

УДК 621.383.4/5.029.71/73

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ  
СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
В ТЕРАГЕРЦОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА  
НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК PbSnTe:In\***

**П. С. Галкин<sup>1</sup>, И. К. Игуменов<sup>1</sup>, А. Э. Климов<sup>2</sup>,  
В. В. Кубарев<sup>3</sup>, И. Г. Неизвестный<sup>2</sup>, Н. С. Пащин<sup>2</sup>,  
Е. Н. Чесноков<sup>4</sup>, В. Н. Шумский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 3*

<sup>2</sup> *Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13  
E-mail: klimov@thermo.isp.nsc.ru*

<sup>3</sup> *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

<sup>4</sup> *Институт химической кинетики и горения СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3*

Приведены результаты экспериментальных исследований и расчетов отдельных составляющих макетной системы регистрации терагерцового излучения и формирования изображения, включая лазер на свободных электронах и устройства для диагностики его излучения, пленочные экраны с поглощающими покрытиями для формирования промежуточного теплового изображения, прототипы чувствительных элементов на основе пленок PbSnTe:In.

*Ключевые слова:* терагерцовое излучение, лазер на свободных электронах, мелкие уровни, системы формирования изображения.

**Введение.** Создание приемников терагерцового излучения (ТГИ) с длиной волны  $\lambda = 0,1\text{--}1,0$  мм в последнее время стало актуальным не только из-за возможностей расширения фундаментальных знаний, которые открывают изучение взаимодействия ТГИ с различного рода физическими объектами. Значительный интерес к ним обусловлен также тем, что с увеличением длины волны возрастает прозрачность многих материалов. Это дает возможность использовать приемники ТГИ в системах, позволяющих получать изображения объектов сквозь покрытия, непрозрачные в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах спектра, включая биологические ткани, одежду и т. п.

Для регистрации сверхмалых потоков ТГИ разработаны болометры на основе туннельных переходов сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник (СИС), а также фотопроводники Ge:Ga, которые в ненапряженном состоянии обладают чувствительностью в области до 100 мкм, а при приложении одноосного напряжения вдоль оси [100] — до значений  $\lambda > 150$  мкм. Мощность, эквивалентная шуму, (МЭШ) СИС может составлять  $10^{-20}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup>, а Ge:Ga —  $(3\text{--}5) \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup>, но при предельно низких, меньших 3 К, рабочих температурах. Однако на их основе сложно создать матричные приемники ТГИ,

---

\*Работа выполнена при поддержке Президиума СО РАН (междисциплинарный проект № 107 «Исследование взаимодействия фононной подсистемы  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te(In)}$  в условиях сегнетоэлектрической неустойчивости с терагерцовым излучением и разработка приемников для его визуализации») и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-02-01336а) и Федерального центра научно-технических программ (государственные контракты № 02.513.11.3126 и № 02.513.12.3030).

поэтому они применяются только для формирования изображения при использовании сканирования.

Имеются данные, свидетельствующие о возможности прямого детектирования ТГИ с помощью PbSnTe:In на длинах волн  $\lambda = 90$  мкм (энергия кванта  $E = 13,8$  мэВ),  $\lambda = 116$  мкм ( $E = 10,6$  мэВ) и  $\lambda = 336,8$  мкм ( $E = 3,7$  мэВ) [1, 2]. По-видимому, фоточувствительность PbSnTe:In на этих длинах волн связана с переходами электронов с мелких локализованных состояний (уровней захвата) в зону проводимости. Поэтому большой интерес вызывает выяснение спектрального диапазона чувствительности PbSnTe:In к ТГИ, который определяется распределением уровней захвата по энергии в запрещенной зоне. Помимо прямых измерений спектральной чувствительности возможен и другой метод определения энергетического спектра локализованных состояний. Как показано в [3], транспорт носителей заряда в пленках PbSnTe:In описывается теорией токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), в условиях монополярной инжекции при наличии центров захвата электронов. Обратная задача нахождения распределения этих центров по энергии может быть решена с помощью анализа экспериментальных вольт-амперных характеристик (ВАХ). Так как заселенность ловушек зависит от приложенного напряжения, то спектральную чувствительность структуры с ТОПЗ можно регулировать, задавая то или иное напряжение.

Возможности использования высокочувствительных матричных фотоприемников PbSnTe:In ( $x_{\text{Sn}} = 0,24-0,26$ ) со спектральной чувствительностью до 20 мкм и МЭШ  $\leq 10^{-18}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup> при  $T = 7$  К для не прямой визуализации ТГИ в схеме с промежуточным тепловым экраном были рассмотрены в [4]. В такой схеме терагерцовая компонента теплового излучения объекта с температурой около 300 К формирует промежуточное тепловое изображение на тонком экране, расположенном в вакууме, которое затем «считывается» в ИК-области спектра. Было показано, что применение этой схемы может обеспечить получение изображения хорошего качества без дополнительной ТГИ-подсветки, например лазером.

Целью данной работы является обобщение результатов комплексных исследований, направленных на разработку элементов макетной системы формирования изображения в терагерцовой области спектра.

**1. Элементы системы формирования изображения.** 1.1. *Источники когерентного терагерцового излучения и системы его диагностики, терагерцовые материалы.* В экспериментах с детекторами использовались два типа источников когерентного ТГИ. Первые эксперименты, когда была обнаружена чувствительность пленок PbSnTe:In к терагерцовому излучению на длинах волн свыше 300 мкм [2], проводились на универсальном газовом лазере ИК- и дальнего ИК-диапазона [5]. Особенности лазера являются очень широкий спектральный диапазон ( $\lambda = 1-400$  мкм в газоразрядном режиме и  $\lambda = 40-1000$  мкм в режиме лазера с оптической накачкой), предельно низкие шумы при высокочастотной накачке (менее  $10^{-4}$ ) и рекордные для этого типа приборов уровни мощностей (специальные режимы и смеси газов, волноводный резонатор). В частности, терагерцовая чувствительность пленок PbSnTe:In была обнаружена на длине волны 336,8 мкм при работе универсального лазера в режиме HCN-лазера [6].

Вторым источником когерентного ТГИ был Новосибирский лазер на свободных электронах (НЛСЭ) [7]. Главными преимуществами этого источника являются высокая мощность и возможность плавной перестройки длины волны. Лазер излучает непрерывную последовательность терагерцовых импульсов длительностью  $\sim 100$  пс с частотой повторения 5,6–22 МГц. Импульсная мощность лазера достигает величины 0,5 МВт, средняя мощность — величины 500 Вт. Диапазон генерации первой гармоники 110–235 мкм, ширина спектра излучения в зависимости от режима 0,3–2,0 %. Возможна генерация лазера

на второй и третьей гармониках в специальных режимах с повышенной когерентностью; уровень мощностей гармоник  $\sim 1\%$  от первой гармоники [7, 8].

Работа проводилась на диагностической станции НЛСЭ, которая оснащена различными диагностическими системами. Среди них три типа спектрометров (фурье-спектрометр, монохроматор на дифракционных решетках, сеточные интерферометры Фабри — Перо) [9], различные фильтры терагерцового диапазона на двумерных периодических структурах [10], два типа калориметров средней мощности (эталонный сапфировый калориметр и модифицированный под ТГИ ваттметр МКЗ-71) [11]. Измерения импульсной мощности НЛСЭ осуществлялись с помощью ультрабыстродействующего детектора Шоттки с временным разрешением не хуже 20 пс. Пространственное распределение ТГИ измерялось двумя системами двумерной визуализации. Автоматизированная сканирующая линейка из 30 пироэлектрических приемников позволяла исследовать поле  $160 \times 200$  мм с достаточно хорошей чувствительностью. Другая, более удобная в эксплуатации, система на основе термофлюоресцентных экранов с рабочим полем  $152 \times 152$  мм имела лучшее пространственное разрешение (менее 1 мм), но гораздо меньшую чувствительность [11].

При работе в малоосвоенном терагерцовом диапазоне важным является выбор оптимального оптического материала. На диагностической станции были исследованы различные материалы. Среди них наиболее перспективным как для мощных ЛСЭ, так и для разных детекторов является CVD-алмаз. Его оптические параметры в терагерцовом диапазоне были измерены с высокой точностью четырьмя взаимодополняющими методами [12].

1.2. *Тепловой экран для формирования промежуточного теплового изображения.* Важным элементом разрабатываемой системы является промежуточный тепловой экран. К материалу, из которого изготавливается тепловой экран, предъявляются весьма жесткие требования. Он должен обеспечить значительное поглощение субмиллиметрового излучения при толщине поглощающего покрытия менее 0,1 мкм, обладать высокой излучательной способностью в ИК-области чувствительности PbSnTe:In (до 20 мкм) и достаточно высокой прочностью. Пленки органических полимеров сами по себе не могут обеспечить требуемого коэффициента поглощения. Поглощение полимеров в этой области связано с деформационными колебаниями молекул, причем коэффициенты поглощения в максимуме полос поглощения деформационных колебаний не превышают  $10^{-3} \text{ см}^{-1}$  [13]. Необходимые по величине коэффициенты поглощения ТГИ наблюдаются только для пленок из проводящих материалов. Поэтому были испытаны пленки из различных металлов на полимерной подложке.

На тонкую полимерную пленку толщиной около 3 мкм химическим осаждением из растворов наносили полупрозрачное металлическое покрытие (Au, Pd, Ni и InGaSn) со средней толщиной порядка десятков нанометров. Существенное поглощение ТГИ обнаружено только у пленок химически осажденного никеля, в то время как для других испытанных материалов пленки были либо прозрачными в субмиллиметровой области (золото, палладий), либо сильно отражающими (InGaSn). Поэтому в качестве модельного материала было выбрано никелевое покрытие на конденсаторной полиимидной пленке.

Для измерения пропускания и отражения использовался ИК-спектрометр Фурье Bruker IFS-22V. Спектры записывались в диапазоне  $40\text{--}600 \text{ см}^{-1}$  с разрешением  $1 \text{ см}^{-1}$ . Коэффициент пропускания пленки измерялся при нормальном падении излучения, а коэффициент отражения — для угла падения, равного  $40^\circ$ . Измерения коэффициента отражения производились по отношению к коэффициенту отражения металлического (напыленный Al) зеркала. Для этого на место образца устанавливалось зеркало. Коэффициент отражения металлов в субмиллиметровой области близок к 100% [14], поэтому погрешность, связанная с неполным отражением зеркала, не превышала 5%.

Спектры пропускания и отражения образцов покрытий в диапазоне  $50\text{--}350\text{ см}^{-1}$  приведены на рис. 1. Образцы отличались временем осаждения металла. По оптическим свойствам в области ТГИ приготовленные образцы четко разделились на два типа: сильно отражающие и слабо отражающие. Оптические свойства сильно отражающих образцов (рис. 1, *a*) типичны для тонких металлических пленок [15]. Слабо отражающие пленки имели значительный коэффициент поглощения и малый коэффициент отражения. Образцы слабо отражающей и сильно отражающей пленок были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL-JSM-6700F. Сравнение полученных изображений показало, что пленка с меньшим временем осаждения (слабо отражающая) состоит из кристаллитов меньшего размера, порядка  $5\text{--}10\text{ нм}$ , против  $20\text{--}40\text{ нм}$  у более толстой пленки, причем у последней наблюдается более значительный разброс в размерах кристаллитов.

В качестве теплового экрана предпочтительными являются слабо отражающие пленки Ni, спектры которых изображены на рис. 1, *b*. Для таких покрытий с коэффициентом отражения  $R = 5\text{--}15\%$  коэффициент поглощения пленок составляет десятки процентов. Что касается сильно отражающих пленок, то из данных, приведенных на рисунке, не следует, что они обладают высоким коэффициентом поглощения. Хотя измеренный коэффициент отражения этих пленок не превышает  $70\%$ , неизвестно, связано ли это с поглощением или с рассеянием отраженного излучения.

1.3. *Эпитаксиальные пленки PbSnTe:In для приемников излучения.* Технология роста и легирования индием пленок PbSnTe на изолирующих подложках монокристаллического  $\text{BaF}_2$ , кристаллические решетки которых хорошо согласованы, описана в работе [16], а полученные параметры пленок позволяют изготавливать на их основе фотоприемники для визуализации ТГИ в варианте с промежуточным экраном. Однако в перспективе, в расчете на использование широкоформатных матриц, крайне желательно иметь приемные устройства в интегральном исполнении, т. е. сформированные в едином кристалле собственно приемники и мультиплексоры. Поскольку единственным материалом для изготовления матричных мультиплексоров является кремний, были проведены исследования процессов роста и легирования индием пленок  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  на кремнии через тонкие буферные слои  $\text{CaF}_2$  и  $\text{BaF}_2$ .

Важным фактором, делающим пленки PbSnTe:In привлекательными для разработки систем формирования изображения в области ТГИ, является возможность их получения

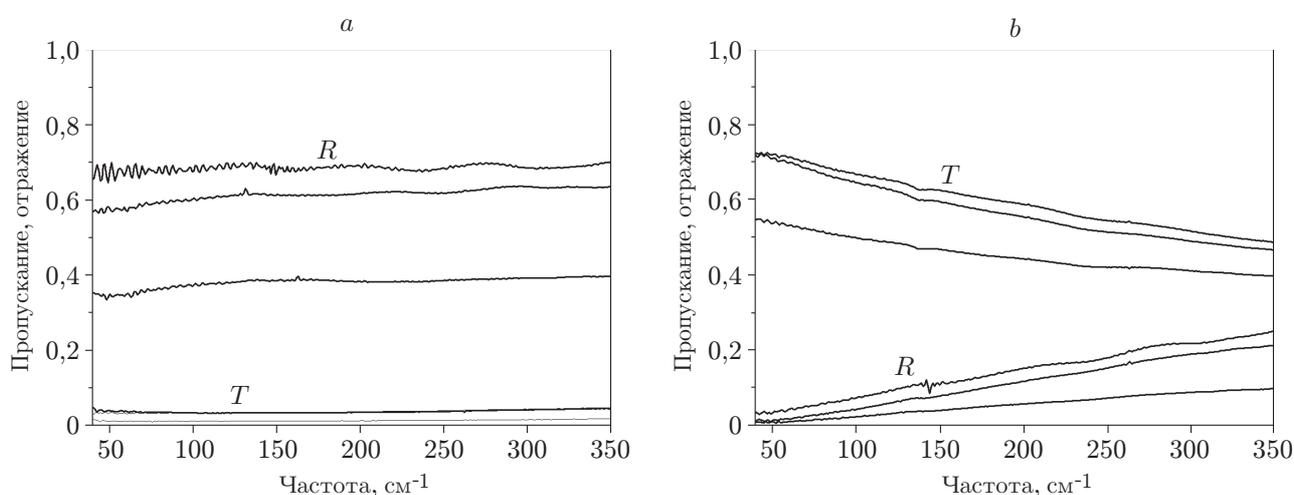


Рис. 1. Спектры пропускания (*T*) и отражения (*R*): сильно отражающих (*a*) и слабо отражающих (*b*) образцов пленок Ni

на кремниевых подложках с использованием буферных  $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$  с параметрами, аналогичными параметрам пленок на подложках  $\text{BaF}_2$  [17]. В этом случае снимается проблема рассогласования коэффициентов температурного расширения (КТР) в технологии «флип-чип», и в перспективе физический размер матричных фотоприемных устройств (МФПУ) на основе  $\text{PbSnTe:In}$  будет ограничиваться лишь возможностями кремниевой электроники. Кроме того, диэлектрический эффект, обнаруженный в [18], и фототок при воздействии ТГИ [19] открывают перспективу «прямой» регистрации терагерцового излучения.

Разработанные технологические режимы позволили получать пленки  $\text{PbSnTe:In}$  с электрофизическими свойствами, лежащими в широких пределах. В дальнейшем это позволит хорошо согласовывать выходные сопротивления и чувствительность элементов матрицы фотоприемников (ФП) с входными параметрами кремниевого мультиплексора.

**2. Регистрация терагерцового излучения в схеме с промежуточным тепловым экраном: расчет и эксперимент.** 2.1. *Расчет отношения сигнал/шум по излучению абсолютно черного тела с  $T = 300$  К.* В работе [4] было проведено сопоставление величины мощности, излучаемой экраном при различных температурах, и МЭШ для ИК-фотоприемников различных спектральных диапазонов. Показано, что при прочих равных условиях предпочтительнее использовать ФП с максимальной красной границей чувствительности. Рассмотрим теперь возможности визуализации ТГИ в схеме с промежуточным тепловым экраном с использованием приемников на основе  $\text{PbSnTe:In}$  в пассивном режиме (без дополнительной подсветки ТГИ).

Пусть источником ТГИ является модель абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой, равной  $T_{\text{АЧТ}}$ , а экран состоит из  $n$  элементов разложения (пикселей), на каждый из которых поступает ТГИ с элемента площади излучателя  $0,5 \times 0,5$  см при поглощении 50 %. Матрица фотоприемных элементов состоит также из  $n$  пикселей, причем взаимное расположение экрана и матрицы таково, что можно приближенно считать, что излучение пикселя экрана полностью поглощается пикселем матрицы ФП в области его чувствительности.

Пусть  $T_{0\varepsilon}$  — температура находящегося в вакууме промежуточного теплового экрана в отсутствие сигнального ТГИ. В пренебрежении теплопереноса мощность, рассеиваемая экраном,  $P_{0\varepsilon} = \sigma T_{0\varepsilon}^4$  (одна эффективно излучающая поверхность). При поглощении сигнального ТГИ к пикселю экрана подводится дополнительная мощность

$$\Delta P_{\text{ТГИ}} = \alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(T_{\text{АЧТ}}, \lambda) d\lambda,$$

где  $R(T_{\text{АЧТ}}, \lambda)$  — излучательная способность АЧТ (объекта — источника ТГИ);  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — граничные длины волн пропускания фильтра, вырезающего терагерцовую компоненту теплового излучения;  $\alpha$  — коэффициент, определяемый площадью пикселя, пропусканием фильтра, коэффициентом поглощения экрана и характеристиками терагерцового объектива.

В стационарном режиме при наличии сигнального ТГИ рассеиваемая пикселем экрана мощность  $P_{1\varepsilon} = P_{0\varepsilon} + \Delta P_{\text{ТГИ}}$ .

Температура экрана при поглощении ТГИ повысится до значения  $T_{1\varepsilon} = \sqrt[4]{P_{1\varepsilon}/\sigma}$ .

В этих условиях излучение, попадающее на пиксель приемной матрицы, запишем в виде

$$P_{\text{ФП}} = \int_0^{\lambda_{\text{кр}}} R(T_{1\varepsilon}, \lambda) d\lambda,$$

где  $\lambda_{кр}$  — красная граница чувствительности ФП.

До поглощения ТГИ в цепи фотоприемной площадки (пикселя) течет ток  $I$ :

$$I_{ФП0} = \int_0^{\lambda_{кр}} R(T_{0э}, \lambda) S_{\lambda} d\lambda,$$

где  $S_{\lambda}$  — амперваттная чувствительность.

При поглощении субмиллиметрового излучения ток вычисляется как

$$I_{ФП1} = \int_0^{\lambda_{кр}} R(T_{1э}, \lambda) S_{\lambda} d\lambda.$$

Тогда полезный сигнал в цепи ФП, вызванный поглощением сигнального ТГИ, равен разности этих токов:

$$I_c = I_{ФП1} - I_{ФП0}.$$

На основе изложенных соображений перейдем к конкретным расчетам с привязкой к известным параметрам ФП на базе PbSnTe:In. В [20] приведена экспериментальная зависимость амперваттной чувствительности ФП из PbSnTe:In от температуры излучателя АЧТ, которую в диапазоне  $T = 4,2-300$  К можно приблизительно аппроксимировать выражением

$$S_{\lambda_{PbSnTe:In}} = 10^{-\frac{1,8T_{э}}{300} + 5,6} \text{ А/Вт}.$$

Так как МЭШ равна  $I_{ш}/S_{\lambda}$ , а значение МЭШ для ФП на основе PbSnTe:In не превышает значений  $1 \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup> при гелиевых температурах, то получим оценку величины собственного (в отсутствие фонового излучения) шума ФП «сверху»:

$$I_{ш0} = 10^{\frac{1,8T_{э}}{300} - 12,4} \text{ А/Гц}^{0,5}.$$

Экстраполяция шума к нулевой температуре излучателя (экрана) дает значение собственного шума ФП, равное  $I_{ш0} = 4 \cdot 10^{-12}$  А/Гц<sup>0,5</sup>. Полагая шум дробовым, что имеет основание для ФП с преобладанием инжекции из контактов, можно записать фоновый шум экрана в виде

$$I_{ш.э} = \sqrt{2qS_{\lambda}P_{э0}}.$$

Полный шум ФП при ненулевой температуре экрана в этом случае запишем в виде

$$I_{ш.п} = \sqrt{(2qS_{\lambda}P_{э0})^2 + I_{ш0}^2}.$$

Отношение сигнал/шум можно выразить как

$$S = I_c / I_{ш.п}.$$

Результаты расчета отношения сигнал/шум в зависимости от температуры экрана представлены на рис. 2. Сплошной кривой показана расчетная зависимость без учета нагрева экрана сигнальной компонентой ТГИ объекта с комнатной температурой, а точками — с учетом этой компоненты. При этом расчетная мощность сигнального ТГИ в

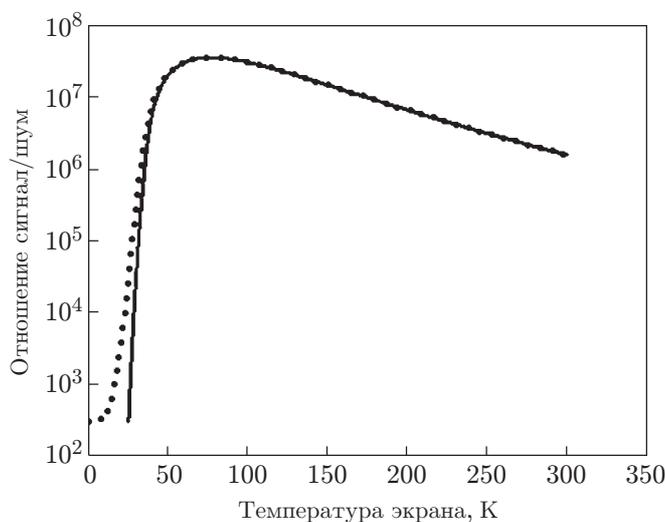


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум от температуры экрана

диапазоне от 100 до 200 мкм составляет примерно  $2,3 \cdot 10^{-6}$  Вт/пиксель. Как видно из рисунка, существует оптимальная для отношения сигнал/шум температура экрана, которая определяется параметрами ФП и в данном случае близка к  $T_s = 75$  К. Полученный результат связан с тем, что при понижении температуры экрана ниже 50–70 К одновременно со снижением фонового излучения (шума) резко уменьшается доля квантов в излучении экрана, приходящаяся на область чувствительности ФП. При более высоких температурах быстрое возрастание фонового шума не компенсируется в достаточной степени ростом чувствительности ФП, что также ведет к ухудшению отношения сигнал/шум по сравнению с оптимальным.

2.2. *Регистрация фототока в схеме с промежуточным экраном.* В качестве макета отдельного элемента системы формирования изображения был выбран одиночный ФП на основе пленки PbSnTe:In, над которым в непосредственной близости располагался элемент экрана, описанный в разд. 1.2. ФП представлял собой два металлических электрода на поверхности пленки PbSnTe:In, разделенные зазором 64 мкм. Длина зазора составляла один миллиметр. К экрану с поглощающим покрытием из никеля были припаяны тонкие (2 мкм) золотые проволоки, что позволяло разогревать его джоулевым теплом при приложении к нему напряжения и таким образом имитировать разогрев экрана ТГИ. Сопротивление экрана составляло 150 Ом. Экран и ФП были размещены в камере с температурой  $T = 4,2$  К и тщательно экранированы от попадания на них фонового и любого другого излучения. Излучение экрана регистрировалось ФП. Мощность, выделяемая на экране, примерно соответствовала мощности ЛСЭ, которую планировалось подавать на него.

Временные зависимости напряжения с ФП при приложении к элементу экрана различного напряжения показаны на рис. 3, *a–f*. Величина напряжения составляла 2,4; 2,6; 2,8; 3,0; 3,2 и 3,4 В, что соответствовало выделяемой мощности 38; 45; 52; 60; 68 и 77 мВт (при величине измеренной мощности ЛСЭ в плоскости экрана около  $50$  мВт/см<sup>2</sup>). Однако трудно дать оценку, какая часть указанной мощности отводилась как ИК-излучение, а какая — через электрические контакты к экрану и пьедесталу, на котором были закреплены его концы. Из рисунка видно, что, начиная с самых малых из указанных значений мощности, она уверенно регистрировалась фотоприемником.

Периодические колебания напряжения на ФП, видимые на рисунке, не связаны с флуктуацией излучаемой экраном мощности (она оставалась постоянной). Они представляют собой описанные в [21, 22] колебания тока в PbSnTe:In при постоянном освещении, кото-

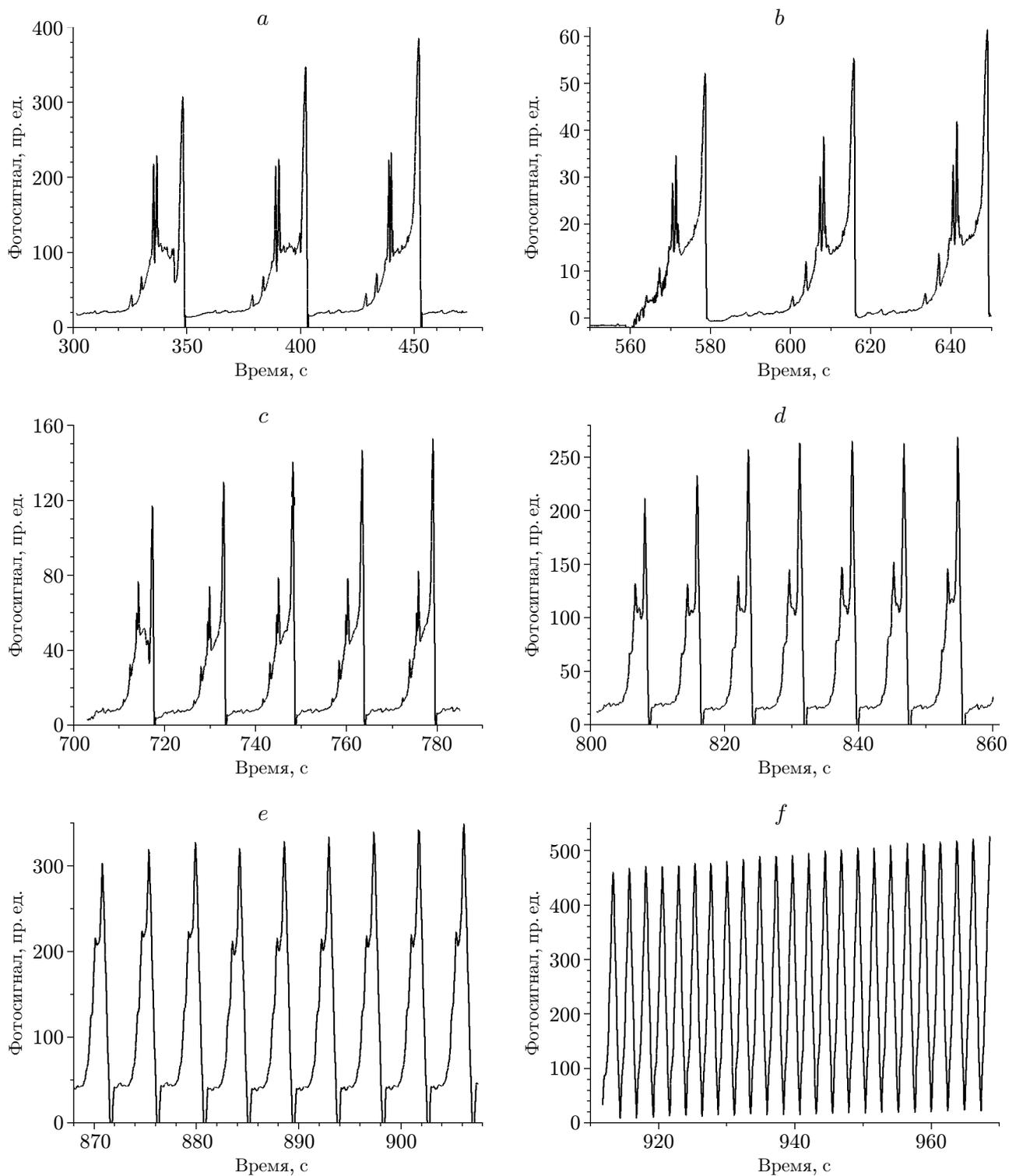


Рис. 3. Зависимость фотосигнала от времени при различных значениях напряжения на экране: 2,4 В (*a*); 2,6 В (*b*); 2,8 В (*c*); 3,0 В (*d*); 3,2 В (*e*) и 3,4 В (*f*)

рые связаны с уровнем освещения, его спектральным составом, значением электрического поля и геометрией образцов. Можно предположить, что их форма связана с динамикой перезарядки ловушек со сложным энергетическим спектром, которая не является предметом изучения в предлагаемой работе.

На данном этапе экспериментов по наблюдению сигнала с ФП в условиях, максимально приближенных к реальным, т. е. под действием ТГИ с использованием терагерцовых обрезаящих фильтров, не проводилось. Однако наблюдаемые временные зависимости фотосигнала при нагреве экрана джоулевым теплом (см. рис. 3) и расчетные зависимости отношения сигнал/шум (см. рис. 2) свидетельствуют о принципиальной возможности создания устройства формирования изображения объекта с комнатной температурой в терагерцовом диапазоне длин волн без активной подсветки ТГИ.

**Закключение.** Таким образом, в результате проведенных в данной работе исследований:

— расширен в 3 раза (40–230 мкм) спектральный диапазон излучения Новосибирского лазера на свободных электронах за счет второй и третьей гармоник;

— созданы системы диагностики прототипов устройств формирования изображения в терагерцовой области спектра;

— разработан модельный материал для экрана-преобразователя излучения терагерцового диапазона в инфракрасное на основе никелевого покрытия на полиимидной пленке толщиной 3 мкм;

— измерены спектральные зависимости коэффициентов пропускания и отражения образцов таких преобразователей в терагерцовой области спектра;

— показано, что поглощение на длине волны 100 мкм может превышать 40 %;

— получены пленки PbSnTe, легированные индием, на буферных слоях фторидов CaF<sub>2</sub> и BaF<sub>2</sub>, выращенных предварительно на пластинах Si(111) со свойствами, пригодными для создания матричной системы считывания теплового изображения с промежуточного экрана;

— проведены расчеты отношения сигнал/шум при воздействии терагерцовой компоненты излучения АЧТ с  $T = 300$  К в схеме с промежуточным тепловым экраном при использовании фотоприемников на основе PbSnTe:In;

— изготовлен и исследован макет элемента устройства непрямого формирования изображения в терагерцовой области спектра, состоящий из нагреваемого поглощающего экрана — пленки никеля на полиимидной основе — и фотоприемника PbSnTe:In.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khokhlov D. R., Ivanchik I. I., Raines S. N. et al. Performance and spectral response of Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te (In) far-infrared detectors // Appl. Phys. Lett. 2000. **76**, N 20. P. 2835–2837.
2. Акимов А. Н., Ерко в В. Г., Кубарев В. В. и др. Фоточувствительность пленок Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te(In) в терагерцовой области спектра // ФТП. 2006. **40**, № 2. С. 169–173.
3. Акимов А. Н., Ерко в В. Г., Климов А. Э. и др. Токи инжекции в узкозонном диэлектрике Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te(In) // ФТП. 2005. **39**, № 5. С. 563–568.
4. Акимов А. Н., Климов А. Э., Шумский В. Н., Асеев А. Л. Матричные фотоприемные устройства субмиллиметрового диапазона на основе пленок PbSnTe:In // Автометрия. 2007. **43**, № 4. С. 63–73.
5. Кубарев В. В. Ксенон как эффективный буферный газ субмиллиметровых лазеров на колебательно-вращательных переходах // Квантовая электрон. 1996. **23**, № 3. С. 197.
6. Кубарев В. В. Оптимизированный HCN-лазер // ПТЭ. 1986. № 3. С. 177.

7. **Gavrilov N. G., Knyazev B. A., Kolobanov E. I. et al.** Status of the Novosibirsk high-power terahertz FEL // Nuclear Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. 2007. **575**, N 1/2. P. 54–57.
8. **Kubarev V. V., Vinokurov N. A., Kotenkov V. V. et al.** Modulation instability, three mode regimes and harmonic generation at the Novosibirsk terahertz free electron laser // Nuclear Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. 2009. **603**, N 1/2. P. 25–27.
9. **Kubarev V. V., Vinokurov N. A., Kotenkov V. V. et al.** Fourier spectroscopy of radiation of the Novosibirsk terahertz free electron laser // Digests of the Joint 31th Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves & 14th Intern. Conf. on Terahertz Electronics. Shanghai, China. September 18–22, 2008. P. 58.
10. **Kuznetsov S. A., Kubarev V. V., Kalinin P. V., Vinokurov N. A.** 1-D and 2-D metal mesh based quasi-optical selective components for high-power applications at Novosibirsk terahertz FEL // Digest of the Joint 32th Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, and 15th Intern. Conf on Terahertz Electronics. Cardiff, UK. 3–7 September, 2007. P. 303–304.
11. **Kubarev V. V., Makashov E. V., Palagin K. S. et al.** Powermeters and 2D beam imaging systems on the Novosibirsk terahertz free electron laser // Ibid. P. 249–250.
12. **Kubarev V. V.** Optical properties of CVD-diamond in terahertz and infrared ranges // Nuclear Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. 2009. **603**, N 1/2. P. 22–24.
13. **Hummel D. O.** Atlas of Polymer and Plastics Analysis. VCH, 1985. Vol. 1: Polymers: Structures and Spectra.
14. **Ordal M. A., Bell R. J., Alexander R. W., Jr. et al.** Optical properties of Au, Ni, and Pb at submillimeter wavelengths // Appl. Opt. 1987. **26**. P. 744–752.
15. **Абелес Ф.** Оптические свойства металлических пленок // Физика тонких пленок. Т. 6. М.: Мир, 1973.
16. **Fedosenko E. V., Klimov A. E., Krivopalov D. V. et al.** Surface LTT-film structure with In doping // Appl. Surface Sci. 1994. **78**. P. 413–420.
17. **Пат. № 2278446 РФ.** Интегральное многоэлементное фотоприемное устройство инфракрасного диапазона /А. А. Величко, В. А. Илюшин, Н. И. Филимонова и др. Оpubл. 20.06.2006, Бюл. № 17.
18. **Климов А. Э., Шумский В. Н.** Фотодиэлектрический эффект в эпитаксиальных пленках  $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ , полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2001. № 3. С. 65–75.
19. **Акимов А. Н., Еркоу В. Г., Кубарев В. В. и др.** Фоточувствительность пленок  $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$  в терагерцовой области спектра // ФТП. 2006. **40**, вып. 2. С. 169.
20. **Климов А. Э., Шумский В. Н.** Многоэлементные фотоприемные устройства дальнего ИК-диапазона на основе гетероэпитаксиальных пленок  $PbSnTe$ , легированных In, на  $BaF_2$  // Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона /Под ред. С. П. Синецы. Новосибирск: Наука, 2001. С. 308–372.
21. **Akimov B. A., Ryabova L. I., Shumskiy V. N., Petikov N. I.** An operating regime based on switching effect for photodetectors of  $PbSnTe(In)$  MBE films // Infrared Phys. 1993. **34**, N 4. P. 375–378.
22. **Borodin V. V., Klimov A. E., Shumsky V. N.** Photocurrent oscillations in  $PbSnTe(In)$  films // Narrow Gap Semiconductors /Eds. S. C. Shen, D. V. Tang, G. V. Zheng, G. Bauer. World Scientific, 1997. P. 361–364.