режим и др.) эксплуатации МФПУ и др.

Среди задач конструктивно-технологического характера можно выделить следующие. В процессе создания МФПУ осуществляется соединение мультиплексора с фоточувствительной матрицей с помощью индиевых столбов по flip-chip-технологии. При создании широкоформатной матрицы этот технологический этап может привести к механическим напряжениям в структуре МФПУ, что ведет к ухудшению параметров, а также обуславливает линейные погрешности монтажа. Увеличение формата приводит к росту габаритных размеров всей поверхности МФПУ и снижению эффективности заполнения фоточувствительной поверхности. Отсюда следует необходимость перехода на технологические процессы, обеспечивающие создание элементов с размерами 0,1 мкм и менее. Уменьшение размера пикселей приводит к уменьшению накопительной ячейки и, соответственно, к снижению величины преобразуемых сигналов, т. е. к ограничению динамического диапазона МФПУ. Кроме того, уменьшение размера пикселей делает их сравнимыми по размеру и плотности на единицу поверхности со структурными дефектами фоточувствительных слоев МФПУ, что в дальнейшем снижает величину отношения сигнал/шум и затрудняет обработку регистрируемых изображений. Увеличение формата МФПУ при сохранении требований по времени обработки кадров входной информации, поступающей на

вход МФПУ, приводит к необходимости увеличения тактовой частоты считывающих сигналов и к возрастанию тепловыделения в структуре ФПУ, что негативно сказывается на характеристиках последней, а также к соответствующему возрастанию линейных размеров фоточувствительной матрицы, что влечет за собой возрастание оптических искажений, особенно в периферийной зоне, и к снижению эффективности работы всего МФПУ.

Значительный интерес широкоформатные МФПУ представляют для использования в спектральном диапазоне 2,5—5 мкм, для которого возможна реализация работы в условиях радиационного охлаждения, либо при охлаждении МФПУ до температуры жидкого азота.

В этом спектральном диапазоне могут использоваться многоэлементные фотоприемники на основе силицидов платины PtSi, узкозонных материалов InSb, HgCdTe, InAs, а также на основе структур AlGaAs/GaAs с квантовыми ямами (СКЯ) [1, 3].

Приемники на основе PtSi имеют весьма низкую квантовую эффективность, не превышающую нескольких процентов, поэтому их использование целесообразно при наличии светосильной оптики и времени интегрирования сигнала несколько десятков миллисекунд. Приемники такого типа позволяют достигать температурного разрешения в сотые доли градуса. Фотоприемные матрицы на основе PtSi могут иметь формат до 1000×1000 элементов и более. Один из основных недостатков фотоприемников данного типа — быстрый спад квантовой эффективности при приближении к длине волны отсечки около 5,5 мкм. Из-за этого сигнал в основном формируется излучением из области с  $\lambda \leq 4,2$  мкм. Другой недостаток — низкое значение контраста формируемого изображения, что связано с необходимостью использования многократного переотражения входного светового потока в объеме матрицы из-за низкой величины фоточувствительности. Рабочая температура таких фотоприемников ~80 К.

Фотоприемники на основе InSb и HgCdTe достаточно близки по своим характеристикам. Они имеют квантовую эффективность около 70 % и достаточно однородную чувствительность в спектральном диапазоне 3—5 мкм. Различия заключаются в величине рабочей температуры.

Фотоприемники на основе HgCdTe могут работать при 120 К, а на основе InSb — нужно охлаждать, по крайней мере, до 88 К [3, 4, 8, 10]. К недостаткам фотоприемников указанного типа следует отнести низкую однородность чувствительности и сложность получения матриц формата больше чем 256×256 элементов.

Спектральная характеристика чувствительности фотоприемников на основе InAs идеально

подходит для работы в диапазоне 2,7—2,95 мкм. Они имеют более высокую рабочую температуру до ~120 К, чем фотоприемники на основе узкозонных аналогов.

МФПУ на основе СКЯ-типа занимают как бы промежуточное положение между аналогами на PtSi и на основе узкозонных материалов (InSb и HgCdTe). Образцы таких приборов обладают квантовой эффективностью до 10 % и обеспечивают хорошее температурное разрешение (в сотые доли градуса) при временах интегрирования до 10 мс. Они могут работать при температуре свыше 100 К (в зависимости от конкретного вида спектральной характеристики чувствительности). Спектр фоточувствительности, как правило, узкий ( $\Delta\lambda \leq 1$  мкм), однако он может быть расширен и/или подстроен на чувствительность в области  $\lambda \leq 4,2$  и  $\lambda \geq 4,2$  мкм. Так как МФПУ на основе СКЯ изготавливают из AlGaAs/GaAs, InGaAs/AlGaAs, то для создания приборов на их основе подходит технология, давно отработанная для производства транзисторов. В результате сегодня на их основе созданы матрицы формата 64×480 [1]. Технологии, используемые при выращивании СКЯ, в частности газофазная эпитаксия, в том числе из металлоорганических соединений, обеспечивают высокую однородность параметров материала по площади пластины, что в свою очередь позволяет получить достаточно высокую однородность фотоэлектрических параметров СКЯ-матриц. Технологичность СКЯ делает их значительно дешевле аналогов на основе узкозонных материалов.

Для более длинноволнового диапазона (8—12 мкм) наряду с традиционными фотоприемниками на основе HgCdTe и примесным кремнием эффективным в использовании оказываются также МФПУ на основе СКЯ. Они обладают теми же достоинствами, что и для диапазона 3—5 мкм.

HgCdTe-фотоприемники длинноволнового диапазона имеют довольно однородную спектральную характеристику в области 8—12 мкм, их охлаждают, как правило, до 77 К. Высокая квантовая эффективность таких фотоприемников позволяет достигать температурного разрешения в сотые доли градуса. Однако высокая стоимость и повышенная чувствительность к различным внешним воздействующим факторам делают проблематичными и создание фотоприемников большого формата, и возможность практического их использования.

Фотоприемники на основе примесной фотопроводимости для любого спектрального диапазона обладают более низкой рабочей температурой, обеспечивающей работу в режиме ограничения фоном, по сравнению с фотоприемниками на основе собственной фотопроводимости. Однако

применительно к материалам с собственной фотопроводимостью, фоточувствительным в диапазоне 8—12 мкм (HgCdTe и др.), они обладают низким значением темновых токов при достаточном охлаждении фотоприемника. Поэтому они могут быть эффективны при больших временах накопления.

Выбор примесного фоточувствительного полупроводника ограничен величиной энергии активации в крайне узком диапазоне  $\sim 0,10$  эВ. Примесь должна иметь хорошую растворимость в основном полупроводнике (не менее  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>), иметь малый коэффициент диффузии и т. д. Кроме того, сам полупроводник должен быть очень высокого качества в отношении степени очистки от посторонних неконтролируемых (фоновых) примесей, а также желательно иметь на нем развитую планарную технологию. С учетом этого определенным интересом может представлять Si:Ga (Si:Te, Si:Se и т. д.). Этот материал обладает рядом достоинств: он имеет выгодную спектральную характеристику (ее максимум находится в пределах рабочего спектрального диапазона), высокую растворимость галлия в кремнии, возможность введения примеси различными способами как в расплав, так и в эпитаксиальные слои, достаточно хорошие время жизни  $\tau$  и подвижность  $\mu$  носителей заряда, что связано с высокой степенью очистки кремния. Галлий обладает также очень низким коэффициентом диффузии в кремнии, что позволяет безболезненно использовать в технологии термические операции, например окисление кремния. Существенными недостатками примесных фоточувствительных полупроводников, ограничивающих возможность их использования, являются низкие значения квантовой эффективности.

При использовании в качестве материала фотоприемных матриц таких полупроводников как твердый раствор CdHgTe либо полупроводниковых соединений InAs, InSb и подобных, а также Si, легированного примесями с энергией активации, соответствующей заданному спектральному диапазону фоточувствительности, в составе МФПУ применяются кремниевые мультиплексоры. Формат матриц по данной технологии ограничен точностью процесса сборки и величиной механических напряжений из-за сопряжения материалов с различными коэффициентами теплового расширения. В этой связи представляет интерес создание МФПУ на основе материалов с близкими значениями коэффициентов теплового расширения, например на основе GaAs и твердого раствора AlGaAs. Для кремниевых мультиплексоров оптимальным является использование кремниевых же примесных МФПУ. Для МФПУ на основе СКЯ (соединения AlGaAs/GaAs, InGaAs/AlGaAs-GaAs)

оптимальным материалом для создания мультиплексора является GaAs.

Следует отметить, что помимо задаваемого спектрального диапазона, ключевыми параметрами МФПУ являются абсолютная величина фоточувствительности, величина пороговой мощности, динамический диапазон. Значения указанных параметров определяются в значительной степени величиной емкости элементарной ячейки, соответствующей пикселю МФПУ, и соотношением времени накопления и постоянной времени заряда этой емкости [2, 5, 6, 9]. Линейные приближения в характеристиках могут быть реализованы для  $t < \tau_c$  при условии

$$Q \ll Q_{\max},$$

где  $t$  — время накопления заряда;

$\tau_c$  — постоянная времени накопительной ячейки пикселя МФПУ;

$Q_{\max}$  — максимальное значение заряда в накопительной ячейке.

Взаимосвязь между пороговой мощностью, чувствительностью и  $Q_{\max}$  для линейного участка свет-сигнальной характеристики можно определить соотношением

$$S_v \ll \frac{Q_{\max}}{P_{th}},$$

где  $S_v$  — фоточувствительность;

$P_{th}$  — пороговая мощность.

Превышение времени заряда  $t$  этой постоянной величины  $\tau_c$  приводит к возрастанию флуктуационных шумов, ограничению динамического диапазона свет-сигнальной характеристики, снижению чувствительности.

В той связи в отличие от структур на основе HgCdTe и узкозонных полупроводников в СКЯ возможна конструктивная (за счет изменения числа квантово-размерных слоев) реализация контролируемого регулирования величины емкости элементарной ячейки.

Таким образом, использование соединений AlGaAs/GaAs, InGaAs/AlGaAs-GaAs позволяет создавать МФПУ на основе структур с квантовыми ямами, обладающих технологически управляемой фоточувствительностью, динамическим диапазоном, величиной пороговой мощности в спектральном диапазоне от  $\sim 2,5$  до 12 мкм, а также конструктивно реализовать в них режим двух-спектральной (в перспективе многоспектральной) регистрации входных изображений полей яркости. Учитывая, что GaAs является вполне приемлемым материалом для создания эффективных мультиплексоров, можно считать, что существуют опти-

мистические перспективы для создания на основе СКЯ широкоформатных МФПУ, обладающих качественно более высокими характеристиками, чем на основе структур из узкозонных либо примесных полупроводников.

#### Л и т е р а т у р а

1. Филачёв А. М., Пономаренко В. П., Таубкин И. И., Ушакова М. Б. Инфракрасные матрицы и тенденции их развития// Прикладная физика. 2003. № 1. С. 105.
2. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. Л. Кн.: Источники и приемники излучения. — С.-Петербург: Политехника. 1991. — 240 с.
3. Васильев В., Голенков А. Г., Дворецкий С. А., Есеев Д. Г. и др. Фотоприемники на основе гетероэпитаксиальных слоев CdHgTe, для среднего и дальнего ИК-диапазонов// Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 6.

4. Timothy F., Thomas E. et al. A high performance 30 TDI scan reversible MWIR InSb hybrid scanning array on focal plane dynamicrange compression// Pros. SPIE. 1992. V. 1685. P. 296—304.

5. Nelson M., Jonson J., Ljmheim T. General noise processes in hybrid infrared focal plane arrays// Optical engineering. 1991. V. 30. № 11. P. 1682—1700.

6. Hite Y. Comparison of NETD Performance of Staring and partial-scanning infrared focal plane arrays// Infrared Phys. 1989. V. 29. № 6. P. 971—984.

7. Haining A. Use of two-dimensional infrared detector array in TDI mode// Pros. SPIE. 1992. V. 1191. P. 270—274.

8. Timothy F. A high performance 30 TDI scan reversible MWIR InSb hybrid scanning array// Ibid. 1992. V. 1685. P. 117—126.

9. Голубь Б. И., Гусев А. Н. Информационные возможности приемников излучения// Тепловидение. — М., 2002. № 14. С. 14—28.

10. Акимов В. М. и др. Матричное фотоприемное устройство на основе InSb форматом 128×128 элементов// Прикладная физика. 1999. № 3.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## Large-format photodetective assemblies based on IR focal plane arrays

A. V. Boroshnev

Kometa Central Research Institute, Moscow, Russia

*Consideration is made to a state and problems of perfection of photodetective assemblies based on IR focal plane arrays.*

УДК 621.384.3:536.3

## Требования к перспективным фотоприемным устройствам ИК-диапазона

Ю. И. Белоусов

Филиал ФГУП «ЦНИИ "Комета"» — "Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения", С.-Петербург, Россия

*Рассмотрены проблемы выработки облика нового поколения фотоприемных устройств (ФПУ) и создания системы параметров, необходимой и достаточной для исчерпывающей характеристики современных и перспективных ФПУ. Одной из существенных черт облика ФПУ нового поколения является способность оперативного изменения их характеристик для обеспечения адаптации ИК-приборов к условиям наблюдения не только по времени экспозиции, но и по спектральным, поляризационным и другим характеристикам. Предложено приступить к выработке современной единой системы параметров ФПУ и методик их измерения.*

Цель настоящей работы — вынести на обсуждение проблемы создания ФПУ нового поколения, облик которых определяет облик перспективных инфракрасных приборов (ИКП).

В соответствии с местом и ролью ФПУ как ключевого функционального узла ИКП, развитие ФПУ должно иметь опережающий характер как по

времени реализации, так и в части выработки технической идеологии облика перспективных ФПУ. С позиций разработчика ИКП, т. е. потребителя ФПУ, на первый план выделяются две проблемы, связанные с развитием ИК-техники и решение которых возможно лишь при объединении усилий разработчиков и потребителей ФПУ. Эти пробле-