

Эффективные широкополосные приемники терагерцового излучения на основе болометров с тонким металлическим поглотителем

© М.А. Демьяненко

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: demyanenko@isp.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 11 января 2017 г. В окончательной редакции 12 апреля 2017 г.)

На основе матричного метода проведен расчет коэффициентов поглощения терагерцового излучения в традиционном и инвертированном типе болометрических структур, отличающихся тем, что в первом случае излучение падает со стороны прилегающего к болометру вакуума, а во втором — со стороны подложки, на которой он изготовлен. Показано, что применение дополнительного резонатора в виде зазора между болометром и входным или выходным окном позволяет получать коэффициенты поглощения близкие к единице, при этом болометры традиционного типа становятся узкополосными, а инвертированного — остаются широкополосными.

DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45495.2165

Введение

Последние полтора десятилетия проявляется значительный интерес к детектированию и визуализации излучения терагерцового спектрального диапазона (0.3–10 THz) для создания систем безопасности, в биохимических, медицинских и других целях [1,2]. Системы визуализации с активной подсветкой на длине волны около 100 μm , работающие на кадровой частоте вплоть до 90 Hz, были реализованы на основе матричных микроболометрических приемников и достаточно мощных газовых [3] и квантовых каскадных [4] лазеров, а также лазеров на свободных электронах [5]. Применяемые в этих работах стандартные микроболометры были разработаны для инфракрасного диапазона 8–14 μm , в котором они обладают высокой чувствительностью — мощность, эквивалентная шуму (Noise Equivalent Power, NEP), составляет около 1 pW/Hz^{1/2} [4]. Однако на длинах волн, близких к 100 μm , их чувствительность оказалась много ниже — NEP = 200–300 pW/Hz^{1/2} [4–5], что преимущественно обусловлено малой величиной пропускания используемых германиевых окон (~ 25%) и малым коэффициентом поглощения терагерцового излучения в микроболометрах (~ 3%) [6].

В дальнейшем величина коэффициента поглощения была значительно повышена путем нанесения дополнительного тонкого металлического поглотителя на поверхность микроболометра, что вместе с заменой германиевого окна на кремниевое, просветленное в рабочем диапазоне длин волн, и значительным понижением теплопроводности балок, поддерживающих болометр, позволило понизить NEP до ~ 40 pW [6]. Отметим, что размерность pW подразумевает мощность, эквивалентную шуму, в полосе частот интегрирования сигнала (для матричных приемников ее характерное значение равно 10 kHz), в то время как размерность pW/Hz^{1/2} означает мощность, эквивалентную шуму, в полосе

1 Hz. Увеличение высоты подвески микроболометра над кремниевой подложкой, в которой выполнена схема считывания сигналов с 3.2 до 5.7 μm , позволило еще повысить коэффициент поглощения и понизить NEP в 1.4 раза [7]. Отметим, что все вышеперечисленные меры повышения чувствительности микроболометра в терагерцовом диапазоне позволяли сохранить широкополосность приемника.

Применение дополнительного оптического резонатора, образованного 50 μm зазором между микроболометром и входным кремниевым окном, привело к дальнейшему понижению NEP до ~ 17 pW на длине волны, равной 97 μm [7], однако при этом приемник стал узкополосным. Использование дополнительного интегрирования по пикселям и кадрам, что, естественно, приводит к понижению пространственного и временного разрешения, позволило понизить NEP до ~ 1 pW [6].

В настоящей работе проводится сравнительный анализ коэффициентов поглощения терагерцового излучения в болометрических структурах с тонким металлическим поглотителем традиционного и предлагаемого нами инвертированного типа с целью выявления конфигурации, позволяющей создать широкополосный терагерцовый болометрический приемник, обладающий коэффициентом поглощения, близким к единице.

1. Предварительный анализ коэффициентов поглощения в болометрических приемниках традиционного и инвертированного типа

Все вышеуказанные модификации дизайна болометра соответствуют традиционной конфигурации (рис. 1, а), в которой болометр, состоящий из высокоомного термочувствительного слоя d и тонкого металлического

поглотителя a , изготовлен на подложке $w1$, а излучение падает через окно $w2$, расположенное на значительном расстоянии (зазор $g2$) от болометра. Величина зазора $g1$ (между болометром и подложкой) задается толщиной жертвенного слоя, который удаляется в конце процесса изготовления болометра и обычно составляет $2-3 \mu\text{m}$. Между металлическим поглотителем и термочувствительным слоем находится тонкий изолирующий слой, который можно не учитывать, если его толщина достаточно мала, или включить в состав термочувствительного слоя, если он слабо от него отличается по величине коэффициента преломления. Под болометром на подложке $w1$ может находиться отражатель r . В инвертированной конфигурации (рис. 1, b) излучение падает на болометр со стороны подложки $w2$, на которой он изготовлен, а отражатель r может находиться на выходном окне $w1$. На окне $w2$ (рис. 1, a) или подложке $w2$ (рис. 1, b), выполняющей роль входного окна, может быть нанесено антиотражающее покрытие AR .

Одно из основных различий этих двух конфигураций можно проиллюстрировать с помощью упрощенной модели. Пусть тонкий металлический поглотитель, толщина которого много меньше длины экранирования, расположен между двумя прозрачными средами (учитывая обозначения рис. 1, обозначим их как w и g), имеющими разные диэлектрические проницаемости ε_w и ε_g , а излучение падает со стороны среды w . Тогда коэффициенты пропускания T , отражения R и поглощения A падающей на границу раздела электромагнитной ТЕ-волны, полученные в рамках так называемого инфракрасного приближения, будут заданы следующими соотношениями [8,9]:

$$T = \frac{4p_w p_g}{(p_w + p_g + f_a)^2}, \quad R = \frac{(p_w - p_g - f_a)^2}{(p_w + p_g + f_a)^2},$$

$$A = \frac{4p_w f_a}{(p_w + p_g + f_a)^2}. \quad (1)$$

Здесь $p_n = (\varepsilon_n \varepsilon_0 / \mu_n \mu_0)^{1/2} \cos \theta_n$ — адмиттанс наклонно распространяющейся ТЕ-волны в среде n ($n = w, g$); ε_0, μ_0 и ε_n, μ_n — абсолютные и относительные диэлектрические и магнитные проницаемости вакуума и среды n соответственно; f_a — слоевая проводимость (адмиттанс) тонкого металлического поглотителя; θ_n — угол, задающий направление распространения волны в слое n , который как обычно находится по закону преломления Снеллиуса. Все величины, входящие в (1), считаем действительными. Для ТМ-волны в соотношениях (1) необходимо заменить p_n на $p'_n = (\varepsilon_n \varepsilon_0 / \mu_n \mu_0)^{1/2} / \cos \theta_n$, а при падении излучения со стороны среды g — переставить индексы w и g .

Из соотношений (1) следует, что коэффициент пропускания не зависит от направления распространения излучения, а коэффициенты поглощения и отражения — зависят. Поглощение достигает своего максимального значения $A = p_w / (p_w + p_g)$ при $f_a = p_w + p_g$, и в случае падения излучения со стороны среды с большим

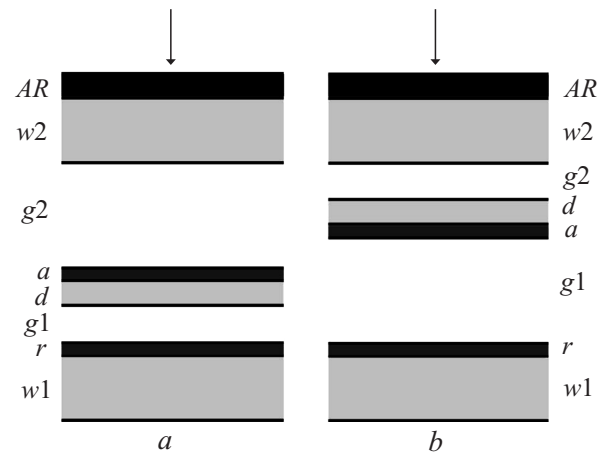


Рис. 1. Болометрические приемники традиционного (a) и инвертированного (b) типа.

адмиттансом оно оказывается больше, чем при падении со стороны среды с меньшим адмиттансом. При равных адмиттансах p_w и p_g , также как и при нормальном падении инфракрасного излучения на расположенный в вакууме тонкий металлический поглотитель со слоевым сопротивлением $R_a = 1/f_a = (\mu_0/\varepsilon_0)^{1/2}/2 \approx 188 \Omega/\square$, коэффициент поглощения равен 0.5 [9].

Такую предельно упрощенную модель можно применить к рассматриваемым нами болометрам в случае отсутствия входного окна $w2$ (или его хорошего просветления с обеих сторон) и отражателя r , а также при отсутствии отражения от нижней границы подложки $w1$, например, при хорошем ее просветлении (рис. 1, a). В случае инвертированного болометра (рис. 1, b) для этого потребуется отсутствие выходного окна $w1$ (или его хорошее просветление с обеих сторон). Кроме того, так как обычно высота h подвески микроболометров над подложкой составляет $2-3 \mu\text{m}$, а толщина термочувствительного слоя d менее $1 \mu\text{m}$, то на интересующих нас длинах волн порядка $100 \mu\text{m}$ этими толщинами можно пренебречь, и считать, что тонкий металлический поглотитель расположен на границе двух сред (между подложкой w и вакуумом g).

В результате можно ожидать, что при отсутствии дополнительных резонаторов инвертированная болометрическая структура (рис. 1, b), в которой излучение падает со стороны подложки, обладающей заметно большей диэлектрической проницаемостью по сравнению с вакуумом, должна обладать большим коэффициентом поглощения терагерцового излучения, чем традиционная структура (рис. 1, a). При этом, учитывая отсутствие частотной зависимости в (1), поглощение в низких частотах должно быть практически постоянным.

Основные особенности поведения коэффициента поглощения в болометрах традиционного типа в зависимости от частоты излучения, толщин зазоров $g1, g2$ и сопротивления металлического поглотителя представлены в [6,7]. С целью описания особенностей поглощения

в болометрах инвертированного типа с дополнительным резонатором $g1$, являющихся основным объектом исследования в настоящей работе, приведем аналитическое соотношение, применимое при следующих упрощениях. Как и ранее, пренебрежем толщиной зазора $g2$ между болометром и подложкой $w2$, на которой он изготовлен, и толщиной высокоомного термочувствительного слоя d , и будем считать, что тонкий металлический поглотитель болометра a расположен на границе подложки $w2$. Кроме того, будем полагать, что просветляющее покрытие AR и отражатель r , показанные на рис. 1, b , идеальны. Первое предположение позволяет считать, что электромагнитная волна, распространяющаяся в полупространстве, обладающем свойствами материала подложки $w2$ (среда w), падает на структуру, состоящую из тонкого металлического поглотителя a , диэлектрического (в частности вакуумного) зазора $g1$ (среда g) и отражателя r . Второе позволяет считать, что поглощение в отражателе не происходит. Тогда, используя соотношение (27) из работы [8] и устремив в нем слоевую проводимость f_r отражателя r к бесконечности, найдем коэффициент поглощения электромагнитной ТЕ-волны в рассматриваемом здесь упрощенном болометре инвертированного типа

$$A = \frac{4p_w f_a}{(p_w + f_a)^2 + p_g^2 \operatorname{ctg}^2(\kappa_g d_g \cos \theta_g)}. \quad (2)$$

Это же соотношение можно получить, используя выражение для коэффициента отражения R отражательного фильтра, состоящего из тонкого металлического слоя, отделенного от идеально отражающей подложки не поглощающим диэлектрическим слоем [9], и учитывая, что для такого фильтра $A = 1 - R$. Здесь $\kappa_g = (2\pi/\lambda)(\epsilon_g \mu_g)^{1/2}$; λ — длина волны излучения в вакууме; d_g — толщина зазора $g1$. Все величины, входящие в (2), считаем действительными. Так же как и ранее, в случае ТМ-волны в выражении (2) необходимо заменить p_n на $p'_n = (\epsilon_n \epsilon_0 / \mu_n \mu_0)^{1/2} / \cos \theta_n$. Заметим, что соотношение (2) справедливо и для болометров традиционного типа, когда входное окно $w2$ хорошо просветлено с обеих сторон (так, что дополнительный оптический резонатор, образованный зазором $g2$, отсутствует). В этом случае можно считать, что излучение падает на болометр из вакуума и, следовательно, в соотношении (2) необходимо положить $p_w = p_g$. Здесь и далее будем считать зазоры $g1$ и $g2$ вакуумными. Следует особо отметить, что соотношение (2) нельзя применить даже для приблизительного анализа традиционного болометра с дополнительным резонатором $g2$, поскольку последний находится по другую сторону от болометра по сравнению с тем, как это было предусмотрено при выводе соотношения (2); а при наличии отражателя r важными являются оба зазора $g1$ и $g2$.

Из соотношения (2) следует, что поглощение нормально падающего ($\theta_n = 0$) излучения с длиной волны λ окажется равным единице, если толщина $d_g = \lambda/4$ и

$f_a = p_w$. При длинах волн $\lambda \approx 100 \mu\text{m}$ для болометров традиционного типа условие $d_g = \lambda/4 \approx 25 \mu\text{m}$ трудно реализовать, так как в хорошо отработанной технологии высота h подвески болометров составляет 2–3 μm . В болометрах инвертированного типа такие большие величины зазора $g1$ легко могут быть достигнуты путем установки пластины $w1$ с отражателем r на нужном расстоянии от болометра. Кроме того, из соотношения (2) следует, что в болометрах инвертированного типа ширина полосы поглощения, края которой определены, например, условием $A = 0.5$, оказывается больше, чем в болометрах традиционного типа. Действительно, для болометров традиционного типа (в случае отсутствия дополнительного резонатора $g2$) $f_a = p_w = p_g = 1/377 S$ и ширина полосы поглощения определяется условием $-2 < \operatorname{ctg}(\kappa_g d_g) < 2$. В болометрах инвертированного типа излучение падает на болометр со стороны подложки $w2$, выполненной, например, из высокоомного кремния, имеющего показатель преломления n в терагерцовой области, равный 3.4, так что $f_a = p_w = 3.4 p_g$ и ширина полосы поглощения определяется условием $-6.8 < \operatorname{ctg}(\kappa_g d_g) < 6.8$. В частности, при $d_g = 15 \mu\text{m}$ максимум поглощения будет наблюдаться на длине волны $\lambda = 60 \mu\text{m}$, а условие $A > 0.5$ будет выполняться в интервале 35–203 и 31–645 μm для болометра традиционного и инвертированного типа соответственно, т.е. ширины полос поглощения отличаются в три раза. При заполнении большей части зазора $g1$ нитридом кремния ($n \approx 2$), как это сделано в [10] с целью решения технологических проблем осуществления высокой подвески болометров, полоса поглощения в болометре традиционного типа уменьшается до интервала 40–120 μm .

В разд. 2 проведем численный расчет коэффициентов поглощения терагерцового излучения в болометрических структурах обоих типов, позволяющий учесть два зазора $g1, g2$, толщину термочувствительного слоя d , просветляющее покрытие и слоевые сопротивления поглотителя a и отражателя r , что позволит провести сравнение реальных болометрических структур.

2. Анализ коэффициентов поглощения в болометрических приемниках традиционного и инвертированного типа, проведенный в рамках матричного метода расчета

Будем использовать известный матричный метод, развитый для расчета многослойных структур [11], детали которого применительно к болометрическим структурам, состоящим из произвольного количества слоев, включающих тонкий металлический поглотитель и отражатель, изложены в работе [8]. Под многослойной структурой, расположенной между двумя полупространствами с диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_v = \epsilon_s = 1$, будем понимать весь приемник, включая окно и подложку, выполненные из оптического кремния толщиной

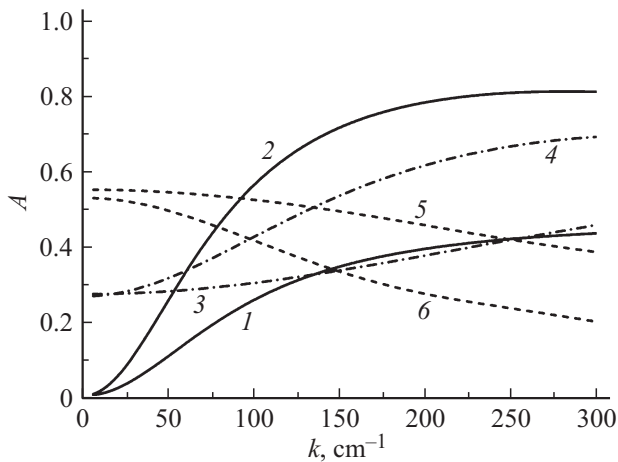


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента поглощения в болометрах традиционного (1–4) и инвертированного (5, 6) типа при разных значениях h и R_a соответственно: 1 — 2.0 и 57, 2 — 5.7 и 149, 3 — 2.0 и 128, 4 — 5.7 и 160, 5 — 2.0 и 83, 6 — 5.7 μm и 119 Ω/\square . При наличии отражателя (1, 2) и без него (3–6).

700 μm . Рассчитанные коэффициенты поглощения усредним по полосе частот порядка 5 cm^{-1} , чтобы устранить осцилляции коэффициентов поглощения, обусловленные интерференцией на окне и подложке, показатели преломления которых, так же как и высокоомного термочувствительного слоя, выполненного, например, из аморфного кремния толщиной $d_d = 0.3 \mu\text{m}$, приняты равными 3.4. Будем считать, что поглощение излучения происходит только в металлическом поглотителе a и отражателе r . При этом нас будет интересовать только коэффициент поглощения A в подвешенном над подложкой болометре, поскольку поглощение излучения именно в нем приводит к нагреву термочувствительного слоя и появлению сигнала болометра. Расчет проведен для случая падения излучения под прямым углом к поверхности болометра и применим к болометрам с латеральными размерами больше или порядка длины волны, так как не учитывались краевые эффекты. Удельная проводимость металлического поглотителя σ_a , ориентируясь на нихром, принималась равной $1 \cdot 10^6 \text{ S/m}$. Слоеое сопротивление отражателя R_r (при его наличии) выбиралось равным $0.4 \Omega/\square$, а его удельная проводимость σ_r , ориентируясь на золото и алюминий и учитывая ее понижение при малых толщинах слоев [12], принималась равной $2.5 \cdot 10^7 \text{ S/m}$. Величину времени релаксации электронов в металлических слоях считали пренебрежимо малой по сравнению с периодом излучения в интересующем нас диапазоне частот.

Вначале рассмотрим упрощенный случай, когда имеется только непросветленная пластина кремния, на которой изготовлен болометр, а окно отсутствует, либо хорошо просветлено, так что его влиянием можно пренебречь. Приведенные на рис. 2 зависимости коэффициента поглощения A от волнового числа $k = 1/\lambda$

рассчитаны при слоевых сопротивлениях поглотителя R_a , соответствующих максимальному поглощению на длине волны $\lambda = 100 \mu\text{m}$ для данной высоты подвески болометра h . В традиционной конфигурации (рис. 1, a), независимо от наличия или отсутствия отражателя, коэффициент поглощения в рассматриваемом диапазоне длин волн, в соответствии с [7], возрастает с ростом высоты подвески, а в инвертированной — понижается. Это дает преимущество для инвертированной конфигурации, так как увеличение высоты подвески связано с дополнительными технологическими трудностями. Отметим, что во всех рассмотренных на рис. 2 случаях для достижения максимального поглощения большая высота подвески болометра требует и большего сопротивления поглотителя, которое, однако, остается значительно меньше $377 \Omega/\square$, необходимых для достижения практически полного поглощения при наличии отражателя и при высоте подвески, равной четверти длины волны излучения. Из рис. 2 видно, что в соответствии с результатами проведенного предварительного анализа на низких частотах максимальное поглощение реализуется в случае инвертированной конфигурации болометра (рис. 1, b) и оно слабо зависит от частоты. В традиционной конфигурации при наличии отражателя коэффициент поглощения по мере понижения волнового числа k квадратичным образом стремится к нулю. Это обусловлено тем, что на отражателе образуется узел электромагнитной волны и, следовательно, электрическое поле в области поглотителя, расположенного на малом (по сравнению с λ) расстоянии h от отражателя, оказывается пропорциональным kh , что приводит к частотной зависимости коэффициента поглощения, пропорциональной k^2 .

Известно, что в рамках традиционной конфигурации болометра коэффициент поглощения на заданной длине

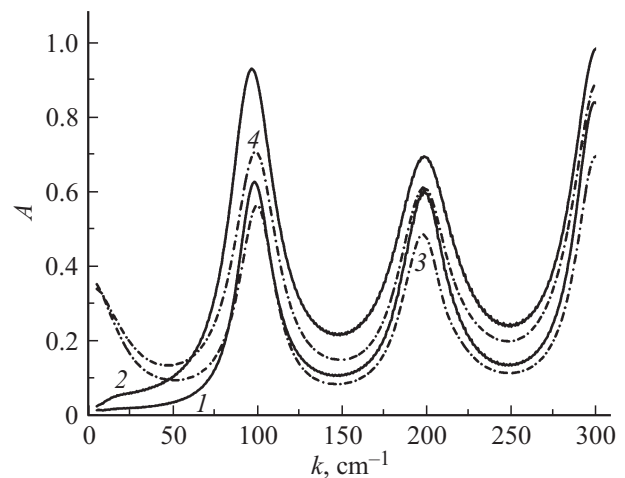


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента поглощения в болометре традиционного типа с входным окном, расположенным на расстоянии $50 \mu\text{m}$ от болометра при двух значениях h и R_a соответственно: 2.0 и 52 (1, 3), 5.7 μm и 93 Ω/\square (2, 4). При наличии отражателя (1, 2) и без него (3, 4).

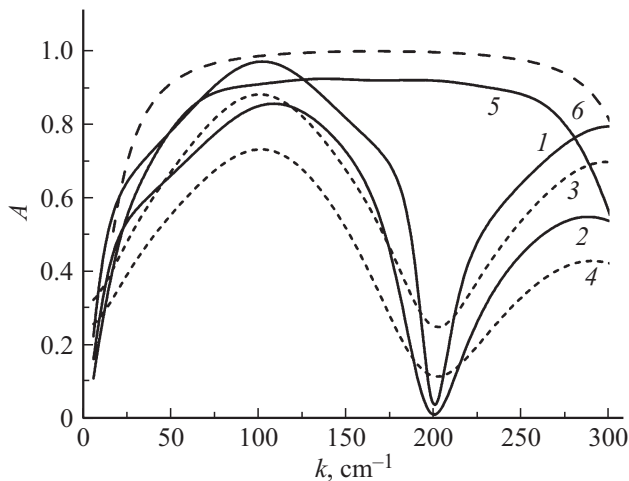


Рис. 4. Спектральные зависимости коэффициента поглощения в болометре инвертированного типа с выходным окном, расположенным на расстоянии 25 (1–4) и 15 мкм (5, 6) от болометра при двух значениях h и R_a соответственно: 2.0 и 126 (1, 3, 5, 6), 5.7 мкм и 198 Ω/\square (2, 4). При наличии отражателя (1, 2, 5, 6) и без него (3, 4).

волны можно повысить, установив просветленное с внешней стороны входное окно, так чтобы зазор g_2 между болометром и окном (рис. 1, а) был кратен половине данной длины волны [7]. На рис. 3 приведены спектральные зависимости коэффициента поглощения, рассчитанные при величине зазора, равном 50 мкм. Здесь и на рис. 4 значения слоевых сопротивлений поглотителя R_a выбирались по зависимостям 1 и 2, соответствующим наличию отражателя, так чтобы коэффициент поглощения на длине волны $\lambda = 100 \mu\text{m}$ был максимален для данной высоты подвески болометра h . Просветляющее покрытие моделировалось одним слоем с показателем преломления $n = (3.4)^{1/2}$ и толщиной $d = 25/n \mu\text{m}$. Видно, что наличие дополнительного резонатора между болометром и окном приводит к повышению коэффициента поглощения вблизи $k \approx 100 \text{cm}^{-1}$ почти до единицы, но при этом поглощение становится сильно селективным, что не всегда желательно, например, при необходимости детектирования широкополосного излучения.

Применение дополнительного резонатора между подложкой и выходным окном приводит к повышению коэффициента поглощения и в случае инвертированной конфигурации болометра (рис. 4). В отличие от традиционной конфигурации здесь оптимальным для получения максимального поглощения на длине волны 100 мкм является зазор g_1 , равный 25 мкм. При наличии отражателя на выходном окне и однослойного просветляющего покрытия, аналогичного используемому выше, здесь также удастся получить коэффициенты поглощения близкие к единице. Кроме того, поглощение является более широкополосным, чем в болометрическом приемнике традиционного типа, а отсутствие отражателя меньше

понижает поглощение. Уменьшение величины зазора g_1 до 15 мкм и применение четырехслойного просветляющего покрытия на внешней стороне подложки w_2 позволяет получить эффективное поглощение ($A > 0.8$) в широкой полосе 50–270 cm^{-1} (кривая 5 на рис. 4). Диэлектрические проницаемости ϵ_n просветляющих слоев были равны $\epsilon_n = 7.4; 3.5; 1.8$ и 1.3, уменьшаясь с удалением от подложки w_2 , а их толщины были заданы соотношением $15/(\epsilon_n)^{1/2} \mu\text{m}$. Кривая 6 на рис. 4, рассчитанная по соотношению (2) при тех же параметрах, что и кривая 5, показывает удовлетворительную применимость данного соотношения. Пониженные величины поглощения на кривой 5 в основном обусловлены учетом конечного значения h и ухудшением качества просветляющего покрытия на краях полосы просветления.

3. Возможность использования болометров инвертированного типа с целью создания широкополосных матричных приемников терагерцового диапазона

Матричные микроболометрические приемники (ММБП) традиционной конфигурации изготавливаются на кремниевых подложках, в которых предварительно выполнены схемы считывания сигналов (мультиплексоры). Такие подложки обычно легированы и не прозрачны в терагерцовом диапазоне. Кроме того, под болометрами располагаются элементы схемы считывания, такие как транзисторные ключи и шины, что также не позволяет выполнять засветку болометра со стороны подложки. Практическая реализация широкополосных ММБП инвертированного типа для терагерцового диапазона длин волн может быть выполнена при использовании нелегированного, оптического кремния в качестве подложки, тыльная сторона которой после изготовления мультиплексора должна быть отполирована. Элементы мультиплексора, в том числе и локальные области легирования, должны быть вынесены из-под микроболометров в межпиксельные зазоры, которые в случае изготовления болометров с латеральными размерами $\sim 100 \mu\text{m}$ (сравнимыми с длиной волны излучения) могут быть достаточно широкими. С учетом возможности засветки микроболометров со стороны подложки кремниевый кристалл с ММБП плотно, например с помощью тонкого прозрачного в терагерцовом диапазоне клея, устанавливается на входное кремниевое окно вакуумного корпуса, просветленное снаружи в требуемом диапазоне длин волн. После чего на необходимом от ММБП расстоянии устанавливается выходное окно, в общем случае с металлическим отражателем, нанесенным на его внутреннюю сторону. Отметим, что использование болометрических приемников инвертированного типа затрудняет применение термоэлектрических охладителей для стабилизации температуры ММБП, что не является существенным препятствием в силу тенденции все

более широкого применения ТЕС-less технологии [13], обеспечивающей работу ММБП без стабилизации его температуры.

Заключение

В настоящей работе предложен инвертированный тип конструкции болометрического приемника для терагерцового спектрального диапазона, в котором в отличие от традиционного типа излучение падает не со стороны прилегающего к болометру вакуума, а со стороны подложки, на которой он изготовлен. На основе проведенного расчета коэффициентов поглощения терагерцового излучения в болометрических структурах с тонким металлическим поглотителем показано, что в области низких частот инвертированный тип обеспечивает большее поглощение, чем традиционный. Применение дополнительного резонатора в виде зазора между болометром и входным или выходным окном позволяет получать коэффициенты поглощения близкие к единице, при этом болометры с традиционной конфигурацией становятся узкополосными, а с инвертированной — остаются широкополосными. В частности, инвертированный тип болометра может обеспечить высокоэффективное поглощение излучения в диапазоне от 50 до 270 см^{-1} . На основе болометров инвертированного типа предложен вариант конструкции высокоэффективного широкополосного матричного микроболометрического приемника терагерцового диапазона.

Список литературы

- [1] Terahertz Spectroscopy: Principles and applications / Ed. S.L. Dexheimer. Publisher: CRC Press, 2008. 331 p.
- [2] Chan W.L., Deibel J., Mittleman D.M. // Rep. Prog. Phys. 2007. Vol. 70. N 8. P. 1325–1379.
- [3] Lee A.W.M., Hu Q. // Opt. Lett. 2005. Vol. 30. N 19. P. 2563–2565.
- [4] Lee A.W.M., Williams B.S., Kumar S., Hu Q., Reno J.L. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2006. Vol. 18. N 13. P. 1415–1417.
- [5] Dem'yanenko M.A., Esaev D.G., Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. P. 131116.
- [6] Oda N., Yoneyama H., Sasaki T., Sano M., Kurashina S., Hosako I., Sekine N., Sudoh T., Irie T. // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6940. P. 69402Y.
- [7] Oda N., Sano M., Sonoda K., Yoneyama H., Kurashina S., Miyoshi M., Sasaki T., Hosako I., Sekine N., Sudou T., Ohkubo S. // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8012. P. 80121B.
- [8] Демьяненко М.А. // Оптический журн. 2017. Т. 84. Вып. 1. С. 48–57.
- [9] Hadley L.N., Dennison D.M. // J. Opt. Soc. Am. 1947. Vol. 37. N 6. P. 451–465.
- [10] Nemoto N., Kanda N., Imai R., Konishi K., Miyoshi M., Kurashina S., Sasaki T., Oda N., Kuwata-Gonokami M. // IEEE Trans. on Terahertz Sci. Technol. 2016. Vol. 6. N 2. P. 175–182.
- [11] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
- [12] Camacho M., Oliva A.I. // Microelectronics J. 2005. Vol. 36. N 3–6. P. 555–558.
- [13] Howard P.E., Clarke J.E., Li C., Yang J.W., Wong W.Y., Bogosyan A. // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5074. P. 527–536.