

**МАТРИЧНЫЕ ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА
СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК PbSnTe : In ***

А. Н. Акимов, А. Э. Климов, В. Н. Шумский, А. Л. Асеев

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

Рассмотрены принципы работы матриц фотоприемников большого размера для визуализации изображения в субмиллиметровой области спектра. Проведена оценка параметров тепловой картины, создаваемой на промежуточном экране субмиллиметровой компонентой излучения объекта с температурой около 300 К, и проанализированы параметры фотоприемников, требуемые для регистрации излучения промежуточного экрана. Показана возможность создания на основе пленок PbSnTe : In матричных фотоприемных устройств большого размера для формирования изображений объектов, имеющих комнатную температуру, без дополнительной субмиллиметровой подсветки.

Введение. Изучение взаимодействия субмиллиметрового излучения (СБММИ) ($\lambda = 0,1-1,0$ мм) с различного рода физическими объектами открывает новые возможности расширения фундаментальных знаний о свойствах твердых, жидких и газообразных тел, включая биологические и астрофизические объекты. На эту область длин волн приходится значительное число энергетических переходов в органических молекулах, линии поглощения воды и соединений, загрязняющих атмосферу. Известно также, что с увеличением длины волны возрастает прозрачность многих объектов, включая ткани, строительные материалы, различные покрытия в технических объектах. Это позволяет использовать устройства СБММИ в системах безопасности (например, в аэропортах) и в системах контроля качества техники (например, теплоизоляции обшивки многоразовых космических кораблей).

Для формирования тепловизионных видеоизображений в ИК-диапазоне применяются матричные фотоприемные устройства (МФПУ) с числом элементов до 10^6 , имеющие край длинноволновой чувствительности от 2,7–3,0 до 20–25 мкм [1]. При понижении температуры источника излучения требуются МФПУ с большей длинноволновой границей чувствительности и более глубоким охлаждением. Тепловидение в ИК-диапазоне осуществляется в пассивном режиме и не требует дополнительной «подсветки» объекта как-либо источником излучения.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 05-02-08022 офи_п, № 07-02-01336а) и Президиума СО РАН (проект № 107).

Казалось бы, что формирование аналогичного видеоизображения в СБММ-диапазоне могло быть основано на тех же принципах, что и в ИК-диапазоне. Однако для непосредственной регистрации СБММИ малой мощности могут быть использованы очень немногие типы приемников излучения (ПИ), например сверхпроводящие болометры. К их недостаткам, в частности, можно отнести сверхнизкую рабочую температуру (десятые доли кельвина) и сложности в организации полноформатных матриц.

Поэтому одним из основных методов создания видеоизображения в СБММ-диапазоне является схема с непрямым преобразованием излучения, в которой СБММИ формирует тепловое изображение источника излучения (объекта) на промежуточном экране с последующим анализом распределения температуры экрана с помощью ИК МФПУ. При использовании активного способа получения изображения, когда объект освещается, например, сравнительно мощным лазерным источником излучения СБММ-диапазона, изменение температуры экрана оказывается достаточно большим. В этом случае для формирования видеоизображения могут быть применены МФПУ даже с длинноволновой границей чувствительности в ближнем ИК-диапазоне. О получении видеоизображения таким способом (при подсветке лазером на свободных электронах и использовании МФПУ размером 128×128 элементов на основе InAs) сообщается в [2].

Однако при пассивном способе получения изображения, когда только сам объект наблюдения является тепловым источником СБММИ небольшой мощности, требования к ПИ и в первую очередь к его длинноволновой границе чувствительности и пороговой мощности, а также к параметрам экрана кардинально меняются.

Целью данной работы является рассмотрение возможности создания на базе современных ИК МФПУ пассивных систем визуализации изображения в субмиллиметровом диапазоне спектра, основанных на анализе теплового изображения на промежуточном экране, а также анализ возможности создания такой системы на основе пленок $\text{PbSnTe} : \text{In}$.

Устройство визуализации изображения в субмиллиметровой области спектра с непрямым преобразованием излучения. Итак, под непрямым преобразованием понимается формирование субмиллиметровой оптической промежуточного изображения на тонком экране. Создаваемый при этом тепловой рельеф экрана анализируется с использованием ПИ ИК-области спектра. Принципиальная схема визуализации, использующая многоэлементные ПИ с глубоким охлаждением на основе $\text{PbSnTe} : \text{In}$, показана на рис. 1. ФПУ 1 размещается в вакуумированной камере, охлажденной до гелиевой температуры, имеющей входное окно в виде отрезающего фильтра 2. В непосредственной близости от ФПУ в вакууме при $T = 30-80 \text{ K}$ располагается тонкий тепловой экран 3, на котором с помощью неохлаждаемого субмиллиметрового объектива 4 формируется изображение объекта 5.

Для снижения расхода жидкого гелия оптическая система включает в себя также охлажденный до азотной температуры экран 6 со спектральной характеристикой, аналогичной фильтру 2. Параметры данной схемы будут определяться:

- характерной средней температурой экрана;
- постоянной времени нагрева и остывания экрана;
- пространственным разрешением тепловой картины, формируемой на экране и связанной с тепловой диффузией вдоль плоскости экрана;
- числом пикселей и размером ИК ФПУ;

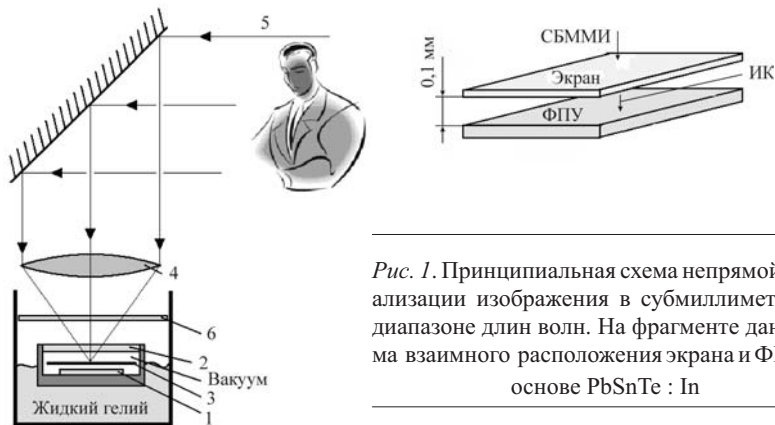


Рис. 1. Принципиальная схема не прямой визуализации изображения в субмиллиметровом диапазоне длин волн. На фрагменте дана схема взаимного расположения экрана и ФПУ на основе PbSnTe : In

– пороговыми характеристиками ИК ФПУ.

Рассмотрим подробнее перечисленные факторы.

Температура экрана. В приближении только радиационного охлаждения средняя стационарная температура экрана T_{30} будет определяться соотношением

$$P = 2k\sigma T_{30}^4, \quad (1)$$

где P – поглощаемая экраном мощность СБММИ; k – коэффициент черноты экрана, принятый для простоты одинаковым для обеих поверхностей и независимым от длины волны; σ – постоянная Стефана – Больцмана. На область пропускания отрезающего фильтра с границей пропускания λ_0 приходится доля излучения фона с температурой T_ϕ :

$$\eta(\lambda_0) = \int_{\lambda_0}^{\infty} r_\lambda(T_\phi) d\lambda / \sigma T_\phi^4, \quad (2)$$

где r_λ – спектральная плотность излучения. Нетрудно показать, что освещенность, созданная в фокальной плоскости объективом с относительным отверстием $D : f$, «смотрим» на однородный фон, будет иметь вид

$$E = \alpha \left(\frac{D^2}{4f^2} \right) \sigma T_\phi^4, \quad (3)$$

где α – коэффициент пропускания; D и f – диаметр входного зрачка и фокусное расстояние объектива соответственно. Если β – коэффициент пропускания охлаждаемого отрезающего фильтра в области его прозрачности, то освещенность экрана E_3 субмиллиметровой составляющей фонового излучения представим в виде

$$E_3 = \alpha\beta\eta\sigma T_\phi^4 \left(\frac{D^2}{4f^2} \right). \quad (4)$$

Положим для простоты, что, как и в ИК-области спектра, коэффициент поглощения экрана в субмиллиметровой области постоянен и также равен k .

Тогда соотношение (1) можно переписать следующим образом:

$$k\alpha\beta\eta\sigma T_{\phi}^4 \left(\frac{D^2}{4f^2} \right) = 2k\sigma T_{30}^4, \quad (5)$$

откуда

$$T_{30} = T_{\phi} \sqrt[4]{\frac{\alpha\beta\eta}{2} \frac{D^2}{f^2}}. \quad (6)$$

Результаты расчета средней температуры экрана как функции граничной волны отрезающего фильтра λ_0 показаны на рис. 2 для $T_{\phi} = 300$ К, двух значений относительного отверстия субмиллиметрового объектива, суммарного коэффициента пропускания объектива и фильтра $\alpha\beta = 0,8$.

Как видно из рисунка, даже при граничной длине волны фильтра $\lambda_0 = 100$ мкм и относительном отверстии $D : f = 1 : 1$ средняя температура экрана T_{30} превысит 40 К. Для $\lambda_0 = 50$ мкм даже при $D : f = 1 : 2$ величина $T_{30} > 50$ К. Таким образом, при $T_{\phi} = 300$ К и при разумных характеристиках оптики – относительном отверстии, коэффициентах пропускания объектива и фильтра – средняя температура экрана в стационарном режиме может лежать в пределах 30–60 К. При этом зависимость температуры экрана от относительного отверстия и коэффициентов пропускания достаточно слабая: как корень второй степени для $D : f$ и корень четвертой степени для коэффициентов пропускания, а зависимость T_{30} от края пропускания отрезающего фильтра сильная. Поэтому, имея набор сменных фильтров, можно варьировать параметры устройства в целом. Так, «жертвуя» краем чувствительности (ухудшая возможности устройства по наблюдению источников излучения сквозь слабопрозрачные объекты, например сквозь ткань одежды), можно повысить час-

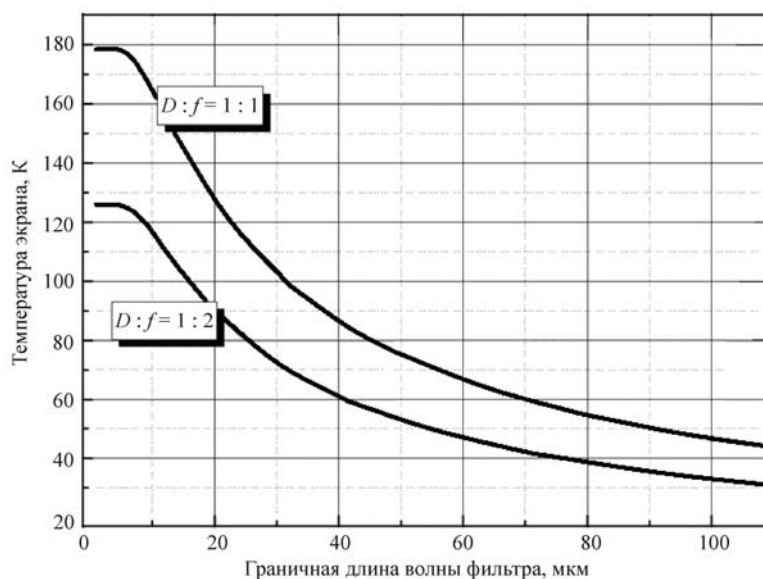


Рис. 2. Зависимости температуры экрана от граничной волны отрезающего фильтра для коэффициента пропускания оптики $\alpha\beta = 0,8$

тоту кадров устройства за счет роста его чувствительности. И наоборот, увеличивая длительность анализа изображения, можно сдвигаться в длинноволновую часть для более тщательного контроля «скрытых» предметов.

Постоянная времени экрана. При чисто радиационном охлаждении экрана, находящегося в вакууме, полагая для простоты коэффициент черноты равным единице, уравнение состояния элемента экрана площадью A в момент выключения сигнального потока излучения можно записать в виде

$$cA\delta \frac{d(T_{30} + \Delta T_3)}{dt} = -2\sigma A \{(T_{30} + \Delta T_3)^4 - T_{30}^4\}, \quad (7)$$

где c – удельная теплоемкость; δ – толщина экрана; ΔT_3 – отклонение от средней температуры, вызванное сигналом. Обычно $\Delta T_3 \ll T_{30}$, тогда уравнение (7) может быть переписано как

$$C \frac{d(\Delta T_3)}{dt} = -8\sigma \Delta T_3 T_{30}^3, \quad (8)$$

где $C = c\delta$ – теплоемкость элемента экрана единичной площади. Решение (8) имеет вид

$$\Delta T_3(t) = \Delta T_{30} e^{-t/\tau}. \quad (9)$$

Здесь ΔT_{30} – отклонение от средней температуры в момент выключения сигнального потока излучения при $t=0$, а постоянная времени $\tau = C/(8\sigma T_{30}^3)$.

Оценка величины τ затруднена тем, что при криогенных температурах данные по теплоемкости органических веществ, потенциально пригодных для создания экрана, крайне ограничены. Тем не менее при снижении температуры от комнатной до 40–50 К удельная теплоемкость органических соединений обычно уменьшается в 3–10 раз, а ее величина для таких материалов, как нейлон, лавсан или полиамид, составляет при $T = 20$ °С примерно 0,10–0,05 Дж/г · град. Для $T_{30} = 40$ К и толщины экрана $\delta = 10^{-4}$ см получим грубую оценку постоянной времени: $\tau = 0,1–1,0$ с. Таким образом, при использовании для анализа температурного профиля экрана полноформатной матрицы можно ожидать частоту кадров устройства примерно от 1 до 10 в секунду, а ее реальная величина требует экспериментальной проверки.

Пространственное разрешение в плоскости изображения будет определяться диффузионным растеканием тепла вдоль экрана за время τ , т. е. толщиной, теплопроводностью и удельной теплоемкостью экрана, а его оценки также затруднены по указанным выше причинам. Вместе с тем дифракционные ограничения стандартных объективов требуют размеров пикселя около 3λ , что в нашем случае составляет не менее 200–300 мкм. Поэтому при необходимости методами фотолитографии отдельные пиксели экрана могут быть легко изолированы друг от друга путем создания зазоров между ними. Таким образом, представляется, что пространственное разрешение системы будет лимитироваться преимущественно параметрами объектива.

Размеры матричного фотоприемного устройства. В настоящее время для ИК-области спектра, как правило, используются МФПУ 128×128 элементов и более. Существуют разработки МФПУ свыше 1024×1024 элемента.

Тем не менее в большинстве случаев стандартные изображения состоят примерно из 256×256 элементов. Таким образом, при размере отдельного пикселя 200–300 мкм (граничная длина волны отрезающего фильтра 60–100 мкм) и схеме устройства, показанной на рис. 1, экран и матрицы ИК ФПУ должны иметь физический размер около 5–8 см.

Известно, что практически единственным способом создания современных МФПУ ИК-диапазона является соединение мультиплексора с кристаллом матрицы ПИ посредством индиевых столбов. При этом серьезную проблему создает разность коэффициентов температурного расширения (КТР) кремния и подложек, на которых формируются матрицы ПИ, что ограничивает физические размеры создаваемого МФПУ и, как следствие, число пикселей в нем. Реально в настоящее время выпускаются МФПУ ИК-диапазона с величиной кристалла до 2–3 см, которая обеспечивает достаточно большое число пикселей в строках и столбцах в силу их малого размера – обычно не более 30 мкм, но недостаточна для получения изображения с большим числом в СБММ-области спектра. Помимо этого в схеме с размещением ИК ФПУ в непосредственной близости от экрана (см. рис. 1) расстояние между экраном и чувствительными элементами должно составлять величину около 0,1–0,2 мм, что представляет серьезные трудности при использовании технологии flip-chip.

Пороговые характеристики. Рассмотрим требования к пороговым характеристикам ИК МФПУ, предназначенным для анализа температурного распределения на промежуточном экране. Полагая, что экран можно рассматривать как абсолютно черное тело (АЧТ), легко рассчитать мощность, излучаемую экраном в спектральном интервале от нуля до длины волны λ_r , соответствующей красной границе чувствительности ИК ФПУ. Зависимость мощности, излучаемой элементом экрана размером 100×100 мкм, от λ_r для различных значений T_{30} показана на рис. 3. Здесь же для сравнения приведены значения мощности, эквивалентной шуму, (МЭШ) чувствительных элементов ФПУ на основе разных материалов с границей чувствительности, равной λ_r .

По определению мощность излучения экрана, равная МЭШ, создает в чувствительном элементе ФПУ сигнал, равный шуму в единичной полосе частот. Таким образом, равенство мощности излучения экрана и МЭШ является качественным критерием способности соответствующего ФПУ анализировать температурный профиль экрана со средней температурой T_{30} . Очевидно, что для получения изображения хорошего качества необходима величина средней мощности излучения экрана, превышающей МЭШ на несколько порядков. Именно такая ситуация реализуется в современных ИК тепловизионных системах, где сигнальные отклонения от средней температуры фона $T_3 \approx 300$ К составляют $\Delta T_\phi \geq 0,01–0,05$ К (больше разности температур, эквивалентной шуму). Более подробный анализ является предметом отдельных расчетов и не входит в задачи данной работы.

Для эффективного анализа распределения температуры по экрану со средней температурой T_{30} рабочая температура соответствующего ИК ФПУ должна быть, по крайней мере, меньше T_{30} . Известно также, что уменьшение рабочей температуры улучшает характеристики ФПУ (снижает МЭШ). Вместе с тем из рис. 3 видно, что необходимо снижение МЭШ до величины 10^{-18} Вт · Гц^{-1/2}, чтобы ФПУ с $\lambda_r \approx 5,5$ мкм (InSb) хотя бы «почувствовало»

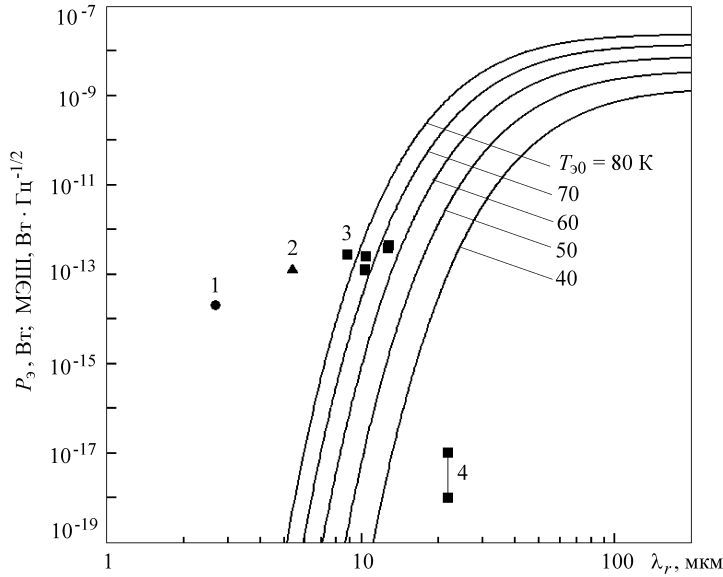


Рис. 3. Мощность P_3 , излучаемая в диапазоне длин волн от нуля до λ_r элементом поверхности экрана размером 100×100 мкм при температуре экрана T_{30} (сплошные кривые), и МЭШ фоточувствительных элементов такого же размера: 1 – InAs (80 К), 2 – InSb (80 К), 3 – CdHgTe (80 К), 4 – PbSnTe : In (7–10 К)

температуру $T_{30} = 80$ К. ФПУ с меньшей λ_r неприменимы для этих целей в принципе.

Таким образом, для анализа температурного профиля экранов с $T_{30} \leq 80$ К необходимы ФПУ с как можно большей красной границей чувствительности λ_r . Из рис. 3 видно, что та же самая величина МЭШ $\approx 10^{-18}$ Вт \cdot Гц $^{-1/2}$ при длине волны $\lambda_r \approx 20$ мкм, соответствующей ФПУ на основе PbSnTe : In, позволяет эффективно «считывать» изображение с экрана при $T_{30} \leq 40$ К.

Точный численный анализ преимуществ, связанных с понижением средней температуры экрана, определяемой характеристиками отрезающего фильтра и рабочей температурой ФПУ, выходит за рамки данной работы. Некоторые расчеты, касающиеся этого вопроса, сделаны в [3]. В частности, легко показать, что при исключительно радиационном охлаждении экрана отклонение от средней температуры ΔT_{30} , связанное с формированием на нем СБММ-изображения, составляет $\sim 1/T_{30}^3$ (например, снижение температуры экрана с $T_{30} = 80$ К до $T_{30} = 40$ К улучшит температурный рельеф приблизительно в 8 раз). Помимо этого понижение температуры экрана за счет снижения фонового потока приводит к уменьшению как фонового шума, входящего в СБММ-компоненту излучения, попадающего на экран, так и шума, связанного с флуктуациями температуры самого экрана [3]. Возможно, менее значительным, но также важным фактором является зависимость тепловых характеристик экрана от его температуры. Так, меньшее значение теплоемкости при заданных значениях T_{30} позволяет повысить быстродействие устройства в целом.

Остановимся теперь более подробно на свойствах ФПУ на основе пленок PbSnTe : In, позволяющих эффективно использовать его для визуализации изображения в СБММ-области спектра.

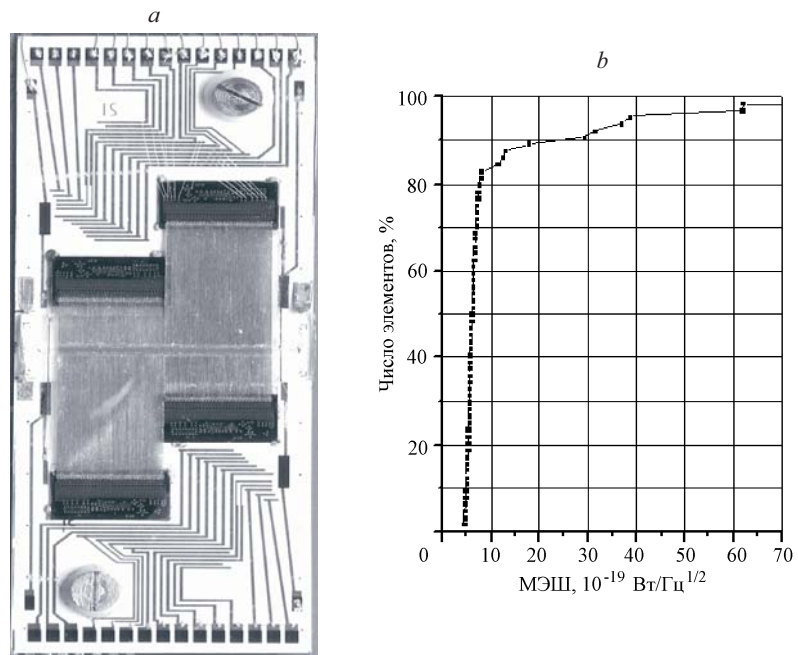


Рис. 4. Общий вид ЛФПУ и его параметры: *a* – изображение ЛФПУ; *b* – распределение МЭШ по элементам (по оси ординат отложено число элементов с МЭШ, не превышающей величину, указанную на оси абсцисс)

ФПУ ИК-диапазона на основе пленок $PbSnTe : In$. Параметры ФПУ.

Технология и параметры линейчатых и матричных фотоприемных устройств (ЛФПУ и МФПУ) на основе пленок $PbSnTe : In$ подробно описаны в [1]. Линейчатое фотоприемное устройство и распределение МЭШ по элементам при рабочей температуре $T = 7\text{ К}$ показаны на рис. 4. В центре ЛФПУ горизонтально расположена sdвоенная линейка фоторезисторов 2×128 элементов с периодом 100 мкм (общая длина $12,8\text{ мм}$). К линейке с помощью гибких полиамидных шлейфов присоединены четыре кремниевых мультиплексора с тактовой частотой 1 кГц . Видно, что при $T = 7\text{ К}$ более чем 80% элементов ЛФПУ имеют МЭШ менее $10^{-18}\text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$. Следует подчеркнуть, что при измерении параметров ЛФПУ из-за его чрезвычайно высокой чувствительности использовался источник излучения типа АЧТ с $T_{\text{АЧТ}} = 78\text{ К}$ и выходным отверстием диаметром 1 мм , расположенным на расстоянии 100 мм от ЛФПУ (апертура $1 : 100$). Временная зависимость нарастания и спада сигнала с одного из элементов ЛФПУ после открытия и закрытия заслонки АЧТ [1] показана на рис. 5 для двух значений температуры АЧТ. Сравнимые амплитуды сигналов в обоих случаях связаны с тем, что режим работы мультиплексора определялся уровнем освещенности ЛФПУ и отличался для разных температур АЧТ.

Из рисунка видно, что постоянные времени ФПУ в целом могут меняться в зависимости от освещенности и режимов работы от долей секунды до десятков секунд и более. На первый взгляд это может создавать проблемы в случае, если требуется сравнительно большая частота кадров при обработке изображения. Однако согласно ряду работ остаточный фототок может быть «погашен» приложением сравнительно большого импульсного напряжения.

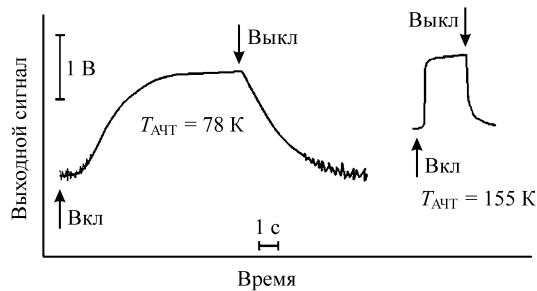


Рис. 5. Релаксационные кривые фотосигнала на выходе мультиплексора для одного из элементов ЛФПУ после открытия (Вкл) и закрытия (Выкл) заслонки излучателя

Этот эффект находит хорошее объяснение в рамках модели, рассматривающей инжекционный характер токов в $\text{PbSnTe} : \text{In}$ [4].

Видно также, что даже при апертуре 1 : 100, использованной в эксперименте, фотосигнал от источника излучения с температурой жидкого азота более чем на порядок превышал уровень шума. Естественно возникает вопрос: насколько низкие температуры источника излучения могут быть зарегистрированы ФПУ на основе $\text{PbSnTe} : \text{In}$?

Зависимость фотосигнала с образца пленки $\text{PbSnTe} : \text{In}$ от температуры АЧТ [5] показана на рис. 6. В данном случае апертура (отношение диаметра выходной диафрагмы АЧТ к расстоянию от диафрагмы до образца) составляла примерно 1 : 10.

Условно зависимость на рис. 6 можно разбить на две области, в которых ее поведение существенно различное. Расчеты показывают [5], что при $T_{\text{АЧТ}} < 40\text{--}50\text{ К}$ сигнал связан с чувствительностью $\text{PbSnTe} : \text{In}$ в области длин волн свыше 300 мкм. Это хорошо согласуется с данными, полученными при использовании субмиллиметрового лазера [6]. При $T_{\text{АЧТ}} > 40\text{--}50\text{ К}$ резкое увеличение фотосигнала объясняется чувствительностью в области длин волн $\lambda < 6\text{ мкм}$, поскольку используемое в АЧТ выходное окно было изготовлено из кристаллического кварца. Таким образом, приведенные данные показывают, что даже при апертуре 1 : 10 ФПУ на основе $\text{PbSnTe} : \text{In}$ способно регистрировать тепловое излучение поверхностей с температурой менее 40 К.

Перспективы создания матриц ФПУ на основе $\text{PbSnTe} : \text{In}$ с физическими размерами свыше 6–8 см. Важным фактором, делающим пленки

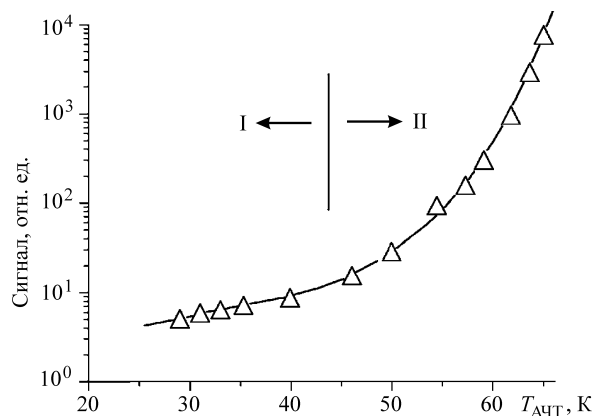


Рис. 6. Температурная зависимость фотосигнала

PbSnTe : In привлекательными для разработки систем визуализации в области СБММИ, является возможность получения их на кремниевых подложках с использованием буферных слоев $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$ [7]. В этом случае снимается проблема рассогласования КТР в технологии flip-chip и физический размер МФПУ будет ограничиваться лишь возможностями кремниевой электроники. Кроме того, диэлектрический эффект, обнаруженный в [8], и фототок при воздействии СБММИ [6] открывают перспективу для непосредственного приема СБММИ.

В качестве примера реализации такой возможности на рис. 7 приведены типичные температурные зависимости тока пленок PbSnTe : In, выращенных на BaF_2 и на $\text{Si}/\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$, в темноте и при освещении в области фундаментального поглощения. При температурах свыше 20 К приведенные зависимости имеют экспоненциальный характер с энергией активации, близкой к полуширине запрещенной зоны PbSnTe : In выбранного состава ($E_g = 0,06$ эВ), и совпадают полностью. Их различие при низких температурах обусловлено особенностями легирования, а уровень темнового тока и фототока контролируется параметрами процесса. Спектральная граница наблюдаемого фотоответа для указанных составов находится вблизи $\lambda_r = 20$ мкм.

Более того, согласно данным [9] кремниевая технология формирования мультиплексоров совместима с технологией получения пленок халькогенидов свинца методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремнии через буферные слои $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$. Это создает реальные перспективы для формирования на единой кремниевой подложке всего МФПУ на основе PbSnTe : In, каждый пиксель которого будет содержать и фоторезистор, и схему считывания фотосигнала с него. Реализация монолитной схемы МФПУ упрощается большими размерами пикселя и большим временем жизни неравновесных

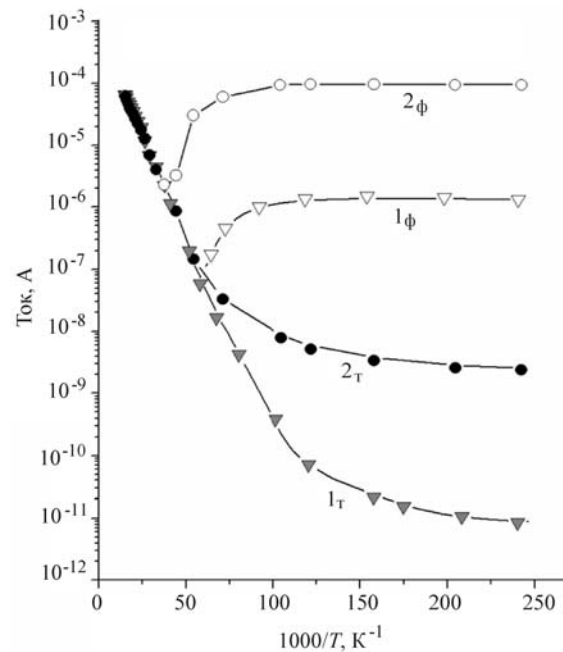


Рис. 7. Сравнение температурных зависимостей темнового тока и фототока для образцов на подложке BaF_2 (1) и на структуре $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$ (2). Индексы «τ» и «φ» обозначают ток в темноте и при освещении (фототок)

носителей заряда в $\text{PbSnTe} : \text{In}$, которое может превышать время кадра. В этом случае накопление фотосигнала может осуществляться не в виде заряда емкости соответствующего пикселя мультиплексора, а непосредственно в чувствительном элементе в виде заряда неравновесных носителей. Тогда каждый пиксель мультиплексора будет содержать только два ключа, один из которых подключает чувствительный элемент к схеме считывания, расположенной по периметру матрицы мультиплексора, а второй служит для «сброса» фотосигнала. В силу больших размеров пикселя и большого сопротивления фотоприемников, которое определяет сопротивление ключей в открытом состоянии, под ключи требуется лишь небольшая часть площади пикселя. Поэтому степень заполнения отдельного пикселя фоточувствительной площадкой может превышать более 90 %, что, в свою очередь, способствует достижению высоких параметров МФПУ в целом.

Заключение. В данной работе показано, что чувствительность пленок $\text{PbSnTe} : \text{In}$ в дальней ИК-области (до 20–25 мкм) позволяет создавать на их основе фотоприемные устройства, способные регистрировать тепловое излучение тел с температурой ниже 40–50 К. Проведены расчеты, которые дали основание считать, что такие ФПУ могут быть положены в основу устройства визуализации изображения объектов с комнатной температурой в субмиллиметровой области спектра без дополнительной подсветки. Возможность получения пленок $\text{PbSnTe} : \text{In}$ на кремниевых подложках позволяет создавать матричные устройства такого типа размером более чем 128×128 элементов с частотой кадров более 1 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Овсяк В. Н., Курышев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др.** Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск: Наука, 2001.
2. **Cherkassky V. S., Knyazev V. A., Kubarev V. V. et al.** Imaging techniques for a high-power THz free electron laser // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Research A. 2005. **543**. P. 102.
3. **Рогальский А.** Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. Новосибирск: Наука, 2003.
4. **Акимов А. Н., Ерков В. Г., Климов А. Э. и др.** Токи инжекции в узкозонном диэлектрике $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ // ФТП. 2005. **39**, вып. 5. С. 563.
5. **Климов А. Э., Шумский В. Н.** Фотоемкостный эффект в узкозонном $\text{PbSnTe}(\text{In})$ // Прикладная физика. 2004. **3**, вып. 74.
6. **Акимов А. Н., Ерков В. Г., Кубарев В. В. и др.** Фоточувствительность пленок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ в терагерцовой области спектра // ФТП. 2006. **40**, вып. 2. С. 169.
7. **Пат. 2278446 РФ.** Интегральное многоэлементное фотоприемное устройство инфракрасного диапазона /А. А. Величко, В. А. Илюшин, Н. И. Филимонова и др. Опубл. 20.06.2006; Бюл. № 17.
8. **Климов А. Э., Шумский В. Н.** Фотодиэлектрический эффект в эпитаксиальных пленках $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2001. № 3. С. 65.
9. **Zogg H., Maissen C., Masek J. et al.** Photovoltaic infrared sensor arrays in monolithic lead chalcogenides on silicon // Semicond. Sci. Technol. 1991. **6**. P. C36.

Поступила в редакцию 4 мая 2007 г.