

УДК 519.6+536.2+537.86.029.65.79+621.384.3+537.86

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИЗУАЛИЗАТОРЕ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ОСНОВАННОМ НА ТОНКОПЛЁНОЧНОМ КОНВЕРТЕРЕ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА

*П. С. Загубисало*¹, *А. Г. Паулиш*^{1,2}, *С. А. Кузнецов*², *А. В. Аржанников*²,
*М. К. А. Тумм*²

¹ Филиал Института физики полупроводников СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»;

² Новосибирский госуниверситет, г. Новосибирск, Россия

В настоящей работе проведено моделирование теплофизических процессов в болометрическом конвертере, преобразующем поток субтерагерцового излучения в инфракрасное излучение с использованием тонкоплёночной металлодиэлектрической метаструктуры. Результаты моделирования использованы для расчёта основных характеристик детектора пространственного распределения потока субтерагерцового излучения, в котором выходной сигнал такого конвертера регистрируется с помощью инфракрасной камеры и используется для построения теплового изображения. Продemonстрированная эффективность конверсии свыше 80 % позволяет обеспечить чувствительность визуализатора на уровне современных тепловизионных детекторов. Показано, что динамический диапазон линейного преобразования составляет около трёх порядков по чувствительности, при этом получение изображения в режиме реального времени достигается при толщине диэлектрического слоя менее 3 мкм. Обсуждается эффект расплывания изображения и способы уменьшения его влияния.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы ведутся активные разработки систем для получения изображений в диапазоне от коротковолновой части миллиметрового до субмиллиметрового участков спектра электромагнитного излучения [1–6]. Данная спектральная область соответствует субтерагерцовым частотам и считается перспективной для ряда важных практических приложений, к которым можно отнести системы безопасности, неразрушающий контроль качества материалов, биомедицинскую диагностику и др. Перспективность использования данного спектрального диапазона обусловлена возможностью достичь в нём более высокого по сравнению с сантиметровым диапазоном пространственного разрешения в получаемом изображении и большей по сравнению с инфракрасным излучением глубиной проникновения субтерагерцовых волн в исследуемые объекты. Для практического применения наибольший интерес представляют системы визуализации, работающие в режиме реального времени, т. е. позволяющие обеспечить частоту кадров изображения 10 Гц и выше. Именно необходимость достижения приемлемой частоты кадров ограничивает использование систем на базе одноканальных детекторов с пространственным сканированием и вынуждает применять детекторы матричного типа. Отметим, что ключевые проблемы существующих матричных субтерагерцовых приёмников антенного, фотонного и болометрического типов [4–7] связаны либо с принципиальным ограничением числа регистрирующих элементов матрицы, либо с её малыми размерами. Последние не позволяют достигнуть высокочувствительной регистрации распределения плотности потока излучения с большой апертурой от 50 мм и выше без дополнительного использования механических сканеров.

В работах [8–12] нами был предложен простой и эффективный способ получения изображений в диапазоне субтерагерцовых и терагерцовых волн в реальном времени, свободный от принципиальных ограничений на апертуру диагностируемого пучка излучения. Этот способ основан на

конверсии излучения указанного диапазона в инфракрасное излучение. Такая конверсия осуществляется на тонкоплёночной метаструктуре, резонансно поглощающей субтерагерцовое излучение с заданной длиной волны с коэффициентом поглощения, близким к 100 %, тепловой нагрев которой регистрируется высокочувствительной инфракрасной камерой (рис. 1а). Таким образом, пространственное распределение потока падающего на конвертер субтерагерцового излучения отображается в распределении плотности энергии создаваемого им теплового поля. Ключевой особенностью поглощающей метаструктуры является малость её толщины d по сравнению с рабочей длиной λ субтерагерцового излучения, что позволяет обеспечить низкую теплоёмкость и, тем самым, высокую чувствительность и быстродействие основанного на ней болометрического детектора. Так, в работе [11] нами была экспериментально продемонстрирована возможность достигнуть отношения $\lambda/d \sim 180$ и более, что соответствует толщине метаструктуры 10 мкм и меньше.

В настоящей работе проведено численное моделирование теплофизических процессов в детекторе пространственного распределения потока субтерагерцового излучения на основе описанного выше конвертера и инфракрасной камеры, в результате которого осуществлён расчёт предельных характеристик такой регистрирующей системы. По результатам моделирования получены оценки минимальной обнаруживаемой плотности потока энергии субтерагерцового излучения и времени отклика детектора. Под предельными значениями характеристик подразумевается возможность их достижения в условиях размещения конвертера в вакуумной камере, что предотвращает потери энергии за счёт теплопроводности газовой среды, и использования регистрирующей инфракрасной системы с температурным разрешением порядка 40 мК, которое достигается в лучших серийно производимых образцах таких систем. Математическое моделирование процессов нагрева и остывания конвертера под действием субтерагерцового излучения проводилось с помощью программного пакета «COMSOL Multiphysics». Также моделировался процесс расплывания теплового поля вдоль конвертера, обусловленный латеральной теплопроводностью, т. е. эффект, аналогичный блюмингу в матричных фотоприёмных устройствах. Также проведены расчёты диапазона линейности выходного сигнала приёмника.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРА, ОСНОВАННОГО НА КОНВЕРТЕРЕ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОЕ

1.1. Структура конвертера на основе резонансного магнитного метаматериала и его электродинамические характеристики

Конвертер субтерагерцового излучения в инфракрасное представляет собой многослойную структуру, состоящую из ультратонкого резонансного поглотителя на основе метаматериала и эмиссионного слоя с коэффициентом серости¹ в инфракрасном диапазоне, близким к единице (рис. 1а). Поглощение субтерагерцовых волн приводит к нагреву поглотителя и увеличению интенсивности инфракрасного излучения со стороны эмиссионного слоя. Регистрация инфракрасного излучения осуществляется высокочувствительной инфракрасной камерой.

Как было показано нами в работах [9–11], при выполнении условия $\lambda/d \gg 1$ близкий к 100 % коэффициент поглощения может быть получен при использовании высокоимпедансных поверхностей. В традиционном радиофизическом подходе последние представляют собой частотно-избирательные поверхности (ЧИП или метаповерхность) с ёмкостным импедансом, лежащие по-

¹ Коэффициент серости показывает отношение энергии теплового излучения «серого тела» согласно закону Стефана—Больцмана к энергии излучения абсолютно чёрного тела при той же температуре.

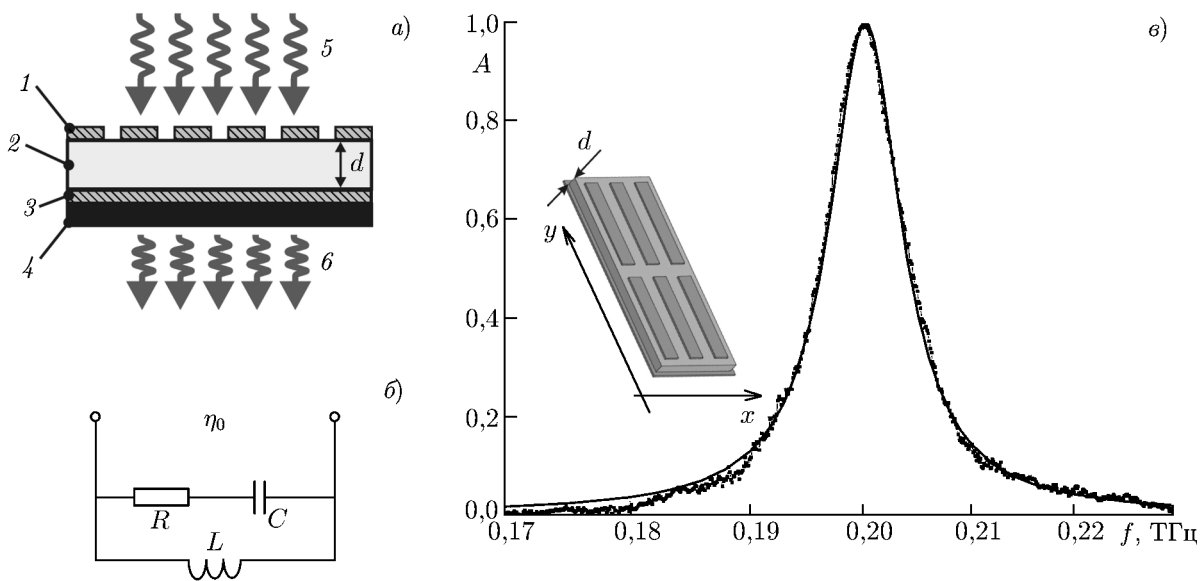


Рис. 1. Структура и электродинамические свойства конвертера субтерагерцового излучения в инфракрасное. Панель (а) — структура конвертера: 1 — частотно-избирательная поверхность (ЧИП), 2 — диэлектрический слой, 3 — «заземляющий» металлизированный слой, 4 — слой, ответственный за эмиссию инфракрасного излучения, 5 — субтерагерцовое излучение, 6 — инфракрасное излучение. Слои 1, 2 и 3 вместе образуют высокоимпедансную поверхность, работающую как ультратонкий поглотитель субтерагерцового излучения (метаматериал) с толщиной много меньше рабочей длины волны. Панель (б) — упрощённая эквивалентная схема высокоимпедансной поверхности. Панель (в) — спектральный коэффициент поглощения электромагнитной волны с y -поляризацией (электрическое поле волны направлено вдоль оси y) для метапоглотителя с $\lambda/d \approx 100$, реализованного на базе ЧИП с металлическими элементами прямоугольной формы. Штрихпунктир отвечает результатам измерений, сплошная линия — численному моделированию. Для волны x -поляризации (электрическое поле волны направлено вдоль оси x) спектральное поглощение близко к нулю и на графике не показано

верх тонкого слоя «заземлённого» диэлектрика (рис. 1а). При условии $d/\lambda \ll 1$ импеданс последнего оказывается чисто индуктивным, так что ЧИП и диэлектрический слой образуют некоторый эффективный LC -контур (рис. 1б), при отсутствии диссипации импеданс которого $Z = j\omega L / (1 - \omega^2 LC)$ обращается в бесконечность на резонансной частоте контура $\omega = 1/\sqrt{LC}$. Правильное введение диссипативных потерь позволяет, не ухудшая существенно резонансных свойств LC -контура, сделать его импеданс Z равным импедансу свободного пространства $\eta_0 \approx 377$ Ом. В результате согласно классической формуле теории передающих линий [13] амплитудный коэффициент отражения S_{11} такого поглотителя на основе высокоимпедансных поверхностей становится равным нулю:

$$S_{11} = \frac{Z - \eta_0}{Z + \eta_0} = 0. \quad (1)$$

Физическая причина обращения в нуль коэффициента отражения S_{11} , а коэффициента поглощения $A = 1 - |S_{11}|^2$, соответственно, в единицу, состоит в том, что на резонансной частоте структура на основе высокоимпедансных поверхностей работает как искусственный магнитный проводник: на её поверхности вследствие зануления фазы S_{11} образуется узел (нуль) магнитного поля и пучность (удвоение) напряжённости электрического поля, обусловленные интерференцией падающей и отражённой волн. Такая максимизация поверхностного электрического поля позво-

ляет обеспечить эффективное (теоретически стопроцентное) резонансное поглощение энергии за счёт омических или диэлектрических потерь в структуре. В LCR -модели последние описываются с помощью резистивного параметра R , через который относительная толщина d/λ и относительная ширина частотной полосы поглощения могут быть выражены следующими компактными формулами ²:

$$d/\lambda \approx \sqrt{R/\eta_0}/(2\pi), \quad \Delta\omega/\omega \approx 2\sqrt{R/\eta_0}. \quad (2)$$

Анализ электродинамических характеристик поглотителей на основе высокоимпедансных поверхностей в рамках модели эффективной среды [11] показывает, что данные структуры могут рассматриваться в качестве резонансного магнитного метаматериала с эффективной магнитной проницаемостью $\mu_{\text{eff}} = \mu'_{\text{eff}} - j\mu''_{\text{eff}}$, выражаемой через импеданс Z и параметр R LCR -цепи формулами

$$\mu'_{\text{eff}} = \text{Im}(Z)/\sqrt{\eta_0 R}, \quad \mu''_{\text{eff}} = \text{Re}(Z)/\sqrt{\eta_0 R}. \quad (3)$$

На частоте резонансного поглощения действительная компонента μ_{eff} обращается нуль, в то время как её мнимая часть претерпевает резкий скачок до значительных величин:

$$\max(\mu''_{\text{eff}}) \approx \sqrt{\eta_0/R} \approx \lambda/(2\pi d).$$

Соотношения (2) демонстрируют ключевую особенность ультратонких метапоглотителей: использование в их структуре слабопоглощающих материалов позволяет минимизировать резистивный параметр R , что ведёт к уменьшению относительной толщины d/λ поглотителя и увеличению его спектральной селективности в терминах $\Delta\omega/\omega$. По этой причине при экспериментальной реализации таких поглотителей в качестве несущего диэлектрика нами использован полипропилен с тангенсом угла потерь $\text{tg } \delta \leq 10^{-3}$, а в качестве металлизующей плёнки на ЧИП и «заземляющего» слоя — высокопроводящее покрытие с толщиной $0,3 \div 0,5$ мкм на основе алюминия с проводимостью $\sigma \approx 2 \cdot 10^7$ См/м. На рис. 16 приведён пример спектральной зависимости коэффициента поглощения и геометрические параметры ЧИП для ультратонкого поляризационно-селективного метапоглотителя, оптимизированного на частоту 200 ГГц фундаментального резонанса поглощения электромагнитного поля с y -поляризацией. Поглотитель реализован на базе полипропиленовой плёнки с толщиной $d \approx 15$ мкм, что обеспечивает отношение $\lambda/d \approx 100$.

1.2. Математическая модель теплофизических процессов в конвертере

Для расчёта зависимостей характеристик конвертера от толщины слоя диэлектрика была рассмотрена радиально-симметричная модель этого устройства, показанная на рис. 2 в цилиндрической системе координат. Её начало находится внизу в центре конвертера, ось z направлена вверх. Конвертер находится в вакууме. Диаметр конвертера равен 50 мм, основой его является слой диэлектрика (в нашем случае плёнка полипропилена). Снизу на диэлектрик нанесён слой алюминия с толщиной 0,5 мкм. Наличием металла на поверхности диэлектрика, обращённой к фронту субтерагерцового излучения, пренебрегалось, т. к. его вклад в теплоёмкость конвертера мал, равно как мал его вклад и в теплопроводность этого устройства, поскольку топологический рисунок метаповерхности состоит из электрически изолированных элементов. В модели также пренебрегалось толщиной эмиссионного слоя. Считалось, что последний получен соответствующей обработкой поверхности металлического слоя, при этом предполагалось, что при такой обработке металлический слой не меняет свои теплофизические свойства.

² Приводимая здесь формула для добротности $\omega/\Delta\omega$ соответствует случаю, когда индуктивная компонента импеданса ЧИП пренебрежимо мала по сравнению с ёмкостной.

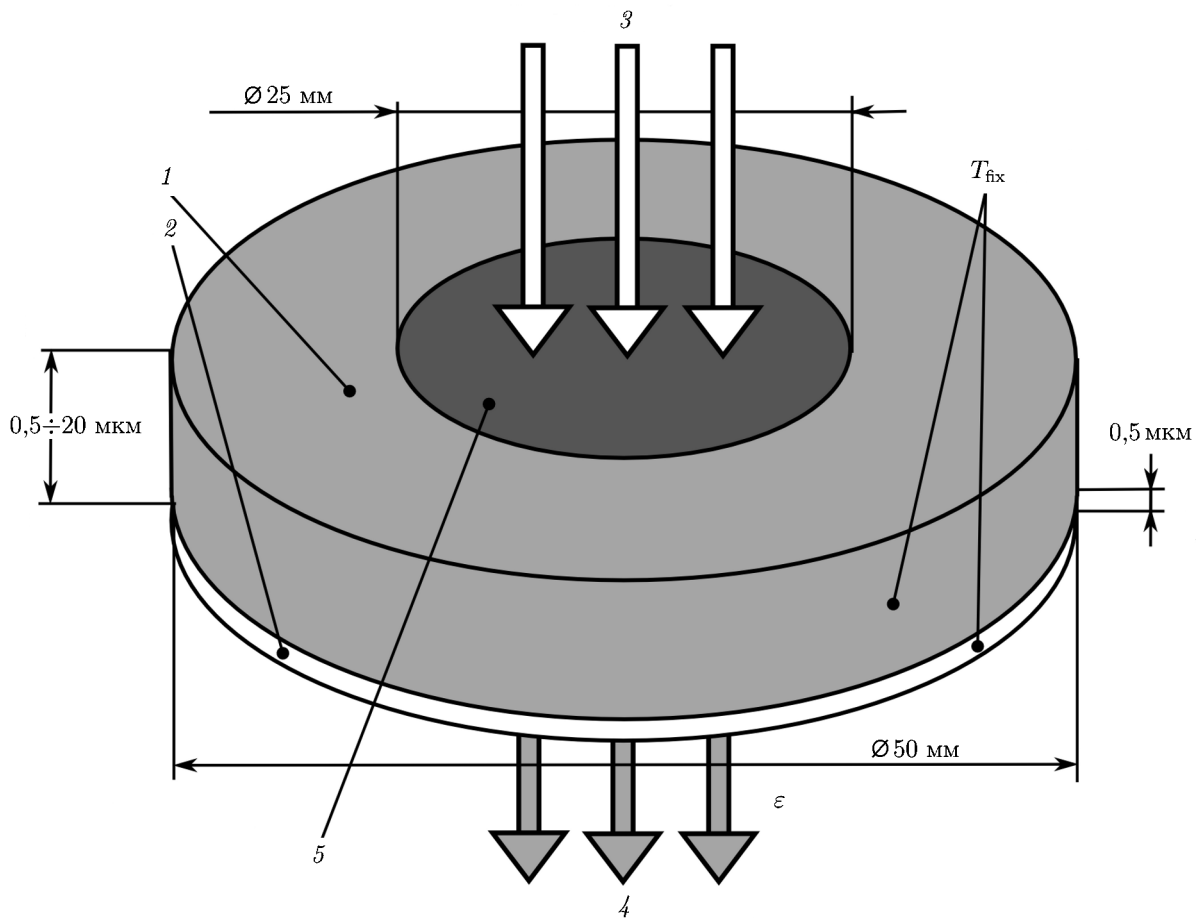


Рис. 2. Геометрическая радиально-симметричная модель конвертера в цилиндрической системе координат. Начало системы координат находится внизу в центре конвертера, ось z направлена вверх; 1 — полипропилен, 2 — алюминий, $T_{\text{fix}} = 293,15$ К — фиксированная температура по периметру конвертера, 3 — падающее субтерагерцовое излучение, 4 — инфракрасное излучение, $\varepsilon = 0,8$ — коэффициент серости поверхности алюминия, 5 — облучаемая область (показана тёмно-серым оттенком)

В настоящей модели предполагается, что освещаемая субтерагерцовым излучением область представляет собой круг с диаметром 25 мм в центре конвертера (верхняя сторона). На данную область подаётся импульс субтерагерцового излучения с длительностью 3 с, который полностью поглощается. Задача решалась для различных величин плотности потока энергии субтерагерцового излучения в диапазоне от 0,3 до 10^4 Вт/м².

При расчёте учитывалась теплопроводность слоёв конвертера и тепловое излучение со стороны, противоположной падающему излучению. Тепловое излучение со стороны падающего импульса не рассматривалось, поскольку считалось, что коэффициент серости данной поверхности равен нулю. Это обосновано тем, что коэффициенты серости алюминия и полипропилена, образующих поверхность поглотителя, очень малы по сравнению с коэффициентом серости эмиссионного слоя. Температура по периферии конвертера принималась фиксированной и равной 293,15 К. Начальная температура также полагалась равной 293,15 К.

Для расчёта характеристик данного конвертера решалась задача теплопроводности в цилиндрической системе координат, описываемая следующим дифференциальным уравнением:

Таблица 1

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Удельная теплоёмкость при постоянном давлении C_p , Дж/(кг · К)	Коэффициент теплопроводности k , Вт/(м · К)
полипропилен	900	1 575,5	0,1295
алюминий	2 700	893,6	236

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (4)$$

где $T(t, r, z)$ — температура, t — время, r — радиус, z — толщина, $\rho(z)$ — плотность, $k(z)$ — коэффициент теплопроводности, $C_p(z)$ — удельная теплоёмкость при постоянном давлении. Область определения функции T есть

$$t \in [0, t_{\text{last}}], \quad r \in [0, R], \quad z \in [0, h_{\text{al}} + h_{\text{pp}}],$$

где $R = 25$ мм — радиус конвертера, $h_{\text{al}} = 0,5$ мкм — толщина слоя алюминия, $h_{\text{pp}} \in [0,5; 20]$ мкм — толщина слоя полипропилена, $t_{\text{last}} = 20$ с — время, до которого проводился расчёт,

$$(\rho, C_p, k) = \begin{cases} (\rho_{\text{al}}, C_{p,\text{al}}, k_{\text{al}}), & 0 < z < h_{\text{al}}; \\ (\rho_{\text{pp}}, C_{p,\text{pp}}, k_{\text{pp}}), & h_{\text{al}} < z < h_{\text{al}} + h_{\text{pp}}, \end{cases}$$

ρ_{al} и ρ_{pp} — плотности алюминия и полипропилена соответственно, $C_{p,\text{al}}$ и $C_{p,\text{pp}}$ — удельные теплоёмкости при постоянном давлении алюминия и полипропилена соответственно, k_{al} и k_{pp} — коэффициенты теплопроводности алюминия и полипропилена соответственно. Значения вышеперечисленных параметров представлены в табл. 1. Начальная температура конвертера равнялась 293,15 К, т. е. $T|_{t=0} = T_{\text{fix}}$, где $T_{\text{fix}} = 293,15$ К — температура окружающей среды. Граничные условия для уравнения (4) следующие.

1) Граничные условия сопряжения при $z = h_{\text{al}}$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^-} T|_{z=\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^+} T|_{z=\Delta z}, \quad \lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^-} k_{\text{al}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^+} k_{\text{pp}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\Delta z}$$

означают равенство температур и тепловых потоков на границе между полипропиленом и алюминием.

2) По внешней боковой границе пластины температура полагалась фиксированной и равной 293,15 К:

$$T|_{r=R} = T_{\text{fix}}.$$

3) На верхнюю поверхность конвертера (со стороны полипропилена) в круг с радиусом 12,5 мм подаётся импульс излучения с плотностью потока энергии P , пластина имеет коэффициент поглощения, равный 1, и коэффициент серости $\varepsilon = 0$, что подразумевает полное поглощение падающего излучения и отсутствие теплового излучения, т. е.

$$k_{\text{pp}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h_{\text{al}}+h_{\text{pp}}} = f(t)g(r)p = P(t, r), \quad g(r) = \begin{cases} 1, & 0 \leq r \leq R/2; \\ 0, & R/2 < r \leq R, \end{cases}$$

где стоящая слева величина — тепловой поток через поглощающую поверхность конвертера, величина, стоящая справа — распределение плотности потока энергии падающего излучения по

поверхности в зависимости от времени, $p \in [0, 3; 10^4]$ Вт/м² — максимальная плотность потока энергии приходящего субтерагерцового излучения. Функция зависимости плотности потока энергии падающего излучения от времени $f(t)$ бралась достаточно гладкой для уменьшения влияния паразитных осцилляций, возникающих в решении при использовании разрывной функции (рис. 3). Функция $f(t)$ изображена на рис. 3 и по суммарной энергии эквивалентна прямоугольному импульсу с центром в точке $(t_\rho + t_{\text{on}})/2$, единичной амплитудой и длительностью 3 с, где $t_{\text{on}} = 3$ с — эффективное время излучения, $t_\rho = 1,5$ с — ширина переходной зоны:

$$f(t) = \text{erf}_+(t, 0) \text{erf}_-(t, t_{\text{on}}), \quad (5)$$

$$\left| t_{\text{on}} - \int_0^{t_{\text{on}} + t_{\text{trans}}} f(t) dt \right| < 10^{-4},$$

$$\text{erf}_\pm(t, t_0) = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \text{erf} \left[4,5 \frac{(t - t_\rho/2) - t_0}{t_\rho} \right], \quad \text{erf}(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x \exp(-t^2) dt,$$

$$f_0(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t - t_\rho/2 \leq t_{\text{on}}; \\ 0, & t - t_\rho/2 < 0 \text{ или } t - t_\rho/2 > t_{\text{on}}. \end{cases}$$

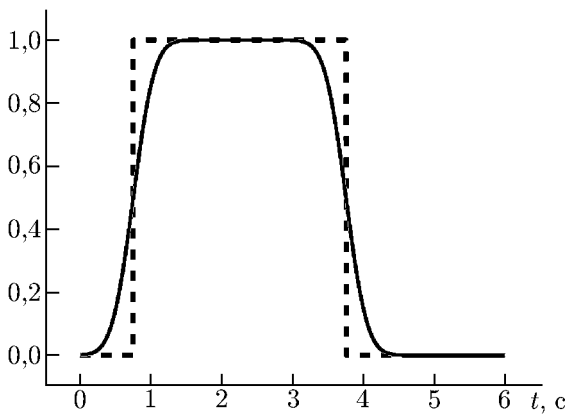


Рис. 3. Ступенчатая функция $f_0(t)$ (пунктир) и её гладкая аппроксимация $f(t)$ (сплошная линия). По оси абсцисс отложено время, по оси ординат — значения функций в относительных единицах

Данное дифференциальное уравнение с указанными граничными условиями записано в цилиндрической системе координат с учётом осевой симметрии задачи. Оно решалось методом конечных элементов с помощью пакета «COMSOL Multiphysics» на временном отрезке от 0 до 20 с.

1.3. Временные зависимости изменения температуры при различной толщине слоя диэлектрика

На рис. 4 показаны временные зависимости изменения температуры ΔT для конвертеров с различной толщиной диэлектрика от 0,5 до 20 мкм.

Из рис. 4 видно, что максимальное изменение температуры ΔT_{max} увеличивается с уменьшением толщины диэлектрического слоя. При этом время отклика, т. е. время нагрева и остывания,

4) Поверхность алюминия с нижней стороны конвертера имеет коэффициент серости, равный 0,8, и является источником теплового излучения, поток которого задаётся с помощью граничного условия

$$k_{\text{al}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \varepsilon \sigma (T_{\text{fix}}^4 - T^4|_{z=0}),$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) — постоянная Стефана—Больцмана, $\varepsilon = 0,8$ — коэффициент серости.

5) Отсутствие других слагаемых в граничных условиях 3 и 4 говорит о том, что конвертер находится в вакууме и не обменивается теплом с окружающей средой другими способами, кроме указанных в пп. 2, 3 и 4.

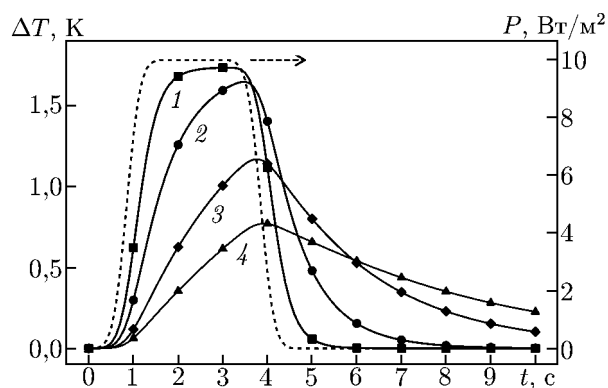


Рис. 4. Зависимости изменения температуры от времени в центре конвертера для различных толщин слоя полипропилена: кривая 1 отвечает толщине слоя 0,5 мкм, 2 — 3 мкм, 3 — 10 мкм, 4 — 20 мкм. Пунктирной линией показана временная зависимость плотности потока энергии субтерагерцового излучения P в центре конвертера (шкала справа)

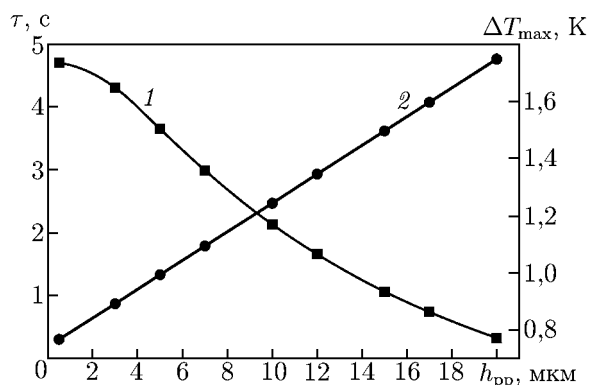


Рис. 5. Зависимости максимального изменения температуры $\Delta T_{\max}$ в центре конвертера (кривая 1) и характерного времени τ (кривая 2) от толщины диэлектрического слоя h_{pp}

уменьшается с уменьшением толщины диэлектрика, что является очевидным результатом уменьшения теплоёмкости конвертера [14]. На рис. 5 показаны зависимости максимального изменения температуры $\Delta T_{\max}$ в центре конвертера и характерного времени отклика τ от толщины диэлектрического слоя, полученные из зависимостей, часть которых показана на рис. 4. Характерное время τ рассчитывалось из аппроксимации моделированных временных зависимостей температуры при нагревании и остывании функциями $1 - \exp(-t/\tau)$ и $\exp(-t/\tau)$ соответственно. Следует отметить, что полученные в расчётах временные зависимости достаточно хорошо описываются указанными экспоненциальными функциями. Значения τ для процессов нагрева и остывания совпадают.

Из рис. 5 видно, что характерное время отклика является линейной функцией толщины диэлектрика, что соответствует линейной зависимости времени отклика от теплоёмкости диэлектрика. Таким образом, на время отклика конвертера определяющим образом влияет теплоёмкость диэлектрика, а теплоёмкость металлического слоя на нём практически не сказывается ввиду малой теплоёмкости алюминия и его малой толщины. Кроме того, из рисунка видно, что для обеспечения работы конвертера в режиме реального времени толщина диэлектрика должна быть менее 3 мкм, что соответствует τ менее 1 с. Зависимость $\Delta T_{\max}$ от толщины диэлектрика имеет нелинейный характер и насыщается, когда толщина диэлектрика становится менее 3 мкм, что объясняется влиянием фиксированной толщины металлического слоя.

Зная $\Delta T_{\max}$ конвертера и температурное разрешение инфракрасной камеры (noise-equivalent temperature difference, NETD), можно рассчитать зависимость минимальной обнаруживаемой

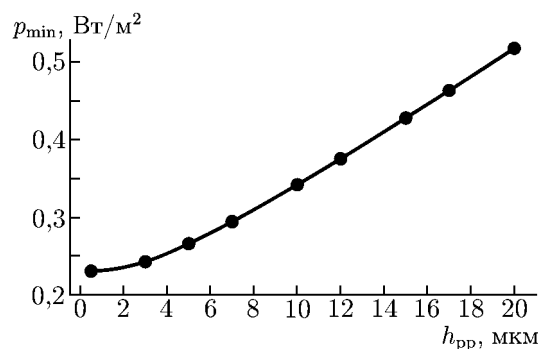


Рис. 6. Минимальная регистрируемая плотность потока энергии $p_{\min}$ в зависимости от толщины слоя полипропилена h_{pp} . Температурное разрешение инфракрасной камеры считалось равным 40 мК

плотности потока энергии от толщины диэлектрика, т. е. такую плотность потока энергии субтерагерцового излучения, которая вызывает изменение температуры конвертера, равное температурному разрешению инфракрасной камеры, в нашем случае равному 40 мК (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что эта зависимость с хорошей точностью является линейной при толщине диэлектрика более 5 мкм. При меньших толщинах диэлектрика зависимость насыщается из-за влияния слоя металла с фиксированной толщиной. При толщине диэлектрика 3 мкм минимальная обнаруживаемая плотность потока энергии составила 0,25 Вт/м², что отвечает потоку энергии $2,5 \cdot 10^{-7}$ Вт, приходящему на пиксел с размерами 1×1 мм (которые соответствуют рабочей длине волны). Для сравнения с современными болометрическими инфракрасными камерами можно рассчитать поток энергии на пиксел с размерами 15×15 мкм, что даёт величину $5,6 \cdot 10^{-11}$ Вт (noise-equivalent power, NEP). Она соответствует лучшим образцам современных тепловизионных камер. Таким образом, чувствительность детектора на основе описанного конвертера и инфракрасной камеры не уступает современному уровню тепловизионных детекторов.

1.4. Эффективность конверсии субтерагерцового излучения в инфракрасное

Естественным параметром конвертера является эффективность конверсии, определяемая как отношение энергии теплового излучения E_{out} к падающей энергии субтерагерцового излучения E_{in} . Программный пакет «COMSOL Multiphysics» позволяет найти этот параметр. Эффективность конверсии η в процентах, другими словами КПД конверсии, рассчитывалась посредством следующих формул:

$$\eta = 100 E_{\text{out}}/E_{\text{in}}, \quad E_{\text{out}} = \int_0^{t_{\text{last}}} \int_0^R \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{fix}}^4) 2\pi r dr dt,$$

$$E_{\text{in}} = \int_0^{t_{\text{on}}+t_{\text{trans}}} \int_0^R P(t, r) 2\pi r dr dt \approx t_{\text{on}} p \pi (R/2)^2 \approx 0,0147 \text{ Дж},$$

где $p = 10 \text{ Вт/м}^2$ — максимальная плотность потока энергии падающего излучения.

Временная зависимость плотности потока энергии указана на рис. 4, время накопления энергии теплового излучения $t_{\text{last}} = 20$ с.

Результаты моделирования приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что конвертер обладает весьма хорошей эффективностью, соответствующей потерям менее 10 %. Уменьшение эффективности конверсии при толщине диэлектрика 20 мкм объясняется тем, что с увеличением толщины слоя полипропилена увеличивается время остывания. Это приводит к тому, что за счёт латеральной теплопроводности через боковую границу конвертера успевает уйти большее количество энергии и, тем самым, уменьшается доля энергии, ушедшей в виде теплового излучения.

Таблица 2. Эффективность конверсии

Толщина диэлектрика h_{pp} , мкм	Расчётная эффективность конверсии η , %
3	92,2
10	92,0
20	88,9

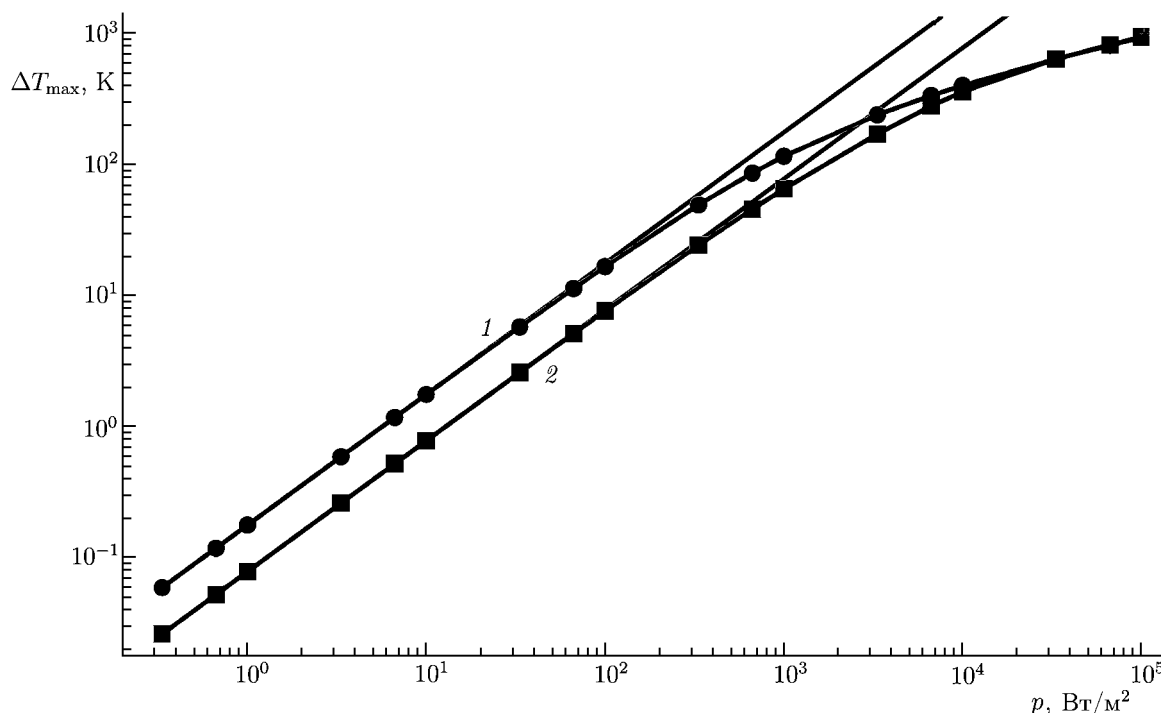


Рис. 7. Зависимость максимального изменения температуры конвертера $\Delta T_{\max}$ от плотности потока излучения p для толщин конвертера, равных 0,5 (кривая 1) и 20 мкм (кривая 2). Зависимости наложены на прямые, построенные по первым двум точкам

1.5. Линейность преобразования

Другой важной характеристикой любого детектора является линейность осуществляемого им преобразования. Поскольку инфракрасная камера является линейным детектором температуры наблюдаемого объекта, то линейность конвертера оценивалась по линейности зависимости максимального изменения температуры $\Delta T_{\max}$ от максимального потока энергии падающего субтерагерцового излучения. На рис. 7 показана расчётная зависимость $\Delta T_{\max}$ от максимальной плотности потока энергии падающего субтерагерцового излучения p .

Из рис. 7 видно, что для указанных толщин диэлектрика область линейности детектора по отношению к её нижней границе составляет заведомо более 10^3 , что является достаточно хорошим показателем. Насыщение зависимости наступает только при изменении температуры более, чем на 50 K, что лежит за пределами реальных рабочих температур конвертера.

2. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ КОНВЕРТЕРА

2.1. Влияние латеральной теплопроводности на пространственное разрешение конвертера

Одной из важных характеристик матричного детектора изображения является эффект расплывания изображения (блюминг), обусловленный электрической или тепловой связью соседних пикселей и характерный для матричных детекторов всех типов. В случае описываемого конвертера расплывание изображения обусловлено поперечной теплопроводностью вдоль его структуры. Для исследования данного эффекта постановка задачи была изменена. Цилиндрическая

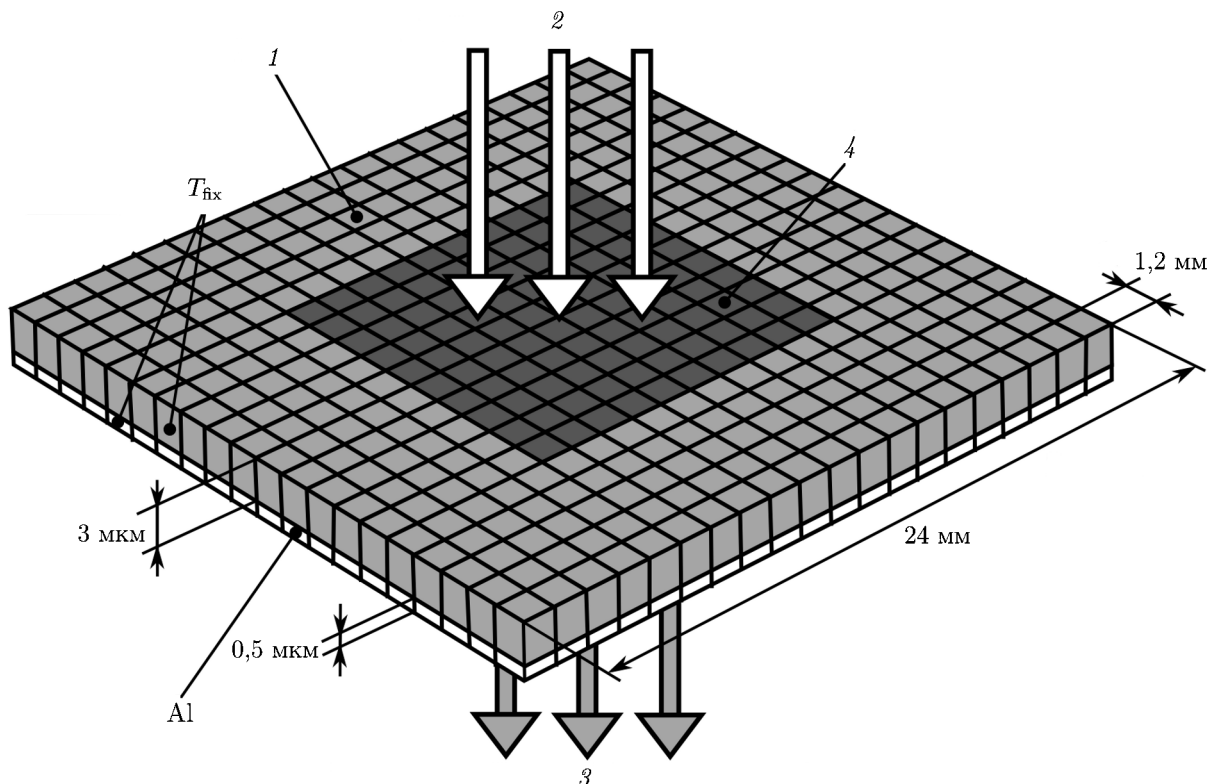


Рис. 8. Геометрическая модель квадратного конвертера. Начало системы координат находится внизу в центре конвертера, ось z направлена вверх, оси x и y параллельны сторонам конвертера, 1 — полипропилен, 2 — падающее излучение, 3 — тепловое излучение с коэффициентом серости ε , равным 0,8, Al — алюминий, T_{fix} — фиксированная температура по периметру конвертера, 4 — облучаемая область (показана тёмно-серым оттенком)

система координат была заменена на декартовую систему, а конвертер имел не круглую, а квадратную апертуру. Такая замена объясняется тем, что в прямоугольной системе координат удобнее разбить структуру конвертера на условные прямоугольные пикселы, чтобы исследовать процесс расплывания изображения. Размер субтерагерцового пиксела выбирался равным около 1 мм, т. е. имеющим масштаб рабочей длины волны излучения.

При рассмотрении квадратного конвертера нам пришлось уменьшить его размер по сравнению с круглым конвертером из-за ограниченных возможностей программного пакета «COMSOL Multiphysics». На рис. 8 показана схема конвертера в декартовой системе координат. Начало системы координат находится внизу в центре конвертера, ось z направлена вверх, оси x и y параллельны сторонам конвертера. Длина стороны квадратного конвертера равна 24 мм, основой его является слой диэлектрика (в нашем случае полипропилена). Снизу на диэлектрик нанесён слой алюминия с толщиной 0,5 мкм. Конвертер условно разделён на квадратные пикселы с длиной стороны 1,2 мм. Освещаемая субтерагерцовым излучением прямоугольная область занимает центральные 10×10 пикселов. Временная зависимость плотности потока энергии субтерагерцового излучения задаётся уравнением (5) и на рис. 3 показана сплошной линией. Максимальный поток энергии в импульсе равен $p = 10 \text{ Вт/м}^2$.

При расчёте учитывалась теплопроводность слоёв конвертера и тепловое излучение со стороны, противоположной падающему излучению. Конвертер находится в вакууме. Тепловое излучение со стороны падающего излучения также не рассматривалось, поскольку коэффициент

серости данной поверхности считался равным нулю. Температура по периферии конвертера принималась фиксированной и равной 293,15 К. Начальная температура также полагалась равной 293,15 К.

На рис. 9 показано рассчитанное пространственное распределение изменения температуры по поверхности описанного конвертера с диэлектриком, имеющим толщину 3 мкм. Чёрным квадратом ограничена освещаемая область.

Из рисунка видно, что тепловое поле значительно расплывается. Такое расплывание будет приводить и к значительному расплыванию получаемого изображения. Для уменьшения данного эффекта был рассмотрен конвертер со сквозными разрезами, не нарушающими целостности всей структуры. Разрезы имеют вид штриховых линий, расположенных на границах условных пикселей и формируют матричную структуру из реальных пикселей.

Разрезы, в зависимости от технологии их изготовления, могут быть разного типа. Первый тип — сквозные разрезы. Они выполнены во всей структуре после формирования всех слоёв конвертера. Второй тип — разрезы только алюминиевого слоя на изолированные квадраты. Расстояние между квадратами бралось равным ширине сквозных разрезов в первом случае. Полипропилен при этом не разрезается. Третий тип — комбинация первых двух: алюминиевый слой разрезается на изолированные квадраты, а в полипропилене выполняются сквозные разрезы в виде штриховых линий в промежутках между пикселями.

Для рассмотрения конвертера с разрезами формулировка задачи теплопроводности должна быть изменена. В данном случае она описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

где $T(t, x, y, z)$ — температура, t — время, z — толщина, x, y — координаты вдоль сторон конвертера, $\rho(z)$ — плотность, $k(z)$ — коэффициент теплопроводности, $C_p(z)$ — удельная теплоёмкость среды при постоянном давлении. Область определения функции T есть

$$t \in [0, t_{\text{last}}], \quad x, y \in [-a/2, a/2], \quad z \in [0, h_{\text{al}} + h_{\text{pp}}].$$

Зададим также $d_{\text{pix}} = 1,2$ мм — размер стороны одного пикселя, $a = 20d_{\text{pix}} = 24$ мм — размер стороны конвертера, $h_{\text{al}} = 0,5$ мкм — толщина слоя алюминия, $h_{\text{pp}} = 3$ мкм — толщина слоя полипропилена, $t_{\text{last}} = 10$ с — время, до которого проводились расчёты;

$$(\rho, C_p, k) = \begin{cases} (\rho_{\text{al}}, C_{p,\text{al}}, k_{\text{al}}), & 0 < z < h_{\text{al}}; \\ (\rho_{\text{pp}}, C_{p,\text{pp}}, k_{\text{pp}}), & h_{\text{al}} < z < h_{\text{al}} + h_{\text{pp}}, \end{cases}$$

ρ_{al} и ρ_{pp} — плотности алюминия и полипропилена соответственно, $C_{p,\text{al}}$ и $C_{p,\text{pp}}$ — удельные теплоёмкости при постоянном давлении алюминия и полипропилена соответственно, k_{al} и k_{pp} — коэффициенты теплопроводности алюминия и полипропилена соответственно. Значения этих коэффициентов указаны в табл. 1.

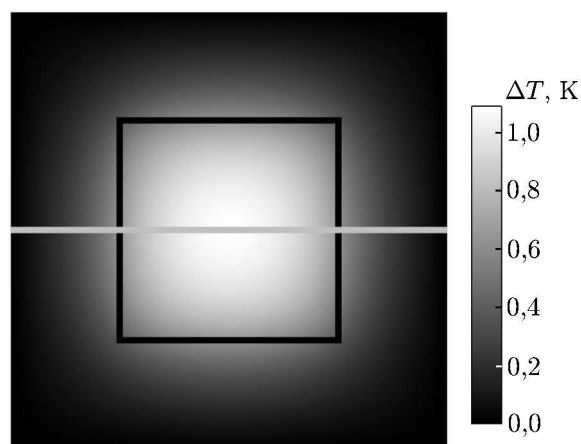


Рис. 9. Распределение изменения температуры ΔT по поверхности квадратного конвертера. Сечение вдоль серой линии используется в дальнейшем для построения двумерных графиков. Чёрным квадратом ограничена облучаемая область

Начальная температура конвертера составляла 293,15 К: $T|_{t=0} = T_{\text{fix}}$, $T_{\text{fix}} = 293,15$ К — температура окружающей среды.

Граничные условия для уравнения теплопроводности были следующими.

1) Граничные условия сопряжения при $z = h_{\text{al}}$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^-} T|_{z=\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^+} T|_{z=\Delta z}, \quad \lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^-} k_{\text{al}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^+} k_{\text{pp}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\Delta z}$$

означают равенство температур и тепловых потоков на границе между полипропиленом и алюминием.

2) По внешней боковой границе конвертера температура полагалась фиксированной и равной 293,15 К: $T|_{S_{\text{side}}} = T_{\text{fix}}$, $S_{\text{side}} = S \cap \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid |x| = a/2 \vee |y| = a/2\}$ — внешняя боковая граница конвертера, где S — поверхность конвертера с учётом всех разрезов. Внешняя боковая граница конвертера представляет собой пересечение поверхности конвертера с учётом всех разрезов и боковой поверхности (не нижней и не верхней) неразрезанного конвертера, ориентированного и расположенного так же, как первый.

3) Поверхность алюминия с нижней стороны конвертера имеет коэффициент серости, равный 0,8, и является источником теплового излучения, которое задаётся с помощью граничного условия

$$k_{\text{al}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{S_{\text{em}}} = \varepsilon \sigma (T_{\text{fix}}^4 - T^4|_{S_{\text{em}}}),$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) — постоянная Стефана—Больцмана, $\varepsilon = 0,8$ — коэффициент серости, $S_{\text{em}} = S \cap \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid z = 0\}$ — поверхность, которая испускает тепловое излучение, S — поверхность конвертера с учётом всех разрезов. Нижняя излучающая граница конвертера представляет собой пересечение поверхности конвертера с учётом всех разрезов и нижней поверхности неразрезанного конвертера, ориентированного и расположенного так же, как первый.

4) На верхнюю поверхность конвертера со стороны полипропилена в центральные 10×10 пикселей подаётся импульс излучения с максимальной плотностью потока энергии 10 Вт/м². При этом поглощение происходит только в тех областях полипропилена, которые закрыты слоем алюминия с противоположной стороны. Верхняя поверхность конвертера имеет коэффициент поглощения субтерагерцового излучения, равный 1, и коэффициент серости $\varepsilon = 0$, что подразумевает отсутствие теплового излучения:

$$k_{\text{pp}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{S_{\text{in}}} = f(t)g(x)g(y)p = P(t, x, y), \quad S_{\text{in}} = S_{\text{em}} + (0, 0, h_{\text{al}} + h_{\text{pp}}).$$

В этом уравнении левая часть отвечает за тепловой поток через поглощающую поверхность пластины, правая — за распределение потока падающего излучения по поверхности и во времени. Через S_{in} обозначена поверхность, на которой поглощается приходящее излучение и которая совпадает с поверхностью S_{em} с точностью до сдвига по оси z на суммарную толщину слоёв конвертера:

$$g(s) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |s| \leq 5d_{\text{pix}}; \\ 0, & 5d_{\text{pix}} < |s| \leq 10d_{\text{pix}}, \end{cases}$$

$p = 10$ Вт/м² — максимальная плотность потока энергии приходящего субтерагерцового излучения. Функция распределения потока падающего излучения во времени $f(t)$ бралась той же, что и в уравнении (5), т. е. имела достаточно гладкую форму, что позволяло уменьшить влияние паразитных осцилляций, возникающих в решении при использовании разрывной функции. Функция $f(t)$ изображена на рис. 3.

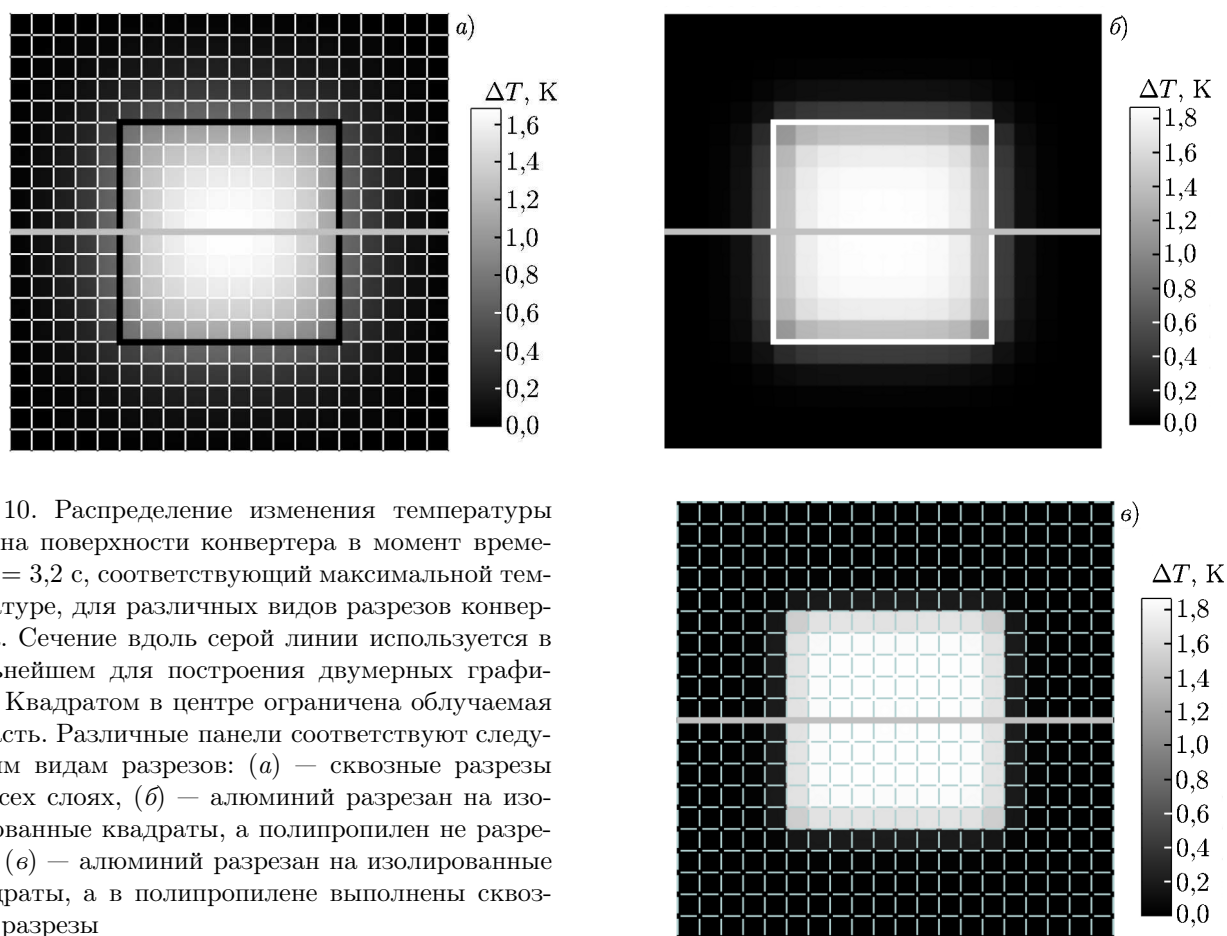


Рис. 10. Распределение изменения температуры ΔT на поверхности конвертера в момент времени $t = 3,2$ с, соответствующий максимальной температуре, для различных видов разрезов конвертера. Сечение вдоль серой линии используется в дальнейшем для построения двумерных графиков. Квадратом в центре ограничена облучаемая область. Различные панели соответствуют следующим видам разрезов: (а) — сквозные разрезы во всех слоях, (б) — алюминий разрезан на изолированные квадраты, а полипропилен не разрезан, (в) — алюминий разрезан на изолированные квадраты, а в полипропилене выполнены сквозные разрезы

5) На всех остальных поверхностях использовались граничные условия теплоизолированности, т. к. конвертер находится в вакууме:

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{S \setminus (S_{\text{side}} \cup S_{\text{em}} \cup S_{\text{in}})} = 0.$$

Данное дифференциальное уравнение с указанными выше граничными условиями в декартовой системе координат решалось методом конечных элементов на временном отрезке от 0 до 10 с.

На рис. 10 показаны распределения изменения температуры ΔT на поверхности конвертера при $t = 3,2$ с, т. е. в момент максимума температуры, для различных видов разрезов конвертера. На рис. 10а показано распределение ΔT для конвертера с разрезами первого типа, т. е. со сквозными разрезами во всех слоях. Из рисунка видно, что расплывание теплового поля остаётся существенным благодаря высокой теплопроводности металла, оставшегося в перемычках между пикселями. На рис. 10б показано распределение ΔT для конвертера с разрезами второго типа, когда алюминий разрезан на изолированные квадраты, а полипропилен не разрезан. Из рисунка видно, что расплывание существенно уменьшилось, несмотря на то, что в полипропилене разрезы отсутствуют. Таким образом, несмотря на малую толщину слоя алюминия, полученные данные свидетельствуют об его определяющем влиянии на расплывание теплового поля.

На рис. 10в показано распределение ΔT для конвертера с разрезами третьего типа, когда алюминий разрезан на изолированные квадраты, а в полипропилене выполнены сквозные раз-

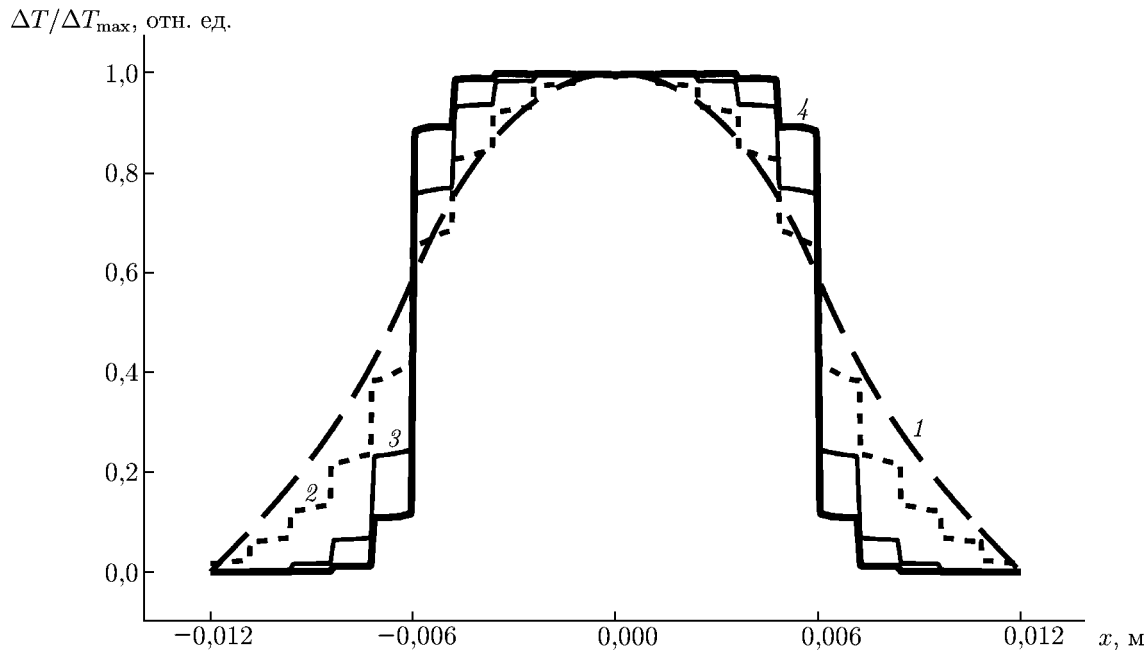


Рис. 11. Сечения пространственных распределений ΔT , представленных на рис. 9 и 10. Все функции нормированы на их значения в максимуме. По оси абсцисс отложена координата x вдоль конвертера, по оси ординат — величина $\Delta T/\Delta T_{\max}$. Кривая 1 отвечает отсутствию разрезов в полипропилене и алюминии, 2 — разрезам с размерами $1,08 \times 0,1$ мм в полипропилене и алюминии, 3 — разрезам с размерами 0,1 мм в алюминии (изолированные пиксели и отсутствие разрезов в полипропилене), 4 — разрезам с размерами 0,1 мм в алюминии (изолированные пиксели) и разрезам с размерами $0,9 \times 0,1$ мм в полипропилене

резы, не нарушающие целостности структуры конвертера. Из рисунка видно, что в последнем случае расплывание теплового поля минимально. Для количественного представления процесса расплывания на рис. 11 показаны нормированные сечения пространственных распределений ΔT , изображённых на рис. 9 и 10. Сечения проводились вдоль серых линий, указанных на этих рисунках.

2.2. Эффективность конверсии субтерагерцового излучения в инфракрасное для конвертера с разрезами

Для конвертера с разрезами, также как и для конвертера без разрезов, рассчитывалась эффективность конверсии η (в процентах), определяемая формулой

$$\eta = 100 \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}, \quad E_{\text{out}} = \int_0^{t_{\text{last}}} \iint_{S_{\text{em}}} \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{fix}}^4) dx dy dt,$$

$$E_{\text{in}} = \int_0^{t_{\text{on}} + t_{\text{trans}}} \iint_{\mathbb{R}^2} P(t, x, y) dx dy dt \approx t_{\text{on}} p (10 d_{\text{pix}})^2 = 108 \text{ мДж},$$

где S_{em} — поверхность, с которой испускается тепловое излучение, $p = 10 \text{ Вт/м}^2$ — максимальная плотность потока энергии падающего излучения.

Таблица 3

№ п/п	Вид разрезов	Расчётная эффективность конверсии η , %
1	Разрезов нет (на боковой границе фиксированная температура)	62,3
2	В алюминии и диэлектрике разрезы с длиной 1,08 мм и шириной 0,1 мм	78,1
3	Алюминий разрезан на изолированные ячейки (ширина разреза 0,1 мм), в диэлектрике разрезов нет	82,6
4	Алюминий разрезан на изолированные ячейки (ширина разреза 0,1 мм), в диэлектрике разрезы с длиной 0,9 мм и шириной 0,1 мм	82,8

Временная зависимость плотности потока энергии показана на рис. 4, время суммирования энергии теплового излучения $t_{\text{last}} = 10$ с. Результаты моделирования приведены в табл. 3. Из неё видно, что эффективность конверсии квадратного конвертера без разрезов меньше, чем круглого конвертера, рассмотренного выше. Это связано с тем, что расстояние между освещённой областью и краем конвертера с фиксированной температурой для квадратного конвертера в два раза меньше, чем для круглого. В результате поток тепла, уходящего вдоль конвертера и не участвующего в тепловом излучении, для квадратного конвертера больше, чем для круглого, что и даёт уменьшение эффективности конверсии. Выполнение разрезов любого типа приводит к увеличению эффективности конверсии, что вполне естественно. Следует отметить, что эффективность конверсии конвертеров, соответствующих п. 3 и 4 табл. 3 и отличающихся наличием разрезов в полипропилене, практически одинакова. Это свидетельствует о слабом влиянии на эффективность конверсии ухода тепла по слою полипропилена.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено моделирование теплофизических процессов в структуре конвертера субтерагерцового излучения в инфракрасное, возникающих при его освещении субтерагерцовым излучением. Цель этого моделирования заключалась в определении предельных характеристик детектора изображения на основе данного конвертера и инфракрасной камеры. Моделирование позволило определить следующие параметры: минимальную обнаруживаемую плотность потока энергии детектируемого излучения, время отклика и эффективность конверсии. Моделировались также процессы расплывания изображения. Полученные значения минимальной обнаруживаемой плотности потока энергии $0,25 \text{ Вт/м}^2$ соответствуют лучшим современным тепловым детекторам. Время отклика оказалось достаточно большим и равно примерно 1 с при толщине диэлектрика 3 мкм и толщине металла 0,5 мкм. Однако, полученная с помощью моделирования линейная зависимость времени срабатывания от толщины указывает путь для повышения быстродействия детектора — дальнейшее уменьшение толщины диэлектрика. С точки зрения теории резонансного поглотителя толщина ограничивается только технологическими возможностями изготовления конструкции конвертера. Эффективность конверсии оказалась достаточно высокой, т. к. потери в конвертере при его оптимальной конфигурации не превышают 20 %. Расплывание изображения может быть существенно уменьшено в результате выполнения соответствующих разрезов в структуре конвертера. Таким образом, полученные при помощи моделирования па-

параметры детектора изображения на основе описанного конвертера показывают перспективность данного подхода для создания моноспектральных и многоспектральных детекторов субтерагерцового излучения.

Работа выполнена при частичной поддержке Правительства РФ в рамках программы финансирования научных исследований, проводимых под руководством ведущих учёных в Российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (грант 11.G34.31.0033).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chan W. L., Deibel J., Mittleman D. M. // Rep. Progr. Phys. 2007. V. 70. P. 1 325.
2. Appleby R., Anderton R. N. // Proc. IEEE. 2007. V. 95, No. 8. P. 1 683.
3. Oka S., Togo H., Kukutsu N., Nagatsuma T. // Progr. Electromag. Res. Lett. 2008. V. 1. P. 197.
4. Yun-Shik L. Principles of THz science and technology. Springer, 2009.
5. Sakai K. Terahertz optoelectronics. New York: Springer-Verlag, 2005.
6. Liu D., Pfeiffer U., Grzyb J., Gaucher B. Advanced millimeter-wave technologies: antennas, packaging and circuits. Wiley, 2009.
7. Sizov F. // Opto-Electron. Rev. 2010. V. 18, No. 1. P. 10.
8. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V., et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. Art. no. 023501.
9. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V., et al. // Proc. 6th ESA Workshop Millimetre-Wave Technology and Applications, May 23–25, 2011, MilliLab, Espoo, Finland (Wednesday Session ESA 6).
10. Kuznetsov S. A., Arzhannikov A. V., Paulish A. G., et al. // Techn. Messen. 2011. V. 78, No. 11. P. 526.
11. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V., et al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8423. P. 84230S.
12. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V., et al. // Progr. Electromag. Res. 2012. V. 122. P. 93.
13. Pozar D. M. Microwave engineering. Wiley, 2005.
14. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. Новосибирск: Наука, 2003.

Поступила в редакцию 30 января 2013 г.; принята в печать 20 февраля 2013 г.

SIMULATION OF THE THERMOPHYSICAL PROCESSES IN THE SUBTERAHERTZ IMAGER BASED ON A THIN-FILM METAMATERIAL CONVERTER

P. S. Zagubisalo, A. G. Paulish, S. A. Kuznetsov, A. V. Arzhannikov, and M. K. A. Thumm

The main characteristics of a subterahertz image detector are calculated by numerical modeling of the thermophysical processes in a bolometer subterahertz-to-infrared converter based on a thin-film metal-dielectric metastructure. The output signal of such a converter is recorded with an infrared camera and is used for thermal imaging. Simulations show that the energy conversion efficiency is over 80%, which provides a high sensitivity of the imager and puts it in line with modern infrared detectors. The converter sensitivity is a linear function of the subterahertz radiation power in about three orders of the dynamic range. The real-time operation is reached when the dielectric layer is less than 3- μm thick. The blooming effect and the ways of its reducing are also discussed.