

УДК 535.34, 535.14, 53.082.52, 53.082.62

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ
ТЕТРААМИНОДИФЕНИЛА В ВИДИМОМ, ИК- И ТГц- ДИАПАЗОНАХ****А.Г. Паулиш^{1,4}, В.А. Голяшов², А.В. Гусаченко¹, А.О. Морозов¹,
К.В. Дорожкин³, В.И. Суляев³, В.Я. Костюченко⁴, С.М. Пыргаева⁵**¹*Новосибирский филиал Института физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологический
институт прикладной микроэлектроники»*²*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН*³*Национальный исследовательский Томский государственный университет*⁴*Новосибирский государственный технический университет*⁵*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова*

Приведены результаты исследований спектральных характеристик чувствительности нового пироэлектрического детектора на основе слоев тетрааминодифенила толщиной 1 мкм в диапазоне длин волн 0,4...10 мкм и 300...3000 мкм. Размер фоточувствительного элемента пироприемника составил 1×1 мм. Для изготовления входного окна, прозрачного в указанных диапазонах, использовалась пленка майлара, толщиной около 70 мкм. Обнаружено, что майлар имеет линии поглощения в диапазоне 0,4...10 мкм, что необходимо учитывать при разработке широкополосных детекторов. Минимальная обнаруживаемая мощность излучения (мощность эквивалентная шуму) в видимом и ИК-диапазонах составила менее $6 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}, что примерно в пять раз ниже, чем для аналогов. В ТГц-диапазоне чувствительность пироприемника в 2...8 раз превышает чувствительность оптико-акустического приемника (ячейки Голея). Показано, что чувствительность такого пироприемника слабо зависит от длины волны во всем измеренном диапазоне. Это может быть объяснено аномальным скин-эффектом в полупрозрачном алюминиевом электроде, который приводит к спектрально независимому поглощению излучения на уровне 40...50 %. Полоса пропускания пироприемника, определенная из измеренной амплитудно-частотной характеристики при синусоидальной и прямоугольной засветке, составляет примерно 500 Гц и определяется параметрами усилителя, расположенного на чипе сенсора, и может быть расширена.

Ключевые слова: пироэлектрический детектор, приемники ИК- и ТГц-излучения, тетрааминодифенил, ИК-спектроскопия, ТГц-спектроскопия.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-57-69

Введение

Пироэлектрические приемники являются неохлаждаемыми тепловыми фотоприемниками, используемыми, как правило, для регистрации теплового излучения в диапазоне длин волн 2...20 мкм [1–5]. Будучи практически неселективными приборами, они часто применяются в ИК-спектрометрах. В последнее время было показана возможность их применения в терагерцовой (ТГц) части оптического диапазона 100...1000 мкм [6–10]. Для создания пироприемников ИК- и ТГц-диапазонов исследовано много пироэлектрических материалов, таких как цирконат-титанат свинца, сополимеры винили-денфторида, органические полимеры тетрааминодифенила (ТАДФ), танталат лития (LiTaO₃), ниобат лития (LiNbO₃), соединения KTaNbO₃, PbZnNbO₃, PbScTaO₃, Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb₂O₆ и другие. Идеальный

пироэлектрический сенсор помимо большого пироэлектрического коэффициента и малой диэлектрической постоянной должен обладать малой теплоемкостью. К таким материалам, прежде всего, относится тетрааминодифенил (или дифенилтетраамина (ДФТА)). В работах [11–15] были исследованы физико-химические свойства пленок ДФТА толщиной 0,6...1,0 мкм, полученные методом вакуумного термического напыления, для создания тонкопленочной мишени в пироэлектрическом электронно-оптическом преобразователе, рассчитанном для регистрации ИК-излучения с рабочим диапазоном 8...14 мкм. Для других материалов, например для танталата лития и ниобата лития, рабочие толщины пленок существенно больше, так как получают механическим утонением толстой пластины до 25...50 мкм с последующим ионным травлением до 10...20 мкм [16]. Как было показано в [17], заряд, т. е. ток, генерируемый пироэлектрическим детектором, увеличивается с уменьшением толщины материала. Кроме того, малая толщина пироэлектрической пленки обеспечивает малую теплоемкость сенсора и, следовательно, высокую чувствительность и быстродействие детектора. На сегодня характеристики пиродетекторов на основе тонких слоев ТАДФ в ТГц-диапазоне и субТГц-диапазоне не исследовались.

Целью работы является определение спектральных характеристик чувствительности пироэлектрического фотодетектора на основе ТАДФ в видимом, инфракрасном и терагерцовом диапазонах и выяснение перспектив использования таких детекторов в данных диапазонах.

1. Образцы и методы исследований

Образцы пироэлектрических детекторов изготавливались на НПП «Восток», г. Новосибирск, в стандартном корпусе КТ-3 [18]. В качестве материала входного окна использовалась пленка полиэтилентерефталата (то же, что и лавсан или майлар) толщиной около 70 мкм, предположительно прозрачной в видимом, ИК- и ТГц-диапазонах. Структурная схема пиродетектора показана на рис. 1, а.

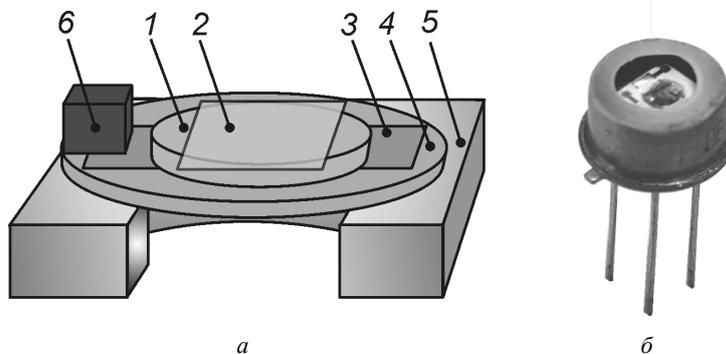


Рис. 1 – Пироэлектрический детектор на основе тетрааминодифенила:
 а – структурная схема; б – внешний вид пироприемника в корпусе; 1 – слой ТАДФ; 2, 3 – электроды; 4 – несущая полимерная пленка; 5 – ситалловая подложка; 6 – предусилитель

Fig. 1 – A pyroelectric detector based on tetraamine diphenyl:
 a is a structure diagram b is an overview of the pyroelectric detector in a case;
 1 is a tetraamine diphenyl layer; 2, 3 are contact electrodes; 4 is a self support polymer carrier film; 5 is a Sitall substrate; 6 is a preamplifier;

Фоточувствительный элемент представляет собой конденсатор, где в качестве диэлектрика использован слой ТАДФ (1) толщиной 1 мкм. В качестве верхнего

электрода 2 использован полупрозрачный слой алюминия толщиной 0,01 мкм, а для нижнего электрода – слой алюминия толщиной 0,07 мкм 3. Конденсатор размещен на свободно висящей пленке полиарилатно-эпоксидного лака марки ЛКС толщиной 0,3 мкм 4, закрепленной по краям на ситалловой подложке 5 размером 4×4×1 мм с отверстием в центре диаметром 2 мм. Такая конструкция позволяет минимизировать теплоотвод от пиропленки, которая нагревается при поглощении излучения, что увеличивает чувствительность детектора. На ситалловой подложке также размещен предварительный усилитель 6. Размер фоточувствительной площадки составлял 1×1 мм. На рис. 1, б показан внешний вид детектора в корпусе с габаритными размерами без выводов $\varnothing 9 \times 6,6$ мм. Данный детектор подключался к вторичному усилителю и формирователю выходного сигнала с максимальной амплитудой ± 4 В (нагрузка 50 Ом) и максимальным шумом усилителя на уровне 0,3 мВ.

Измерение спектральных характеристик чувствительности пироприемника в видимом и ИК-диапазоне проводилось на спектрометрическом комплексе на основе монохроматора МДР-41 с рабочим диапазоном длин волн $\lambda = 0,4 \dots 10$ мкм. В качестве источников излучения для диапазона $\lambda = 0,4 \dots 2,0$ мкм использовалась кварцевая вольфрам-галогенная лампа, а для диапазона $\lambda = 2,0 \dots 10$ мкм использовался карбид-кремниевый глобар. Для разных диапазонов λ использовались разные дифракционные решетки: 1500 штрихов на мм для диапазона 0,4...1,0 мкм, 600 штр/мм для 1,0...2,0 мкм, 300 штр/мм для 2,0...4,0 мкм и 150 штр/мм для 4,0...10 мкм, спектральное разрешение составляло около 4, 10, 20 и 40 нм соответственно. Излучение модулировалось с помощью оптико-механического модулятора на частоте 74 Гц, исследуемый фотоприемник освещался равномерно по всей площади, выходной сигнал приемника регистрировался с помощью синхронного усилителя EG&G 5210. Измерения проводились следующим образом. Сначала измерялся спектр отклика исследуемого пироприемника, затем измерялся спектр опорного пироприемника (с калиброванным спектром чувствительности) и первый спектр нормировался на второй. Опорным детектором являлся калиброванный пироэлектрический фотоприемник Oriol 70123 (Oriol Instruments, США) на основе танталата лития с входным окном CaF_2 и чувствительностью 1000 В/Вт. Абсолютная калибровка вольт-ваттной чувствительности исследуемого пироприемника проводилась с помощью сфокусированного излучения полупроводникового лазера с длиной волны 650 нм. Схема измерений строилась так, чтобы все излучение лазера полностью попадало на фотоприемные площадки обоих пироприемников.

Измерения в ТГц-диапазоне проводилось на квазиоптическом спектрометре с набором ламп обратной волны (ЛОВ) в качестве перестраиваемых источников монохроматического излучения с общим рабочим диапазоном частот излучения $\nu = 100 \dots 1000$ ТГц ($\lambda = 300 \dots 3000$ мкм). Измерения проводились при модуляции излучения с частотой 23 Гц оптико-механическим модулятором. Опорным детектором служил калиброванный оптико-акустический приемник (ОАП), по-другому называемый ячейкой Голея, производства Microtech Instruments, Inc. (США). Измерения проводились по аналогичной методике: сначала измерялся спектр отклика исследуемого пироприемника, затем спектр ячейки Голея, далее первый спектр нормировался на второй. Следует отметить, что диаметр фоточувствительной площадки ячейки Голея составляет примерно 6 мм и этого достаточно, чтобы поглотить весь поток излучения. Размер фоточувствительной площадки пироприемника составляет 1×1 мм и это меньше размера светового пятна в плоскости пироприемника. Поэтому для корректного сравнения чувствительностей ячейки Голея и пироприемника был измерен профиль пучка излучения и определена доля мощ-

ности, приходящейся на фоточувствительную площадку пироприемника. На частоте $\nu = 626$ ГГц доля составила 27 % от общей мощности излучения. Поэтому при сравнении абсолютных чувствительностей сигнал с пироприемника умножался на коэффициент $1/0,27 = 3,7$. Данная частота была выбрана потому, что на ней пространственное распределение мощности излучения по площади пучка было наиболее близким к распределению Гаусса и имело минимальную ширину на полувысоте. На других частотах форма распределения мощности отличалась от распределения Гаусса в более значительной степени и имело бóльшую ширину. Таким образом, проведенная калибровка чувствительности нового пироприемника является оценкой снизу.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2, *a* показан пример измеренного спектра вольт-ваттной чувствительности пироприемника в видимом и ИК-диапазоне. Видно, что с одной стороны спектральная зависимость практически ровная во всем диапазоне. С другой стороны зависимость имеет осцилляции в коротковолновой части спектра (0,4...3,0 мкм) и провалы в окрестности длин волн $\lambda \approx 3,4$; 6,8; 7,2 и 8,6 мкм. Также присутствуют небольшие осцилляции в диапазоне от 4,0 до 6,5 мкм.

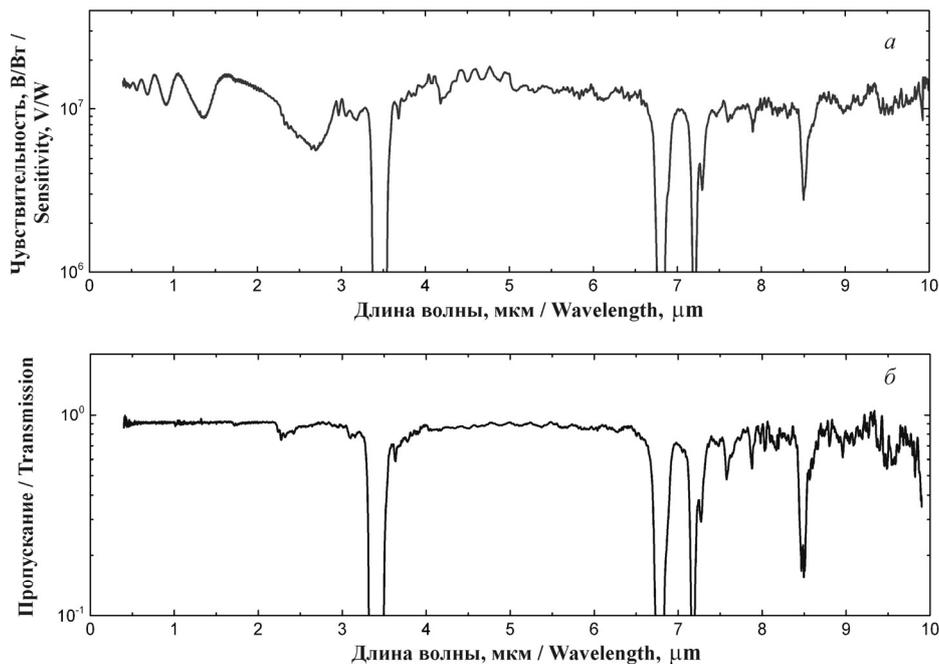


Рис. 2 – Спектр вольт-ваттной чувствительности пироприемника (*a*); спектр пропускания майларовой пленки (*б*)

Fig. 2 – A pyroelectric detector volt – watt sensitivity spectrum (*a*) and a mylar film transmission spectrum (*b*)

Увеличение шума в диапазоне 8...10 мкм связано с уменьшением энергии излучения источника (глобар + монохроматор) в этом диапазоне. Осцилляции могут быть связаны с интерференцией световых лучей, например, в пироэлектрической пленке или в майларовой пленке входного окна. Выяснение причин наблюдаемых осцилляций и их устранения требует дополнительных исследований, которые

будут выполнены в дальнейшей работе. Причиной провалов, можно предположить, является поглощение в майларовом окне. Для проверки этого предположения был измерен спектр пропускания пленки майлара, который показан на рис. 2, б. Видно, что провалы в спектрах хорошо совпадают и связаны с линиями поглощения майлара. Спектральные характеристики майларовых пленок в данном диапазоне ранее не исследовались, полученные результаты являются новыми, и их необходимо учитывать при конструировании детекторов с майларовым окном.

Вольт-ваттная чувствительность предложенного пироприемника находится в диапазоне $\approx 0,5 \dots 1,5 \cdot 10^7$ В/Вт. Вольт-ваттная чувствительность пироэлектрического фотоприемника Oriel 70123 составляла $1,0 \cdot 10^3$ В/Вт и эквивалентная мощность шума в единичной полосе (noise equivalent power, NEP) на уровне $3 \cdot 10^{-9}$ Вт/Гц^{1/2}. Максимальный шум исследуемого пироприемника составлял 6,0 мВ, что при полученной средней вольт-ваттной чувствительности $1,0 \cdot 10^7$ В/Вт дает $NEP = 6 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}. Что, примерно, в пять раз ниже NEP калибровочного детектора.

На рис. 3, а показан фрагмент спектральных зависимостей отклика пироприемника и ячейки Голя, измеренных на ЛОВ-спектрометре. Видно, что все спектры, включая спектр ячейки Голя, имеют ярко выраженный линейчатый характер, который связан с линейчатым спектром излучения ЛОВ [19, 20].

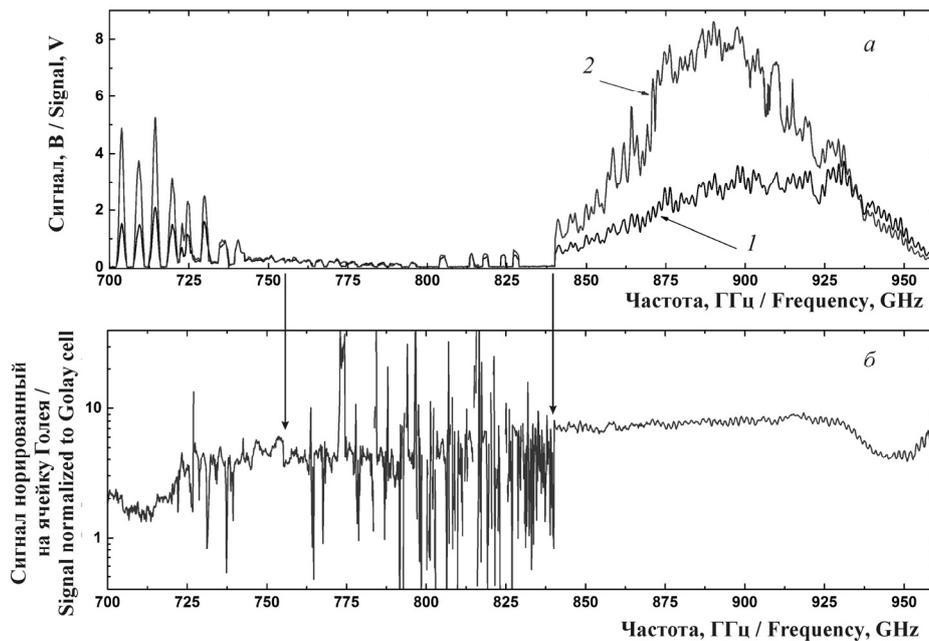


Рис. 3 – Фрагмент спектров отклика ячейки Голя и пироприемника:

а – исходные спектры ячейки Голя (1) и пироприемника (2); б – спектр отклика пироприемника, нормированный на сигнал ячейки Голя

Fig. 3 – A fragment of the Golay cell and pyroelectric detector response spectra:

a is an initial Golay cell (1) and pyroelectric detector response spectra; b is a pyroelectric detector response spectrum normalized to the Golay cell signal

При определенных частотах излучение практически отсутствует, например в диапазоне 750...830 ГГц, а там, где излучение регистрируется, амплитуда отклика пироприемника в 2–5 раз превышает сигнал от ячейки Голя. При этом, как гово-

рилось ранее, на фоточувствительную площадку пироприемника попадает только часть излучения, в отличие от ячейки Голя, которая поглощает все излучение.

В результате, при нормировке спектра пироприемника на спектр ячейки Голя в местах, где полезный сигнал отсутствует, возрастает роль шумов, что проявляется как шум высокой амплитуды, показанный на рис. 3, б (см. диапазон 750...830 ГГц, обозначенный стрелками). Чтобы уменьшить вклад таких шумов, была проведена математическая обработка нормированных спектров методом быстрого преобразования Фурье (FFT – Fast Fourier Transform) с окном 50. На рис. 4 приведен пример спектра отклика пироприемника во всем измеренном диапазоне частот 100...1000 ГГц, обработанном по данной методике. Пики, показанные стрелками, являются артефактами нормировки в случае отсутствия полезного сигнала и не должны учитываться.

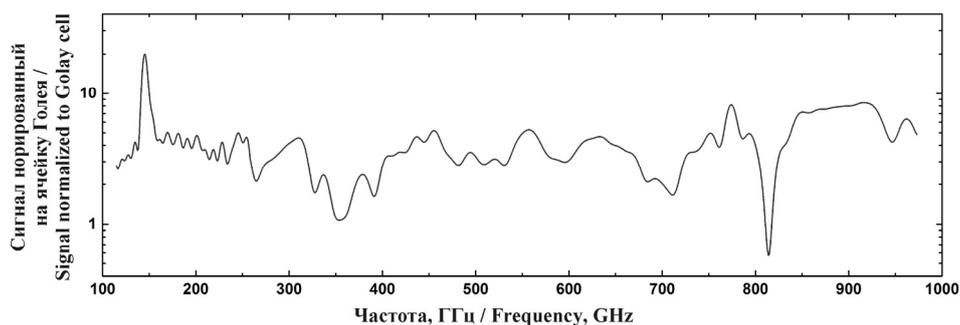


Рис. 4 – Спектр отклика пироприемника, нормированный на сигнал ячейки Голя и сглаженный методом быстрого преобразования Фурье. Стрелками показаны артефакты нормировки

Fig. 4 – The response spectrum of the pyroelectric detector normalized to the Golay cell signal and smoothed by the fast Fourier transform method. Arrows indicate normalization artifacts

Из рисунка видно, что чувствительность пироприемника в среднем имеет ровную спектральную (или спектрально независимую) характеристику и в 2...8 раз превышает чувствительность ячейки Голя, который является наиболее чувствительным детектором в данном диапазоне.

Спектральная независимость чувствительности пироприемника с толщиной чувствительного слоя 1 мкм в диапазоне длин волн 0,4...10 мкм и 300...3000 мкм не может быть объяснена поглощением в пироэлектрической пленке тетрааминодифенила. Вероятно, поглощение возникает в верхнем полупрозрачном электроде из алюминия, толщиной 0,01 мкм, и обусловлено аномальным скин-эффектом. Известно, что оптические характеристики металлических пленок, толщина которых меньше толщины скин-слоя, не зависят от частоты излучения [21–23], а поглощение при определенном соотношении толщины и проводимости слоя может достигать 50 %. В этом случае такая структура пироприемника является идеальной для сверхширокополосного приемника с чувствительностью от ультрафиолетового диапазона до миллиметрового диапазона.

На рис. 5 приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) пироприемника, измеренная при синусоидальной форме засветки и нормированная на максимум при частоте 100 Гц (кривая 1). Синусоидальная форма засветки обеспечивалась с помощью механического прерывателя, размер окна которого примерно совпадал с поперечным размером пучка излучения. Полученная характеристика определяется

параметрами предварительного усилителя, расположенного на чипе сенсора (позиция *б* на рис. 1, *а*). Данный усилитель имеет полосу частот пропускания 60...400 Гц с максимумом на 100 Гц. При использовании пироприемников в активных системах, как правило, с подсветкой прямоугольной формы, необходимо знать, как трансформируется АЧХ детектора. На рис. 5 показана АЧХ пироприемника при засветке источником на основе лавинно-пролетного диода с частотой излучения 140 ГГц (кривая 2). Модуляция проводилась подачей импульсов прямоугольной формы в систему питания источника. Полученная характеристика нормировалась на сигнал при частоте модуляции 100 Гц, так же как и для зависимости 1. Видно, что формы характеристик 1 и 2 похожи при частоте модуляции более 200 Гц. При этом сигнал при прямоугольной засветке превышает сигнал при синусоидальной засветке. При низких частотах, менее 100 Гц, характеристики ведут себя по-разному – при синусоидальной засветке сигнал падает, а при прямоугольной засветке растет.

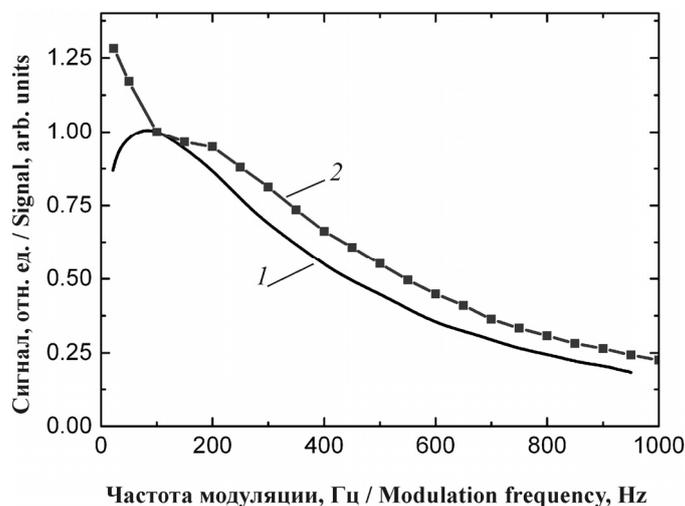


Рис. 5 – Амплитудно-частотные характеристики пироприемника при синусоидальной засветке 1 и при прямоугольной засветке 2

Fig. 5 – Amplitude-frequency characteristics of the pyroelectric detector with sinusoidal illumination 1 and with rectangular illumination 2

Данное отличие в поведении АЧХ обусловлено тем, что при прямоугольной засветке, в отличие от синусоидальной, в сигнале присутствует широкий набор частот, независимо от частоты модуляции, поэтому при частоте модуляции менее 100 Гц в сигнале засветки присутствуют сигналы с более высокими частотами, которые дают добавку к сигналу на частоте модуляции. Это также объясняет и прирост сигнала при частотах более 100 Гц. В нашем случае полученная АЧХ пироприемника определяется частотными характеристиками предварительного усилителя, расположенного на чипе сенсора. Однако известно, что пироэлектрические детекторы могут работать на частотах более 10 кГц, так как скорость отклика пироэлектрика ограничена лишь частотой колебательной поляризации кристаллической решетки (около 10^{12} Гц) [1]. Для расширения полосы пропускания детектора необходимо менять параметры предусилителя.

Заключение

В данной работе исследованы спектральные характеристики чувствительности нового пироэлектрического детектора излучения на основе слоев тетрааминодифенила толщиной 1 мкм в диапазонах длин волн 0,4...10 мкм и 300...3000 мкм. Показано, что вольт-ваттная чувствительность такого пироприемника имеет относительно ровную характеристику во всем измеренном диапазоне. Полученная мощность, эквивалентная шуму, составила $\approx 6 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}, что в 2...8 раз ниже, чем для известных пироэлектрических детекторов и ячейки Голея. Обнаружено, что пленка майлара, использованная в качестве входного окна детектора, имеет линии поглощения в ИК-диапазоне, что необходимо учитывать при конструировании приборов. Измерение амплитудно-частотной характеристики показало, что полоса пропускания пироприемника составляет около 500 Гц на уровне 0,7, определяется предварительным усилителем на чипе сенсора и может быть расширена за счет изменения параметра предусилителя.

Использование компактных вторичных усилителей и многоканального блока питания позволит строить относительно недорогие системы для спектрорадиометрических измерений в научных и технологических исследованиях. Также такие детекторы перспективны для построения компактных систем безопасности для выявления скрытых опасных объектов – оружия, взрывных устройств и др., использующих высокую проникающую способность ТГц-излучения. Такие системы привлекательны тем, что не оказывают ионизирующего воздействия на живые организмы и обладают приемлемым пространственным разрешением [24–25].

Таким образом, данный пироэлектрический приемник имеет хорошие перспективы для использования в широком спектральном диапазоне, от видимого до миллиметрового излучения, в спектрометрах для научных исследований, в промышленности для оперативного контроля источников ТГц-излучения, а также в системах безопасности и других системах, использующих видимое, ИК- и ТГц-излучение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rogalski A.** Infrared detectors. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. – 876 p.
2. **Shibasaki I., Kuze N.** Mass production of sensors grown by molecular beam epitaxy // Molecular beam epitaxy: from research to mass production / ed. by M. Henini. – 2nd ed. – Elsevier Inc., 2018. – Ch. 31. – P. 693–719. – DOI: 10.1016/C2016-0-02290-8.
3. **Spain E., Venkatanarayanan A.** Review of physical principles of sensing and types of sensing materials // Comprehensive Materials Processing. – 2014. – Vol. 13. – P. 5–46. – DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01302-9.
4. Pyroelectric materials for uncooled infrared detectors: processing, properties, and applications / M.D. Aggarwal, A.K. Batra, P. Guggilla, M.E. Edwards, B.G. Penn, J.R. Currie, Jr.. – Huntsville, Ala.: National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center, 2010. – 92 p.
5. **Schossing M., Norkus V., Gerlach G.** High performance pyroelectric infrared detectors // SENSOR+TEST Conferences 2009: Proceedings OPTO 2009 & IRS² 2009. – AMA Service, 2009. – P. 191–196. – DOI: 10.5162/irs09/i1.2.
6. Thin Film Lithium Tantalate (TFLTTM) pyroelectric detectors / V. Stenger, M. Shnider, S. Sriram, D. Dooley, M. Stout // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8261. – Art. 82610Q.
7. **Wang J., Gou J., Li W.** Preparation of room temperature terahertz detector with lithium tantalate crystal and thin film // AIP Advances. – 2014. – Vol. 4. – P. 027106. – DOI: 10.1063/1.4865097.
8. **Rogalski A., Sizov F.** Terahertz detectors and focal plane arrays // Opto-Electronics Review. – 2011. – Vol. 19, N 3. – P. 346–404. – DOI: 10.2478/s11772-011-0033-3.

9. Novel detectors for traceable THz power measurements / R. Müller, W. Bohmeyer, M. Kehrt, K. Lange, C. Monte, A. Steiger // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2014. – Vol. 35, iss. 8. – P. 659–670. – DOI: 10.1007/s10762-014-0066-z.
10. Characterization of a large-area pyroelectric detector from 300 GHz to 30 THz / R. Müller, V. Gutschwager, J. Hollandt, M. Kehrt, C. Monte, R. Müller, A. Steiger // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2015. – Vol. 36, iss. 7. – P. 654–661. – DOI: 10.1007/s10762-015-0163-7.
11. Свойства дифенил-2,2',4,4'-тетрамина и тонкопленочная мишень пироэлектрического электронно-оптического преобразователя на его основе / С.М. Зорин, Б.Г. Гончаренко, В.В. Козлов, А.Н. Романов, В.Д. Салов // *Известия вузов. Материалы электронной техники*. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 205–211.
12. Молекулярная структура дифенил-2,2',4,4'-тетрамина и природа пироэлектрических свойств тонких пленок на его основе / А.Н. Романов, С.К. Гуларян, С.М. Зорин, В.В. Козлов, Б.Г. Гончаренко, В.Д. Салов // *Инженерный вестник Дона*. – 2014. – № 2. – URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_32_Romanov.pdf_2337.pdf (дата обращения: 08.11.2019).
13. Measurement of the dielectric, conductance and pyroelectric properties of MWCNT: PVDF nanocomposite thin films for application in infrared technologies / M. Edwards, J. Corda, S. Egarievwe, P. Guggilla // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 8868. – Art. 88680E. – DOI: 10.1117/12.2023097.
14. Pyroelectric properties of PVDF: MWCNT nanocomposite film for uncooled infrared detectors and medical applications / A.K. Batra, M.E. Edwards, P. Guggilla, M.D. Aggarwal, R.B. Lal // *Integrated Ferroelectrics*. – 2014. – Vol. 158, N 1. – P. 98–107. – DOI: 10.1080/10584587.2014.957559.
15. **Batra A.K., Aggarwal M.D.** Pyroelectric materials: infrared detectors, particle, accelerators, and energy harvesters. – Bellingham, WA: SPIE Press, 2013. – 202 p.
16. **Muralt P.** Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films // *Reports on Progress in Physics*. – 2001. – N 64. – P. 1339–1388. – DOI: 10.1007/0-387-23319-9_5.
17. **Hossain A., Rashid M.** Pyroelectric detectors and their applications // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1991. – Vol. 27, N 5. – P. 824–829. – DOI: 10.1109/28.90335.
18. Малогабаритный приемник оптического излучения пироэлектрический МГ-33 [Электронный ресурс] / ОАО НПП «Восток»: <http://www.vostok.nsk.su/files/pdf/MG33.pdf> (дата обращения: 08.11.2019).
19. **Лебедев И.В.** Техника и приборы СВЧ: в 2 т. – М.: Высшая школа, 1970–1972. – 2 т.
20. **Альтшулер Ю.Г., Татаренко А.С.** Лампы малой мощности с обратной волной. – М.: Советское радио, 1963. – 296 с.
21. **Андреев В.Г., Вдовин В.А., Воронов П.С.** Спектральные характеристики пленок хрома нанометровой толщины в терагерцовом диапазоне частот // *Письма в ЖТФ*. – 2003. – Т. 29, вып. 22. – С. 68–73.
22. Экспериментальное исследование поглощения волн миллиметрового диапазона в тонких металлических пленках / В.Г. Андреев, А.А. Ангелуц, В.А. Вдовин, В.Ф. Лукичев // *Письма в ЖТФ*. – 2015. – Т. 41, вып. 4. – С. 52–60.
23. **Пронин С.М., Вдовин В.А., Андреев В.Г.** Исследование оптических коэффициентов нанометровых пленок меди и золота в СВЧ диапазоне // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. – 2016. – Т. 5. – С. 165411.
24. THz and security applications: detectors, sources and associated electronics for THz applications / ed. by C. Corsi, F. Sizov. – Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2014. – 292 p. – (NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics).
25. Hidden object detection: security applications of terahertz technology / W.R. Tribe, D.A. Newnham, Ph.F. Taday, M.C. Kemp // *Proceedings of SPIE*. – 2004. – Vol. 5354. – P. 168–176. – DOI: 10.1117/12.543049.

**SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE PYROELECTRIC
DETECTOR SENSITIVITY BASED ON TETRAAMINODIPHENYL
IN VISIBLE, IR AND THz - RANGES**

**Paulish A.G.^{1,4}, Golyashov V.A.², A.V. Gusachenko A.V.¹, Morozov A.O.¹,
Dorozhkin K.V.³, Suslyayev V.I.³, Kostyuchenko V.Ya.⁴, Pyrgaeva S.M.⁵**

¹ *Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics,
SB RAS, "Technological Design Institute of Applied
Microelectronics", Novosibirsk, Russian Federation*

² *Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation*

³ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

⁴ *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

⁵ *Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation*

The results of studies of the spectral sensitivity characteristics of a new pyroelectric detector based on tetraaminodiphenyl layers 1 μm thick in the wavelength range of 0.4–10 μm and 300...3000 μm are presented. The photosensitive element size of the pyrodetector was 1 × 1 mm. A mylar film with a thickness of about 70 μm was used as an input window that is transparent in the indicated ranges. The mylar was found to have absorption lines in the range of 0.4...10 μm, which must be taken into account when developing broadband detectors. The minimum detectable radiation power (noise equivalent power) in the visible and infrared ranges was less than 6 × 10⁻¹⁰ W/Hz^{1/2}, which is about five times lower than for analogues. In the THz range, the sensitivity of the pyrodetector presented is 2...8 times higher than the sensitivity of the Golay cell. It was shown that the sensitivity of such a pyrodetector weakly depends on the wavelength in the entire measured range. This can be explained by an anomalous skin-effect in a semitransparent aluminum electrode, which leads to spectrally independent absorption of radiation at a level of 40...50 %. The passband of the pyrodetector, determined from the measured amplitude-frequency characteristic for sinusoidal and rectangular illumination, is approximately 500 Hz and is determined by the parameters of the amplifier located on the sensor chip, and can be expanded.

Keywords: pyroelectric detectors, IR and THz radiation detectors, tetraaminodiphenyl, IR spectroscopy, THz spectroscopy

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-57-69

REFERENCES

1. Rogalski A. *Infrared detectors*. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 876 p.
2. Shibasaki I., Kuze N. Mass production of sensors grown by molecular beam epitaxy. *Molecular Beam Epitaxy: from research to mass production*. 2nd ed. Ed. by M. Henini. Elsevier Inc., 2018, pp. 693–719. DOI: 10.1016/C2016-0-02290-8.
3. Spain E., Venkatanarayanan A. Review of physical principles of sensing and types of sensing materials. *Comprehensive Materials Processing*, 2014, vol. 13, pp. 5-46. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01302-9.
4. Aggarwal M.D., Batra A.K., Guggilla P., Edwards M.E., Penn B.G., Currie J.R., Jr. *Pyroelectric materials for uncooled infrared detectors: processing, properties, and applications*. Huntsville, Ala., National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center, 2010. 92 p.
5. Schossing M., Norkus V., Gerlach G. High performance pyroelectric infrared detectors. *SENSOR+TEST Conferences 2009: Proceedings OPTO 2009 & IRS² 2009*. AMA Service, 2009, pp. 191–196. DOI: 10.5162/irs09/i1.2.
6. Stenger V., Shnider M., Sriram S., Dooley D., Stout M. Thin Film Lithium Tantalate (TFLTTM) pyroelectric detectors. *Proceedings of SPIE*, 2012, vol. 8261, art. 82610Q.
7. Wang J., Gou J., Li W. Preparation of room temperature terahertz detector with lithium tantalate crystal and thin film. *AIP Advances*, 2014, vol. 4, p. 027106. DOI: 10.1063/1.4865097.
8. Rogalski A., Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays. *Opto-Electronics Review*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 346–404. DOI: 10.2478/s11772-011-0033-3.

9. Müller R., Bohmeyer W., Kehrt M., Lange K., Monte C., Steiger A. Novel detectors for traceable THz power measurements. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, vol. 35, iss. 8, pp. 659–670. DOI: 10.1007/s10762-014-0066-z.
10. Müller R., Gutschwager B., Hollandt J., Kehrt M., Monte C., Müller R., Steiger A. Characterization of a large-area pyroelectric detector from 300 GHz to 30 THz. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, vol. 36, iss. 7, pp. 654–661. DOI: 10.1007/s10762-015-0163-7.
11. Zorin S.M., Goncharenko B.G., Kozlov V.V., Romanov A.N., Salov V.D. Svoistva difenil–2,2',4,4'–tetraamina i tonkopenochnaya mishen' piroelektricheskogo elektronno-opticheskogo preobrazovatelya na ego osnove [Diphenyl–2,2',4,4'–tetraamine properties and the thin–film target of a pyroelectric thermal image transducer on its basis]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki – Materials of Electronics Engineering*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 205–211.
12. Romanov A.N., Gularyan S.K., Zorin S.M., Kozlov V.V., Goncharenko B.G., Salov V.D. Molekulyarnaya struktura difenil–2,2',4,4'–tetraamina i priroda piroelektricheskikh svoystv tonkikh plenok na ego osnove [Diphenyl–2,2',4,4'–tetraamine molecular structure and its thin film pyroelectric properties]. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Journal of Don*, 2014, no. 2. Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_32_Romanov.pdf_2337.pdf (accessed 08.11.2019).
13. Edwards M., Corda J., Egarievwe S., Guggilla P. Measurement of the dielectric, conductance and pyroelectric properties of MWCNT: PVDF nanocomposite thin films for application in infrared technologies. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8868, art. 88680E. DOI: 10.1117/12.2023097.
14. Batra A.K., Edwards M.E., Guggilla P., Aggarwal M.D., Lal R.B. Pyroelectric properties of PVDF: MWCNT nanocomposite film for uncooled infrared detectors and medical applications. *Integrated Ferroelectrics*, 2014, vol. 158, no. 1, pp. 98–107. DOI: 10.1080/10584587.2014.957559.
15. Batra A.K., Aggarwal M.D. *Pyroelectric materials: infrared detectors, particle, accelerators, and energy harvesters*. Bellingham, WA, SPIE Press, 2013. 202 p.
16. Murali P. Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films. *Reports on Progress in Physics*, 2001, no. 64, pp. 1339–1388. DOI: 10.1007/0-387-23319-9_5.
17. Hossain A., Rashid M. Pyroelectric detectors and their applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1991, vol. 27, no. 5, pp. 824–829. DOI: 10.1109/28.90335.
18. *Malogabaritnyi priemnik opticheskogo izlucheniya piroelektricheskii MG-33* [Small-sized pyroelectric optical radiation receiver MG-33]. OAO NPP "Vostok". (In Russian). Available at: <http://www.vostok.nsk.su/files/pdf/MG33.pdf> (accessed 08.11.2019).
19. Lebedev I.V. *Tekhnika i pribory SVCh. V 2 t.* [Microwave equipment and devices. In 2 vol.]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970–1972.
20. Al'tshuler Yu.G., Tatarenko A.S. *Lampy maloi moshchnosti s obratnoi volnoi* [Low-power backward wave tubes]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1963. 296 p.
21. Andreev V.G., Vdovin V.A., Voronov P.S. Spektral'nye kharakteristiki plenok khroma nanometrovoy tolshchiny v teragertsovom diapazone chastot [Spectral characteristics of chromium films of nanometer thickness in the terahertz frequency range]. *Pis'ma v ZhTF – Technical Physics Letters*, 2003, vol. 29, iss. 22, pp. 68–73. (In Russian).
22. Andreev V.G., Angeluts A.A., Vdovin V.A., Lukichev V.F. Eksperimental'noe issledovanie pogloshcheniya voln millimetrovogo diapazona v tonkikh metallicheskih plenkakh [Experimental study of the absorption of millimeter-wave waves in thin metal films]. *Pis'ma v ZhTF – Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, no. 4, pp. 52–60. (In Russian).
23. Pronin S.M., Vdovin V.A., Andreev V.G. Issledovanie opticheskikh koeffitsientov nanometrovoykh plenok medi i zolota v SVCh diapazone [Studying the optical coefficients of nanometer-thick copper and gold films at microwave frequencies]. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta – Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*, 2016, no. 5, p. 165441.
24. Corsi C., Sizov F., eds. *THz and security applications: detectors, sources and associated electronics for THz applications*. Dordrecht, The Netherlands, Springer, 2014. 292 p.
25. Tribe W.R., Newnham D.A., Taday Ph.F., Kemp M.C. Hidden object detection: security applications of terahertz technology. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5354, pp. 168–176. DOI: 10.1117/12.543049.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Паулиш Андрей Георгиевич – родился в 1963 году, канд. физ.-мат. наук, доцент, ученый секретарь Филиала Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, доцент Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: оптико-электронные системы и приборы, ИК- и ТГц-спектроскопия, тензометрия. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 2/1. E-mail: paulish@corp.nstu.ru).

Paulish Andrey Geogrievich (b. 1963) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), assistant professor, Scientific Secretary of Novosibirsk Branch of the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics». Assistant professor of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on optoelectronic system and devices, IR- and THz-spectroscopy, strain gauge. He is author of more than 100 scientific papers. (Address: 2/1, Lavrentev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: paulish@corp.nstu.ru).



Голяшов Владимир Андреевич – родился в 1989, м.н.с. Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: физика полупроводников и диэлектриков, тонкие пленки, спектроскопия. Опубликовано более 17 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 13. E-mail: vladimirogolyashov@gmail.com).

Golyashov Vladimir Andreevich (b. 1989) – Junior Researcher of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS. His research interests are currently focused on semiconductor and dielectric science and technology, thin films, spectroscopy. He is author of more than 17 scientific papers. (Address: 13, Lavrentev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: vladimirogolyashov@gmail.com).



Гусаченко Анатолий Вячеславович – родился в 1963 году, заведующий сектором Филиала Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники. Область научных интересов: оптико-электронные системы и приборы. Опубликовано 20 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, про. Лаврентьева, 2/1. E-mail: avgus@oesd.ru).

Gusachenko Anatoly Vyacheslavovich (b. 1963) – head of electronic sector of Novosibirsk Branch of the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics». His research interests are currently focused on optoelectronic system and devices. He is author of 20 scientific papers. (Address: 2/1, Lavrentev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: avgus@oesd.ru).



Морозов Александр Олегович – родился в 1989 году, старший инженер-электроник Филиала Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники. Область научных интересов: оптико-электронные системы и приборы. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 2/1. E-mail: Msmer@yandex.ru).

Morozov Alexander Olegovich (b. 1989) – senior electronic engineer of Novosibirsk Branch of the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics». His research interests are currently focused on optoelectronic system and devices. He is author of 6 scientific papers. (Address: 2/1, Lavrentev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: Msmer@yandex.ru).



Дорожкин Кирилл Валерьевич – родился в 1990 году, аспирант Национального исследовательского Томского государственного университета. Область научных интересов: радиофизика, ТГц-спектроскопия. Опубликовано 29 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: yasbtk@yandex.ru).

Dorozhkin Kirill Valerevich (b. 1990) – graduate student of National Research Tomsk State University. His research interests are currently focused on radiophysics, THz spectroscopy. He is author of 29 scientific papers. (Address: 36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: yasbtk@yandex.ru).



Суслев Валентин Иванович – родился в 1946 году, канд. физ.-мат. наук, доцент Национального исследовательского Томского государственного университета. Область научных интересов: радиоэлектроника, оптика, СВЧ техника и технология. Опубликовано 85 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: susl@mail.tsu.ru).

Suslyayev Valentin Ivanovich (b. 1946) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), assistant professor of National Research Tomsk State University. His research interests are currently focused on radio electronics, optics, microwave equipment and technology. He is author of 85 scientific papers. (Address: 36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: susl@mail.tsu.ru).



Костюченко Владимир Яковлевич – родился в 1957 году, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: физика полупроводников и диэлектриков, физическая электроника. Опубликовано 67 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: kostyuchenko@corp.nstu.ru).

Kostyuchenko Vladimir Yakovlevich (b. 1957) – Doctor of Sciences (Phys.&Math.), assistant professor, professor of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on physics of semiconductors and dielectrics, physical electronics. He is author of 67 scientific papers. (Address: 20, Karl Marks Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kostyuchenko@corp.nstu.ru).



Пыргаева Светлана Михайловна родилась в 1963 году, канд. физ.-мат. наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Область научных интересов: физика конденсированного состояния, дефекты в кристаллах и поликристаллах, спектроскопия. Опубликовано 56 научных работ. (Адрес: 656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46. E-mail: genphys@mail.ru).

Pyrgaeva Svetlana Mikhailovna (b. 1963) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), assistant professor of Polzunov Altai State Technical University. His research interests are currently focused on solid state physics, defects in crystals and polycrystals, spectroscopy. He is author of 56 scientific papers. (Address: 46, Lenin Av., Barnaul, 656038, Russia. E-mail: genphys@mail.ru).

*Статья поступила 06 августа 2019 г.
Received August 06, 2019*

To Reference:

Paulish A.G., Golyashov V.A., Gusachenko A.V., Morozov A.O., Dorozhkin K.V., Suslyayev V.I., Kostyuchenko V.Ya., Pyrgaeva S.M. Spektral'nye kharakteristiki chuvstvitel'nosti piroelektricheskogo detektora na osnove tetraaminodifenila v vidimom, IK- i TGts-diapazonakh [Spectral characteristics of the pyroelectric detector sensitivity based on tetraaminodiphenyl in visible, IR and THz-ranges]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 3 (44), pp. 57-69. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-57-69.