

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОДНОГО МИКРОРЕЗОНАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИК ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2009 г. В. А. Пилипович, доктор физ.-мат. наук; А. К. Есман, доктор физ.-мат. наук;
В. К. Кулешов, канд. техн. наук; Г. Л. Зыков, канд. физ.-мат. наук

Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Белоруссия

E-mail: lomoi@inel.bas-net.by

Показано, что использование нового метода преобразования изображений инфракрасного (ИК) диапазона в видимое изображение на основе волноводного кремниевого микрорезонатора при построении матричных ИК преобразователей тепловизионной техники, воспринимающих контраст температур порядка 10^{-3} К, позволяет получить пространственное разрешение 25 мкм при радиусе замкнутого оптического кремниевого волновода 10 мкм и энергии падающего на него ИК излучения $5,6 \times 10^{-10}$ Дж с частотой полнокадрового режима 50 Гц.

Ключевые слова: замкнутый волноводный микрорезонаторный преобразователь, инфракрасный диапазон, температурное поле, температурный контраст.

Коды OCIS: 110.0110, 110.3080, 3000.33080

Поступила в редакцию 13.10.2008

В работе [1] рассмотрены структурная схема и принцип работы матричного преобразователя изображений инфракрасного диапазона в видимый или ближний ИК диапазоны спектра электромагнитных волн с использованием в качестве чувствительного элемента микрорезонатора в виде замкнутого оптического волновода на диэлектрической подложке. Зависимость резонансной длины волны микрорезонатора от его температуры положена в основу работы преобразователя.

Данная работа посвящена оценке основных параметров микрорезонатора преобразователя инфракрасного электромагнитного излучения, физической основой работы которого являются не фотонные эффекты, а интегральные изменения оптических свойств материала чувствительного элемента, происходящие в результате изменений его температуры под действием падающего излучения.

Анализ работы волноводного микрорезонаторного преобразователя ИК изображений может быть выполнен на основе его структурной схемы, приведенной на рис. 1. Замкнутый оптический волновод 3 расположен на кольцевом выступе 5 диэлектрической подложки 6 и выполнен из кремния. Для получения условий полного внутреннего отражения сверху и снизу волновода 3 расположены буферные слои 2 и 4 из материала

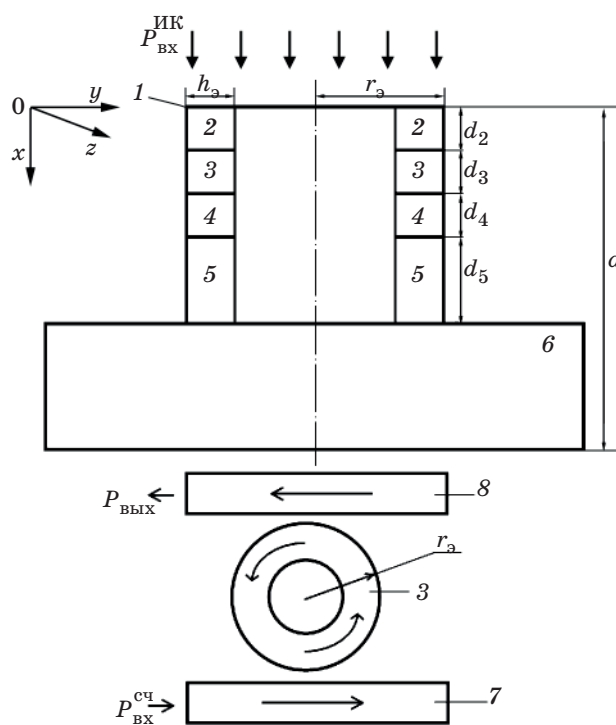


Рис. 1. Структурная схема волноводного микрорезонаторного преобразователя ИК изображений. 1 – поглощающая пленка, 2 и 4 – буферные слои, 3 – замкнутый оптический волновод, 5 – кольцевой выступ подложки, 6 – подложка.

с меньшим показателем преломления – окиси кремния. На верхнем буферном слое 2 нанесена пленка 1 из материала, эффективно поглощающего тепловое излучение, например, платиновая или золотая чернь, обычно используемые в болометрах [2]. Для считывания информации на входной волновод 7 подается излучение с мощностью $P_{\text{вх}}^{\text{ИК}}$ видимого или ближнего ИК диапазонов. В рассматриваемом случае – это излучение на длине волны 1,5 мкм, которое через спадающие поля поступает через замкнутый оптический волновод 3 в выходной волновод 8.

Количество энергии электромагнитного излучения, поглощенной чувствительным элементом для изменения его температуры, зависит от следующих основных параметров:

плотности потока мощности ИК излучения $P_{\text{вх}}^{\text{ИК}}$, падающего на поглощающую пленку 1, параметров поглощающей пленки 1, эффективности теплоотдачи от поглощающей пленки 1 к замкнутому оптическому волноводу 3, теплофизических параметров материала замкнутого оптического волновода 3.

Эффективность преобразования падающего ИК излучения $P_{\text{вх}}^{\text{ИК}}$ и другие параметры преобразователя получены численным моделированием рассматриваемой структуры чувствительного элемента с учетом ее геометрических размеров и всех вышеуказанных факторов.

В общем виде температурное поле в многослойной тепловоспринимающей структуре определяется из нестационарного уравнения теплопроводности [3]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t), \quad (1)$$

где ρ – плотность материала, c – его теплоемкость, T – температура, t – время, k – теплопроводность, x, y и z – пространственные переменные, $Q(x, y, z, t)$ – функция теплового источника.

В данном случае инфракрасное излучение направлено по нормали к поверхности поглощающей пленки 1, выполненной в виде диска с радиусом r_3 , равным радиусам элементов 2–5 (рис. 1). Температура нижней поверхности подложки 6 принималась постоянной и равной начальной температуре T_0 .

Анализ характеристик отдельного элемента матричного преобразователя ИК изображения проводился методом численного моделирования на основе одномерного уравнения теплопроводности

$$\rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q(x, t), \quad i = 1, 2 \dots N \quad (2)$$

при граничных и начальных условиях

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad T(x=d, t) = T_0, \quad T(x, t=0) = T_0, \quad (3)$$

где i – номер текущего слоя чувствительного элемента матричного преобразователя изображений, d – толщина рассматриваемого чувствительного элемента, T_0 – начальная температура.

Так как температура в плоскости yoz (рис. 1) предполагалась одинаковой, то при моделировании температурных полей рассматривался одномерный случай (2). Кроме этого, температурное поле в преобразователе ИК изображений удовлетворяет условиям сопряжения на границах раздела ξ его элементов j , выполненных из различных материалов

$$T_{(j)} = T_{(j+1)} \text{ при } x = \xi, \quad j = 1, 2 \dots 5, \quad (4)$$

$$k_{(j)} \left. \frac{\partial T_{(j)}}{\partial x} \right|_{x=\xi} - k_{(j+1)} \left. \frac{\partial T_{(j+1)}}{\partial x} \right|_{x=\xi} = 0, \quad (5)$$

где $j = 1$ – поглощающая пленка, $j = 2$ – верхний буферный слой, $j = 3$ – замкнутый оптический волновод, $j = 4$ – нижний буферный слой, $j = 5$ – кольцевой выступ подложки, $j = 6$ – подложка, $T_{(j)}$ и $T_{(j+1)}$ – температуры контактирующих поверхностей j -го и $j + 1$ -го элементов, выполненных из различных материалов, $k_{(j)}$ и $k_{(j+1)}$ – теплопроводности рассматриваемых элементов.

Количество тепла $Q(x, t)$, выделяемое в i -ом слое j -го элемента при поглощении ИК излучения, задавалось выражением

$$Q(x, t) = (1 - R) \frac{P_{\text{вх}}^{\text{ИК}}}{S_i} \alpha_i(x) \exp \left[- \int_0^x \alpha_i(x') dx' \right], \quad (6)$$

где R – коэффициент оптического отражения поглощающей пленки, $\alpha_i(x)$ – коэффициент поглощения i -го слоя j -го элемента, $P_{\text{вх}}^{\text{ИК}}$ – мощность падающего ИК излучения, S_i – площадь i -го слоя рассматриваемого элемента.

Уравнение (2) решалось методом конечных разностей. Суть метода заключается в покрытии расчетной области (x, t) сеткой из $N \times M$ точек. Тем самым определяются узлы, в которых будет осуществляться поиск решения. Шаги по времени и координате выбирались из требования получения точности счета, равной 1,5%.

Численное моделирование проводилось при следующих параметрах элементов j : толщина поглощающей пленки 1 равна одному шагу по координате x , а теплоемкость единицы ее площади –

$8,368 \times 10^{-3}$ Дж см $^{-2}$ К $^{-1}$ [2], ширина верхнего 2 и нижнего 4 буферных слоев из SiO $_2$ и замкнутого оптического волновода 3 из Si одинаковы и равны $h_3 = 0,5$ мкм, а их толщина составляет $d_2 = d_3 = d_4 = 0,3$ мкм. Толщина кольцевого выступа подложки 5, выполненного из кремния, составляет $d_5 = 20$ мкм. Теплофизические и оптические параметры материалов чувствительного элемента, использованные при расчетах, представлены в таблице.

При расчетах выбирались размеры чувствительного элемента $10 \div 40$ мкм ($r_3 = 5 \div 20$ мкм) с учетом теоретических пределов дифракционного рассеяния для дальнего ИК диапазона [4].

Считывание информации с чувствительного элемента осуществляется при достижении максимальных изменений температуры в замкнутом оптическом волноводе 3. Зависимости значений этих изменений температуры замкнутого оптического волновода 3 от входной мощности $P_{\text{вх}}^{\text{ИК}}$ для различных длительностей воздействия ИК излучения приведены на рис. 2. Из характеристик, полученных для радиуса замкнутого оптического волновода 3 $r_3 = 10$ мкм, следует, что при значении его температурного контраста порядка 5×10^{-4} К энергия на один чувствительный элемент составляет $3,1 \times 10^{-11}$, $1,6 \times 10^{-10}$ и $1,5 \times 10^{-11}$ Дж при временах воздействия ИК излучения соответственно 1, 20 и 30 мс или при входных мощностях $3,1 \times 10^{-8}$, 8×10^{-9} и 5×10^{-10} Вт/элемент. В разрабатываемых современных преобразователях ИК изображений в видимое изображение значение температурного контраста составляет порядка 10^{-3} К [5]. Таким образом, для достижения указанного значения необходимо на вход рассматриваемого преобразователя подать мощности порядка $8,4 \times 10^{-8}$, $2,8 \times 10^{-8}$ и $1,8 \times 10^{-8}$ Вт/элемент при длительностях воздействия соответственно 1, 20 и 30 мс.

Время реагирования чувствительного элемента на изменение ИК сигнала, т.е. временные зависимости изменения температуры замкнутого оптического волновода 3 с различными радиусами r_3 при минимальном времени воздействия – 1 мс и плотности входной мощности ИК излучения $\sim 3,2 \times 10^{-2}$ Вт/см 2 , падающей на него, при-

ведены на рис. 3. Указанная плотность мощности соответствует уровню теплового воздействия 10^{-7} Вт/элемент при $r_3 = 10$ мкм. Как видно из этих зависимостей, сумма времен срабатывания и восстановления после снятия теплового воздействия для радиусов замкнутого оптического волновода 3, равных 5, 10 и 20 мкм, соответственно составляют примерно 14, 20 и 35 мс.

Таким образом, при радиусе замкнутого оптического волновода 3 $r_3 = 10$ мкм возможно построение рассматриваемого матричного ИК

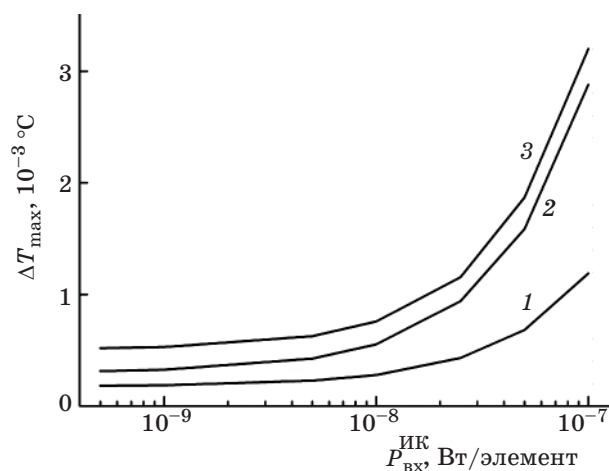


Рис. 2. Зависимости максимальных изменений температуры замкнутого оптического волновода от мощности $P_{\text{вх}}^{\text{ИК}}$ для разных длительностей воздействия. 1 – 1 мс, 2 – 20 мс, 3 – 30 мс.

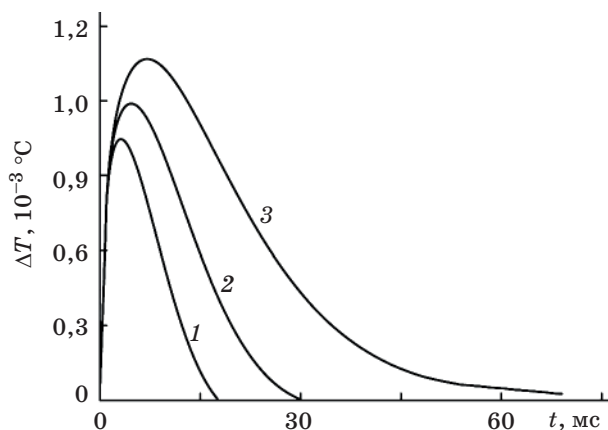


Рис. 3. Зависимости изменения температуры замкнутого оптического волновода ΔT от времени t . 1 – $r_3 = 5$ мкм, 2 – $r_3 = 10$ мкм, 3 – $r_3 = 20$ мкм.

Параметры	Si	SiO $_2$
ρ , г/см 3	2,33	2,65
c , Дж/(г К)	1,648	0,89
k , Вт/(см К)	0,4	0,0155
α , см $^{-1}$	418,9	0,16755

преобразователя с частотой полнокадровой развертки 50 Гц.

Эффективность преобразования падающего ИК излучения $P_{\text{вх}}^{\text{ИК}}$ с учетом того, что золотая чернь во всем диапазоне длин волн поглощает 90% энергии [2], оценивалась по отношению максимальных температур замкнутого оптического волновода 3 и поглощающей пленки 1. Для кривых 1–3, приведенных на рис. 3, такая эффективность преобразования соответственно составила 0,32; 0,35; 0,404, т. е. с увеличением радиуса эффективность преобразования увеличивается.

Зависимость максимального изменения температуры ΔT замкнутого оптического волновода 3 от радиуса r_3 при плотности мощности входного ИК излучения порядка $3,2 \times 10^{-2}$ Вт/см² приведена на рис. 4. С увеличением времени теплового воздействия и радиуса замкнутого оптического волновода изменение температуры ΔT возрастает.

На рис. 5 представлены распределения температурных изменений в слоях элементов $j = 2, 3, 4, 5$ преобразователя в различные моменты времени, из которых следует, что на стадии нагревания замкнутого оптического волновода 3, имеющего радиус 10 мкм, градиент температуры по его глубине незначителен, и, следовательно, влиянием пьезоэффекта на оптические свойства чувствительного элемента можно пренебречь.

Для получения номинального значения оптического сигнала на выходе чувствительного элемента на основе кремния с радиусом замкнутого оптического волновода 10 мкм необходимо время 100 пс [6]. Поэтому при времени считывания информации порядка 200 пс и мощности входного считывающего сигнала $P_{\text{вх}}^{\text{сч}} = 1$ мВт в замкнутом оптическом волноводе 3 выделится примерно 10^{-13} Дж тепловой энергии. Это значение получено с учетом того, что экспериментально измеренное затухание оптического сигнала в кремниевых резонансных волноводных структурах составляет от 2,5 до 5,5 дБ [7]. При использовании мощности считывания $P_{\text{вх}}^{\text{сч}} = 10^{-7}$ Вт, что вполне реально для современных фотоприемников, тепловыделение в замкнутом оптическом волноводе снижается на 4 порядка. Следовательно, тепловыделением при считывании можно пренебречь.

Математическое моделирование основных параметров чувствительного элемента преобразователя ИК изображений на основе замкнутых волноводных кремниевых микрорезонаторов показывает, что использование нового метода

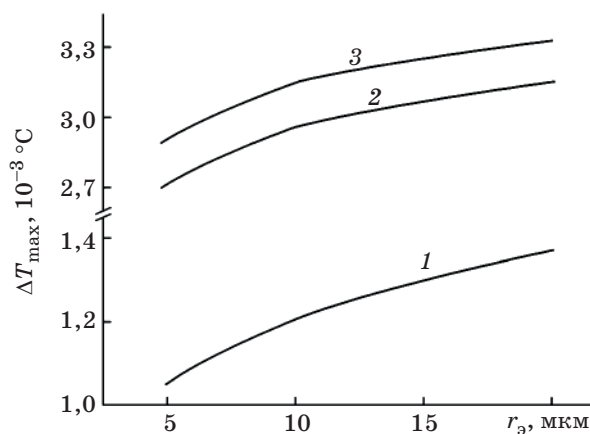


Рис. 4. Зависимости максимального изменения температуры замкнутого оптического волновода от его радиуса для разных длительностей воздействия ИК излучения. 1 – 1 мс, 2 – 20 мс, 3 – 30 мс.

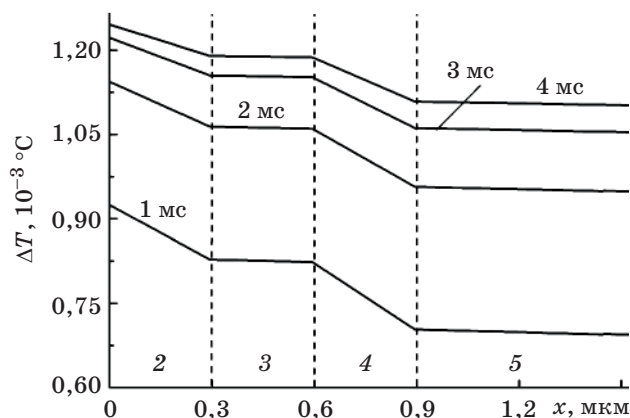


Рис. 5. Профиль изменения температуры в отдельном чувствительном элементе преобразователя ИК изображения на глубине до 1,5 мкм с радиусом чувствительного элемента $r_3 = 10$ мкм в различные моменты времени на стадии нагревания. Области 2 – верхний буферный слой, 3 – замкнутый оптический волновод, 4 – нижний буферный слой, 5 – кольцевой выступ подложки.

преобразования изображений инфракрасного диапазона в видимое изображение в современных тепловизионных приборах, воспринимающих контраст температур порядка 10^{-3} К, позволяет достичь следующих основных параметров: пространственное разрешение – 25 мкм, частота полнокадрового режима – 50 Гц, время считывания одной строки – 0,2 нс, энергия ИК излучения, падающего на один элемент – $5,6 \times 10^{-10}$ Дж,

радиус замкнутого оптического волновода – 10 мкм.

Таким образом, на основе предложенного чувствительного элемента возможно построение нового типа матричного преобразователя ИК изображений, удовлетворяющего современным требованиям тепловизионной техники и неподверженного электромагнитным наводкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пилипович В.А., Есман А.К., Гончаренко И.А., Кулешов В.К. Матричный преобразователь инфракрасных изображений в видимые на основе волноводных микрорезонаторов // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 5. С. 59–64.
2. Синцов В.Н. Исследование свойств золотой черни // ЖПС. 1966. Т. 4, вып. 6. С. 503–508.
3. Мельников А.А. Расчет температурных полей в многослойных фотоприемных структурах // Нано- и микросистемная техника. 2000. № 2. С. 21–26.
4. Певцов Е., Чернокожин В. Матричные ИК приемники для малогабаритных тепловизионных камер // Электронные компоненты. 2001. № 3. С. 12–20.
5. Таубкин И.И., Тришенков М.А. Предельные значения чувствительности тепловизоров и информативности систем технического зрения // Прикладная физика. 2001. № 6. С. 48–60.
6. Пилипович В.А., Есман А.К., Гончаренко И.А., Кулешов В.К., Зыков Г.Л. Управляемый интегрально-оптический фильтр высокого разрешения на волноводных микрорезонаторах // Доклады НАН Беларуси. 2008. Т. 52. № 3. С. 48–51.
7. Barwicz T., Popovic M.A., Watts M.R., Rakich P.T., Ippen E.P., Smith H.J. Fabrication of add-drop filters based on frequency-matched microring resonators // Journal of Lightwave Technology. 2006. V. 24. № 5. P. 2207–2218.