

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

2007, том 43, № 4

УДК 535.247.049.7 : 621.383.52

**МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ГИБРИДНЫЕ ИК ФПУ
НА ОСНОВЕ ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ.
Ч. I. ПРИНЦИПЫ СЧИТЫВАНИЯ СИГНАЛОВ**

**И. И. Ли, В. М. Базовкин, Н. А. Валишева, А. А. Гузев,
В. М. Ефимов, А. П. Ковчавцев, Г. Л. Курышев, В. Г. Половинкин,
А. С. Строганов, А. В. Царенко**

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: irlamlee@isp.nsc.ru*

Рассмотрены вопросы использования приборов с зарядовой инжекцией в гибридных инфракрасных фотоприемных устройствах.

Введение. В 70–80-е годы XX века интенсивно велись работы по созданию интегральных инфракрасных фотоприемных устройств (ИК ФПУ) на основе структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП). Прежде всего интерес к МДП-структурам объяснялся желанием разработать многоэлементные ИК ФПУ в интегральном исполнении на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) и приборов с зарядовой инжекцией (ПЗИ), аналогичных кремниевым ПЗС-матрицам видимого диапазона. Однако, несмотря на определенные достижения, не удалось реализовать требуемое качество границы раздела на полупроводниках A_3B_5 , A_2B_6 и тройных растворах A_3B_5 , а также найти конструктивные решения, позволяющие реализовать в интегральном исполнении двумерные матрицы на основе элементов ПЗИ размером больше чем 128×128 элементов [1–3].

С освоением технологии сборки кристаллов на индиевых микростолбах основным типом многоэлементных фотоприемных модулей стали гибридные ИК ФПУ, которые совместили достоинства квантовых фотоприемников на узкозонных материалах с высоким качеством кремниевых устройств считывания [4, 5].

Необходимо отметить, что даже при успешном решении всех технологических и технических проблем создания ПЗС и ПЗИ на узкозонных материалах тепловизионные системы на основе интегральных ФПУ в ИК-диапазоне (5–12 мкм) имели бы более низкое температурное разрешение (NETD) по сравнению с гибридными ИК ФПУ. Причина этого – меньшая зарядовая емкость МДП-структур в режиме неравновесного обеднения на узкозонных полупроводниковых подложках по сравнению с кремниевыми устройствами считывания. Поэтому основное внимание стали уделять разработке кремниевых устройств считывания фотосигналов с фотодиодов и технологии

изготовления фотодиодов на узкозонных полупроводниковых материалах InGaAs, InSb, HgCdTe во всем спектральном диапазоне 2–12 мкм [5–10].

Цель данной работы – выбрать оптимальный спектральный диапазон для гибридных многоэлементных ИК ФПУ на основе элементов ПЗИ, разработать схемотехнические решения построения устройств считывания и показать, что в коротковолновом диапазоне до 3,5 мкм элементы ПЗИ позволяют реализовать ИК ФПУ, работающие в режиме ограничения флуктуациями фонового излучения, и тепловизионные системы с NETD, близким к теоретическому пределу. Преимущества фотоприемников ПЗИ перед фотодиодами заключаются в следующем:

- упрощается технология изготовления фотоприемных элементов: из технологического маршрута исключается одна из наиболее сложных технологических операций – формирование $p-n$ -перехода;

- работа фотоприемных элементов ПЗИ с внутренним накоплением фотосигнала дает дополнительные возможности построения кремниевых устройств считывания.

Зависимости температурного разрешения тепловизионных систем от спектрального диапазона и зарядовой емкости. Важную роль в выборе спектрального диапазона ИК ФПУ играют уровень фонового излучения и контраст изображения (рис. 1) [11, 12]. Из сравнения кривых 1–3 видно, что контраст сцены монотонно уменьшается с увеличением длины волны. Для $\lambda = 3$ мкм контраст выше почти в 2 раза, чем для $\lambda = 5$ мкм, и более 3 раз, чем для $\lambda = 10$ мкм, в температурном диапазоне 300–500 К абсолютно черного тела (АЧТ). Зарядовая емкость InAs элементов ПЗИ $\approx 4 \cdot 10^6$ электронов (при типичной площади элемента 10^{-5} см²). Как видно из кривых 4–6, только в коротковолновом спектральном диапазоне (приблизительно до 3,5 мкм) чис-

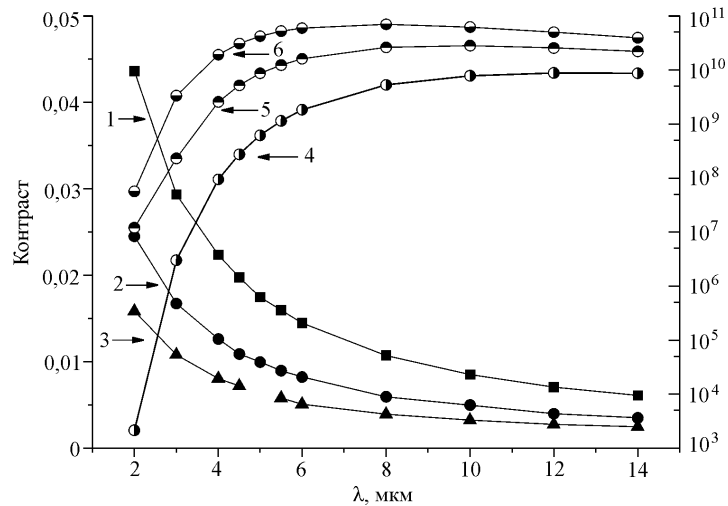


Рис. 1. Зависимости контраста изображения (левая ось, кривые 1–3 при изменении температуры фона на 1° в спектральной полосе $\Delta\lambda = 1$ мкм) и количества квантов света, падающих на фотоприемник, (правая ось, кривые 4–6) от длины волны и температуры АЧТ в качестве параметра при времени накопления 20 мс, апертурном угле $\theta/2 = 30^\circ$ и площади фотоприемника $1 \cdot 10^{-5}$ см². Кривые 1, 4 – $T_{\text{АЧТ}} = 300$ К; 2, 5 – 400 К; 3, 6 – 500 К

ло фотонов при комнатных температурах фона сравнимо или меньше величины $4 \cdot 10^6$ электронов.

Для тепловизионных систем (тепловизоров) на основе многоэлементных фотоприемников наиболее информативным параметром является не обнаружительная способность, а эквивалентная радиационному шуму разность температур NETD [5, 13].

Численные расчеты NETD для тепловизоров в зависимости от длины волны и зарядовой емкости устройства считывания из работы [14] приведены на рис. 2. Кривые 1 и 2 соответствуют зависимостям NETD(λ) «идеальных» тепловизоров [13]. Под идеальным понимается тепловизор, в котором ИК ФПУ имеет обнаружительную способность, ограниченную лишь флуктуациями фонового излучения, а устройства считывания – достаточную зарядовую емкость, обеспечивающую накопление фотосигнальных зарядов в течение всего времени кадра.

Характер зависимостей NETD(λ) кардинально меняется, если оценки делать при условии ограниченной зарядовой емкости устройства считывания. Зарядовая емкость, равная $2 \cdot 10^6$ электронов (кривая 3), соответствует зарядовой емкости элементов ПЗИ на InAs, InSb, а зарядовая емкость $8 \cdot 10^7$ электронов (кривая 5) есть максимальная зарядовая емкость кремниевых устройств считывания [8]. Как видно, для кривой 3 (при $\lambda \geq 3,2$ мкм) и для кривой 5 (при $\lambda \geq 5$ мкм) NETD тепловизоров будет полностью определяться зарядовой емкостью кремниевых устройств считывания. В отличие от идеальных в реальных тепловизорах с ограниченной зарядовой емкостью устройств считывания с ростом λ NETD ухудшается. В работах [8, 15] приведены величины NETD для двух ИК ФПУ, реализованных с идентичными устройствами считывания с зарядовой емкостью $5 \cdot 10^7$ электронов. Для ИК

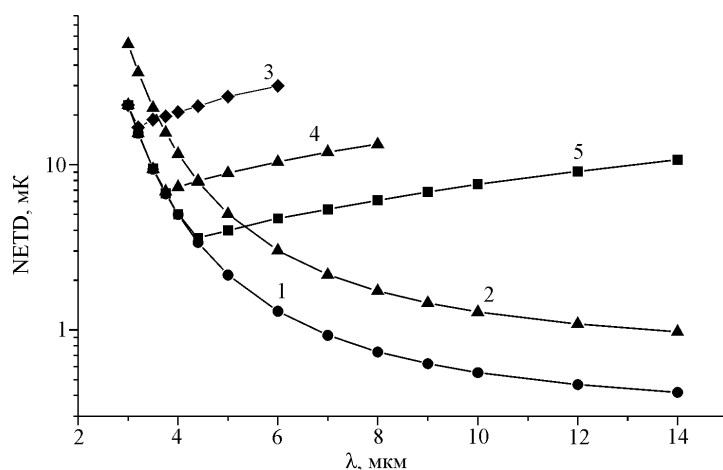


Рис. 2. Расчетные зависимости NETD от длины волны и зарядовой емкости устройства считывания в качестве параметра: кривая 1 соответствует апертуре 30° ($2F/D = 10$), кривая 2 – апертуре 60° ($2F/D = 3$). Время накопления равно времени кадра (20 мс). Для кривых 3–5 NETD рассчитывалось при условии ограниченной зарядовой емкости устройства считывания: кривая 3 – $2 \cdot 10^6$, кривая 4 – $2 \cdot 10^7$ и кривая 5 – $8 \cdot 10^7$ электронов при апертуре 60° ($2F/D = 3$). Площадь фотоприемника $7 \cdot 10^{-5}$ см²

ФПУ на основе фотодиодов InSb с $\lambda_{гр} \sim 5,6$ мкм NETD равно 5,5 мК, тогда как для ИК ФПУ на основе HgCdTe с длинноволновой границей $\lambda_{гр} = 10,3$ мкм NETD равно 13 мК. Эти данные хорошо соответствуют расчетным зависимостям (см. рис. 2, кривые 4, 5). Для крайних правых точек кривых 3–5 максимальное время накопления (≤ 30 –100 мкс), определяемое зарядовой емкостью устройства считывания, становится сравнимо или меньше времени считывания одной строки. В этом случае матричные ИК ФПУ не дают преимуществ по температурному разрешению в сравнении с ИК ФПУ на основе сканируемых фотоприемников линейчатого типа.

Из приведенного анализа следует, что минимальное NETD тепловизионной системы достигается в том спектральном диапазоне, в котором уровень фонового излучения соответствует зарядовой емкости при времени накопления, равном времени кадра. Для фотоприемников ПЗИ при комнатных температурах фона это условие выполняется в довольно узком спектральном диапазоне 2,9–3,5 мкм. Сдвиг спектральной чувствительности в коротковолновую область с 3 до 2 мкм приводит к уменьшению числа регистрируемых фотонов более чем на три порядка (см. рис. 1, кривая 4) и соответственно ухудшению NETD тепловизора. Сдвиг спектра чувствительности тепловизора в длинноволновую область в условиях ограниченной зарядовой емкости элементов ПЗИ (см. рис. 2, кривая 3) также заметно ухудшает температурное разрешение. Таким образом, оптимальным спектральным диапазоном для реализации гибридных ИК ФПУ на основе элементов ПЗИ является диапазон $\sim (2,9$ – $3,5)$ мкм. В этом спектральном диапазоне элементы ПЗИ можно реализовать на подложках InAs и HgCdTe.

Принципы считывания фотосигналов с фотоприемников ПЗИ. Некоторые схемотехнические решения, применяемые для считывания сигналов с фотодиодов, могут быть использованы и в гибридных ИК ФПУ на основе элементов ПЗИ. Схема потенциального считывания с фотодиодов показана на рис. 3, *a*, с элемента ПЗИ – на рис. 3, *b*, схема с истоковым повторителем (простейший вариант) дана на рис. 3, *c* [4, 16]. Недостатком потенциального считывания с элементов ПЗИ в сравнении со считыванием с фотодиодов является то, что коэффициент преобразования фотосигнала (фотосигналом для элемента ПЗИ является изменение поверхностного потенциала Y_s) в напряжение на входе усилителя снижается пропорционально отношению емкостей $C_0/(C_0 + C_1)$, где C_1 – входная емкость кремниевое устройства считывания, C_0 – емкость затвора элемента ПЗИ. Поэтому чувствитель-

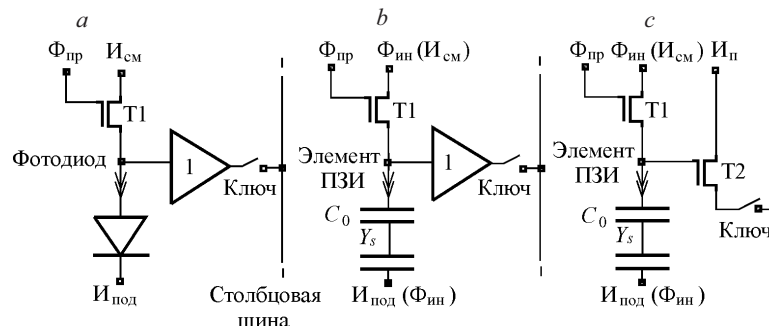


Рис. 3. Принципиальная схема устройства с потенциальным считыванием и накоплением фотосигналов: в фотодиоде (*a*), в фотоприемнике ПЗИ (*b*), вариант усилителя с истоковым повторителем (*c*)

ность ИК ФПУ на основе элементов ПЗИ с потенциальными устройствами считывания ниже чувствительности ИК ФПУ на основе фотодиодов. Кроме того, для считывания с элементов ПЗИ на сток транзистора Т1 одновременно с импульсным напряжением «привязки» $\Phi_{пр}$ необходимо подавать не постоянное, а импульсное напряжение инжекции $\Phi_{ин}$ (см. рис. 3, *b*), нужное для восстановления режима неравновесного обеднения элемента ПЗИ в каждом цикле считывания. Импульс инжекции ($\Phi_{ин}$) можно подавать на подложку $I_{под}$ элементов ПЗИ, в этом случае на сток транзистора Т1 подается постоянное напряжение питания смещения $I_{см}$ (на рис. 3, *b, c* обозначения управляющих напряжений даны в скобках).

Принцип работы устройства считывания с прямой инжекцией поясняет рис. 4. Отличие принципиальной схемы устройства ввода с прямой инжекцией заряда, приведенного на рис. 4, *a*, от устройств считывания с фотодиодами – дополнительная диффузионная область 5, зарядно-связанная с затвором накопления 3 через дополнительный затвор 4 и транзистор Т1. При этом важно, чтобы проводимости подложек элемента ПЗИ и кремниевое устройства считывания были одного типа (*n* или *p*). При подключении постоянных источников питания $I_{вх}$, $I_{п}$, $I_{н}$ (входа, питания, накопления) и импульсного управляющего напряжения $\Phi_{пр}$ (рис. 4, *b*) на затворе элемента ПЗИ устанавливается напряжение $I_{см}$. При подаче импульса $\Phi_{ин}$ неосновные носители, накопленные в предыдущем цикле, инжектируются в подложку элемента ПЗИ, а после окончания $\Phi_{ин}$ восстанавливается режим неравновесного обеднения. С окончанием управляющего импульса $\Phi_{пр}$ и подачей управляющего импульса сброса $\Phi_{сб}$ напряжение на затворе элемента ПЗИ входной диффузионной области 1 задается поверхностным потенциалом под входным затвором 2. Важно отметить, что в начальный момент времени заряд с затвора элемента ПЗИ стекает в источник $I_{п}$ через зарядно-связанную входную диффузионную область 1, входной затвор 2, затвор накопления 3, затвор сброса 4, диффузионную область 5. Накопление фотогенерированных носителей в инверсионном слое приводит к возрастанию емкости элемента ПЗИ, а так как напряжение на затворе элемента ПЗИ определяется поверхностным потенциалом под входным затвором 2, то избыточный заряд стекает и интегрируется под затвором накопления 3 только после окончания импуль-

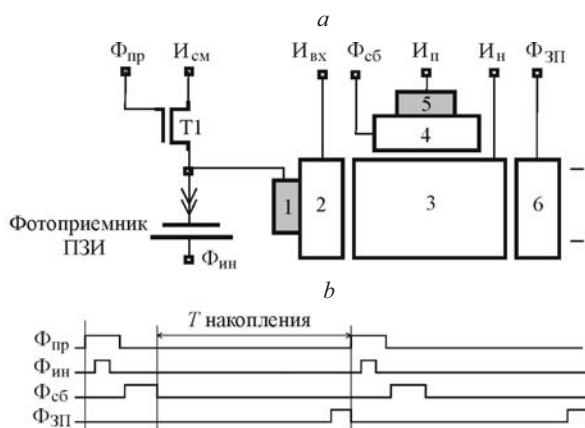


Рис. 4. Система считывания «фотоприемник ПЗИ – прямоинжекционное устройство»: принципиальная схема ячейки (*a*), временные диаграммы управляющих напряжений (*b*)

сного управляющего напряжения $\Phi_{сб}$. При подаче импульса на затвор переноса ($\Phi_{зп}$) б интегрированный под затвором накопления з информационный заряд передается в мультиплексор.

Ввод тока в устройство с прямой инжекцией заряда осуществляется в подпороговом режиме. Для оптимизации режима работы такого устройства принципиально важную роль играют временные зазоры между окончанием импульсов $\Phi_{ин}$, $\Phi_{пр}$ и длительностью импульса $\Phi_{сб}$. Эти временные интервалы должны быть достаточными, чтобы на входной диффузионной области 1 установился потенциал, при котором интегрируемый в устройстве ввода ток становится сравнимым с уровнем фототока. Расчеты показывают, что для типичных величин фототока $10^{-11} - 10^{-8}$ А и емкости входного узла ~ 1 пФ длительность этих интервалов лежит в пределах 5–50 мкс [17], а коэффициент ввода тока (η_l) с элемента ПЗИ в устройства ввода с прямой инжекцией заряда близок к единице за исключением области, когда элемент ПЗИ близок к насыщению. Вне этой области η_l слабо зависит от величины $V_{см} - V_{пор}$. В таком режиме существенно снижаются требования к стабильности управляющего напряжения $I_{вх}$ и соответственно уровень шума ФПУ на основе элементов ПЗИ, тогда как для системы «устройство ввода с прямой инжекцией заряда – фотодиод» изменение напряжения смещения на входном затворе устройства считывания ($I_{вх}$) на несколько милливольт приводит к значительному изменению тока, интегрируемого в устройстве считывания [18]. Преимущество устройств ввода с прямой инжекцией заряда перед устройствами с потенциальным считыванием заключается в том, что коэффициент ввода тока с элементов ПЗИ близок к единице. Поэтому чувствительность ИК ФПУ на основе элементов ПЗИ не будет уступать чувствительности ИК ФПУ на основе фотодиодов. Вывод части информационного заряда, накопленного в фотоприемнике ПЗИ в начальный период, позволяет решить следующие проблемы:

- улучшить линейность передаточных характеристик устройства считывания (в начальный период накопления происходит привязка потенциала затвора ПЗИ к поверхностному потенциалу под входным затвором устройства ввода и этому участку присуща нелинейность передаточных характеристик);
- повысить чувствительность элементов ПЗИ, так как начальный период после формирования неравновесного обеднения в элементе ПЗИ исключается из процесса накопления фотосигнала [19] (этот период характеризуется повышенным уровнем неинформационных компонент из-за перезарядки поверхностных состояний, туннельной перезарядки центров захвата в диэлектрике и т. д.).

Фотосигналы можно интегрировать непосредственно в элементе ПЗИ. Это дает дополнительные возможности построения устройств считывания. Схема устройства считывания фотосигналов с внутренним накоплением в элементе ПЗИ приведена на рис. 5. При данном способе считывания используется подложка элемента ПЗИ *n*-типа, для кремниевого устройства считывания – подложка *p*-типа. При подаче управляющих напряжений – постоянных $I_{вх}$, $I_{п}$, импульсных $\Phi_{пр}$ (рис. 5, *a, b*) – открываются транзисторы Т1 и на затворе МДП-фотоприемника, находящегося в режиме неравновесного обеднения, устанавливается напряжение $I_{см}$. Для уменьшения количества управляющих напряжений этот узел можно соединить с подложкой (землей) кремниевого устройства считывания. С окончанием импульса $\Phi_{пр}$ и подачей импульсов $\Phi_{сб}$, $\Phi_{вх}$ напряжение на затворе элемента ПЗИ входной диффузи-

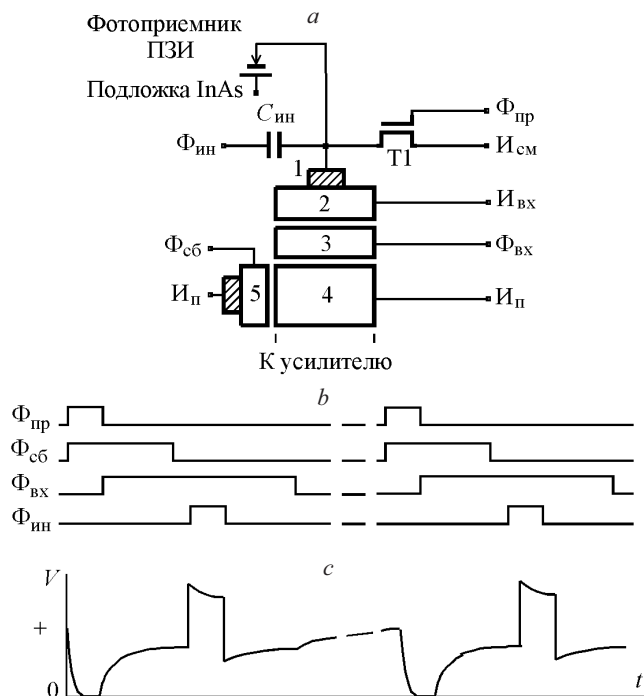


Рис. 5. Схема считывания сигнала с МДП-фотоприемников с внутренним накоплением: принципиальная схема ячейки кремниевого мультиплексора (а), эпюры управляющих напряжений (b), эпюры напряжений на затворе МДП-фотоприемника (с)

онной области 1 задается поверхностным потенциалом под входным затвором 2 (рис. 5, с). Заряд с затвора элемента ПЗИ стекает в $I_{п}$ по пути «входная диффузионная область 1 – зарядно-связанные затворы 2–5». С окончанием импульса $\Phi_{сб}$ и при подаче через разделительную емкость $C_{инн}$ импульса инжекции $\Phi_{инн}$ заряд неосновных носителей, накопленный в инверсионном слое, инжектируется в подложку элемента ПЗИ. С окончанием импульса $\Phi_{инн}$ МДП-фотоприемники снова переводятся в режим неравновесного обеднения, а заряд, пропорциональный фотосигнальному заряду, который накоплен в инверсионной области, вновь стекает с затвора элемента ПЗИ по пути «входная диффузионная область 1 – зарядно-связанные затворы 2, 3» и интегрируется под затвором накопления 4. С окончанием импульса $\Phi_{вх}$ информационный заряд из-под затвора накопления 4 может передаваться в линейку зарядно-чувствительных усилителей.

Таким образом, потенциал затвора элемента ПЗИ привязывается к поверхностному потенциалу под входным затвором устройства считывания до и после подачи импульса инжекции $\Phi_{инн}$, т. е. обеспечивается коррелированная выборка, и тем самым подавляются низкочастотные компоненты шума устройства в каждом цикле считывания. С окончанием импульсов $\Phi_{инн}$, $\Phi_{вх}$ начинается новый цикл накопления.

При данном способе считывания сигналов для обеспечения линейности передаточных характеристик и минимизации уровня собственных шумов устройства считывания, как и для устройства, приведенного на рис. 4, важно правильно выбрать временные интервалы между окончанием импульсов

$\Phi_{пр}$, $\Phi_{сб}$ и импульсов $\Phi_{ин}$, $\Phi_{вх}$. Длительность обоих временных интервалов должна лежать в пределах 2–10 мкс.

Устройство считывания с встроенным RC-фильтром для выделения слабых импульсных фотосигналов. Одной из самых технически сложных проблем в оптоэлектронике является регистрация координаты и времени прихода слабых импульсных сигналов, необходимых в системах лазерной локации. В ИК-области эта задача усложняется тем, что фоновое излучение и темновые токи фотоприемников на 2–3 порядка превышают уровень информационных сигналов. Для решения этой задачи устройство считывания должно удовлетворять следующим требованиям:

- фотосигнал с каждой фотоприемной ячейки необходимо передавать без задержки во времени на выходные строчные и столбцовые шины;
- ячейка устройства считывания должна содержать усилитель и фильтр высоких частот для подавления низкочастотных неинформационных компонент сигналов.

Схема кремниевого устройства считывания приведена на рис. 6. Цепочка, содержащая подзатворную емкость фотоприемника ПЗИ и p -канальный транзистор Т2, образует RC-фильтр высокой частоты [20, 21]. Дифференциальный усилитель, образованный p -канальными транзисторами Т3, Т5 и n -канальными транзисторами Т4, Т6 и Т9, а также n -канальные транзисторы Т7 и Т8 обеспечивают усиление и передачу сигналов на строчные и столбцовые шины считывания.

С началом импульса $\Phi_{пр}$, открывающего n -канальный транзистор Т1, на фотоприемник ПЗИ подается напряжение $I_{см}$. В течение импульса $\Phi_{пр}$ на подложку InAs (n -типа проводимости) фотоприемников ПЗИ подается им-

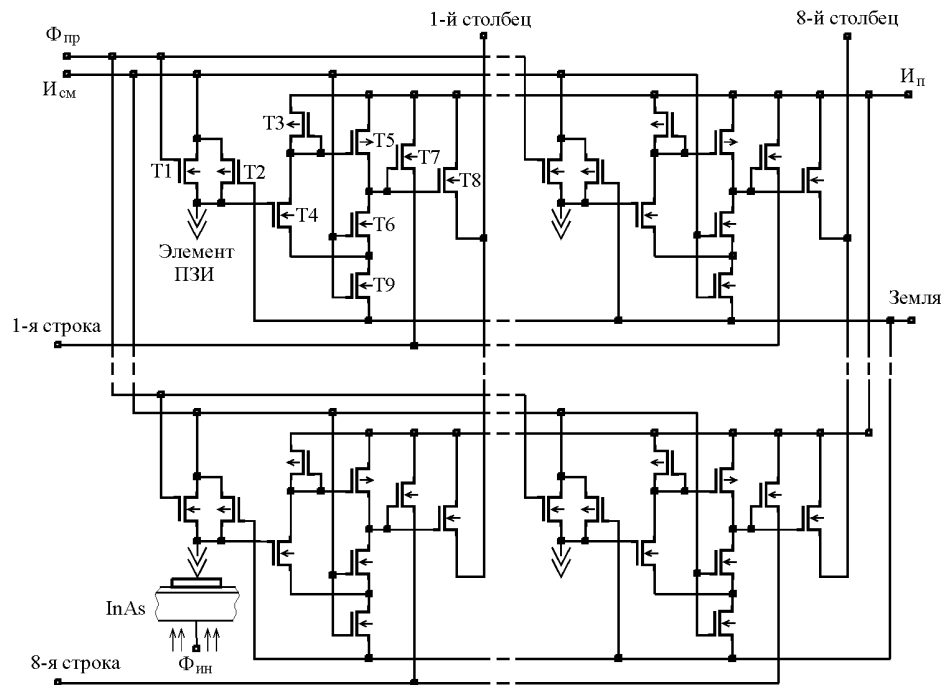


Рис. 6. Принципиальная схема кремниевого устройства считывания для матрицы размером 8 × 8 элементов

пульс отрицательной полярности $\Phi_{ин}$, с окончанием которого фотоприемники ПЗИ одновременно переводятся в режим неравновесного обеднения. С окончанием импульса $\Phi_{пр}$ на элементах ПЗИ устанавливается режим неравновесного обеднения, а на на обоих входах дифференциального усилителя (затворах МДП-транзисторов Т4 и Т6) устанавливается напряжение $I_{см}$. При подаче импульсного сигнала на затвор транзистора Т4 усиленный сигнал передается на затворы транзисторов Т7 и Т8. Важным преимуществом данного кремниевого устройства считывания является использование емкости подзатворного диэлектрика МДП-структур в качестве составной части RC-фильтра. Для устройств считывания на основе фотодиодов емкость RC-фильтра ($C = 0,4$ пФ) пришлось бы размещать на кремниевом кристалле. Такая емкость занимает значительную часть площади в ячейке, существенно ограничивая возможности выбора принципиальной схемы и оптимизацию топологии устройства считывания.

Расчетные зависимости коэффициента усиления дифференциального усилителя устройства считывания (кривые 1–3) и устройства считывания, дополненного RC-фильтром высоких частот, (кривые 4 и 5) от частоты и напряжения смещения $I_{см}$ в качестве параметра приведены на рис. 7. Как видно из этих зависимостей, RC-фильтр обеспечивает подавление низкочастотных компонент сигналов. С увеличением напряжения смещения $I_{см}$ повышается проводимость канала МДП-транзистора Т2, что приводит к сдвигу передаточных характеристик RC-фильтра в область более высоких частот. В области частот выше 2–3 МГц уменьшение коэффициента усиления устройства считывания обусловлено высокочастотной границей полосы пропускания дифференциального усилителя.

Кремниевые устройства считывания были изготовлены по КМОП-технологии с топологической нормой 0,8 мкм, с двумя уровнями металлизации. В центре кремниевого кристалла располагалась матрица (8×8 ячеек)

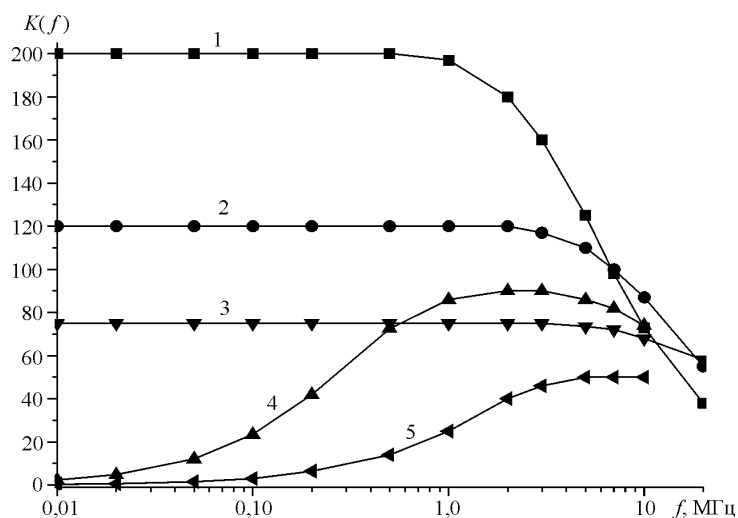


Рис. 7. Зависимости расчетных частотных характеристик дифференциального усилителя устройства считывания (кривые 1–3) и устройства считывания с RC-фильтром высоких частот $K(f)$ (кривые 4, 5) от частоты и напряжения смещения в качестве параметра: кривая 1 – $I_{см} = 2,0$ В, 2 – 2,3 В, 3 – 2,8 В, 4 – 2,3 В, 5 – 2,8 В

устройств считывания с шагом по обеим координатам 50 мкм. Размер элементов ПЗИ 40×40 мкм. Гибридные модули собирались методом flip-chip на индиевых микростолбах. Экспериментальное исследование показало, что ИК ФПУ размером 8×8 элементов обеспечивает регистрацию оптического импульса с пороговой энергией $\sim 8 \cdot 10^{-17}$ Дж/элемент. Точность определения времени прихода оптического сигнала не хуже 50–100 нс и ограничивается длительностью фронта сигналов на выходах ФПУ при достижении амплитуды, равной шести уровням среднеквадратичного шума.

Заключение. В данной работе описаны особенности схемотехнических решений кремниевых мультиплексоров для считывания сигналов с элементов ПЗИ фотоприемных линеек и матриц на примере полупроводников InAs. Показано, что минимальное NETD тепловизионных систем на основе элементов ПЗИ достигается в спектральном диапазоне 2,9–3,5 мкм. В этом диапазоне наиболее перспективными представляются элементы ПЗИ на основе InAs и твердых растворов HgCdTe соответствующего состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Приборы** с зарядовой связью /Под ред. Д. Ф. Барба. М.: Мир, 1982.
2. **Wadsworth M. V., Borrello S. R., Dodge J. et al.** Monolithic CCD imagers in HgCdTe // IEEE Trans. Electron Dev. 1995. **42**. P. 244.
3. **Морозов В. А., Осипов В. В., Селяков А. Ю., Таубкин И. И.** Интегральный матричный фотоприемник нового типа на основе InSb // Микроэлектроника. 1996. **25**, № 3. С. 163.
4. **Hewitt M. J., Vampola J. L., Black S. H., Nielsen C. J.** Infrared readout electronics: a historical perspective // SPIE. 1994. **2226**. P. 108.
5. **Рогальский А.** Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. Новосибирск: Наука, 2003.
6. **Ettenberg M. H., Lange M. J., Grady T. O. et al.** A room temperature 640×512 pixel near-infrared InGaAs focal plane arrays // SPIE. 2000. **4028**. P. 201.
7. **Manissadjian A., Tribolet P., Chorier P., Filton P.** Short-wave infrared detector trade-offs and applications // SPIE. 2003. **4820**. P. 446.
8. **Mottin E., Pantigny P., Boch R.** An improved architecture of IRFPA readout circuits // SPIE. 1997. **3061**. P. 117.
9. **Goodnough M. A., Hahn L. J., Jones R. B. et al.** A flexible 640×512 InSb FPA architecture // SPIE. 1998. **3061**. P. 140.
10. **Vural K., Kozlowski L. J., Cooper D. E. et al.** 2048×2048 HgCdTe focal plane arrays for astronomy applications // SPIE. 1999. **3698**. P. 24.
11. **Woolaway J.** New sensor technology for the 3-to 5 μm imaging band // Photon. Spectra. 1991. **25**. P. 113.
12. **Фотоника:** Словарь терминов /Под ред. В. Н. Овсяюка. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004.
13. **Таубкин И. И., Трищенко М. А.** Предельные чувствительность и информативность тепловизоров и других оптико-электронных преобразователей изображения // Оптический журнал. 1996. № 6. С. 18.
14. **Ли И. И.** Анализ зависимости температурного разрешения тепловизионных систем от зарядовой емкости устройства считывания // Автометрия. 2001. № 2. С. 32.
15. **Destefanis K. G., Audebert P., Mottin E., Rambaud P.** High-performance LWIR 256×256 HgCdTe focal plane array operating at 88 // SPIE. 1997. **3061**. P. 111.

16. **Fossum E. R., Pain B.** Infrared readout electronics for space science sensors: State of the art and future directions // SPIE. 1993. **2020**. P. 262.
17. **Винецкий Ю. Р., Тришенков М. А.** Потенциальное входное устройство прибора с зарядовой связью в режиме слабых сигналов // Радиотехника и электроника. 1981. № 4. С. 852.
18. **Кунакбаева Г. Р., Ли И. И., Черепов Е. И.** Анализ передаточных характеристик системы фотодиод–устройство считывания на приборах с зарядовой связью // Радиотехника и электроника. 1993. № 5. С. 922.
19. **А. с. 1040947 СССР.** Способ записи информации на приборах с зарядовой связью /Х. И. Кляус, И. И. Ли, Е. И. Черепов. Заявл. 26.09.1980; Опубл. 15.12.1989, Бюл. № 46.
20. **Пат. 2282270 РФ.** Устройство считывания с МДП-фотоприемников /И. И. Ли, Г. Л. Курьшев. Заявл. 11.04.2005; Опубл. 20.08.2006, Бюл. № 23.
21. **Ли И. И., Базовкин В. М., Валишева Н. А. и др.** Фотоприемное устройство на основе матрицы МДП-фотодиодов на InAs для регистрации импульсных оптических сигналов // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 68.

Поступила в редакцию 4 мая 2007 г.
