

## ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 623-1/-8, 623-4, 519.876.5

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЁПЛОЙ АПЕРТУРНОЙ ДИАФРАГМЫ В ОХЛАЖДАЕМЫХ МАЛОФОРМАТНЫХ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЁМНИКАХ

© П. П. Добровольский, И. И. Кремис, С. В. Хрящев,  
А. Р. Новоселов, С. М. Чурилов

*Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1  
E-mail: porfir@ngs.ru*

Численным моделированием и экспериментально исследованы конструкции тёплой (неохлаждаемой) апертурной диафрагмы в газонаполненном криостате с матричным фотоприёмником, чувствительным в инфракрасном спектральном диапазоне. Показано, что при применении выбранной конструкции тёплой апертурной диафрагмы матричный фотоприёмник форматом  $384 \times 288$  пикселей охлаждается жидким азотом до рабочих температур (85 К) за время менее чем 40 с, а дроссельным микроохладителем — за 15 с при сохранении стандартной чувствительности фотоприёмников на основе структур кадмий—ртуть—теллур (КРТ).

*Ключевые слова:* апертурная диафрагма, криостат, матричный фотоприёмник, фотоприёмник на основе структур кадмий—ртуть—теллур.

DOI: 10.15372/AUT20200613

В ряде отраслей промышленности для техники в первую очередь военного применения требуются высокочувствительные быстро охлаждаемые фотоприёмные устройства (ФПУ). Известно, что минимизация времени быстрого охлаждения является трудной задачей. На сегодняшний день для охлаждения ФПУ до рабочих температур менее чем за 10 с используют дроссельные микрокриогенные системы. Ещё в 1968 г. фирмой «Химатик» (Англия) был разработан быстродействующий конический дроссельный микроохладитель [1]. Время выхода охладителя на рабочий режим составляло около 2 с, а охлаждение самого фотоприёмника — 4 с. Для ещё более быстрого охлаждения (почти в 2 раза) применяют охлаждаемый столик с фторопластовым покрытием [2], также уменьшает время охлаждения применение в качестве хладагента смеси газов [3].

Для выполнения ряда задач достаточно иметь одиночный приёмник теплового излучения, но для селекции целей требуется многоэлементный фотоприёмник [4]. При использовании многоэлементных фотоприёмников увеличивается масса охлаждаемых деталей и, следовательно, повышается время охлаждения таких фотоприёмников до рабочих температур, так как время охлаждения определяется массой охлаждаемых деталей, их теплоёмкостью и теплопроводностью.

Для быстрого охлаждения фотоприёмников используют газонаполненные криостаты [1]. Они значительно проще в изготовлении, чем вакуумные криостаты, однако обладают большими теплопритоками. Для компенсации этого недостатка применяют дроссельные системы охлаждения с избыточной хладопроизводительностью. В этом случае большие теплопритоки не влияют на время охлаждения фотоприёмника. На рис. 1 представлен

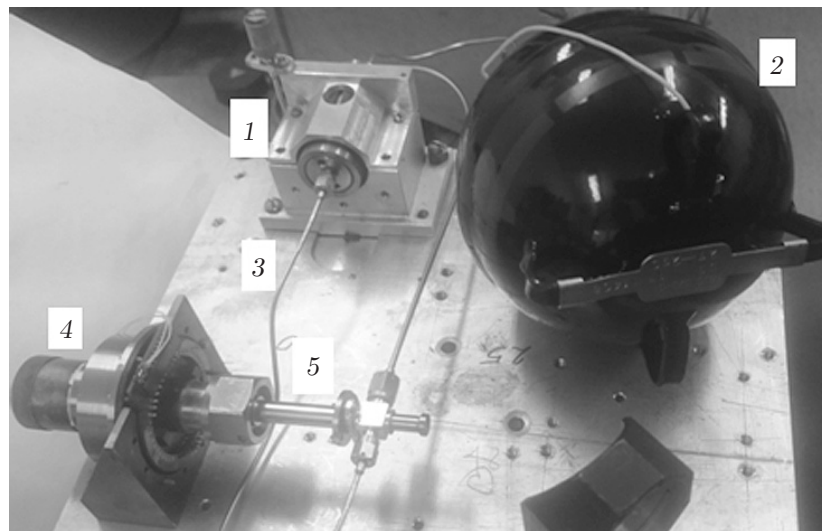


Рис. 1

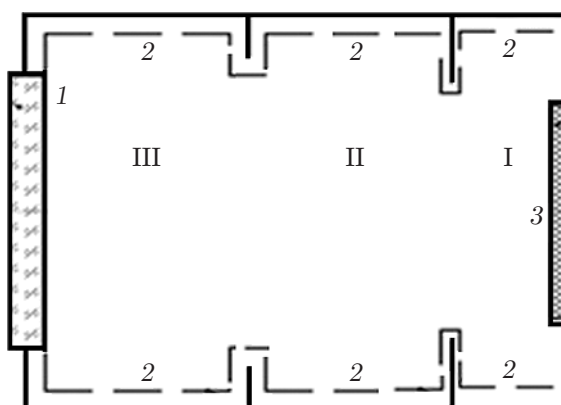


Рис. 2

типовой стенд ФПУ с газонаполненным криостатом и дроссельной системой охлаждения. Обозначения: 1 — фильтр очистки газа, 2 — баллон с хладагентом, 3 — соединительные газопроводы, 4 — газонаполненный криостат с матричным фотоприёмником (МФ), 5 — микротеплообменник.

Кроме самого МФ, в криостат устанавливается апертурная диафрагма сложной конструкции для уменьшения паразитного фона [5]. В [6–8] дано описание различных типов апертурных диафрагм.

Охлаждение составных апертурных диафрагм, имеющих сложную конструкцию, увеличивает время выхода МФ на рабочий режим, так как время, необходимое для охлаждения МФ, зависит от выхода дроссельного холодильника на рабочий режим и времени охлаждения им пьедестала в криостате:

$$T_{\text{охл}} = T_{\text{х}} + T_{\text{о.п}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{охл}}$  — полное время охлаждения,  $T_{\text{х}}$  — время выхода дроссельного холодильника на рабочий режим, а  $T_{\text{о.п}}$  — время охлаждения пьедестала с МФ.

На рис. 2 представлена схема составной апертурной охлаждаемой диафрагмы, устанавливаемой в криостате. Она состоит из апертурной и двух вспомогательных диафрагм (blend). Первая вспомогательная диафрагма (I) непосредственно окружает МФ, следующая вспомогательная диафрагма (II) уменьшает попадание отражённого от стенок диафраг-

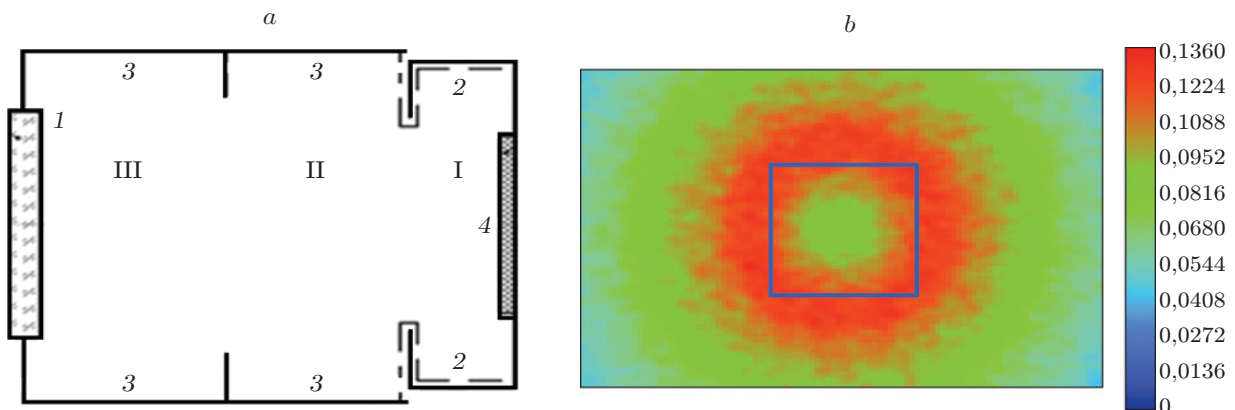


Рис. 3

мы светового потока на МФ. Апертурная диафрагма (III) — ограничивает световой поток от рассматриваемого объекта. Обозначения на рисунке: 1 — световой фильтр; 2 — покрытие, поглощающее излучение; 3 — охлаждаемый МФ. Апертурная диафрагма имеет относительное отверстие 1 : 2 и поле зрения около  $60^\circ$ . Расстояние между фильтром и фотоприёмником составляет около 20 мм.

Охлаждение диафрагмы осуществляется от пьедестала, на котором расположен МФ. Скорость охлаждения зависит от разницы температур между пьедесталом и диафрагмой, её сечением и коэффициентом теплопроводности. Диафрагма имеет малую площадь сечения и плохой тепловой контакт из-за того, что большая часть площади охлаждаемого пьедестала занята токоподводящими проводниками, соответственно она будет охлаждаться медленнее МФ, что увеличивает время выхода ФПУ на рабочий режим. Если разорвать тепловой контакт между вспомогательными диафрагмами I и II, то части II и III не будут охлаждаться, а время выхода на рабочий режим ФПУ сократится, такие диафрагмы можно назвать «тёплыми».

Целью данной работы является исследование экспериментальным и расчётным путём возможности охлаждения матричных фотоприёмных устройств форматом  $100 \times 100$  пикселей за время менее 10 с при сохранении стандартной чувствительности КРТ фотоприёмника. Для достижения поставленной цели исследовано влияние замены холодной апертурной диафрагмы МФ тёплой и определение её наиболее оптимальной конструкции.

Исследования были проведены на МФ производства Института физики полупроводников СО РАН на основе матрицы гетероэпитаксиальных фотодиодов КРТ форматом  $384 \times 288$  пикселей [9] и быстродействующего мультиплексора, позволяющего работать в режиме окна. Газонаполненный криостат с МФ мог охлаждаться как жидким азотом, так и дроссельным микроохладителем. Теплоприток криостата составлял около 1,5 Вт при массе охлаждаемых деталей не более 6 г. Для уменьшения паразитного фона на МФ применялась охлаждаемая апертурная диафрагма, масса которой вместе со спектральным фильтром составляла около 3 г.

Для исследований были изготовлены одна охлаждаемая и две тёплые диафрагмы.

Конструкции тёплых диафрагм были выбраны после численного моделирования с помощью программы Zemax. Анализировался ход лучей, отражённых от внутренних поверхностей диафрагм. Выбранные конструкции диафрагм с наименьшим фоном на площади  $100 \times 100$  пикселей в плоскости МФ представлены на рис. 3, а и 4, а. Внутренняя поверхность тёплых диафрагм зеркальна. На рис. 3, б и 4, б показаны результаты численного моделирования распределения только фонового излучения, отражённого от стенок диафрагмы на площади, соответствующей матрице  $384 \times 288$  элементов. Конструкция диафрагмы имеет цилиндрическую форму. Квадрат в центре изображения включает в себя

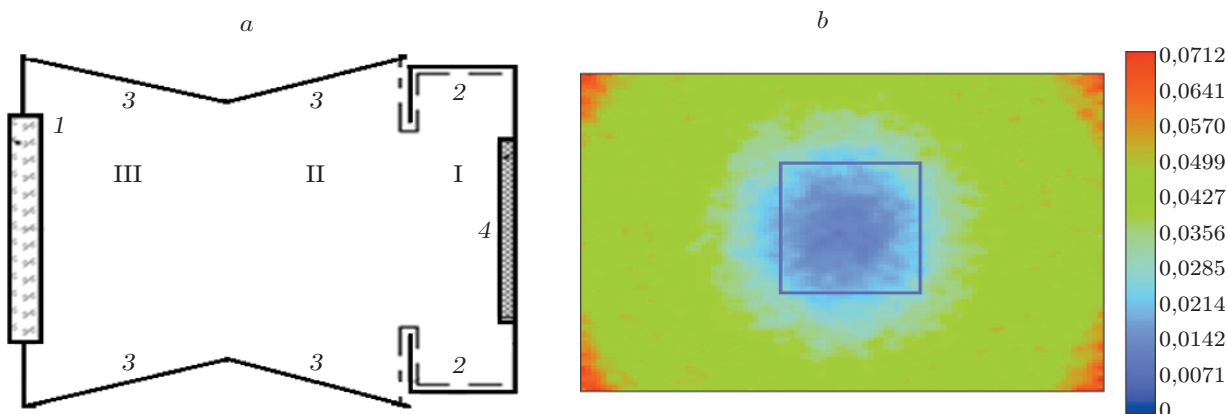


Рис. 4

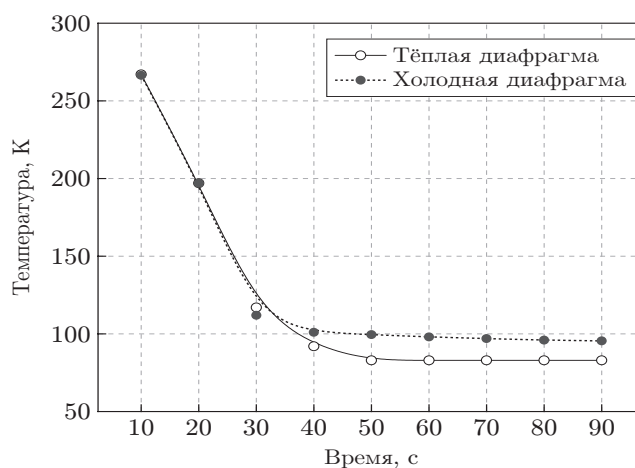


Рис. 5

100 × 100 элементов. Значение шкал указано в Вт/см<sup>2</sup> для плоскости фотоприёмника (при условии, что через диафрагму проходит излучение 1 Вт).

На рис. 3, *a* представлена схема цилиндрической тёплой диафрагмы. Обозначения на рисунке: 1 — световой фильтр; 2 — поглощающее излучение покрытие; 3 — зеркальная поверхность; 4 — охлаждаемый МФ. На рис. 4, *a* приведена схема гофрированной тёплой диафрагмы. Обозначения на рисунке те же, что и на рис. 3, *a*.

Численное моделирование показало, что у диафрагмы (см. рис. 4, *b*) в центре поля уровень фонового излучения около 0,01 Вт/см<sup>2</sup>, что на порядок ниже, чем у диафрагмы на рис. 3, *b* (0,1 Вт/см<sup>2</sup>).

Результаты сравнения времени выхода МФ в газонаполненном криостате, охлаждаемом жидким азотом с холодной (стандартная конструкция на рис. 2) и тёплой апертурными диафрагмами (см. рис. 3), представлены на рис. 5.

Исследована эквивалентная шуму разность температур (NETD) малоформатной части (100 × 100 пикселей) МФ при облучении его чёрным телом с разными апертурными диафрагмами. Для холодной диафрагмы NETD составила около 40 мК при времени накопления 1 мс. Для тёплой диафрагмы (конструкция на рис. 4) NETD около 30 мК при времени накопления в 0,1 мс и суммировании сигнала по 10 кадрам.

**Обсуждение результатов.** Экспериментально выяснено, что охлаждение холодной диафрагмы (см. рис. 5) можно разделить на два этапа: первый этап — быстрое охлаждение от комнатной до температур 120–100 К за время около 30–35 с, второй — медленное, порядка 1 мин до температуры 95 К. Для многих задач время выхода на рабочий режим в

30 с — приемлемая величина. Однако температура 120 К неприемлема, так как количество термогенерируемых носителей в матрице гетероэпитаксиальных КРТ фотодиодов будет превышать количество фотогенерированных носителей. При применении тёплой диафрагмы МФ за время около 40 с охлаждался жидким азотом до температуры 85 К. При охлаждении ФПУ с помощью дроссельного холодильника охлаждение МФ до 85 К уменьшилось до 15 с, время охлаждения для холодной диафрагмы 20 с, так как масса охлаждаемых деталей больше. Причина медленного охлаждения ФПУ с холодной диафрагмой обусловлена большим количеством подходящих к МФ электрических контактов, что снижало площадь теплового контакта диафрагмы к пьедесталу.

При уменьшении формата матрицы гетероэпитаксиальных фотодиодов КРТ до  $100 \times 100$  пикселей время охлаждения (1) составит менее 10 с, так как масса охлаждаемых деталей уменьшится приблизительно в 1,7 раза:

$$T_{\text{охл}} = (1с + 14с/1,7) < 10 \text{ с.}$$

Таким образом, нам удалось получить с тёплой диафрагмой стандартную чувствительность для фотоприёмника КРТ и показать, что для малоформатного ФПУ можно получить время охлаждения менее 10 с.

**Заключение.** Предложена конструкция тёплой диафрагмы, для которой фон отражённых от внутренних поверхностей диафрагмы лучей минимален для малоформатного МФ. Применение тёплой диафрагмы оптимальной конструкции в ФПУ уменьшает время выхода МФ на рабочий режим (85 К) с 1 мин 30 с (холодная диафрагма) до 40 с.

Показано расчётным путём, что применение тёплой диафрагмы для малоформатного МФ уменьшит время охлаждения ФПУ до 10 с и менее. Экспериментально подтверждено, что стандартная чувствительность фотоприёмников КРТ сохранилась.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stephens S.** Advanced desing of Joule-Thompson coolers for infrared detectors // Infrar. Phys. 1968. 8, N 1. P. 25–35.
2. **Кошкин В. К., Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Ярхо С. А.** Нестационарный теплообмен. М.: Машиностроение, 1973. 327 с.
3. **Алфеев В. Н., Никольский В. А., Ягодин В. М.** Дроссельные криогенные системы на многокомпонентных газовых смесях // Электронная техника. 1971. Сер. 15, вып. 1(3). С. 95–103.
4. **Щербин Р.** Головки самонаведения перспективных зарубежных управляемых ракет и авиабомб // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 4. С. 64–68.
5. **Pat. 2571171 RU C1.** ИК матричный фотоприёмник с охлаждаемой диафрагмой и способ изготовления диафрагмы /Л. Н. Хитирова, А. А. Лопухин, А. Н. Савостин, И. Г. Касаткин. Оpubл. 20.12.2015, Бюл. № 35.
6. **Pat. 5994702 US.** Method and apparatus for cold shielding /Th. H. Clynne, L. W. Bossert, J. P. Knauth, M. L. Robinso. Publ. 30.11.1999.
7. **Pat. 5225931 US.** System of reflective telescope baffles using conic sections of revolution /O. N. Stavroudis. Publ. 06.07.1993.
8. **Pat. 4820923 US.** Uncooled reflective shield for cryogenically-cooled radiation detectors /W. H. Wellman. Publ. 11.04.1989.
9. **Zverev A. V., Suslyakov A. O., Sabinina I. V. et al.** Photodetectors with  $384 \times 288$  matrix elements for the infrared range of 8–10 microns // Journ. Commun. Technol. Electron. 64, N 9. P. 1024–1029.

*Поступила в редакцию 27.04.2020*

*После доработки 19.06.2020*

*Принята к публикации 12.10.2020*