

15

## **Селективный пироэлектрический детектор миллиметрового излучения с ультратонким резонансным метапоглопителем**

© А.Г. Паулиш<sup>1,2</sup>, С.А. Кузнецов<sup>1,2</sup>

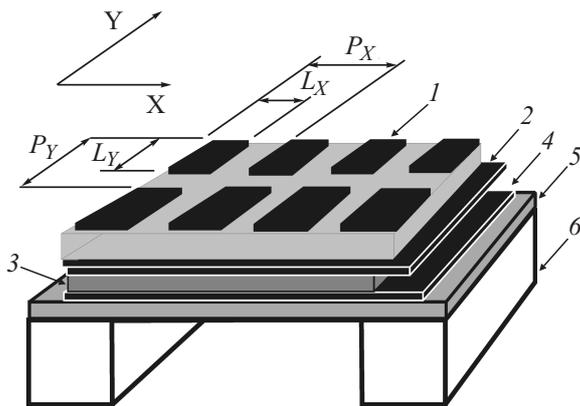
<sup>1</sup> Филиал Института физики полупроводников СО РАН  
„Конструкторско-технологический институт прикладной  
микроэлектроники“, Новосибирск

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет  
E-mail: paulish63@ngs.ru

Поступило в Редакцию 27 июня 2016 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований спектральных и амплитудно-частотных характеристик дискретного пироэлектрического детектора миллиметрового диапазона, интегрированного с резонансным метапоглопителем, имеющим близкий к единице коэффициент поглощения излучения на частоте 140 GHz. Показано, что использование метапоглопителя обеспечивает возможность построения компактных и недорогих мультиспектральных поляризационно-чувствительных систем детектирования излучения в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Пироэлектрические детекторы широко применяются для регистрации инфракрасного излучения благодаря высокой чувствительности и низкой стоимости в сравнении с другими типами неохлаждаемых детекторов [1]. В последние годы предпринимаются многочисленные попытки реализовать высокую чувствительность пироэлектрических сенсоров в миллиметровой области длин волн [2–4]. Для спектрорадиометрических приложений представляют интерес детекторы, позволяющие регистрировать излучение в узком спектральном интервале при максимально широкой области свободной дисперсии. Реализация таких детекторов оказывается возможной за счет использования в качестве поглотителя излучения резонансной субволновой металлодиэлектрической структуры (метаструктуры), совмещенной с пироэлектрическим сенсором. Подобные метаструктуры, именуемые далее ультратонкими



**Рис. 1.** Схема пироэлектрического детектора миллиметрового диапазона с интегрированным ультратонким резонансным поглотителем: 1 — поглотитель, 2 — верхний электрод, 3 — пироэлектрическая пленка, 4 — нижний электрод, 5 — несущий слой, 6 — носитель из ситалла. Размеры микрополосковых элементов  $L_x = 281 \mu\text{m}$ ,  $P_x = 384 \mu\text{m}$ ,  $L_y = 690 \mu\text{m}$ ,  $P_y = 822 \mu\text{m}$ .

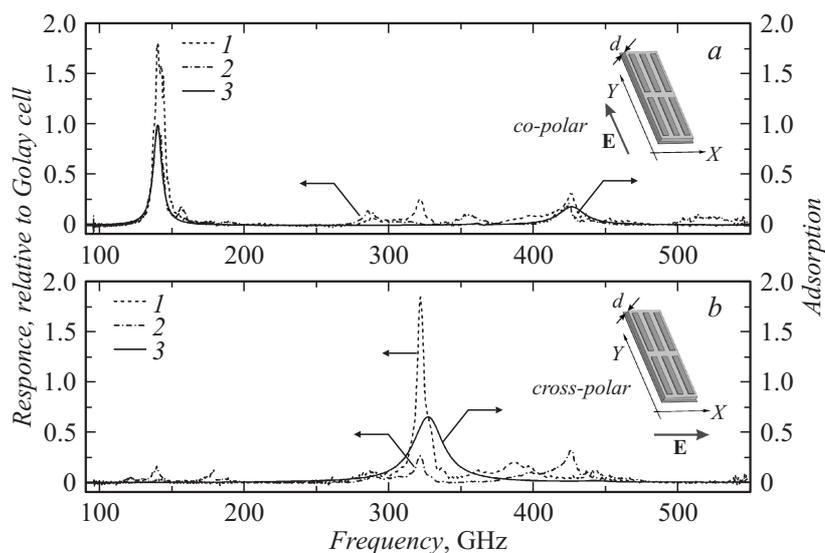
метапоглотителями, как правило, имеют конфигурацию однослойной метаповерхности, представляющей собой регулярный 2D-массив из субволновых металлических элементов емкостного типа, сформированных литографически на поверхности тонкого слоя диэлектрика со сплошной обратной металлизацией (рис. 1). Их достоинство — возможность достижения коэффициента поглощения  $A \cong 1$  при отношении рабочей длины волны  $\lambda$  к толщине диэлектрика  $d \sim 1.5\text{--}2$  порядка [5]. Предельное уменьшение  $d$  важно с точки зрения уменьшения теплоемкости сенсора и соответственно увеличения его чувствительности и быстродействия.

В работах [6–8] нами показано, что максимизация отношения  $\lambda/d$  для метапоглотителя требует максимизации электропроводности составляющих его металлических элементов, а также минимизации тангенса диэлектрических потерь используемого диэлектрика. Важно, что увеличение  $\lambda/d$  автоматически приводит к уменьшению относительной ширины полосы поглощения  $\Delta\lambda/\lambda$ , которая является слабо нелинейной функцией  $d/\lambda$ , что является благоприятным фактором для селективного детектора. При использовании в структуре метапоглотителя таких

материалов, как алюминий и полипропилен (ПП), удается реализовать характерные значения  $\lambda/d \sim 100\text{--}200$  при ширине полосы  $\Delta\lambda/\lambda$  несколько процентов [7,8]. В работе [8] нами продемонстрирован прототип селективного пиродетектора, совмещенного с подобным метапоглопителем на основе метаповерхности с микрополосковыми элементами прямоугольной формы, обеспечивающий  $A \cong 1$  на частоте 140 GHz ( $\lambda \cong 2.14$  mm) для выделенной поляризации. Поглотитель обеспечивал величину  $\Delta\lambda/\lambda \approx 5\%$ , определенную по уровню  $A = 0.5$ , и имел суммарную толщину  $d + 2t = 15.7 \mu\text{m}$  ( $\lambda/d \approx 136$ ), где  $d = 15 \mu\text{m}$  — толщина ПП-слоя,  $t = 0.35 \mu\text{m}$  — толщина металлизации.

Настоящая работа посвящена исследованию амплитудно-частотных и спектральных характеристик предложенного детектора в широком спектральном интервале для выявления наличия паразитных высокочастотных резонансов, определения области свободной дисперсии и возможностей данных поглотителей для построения мультиспектральных систем детектирования миллиметрового диапазона. Для  $d = 15 \mu\text{m}$  оптимальные геометрические параметры микрополосковых элементов метаповерхности составляли  $L_x = 281 \mu\text{m}$  с периодом  $P_x = 384 \mu\text{m}$ ,  $L_y = 690 \mu\text{m}$  с периодом  $P_y = 822 \mu\text{m}$  (рис. 1). Отметим, что замена микрополосков квадратной формы на прямоугольную была осуществлена намеренно и предназначалась для достижения поляризационной селективности детектора, а также для увеличения общего числа микрополосков, приходящихся на активную площадь сенсора. При этом рабочей поляризацией, обеспечивающей  $A \cong 1$  на частоте 140 GHz, является поляризация, параллельная стороне микрополоска с большей длиной ( $\mathbf{E} \parallel Y$ , „co-polar“). В качестве пироэлектрического детектора использовался инфракрасный детектор МГ33 производства „НПП „Восток“, г. Новосибирск, с типичной чувствительностью  $10^5$  V/W и эквивалентной мощностью шума (NEP)  $1.0 \cdot 10^{-9}$  W/Hz<sup>1/2</sup>. Базовая схема пироэлектрического детектора с интегрированным поглотителем показана на рис. 1. Структура поглотителя размещена непосредственно на пироэлектрической пленке и зафиксирована по периферии теплопроводящим клеем.

Измерения спектральных характеристик экспериментальных образцов детектора проводились на квазиоптическом ЛОВ-спектрометре в диапазоне 90–540 GHz с использованием набора ламп обратной волны (ЛОВ) в качестве перестраиваемых монохроматических источников излучения. Частота модуляции излучения составляла 23 Hz. Измерен-



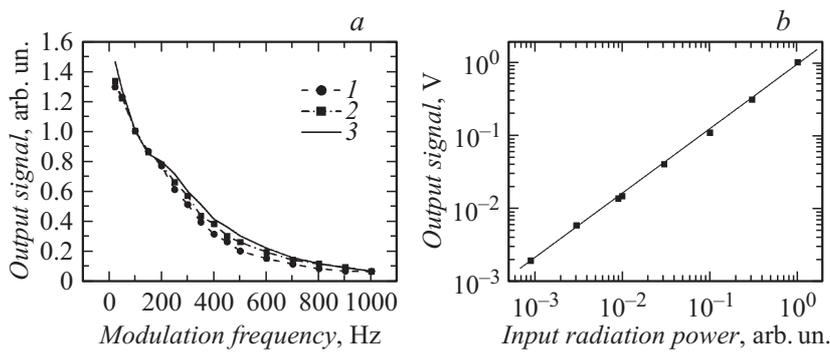
**Рис. 2.** Спектры отклика экспериментальных образцов пироэлектрического детектора миллиметрового диапазона, нормированные на сигнал ячейки Голя. 1 — образец 1, 2 — образец 2, 3 — теоретически рассчитанное поглощение; *a* — спектры для направления поляризации волны вдоль микрополосковых элементов (co-polar); *b* — спектры для направления поляризации волны поперек микрополосковых элементов (cross-polar).

ные спектры отклика образцов нормировались на сигнал калиброванного оптоакустического преобразователя (ячейки Голя) производства Microtech Instruments, Inc. (США). Дополнительная калибровка вольт-ваттной чувствительности проводилась с помощью измерителя мощности производства Thomas Keating Instruments, Ltd. (Великобритания).

Спектральные зависимости сигнала двух экспериментальных образцов, нормированных на сигнал ячейки Голя, а также спектры коэффициента поглощения метапоглопителя, рассчитанные в пакете электродинамического моделирования ANSYS HFSS<sup>TM</sup>, показаны на рис. 2. Образец 1 имел площадь поглотителя, равную  $S = 5.7 \text{ mm}^2$ , и включал  $3 \times 6$  микрополосковых элементов. Для образца 2 величина площади составляла  $S = 3.1 \text{ mm}^2$  при числе микрополосков  $3 \times 4$ . Спектры,

приведенные на рис. 2, *a*, соответствуют поляризации, ориентированной вдоль микрополосковых элементов (co-polar), а на рис. 2, *b* — поперек микрополосков (cross-polar). Из рисунка видно, что оба образца имеют отклик на частоте 140 GHz, совпадающий с расчетным максимумом поглощения. Отметим, что по амплитуде сигнал почти в два раза больше (образец 1) или равен (образец 2) сигналу ячейки Голея, что значительно превышает чувствительность в данном диапазоне для известных пироэлектрических детекторов. Отношение сигналов co-polar к cross-polar на частоте 140 GHz для образца 1 составило более 100, для образца 2 — около 6. Данные результаты свидетельствуют о значительной поляризационной селективности образца 1. Первый паразитный резонанс для образца 1 появляется на частоте 320 GHz (рис. 2, *a*), что не предсказывается в рамках использованной расчетной модели метапоглопителя, предполагавшей его рассмотрение как бесконечно-регулярно-периодического массива из микрополосковых элементов. Данный пик, впрочем, совпадает с резонансом на той же частоте для случая cross-polar и, по-видимому, связан с кроссполяризационным преобразованием внутри корпуса детектора при переотражении излучения. Влияние данного эффекта может быть минимизировано оптимизацией конструкции корпуса детектора. Следующий резонанс наблюдается на частоте 426 GHz с относительной амплитудой 0.18 и совпадает с паразитным резонансом, предсказанным теоретически (кривая 3). Таким образом, для рабочей поляризации ( $\mathbf{E} \parallel Y$ ) область свободной дисперсии детектора составляет 2 октавы. Для образца 2 наблюдаются несколько паразитных резонансов на частоте 286 и 355 GHz, которые не предсказываются моделированием. Для сигналов cross-polar для обоих образцов возникает резонанс на частоте 322 GHz (рис. 2, *b*), что совпадает с расчетом и определяется поперечным периодом микрополосковых элементов. Однако для образца 1 амплитуда резонанса оказывается такой же, как для поляризации co-polar на рабочей частоте, в то время как моделирование предсказывает более широкий резонанс с относительной амплитудой около 0.6 от амплитуды для поляризации co-polar (рис. 2, *b*, кривая 3). Для образца 2 амплитуда резонанса в 2.6 раза меньше, чем для поляризации co-polar на рабочей частоте.

Из приведенных результатов следует, что, несмотря на малые поперечные размеры поглотителя (равные примерно рабочей длине волны), на рабочей частоте формируется высокодобротный резонанс, обеспечивающий чувствительность детектора выше, чем для ячейки Голея. Для образца 2 с меньшим размером поглотителя наблюдаются уменьшение



**Рис. 3.** *a* — амплитудно-частотные характеристики экспериментальных образцов пироэлектрического детектора миллиметрового диапазона, нормированные на сигнал на частоте модуляции 100 Hz; 1 — образец 1, 2 — образец 2, 3 — образец без поглотителя; *b* — зависимость величины выходного сигнала детектора от мощности падающего миллиметрового излучения.

амплитуды отклика, появление дополнительных паразитных резонансов, уменьшающих область свободной дисперсии, а также уменьшение поляризационной селективности. Данные эффекты могут быть связаны с критически малым количеством микрополосков, уместающихся на меньшей площади поглотителя, что приводит к началу разрушения резонанса поглощения. Таким образом, можно утверждать, что для данной топологии метаповерхности размер поглотителя, соответствующий размеру для образца 1, является минимально допустимым.

Другим важным параметром детектора является его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Дело в том, что толщина поглотителя, интегрированного в структуру детектора, составляет  $15\ \mu\text{m}$ , что более чем на порядок больше толщины пироэлектрической пленки, равной  $1\ \mu\text{m}$ . Можно ожидать, что внесение в структуру столь большой теплоемкости должно существенно снизить быстродействие детектора, т. е. исказить его исходную АЧХ. На рис. 3, *a* показаны измеренные АЧХ для образцов 1 и 2, а также для детектора без поглотителя. Детекторы с поглотителем имеют приблизительно такую же АЧХ, как и образец без поглотителя, что свидетельствует о незначительном влиянии структуры поглотителя на АЧХ. Чтобы прояснить данное обстоятельство, с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics была построена

теплофизическая модель пироэлектрического детектора с поглотителем. Известно, что пироэлектрический детектор является дифференциальным устройством, т.е. его сигнал пропорционален скорости изменения температуры пиро пленки со временем. Результаты моделирования показали, что толщина поглотителя (его теплоемкость) слабо влияет на прохождение тепловой волны. Скорость распространения тепловой волны достаточно большая, и толщина порядка  $15\ \mu\text{m}$  не приводит к ее диссипации. На рис. 3, *b* показана зависимость величины выходного сигнала от мощности падающего излучения, которая демонстрирует линейность зависимости в диапазоне трех порядков.

Таким образом, в работе исследованы спектральные и амплитудно-частотные характеристики пироэлектрического детектора с интегрированным ультратонким резонансным поглотителем миллиметрового диапазона длин волн. Показано, что, несмотря на малые размеры поглотителя ( $\sim \lambda$ ), чувствительность предложенного детектора существенно выше известных на сегодня пироэлектрических приемников миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. Продемонстрировано высокое спектральное и поляризационное разрешение детектора при области свободной дисперсии не менее двух октав, что позволяет на его основе создавать мультиспектральные системы высокого разрешения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона.

Авторы выражают благодарность А.В. Глухову, В.М. Гайлесу и В.А. Рыжову за изготовление экспериментальных образцов детектора, П.С. Загубисало за проведение моделирования теплофизических процессов в структуре детектора.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания № 3002, а также при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-29-09593 в части исследования спектральных характеристик образцов детектора.

## Список литературы

- [1] *Rogalski A.* // Infrared Detectors. Boca Raton: CRC Press, 2010. 876 p.
- [2] *Stenger V., Shnider M., Sriram S.* et al. // SPIE Photonics West 2012. Optoelectronic Materials and Devices THz Technology and Applications V — OE107. 2012. Paper number 8261-27.
- [3] *Wang J., Gou J., Li W.* // AIP Advances. 2014. V. 4. P. 027 106.

- 
- [4] *Roralski A., Sizov F.* // *Opto-Electron. Rev. Sep.* 2011. V. 19. N 3. P. 346.
- [5] *Watts C.M., Liu X., Padilla W.J.* // *Adv. Mater.* 2012. V. 24. P. OP98–OP120.
- [6] *Kuznetsov S.A., Paulish A.G., Gelfand A.V.* et al. // *Prog. Electromagn. Res.* 2012. V. 122. P. 93.
- [7] *Kuznetsov S.A., Paulish A.G., Gelfand A.V.* et al. // *Proc. SPIE.* 2012. V. 8423. P. 842 30S.
- [8] *Kuznetsov S.A., Paulish A.G., Navarro-Cta M., Arzhannikov A.V.* // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 21 079.