

## ФОТОПРИЕМНИК ДЛИННОВОЛНОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА С АНАЛОГОВЫМ РЕЖИМОМ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ И НАКОПЛЕНИЯ

© 2009 г. Ю. И. Завадский, канд. физ.-мат. наук; А. С. Скрылев, канд. техн. наук;  
Б. М. Хотянов, канд. техн. наук; В. В. Чернокожин, канд. техн. наук

Научно-производственное предприятие “Пульсар”, Москва

E-mail: pulsar@dol.ru

Описываются особенности конструкции и основные проблемы создания матричного прибора с зарядовой связью в составе глубокоохлаждаемого инфракрасного фотоприемника с аналоговой организацией режима временной задержки и накопления (ВЗН). Основные решаемые проблемы – тепловая разгрузка низкотемпературной ступени микрокриогенной системы и обеспечение возможности ВЗН-суммирования при двунаправленном сканировании.

**Ключевые слова:** ИК фотоприемник, матричный фотоприемник, прибор с зарядовой связью, режим временной задержки и накопления.

Коды OCIS: 040.1240, 040.1520, 040.3060.

Поступила в редакцию 08.07.2009.

### ВВЕДЕНИЕ

В НПП “Пульсар” разработана конструкция субматричного гибридного фотоприемника с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) формата  $16 \times N$ , обеспечивающего 16 шагов накопления. Фотоприемник представляет собой флип-чип-сборку субматрицы высокомомных резисторов из кремния, легированного галлием, с матричным мультиплексором, организующим в своей матричной секции на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС) аналоговый режим ВЗН. В одном из вариантов конструктивного исполнения приемник выполнен в виде отдельного модуля, предназначенного для сборки широкофотоматрной фокальной плоскости инфракрасного (ИК) фотоприемного устройства с оптической сшивкой полей изображения для систем дистанционного зондирования Земли из космоса.

Фоторезисторы на основе кремния с примесью галлия при температуре 25 К обладают спектральной чувствительностью в диапазоне 3–16,5 мкм и могут обеспечить работу фотоприемника в средневолновом и длинноволновом окнах прозрачности атмосферы. Наибольший интерес представляет фотоприемник длинноволнового ИК диапазона, квантовая эффективность которого может превышать 0,5 [1]. Расчетные значения пороговых характеристик при наличии охлаждаемой апертуры следующие. В средневолновом диапазоне

$D^* = 3 \times 10^{11}$  см Вт $^{-1}$  Гц $^{1/2}$  при апертурном отверстии  $D/F = 1:1.4$ . В длинноволновом диапазоне  $D^* = 1,2 \times 10^{11}$  и  $3 \times 10^{12}$  см Вт $^{-1}$  Гц $^{1/2}$  при  $D/F = 1:1.4$  и  $1:10$  соответственно. В последнем случае более резкое изменение величины  $D^*$  по сравнению с изменением относительного отверстия оптической системы связано с тем, что в реальных оптических системах с охлаждаемой апертурой фоновая нагрузка на многоэлементный фотоприемник из-за наличия аппаратного фона изменяется не пропорционально относительному отверстию, а более сильно.

Разработанная конструкция позволяет создать функциональный ряд модулей следующих форматов:  $16 \times (2 \times 32)$ ,  $16 \times 288$ ,  $16 \times 576$ ,  $16 \times 864$ . Указанные модули можно использовать в системах как с последовательно-параллельным, так и с параллельным сканированием. При разработке схемы, топологии и конструкции приемника пришлось решать ряд специфических задач. Основные решаемые проблемы – тепловая разгрузка низкотемпературной ступени микрокриогенной системы и обеспечение возможности ВЗН-суммирования при двунаправленном сканировании.

### Конструкция приемника

Рабочая температура фотоприемной части на основе кремния с примесью галлия в зависимости от интенсивности фона в криостате приемника находится в пределах 25–28 К. Одну из

основных проблем при разработке конструкции приемника составляют довольно значительные тепловыделения ПЗС-мультиплексора, в особенности его выходного регистра, работающего на высокой частоте. Поэтому в первоначально разработанной конструкции фотоприемника для тепловой разгрузки 2-й ступени микрокриогенной системы (МКС), имеющей температуру около 25 К и обладающей относительно небольшой хладопроизводительностью, выходной регистр на основе ПЗС был выполнен в виде отдельного кристалла и вынесен на 1-ю ступень охлаждения с температурой около 80 К, обладающую значительно большей хладопроизводительностью. Электрическое соединение с матричной секцией осуществлялось посредством одного или нескольких многодорожечных полиимидных кабелей, осуществляющих тепловую развязку между ступенями МКС.

Каждая строка фотоприемника топологически представляла собой билинейку, четные и нечетные полустроки которой располагались в шахматном порядке. Информация с них выводилась по отдельности и “спивалась” в одну строку во внешнем цифровом устройстве.

### **Особенности топологии и конструкции матричного мультиплексора**

При разработке усовершенствованной электрической схемы матричного мультиплексора, его топологии и конструкции решались следующие задачи:

- 1) эффективное использование площади матрицы,
- 2) минимизация тепловыделений мультиплексора и теплопритоков на 2-ю ступень охлаждения,
- 3) обеспечение возможности двунаправленного сканирования.

Одна из особенностей электрической схемы матричной секции мультиплексора, имеющей строчно-кадровую организацию считывания, заключается в том, что заряды от соседних столбцов нечетных и четных фоточувствительных элементов (ФЧЭ) вводятся в соседние биты одного и того же “вертикального” регистра сдвига. Схематично это показано на рисунке, где изображены два соседних вертикальных регистра матричного мультиплексора. Для наглядности четные ФЧЭ и соответствующие им биты регистра закрашены серым цветом. Таким образом, один вертикальный регистр обслуживает одновременно два столбца матрицы. Ввод

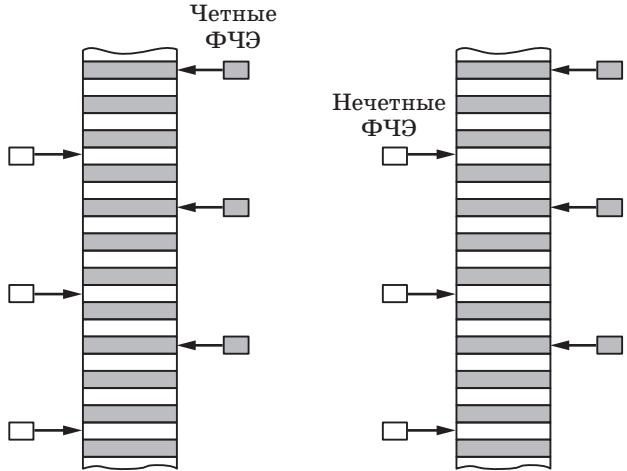


Схема ввода зарядов с матрицы ФЧЭ в “вертикальные” регистры сдвига матричной секции мультиплексора.

в вертикальные регистры зарядов от всех ФЧЭ-столбцов производится одновременно, один раз за два периода (т. е. на два бита) сдвига зарядов в вертикальных регистрах. При этом заряд нечетного ФЧЭ вводится в нижний из пары битов вертикального регистра, а заряд от четного ФЧЭ – в верхний бит из той же пары. В результате все биты каждого вертикального регистра оказываются занятыми зарядовыми пакетами, представляющими собой суммы зарядов от ФЧЭ ступеней ВЗН, уже пройденных соответствующими строками изображения (это частичные зарядовые суммы). При этом частичные суммы зарядов от столбца нечетных и столбца четных ФЧЭ чередуются друг с другом.

Кроме того, что использование одного регистра для переноса информации одновременно с двух столбцов позволяет создать более компактную топологию матричной секции мультиплексора, этим приемом достигаются и другие цели. Поскольку на выходе каждого вертикального регистра имеется устройство для передачи заряда по кабелю в выходной регистр, то число металлических дорожек на кабеле, связывающих обе секции мультиплексора, сокращается вдвое по сравнению с вариантом, когда каждый регистр обслуживает только один столбец. Информация о нечетных и четных полустроках изображения передается по каждой дорожке “по очереди”. Сокращение вдвое числа проводящих дорожек на кабеле обеспечивает снижение теплопритоков по кабелю с более высокотемпературной первой ступени охлаждения на вторую ступень.

Электрическая схема расположенного на отдельном кристалле выходного регистра также имеет свои особенности, направленные на решение сформулированных выше задач. Во-первых, выходной регистр с  $N/2$  входами заменен двумя расположенными на едином кристалле выходными регистрами вдвое меньшей длины ( $N/4$  входов), имеющими свои отдельные выходные схемы. Правый выходной регистр соединен дорожками кабеля с выходами вертикальных регистров правой половины матрицы и обеспечивает сдвиг зарядов вправо, а левый соединен с выходами левой половины матрицы и сдвигает заряды влево. Применение двух выходных регистров вместо одного позволяет вдвое снизить тактовую частоту вывода информации из мультиплексора. При этом снижаются тепловыделения в этом кристалле и улучшаются условия переноса зарядов в ПЗС.

Второй особенностью электрической схемы выходного регистра является наличие в нем двух битов на каждый вертикальный регистр матричной секции. В первоначальном варианте схемы выходного регистра это было вызвано необходимостью обеспечения высокой эффективности переноса в регистре и связанным с этим ограничением размера одного бита в направлении переноса. Зарядовые пакеты из каждого вертикального регистра вводились сразу в два соседних бита выходного регистра, а на конце его, перед поступлением на схему считывания, обе половинки зарядового пакета вновь суммировались. Нечетные и четные полустроки выводятся при этом по очереди и затем “спиваются” во внешнем “спецвычислителе”.

В усовершенствованном варианте схемы выходного регистра введены специальные электроды (затворы), обеспечивающие поступление в “четные” и “нечетные” биты выходного регистра зарядов, накопленных соответственно в “четных” и “нечетных” столбцах матрицы. При этом в выходном регистре формируется полная строка зарядовых пакетов, соответствующих строке изображения. В этой схеме отсутствует необходимость в суммировании половинок зарядов на выходе регистра и в последующем “собирании” четной и нечетной полустрок во внешнем

“спецвычислителе”, а кроме того, уменьшается вдвое частота работы регистра. Последнее обстоятельство само по себе полезно как в отношении эффективности переноса зарядов в регистре, так и в отношении тепловыделений в нем.

Снижение тепловыделений в выходном регистре особенно полезно в так называемом “совмещенном” варианте мультиплексора, в котором предполагается исполнение обеих секций мультиплексора (матричной и выходного ПЗС-регистра) в виде единого кристалла. В этом варианте отсутствует кабель и, соответственно, процедура передачи заряда по нему. Но при этом существенно увеличивается тепловая нагрузка на 2-ю ступень охлаждения МКС. В этом отношении большую перспективу имеет применение выходного регистра, изготовленного на основе КМОП-технологии. При этом эффективность переноса заряда не играет роли, а тепловыделения незначительны (менее 1 мВт при длине строки в 288 элементов). Применение КМОП-выходного регистра позволяет создать компактный модуль для длинноволнового ИК диапазона.

Еще одно усовершенствование матричной секции позволяет обеспечить двунаправленный режим считывания оптической информации. Суть его в создании с обоих концов вертикальных регистров выходных диодных областей, попарно связанных между собой металлической шиной. Независимо от направления переноса заряда информационный сигнал попадает на контактную площадку, связанную с соответствующим входом выходного регистра. Это усовершенствование позволяет, в частности, использовать фотоприемник с режимом ВЗН в тепловизионной аппаратуре при “треугольном” режиме сканирования наблюдаемого пространства, а также в космических системах наблюдения, позволяя проводить съемку в режиме ВЗН при различной ориентации спутника.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Chernokozhin V.V., Zavadskii Yu.I., Pelezneva I.A., Zinis K.A., Enisherlova K.L. Hibrid multielement cooled CCD-based photodetector with increased quantum efficiency for the longwave infrared range // Proc. SPIE. 1996. V. 2790. P. 14–16.