

Матричное микрорезонаторное ИК фотоприемное устройство

А.К.Есман, В.К.Кулешов, Г.Л.Зыков

Предложено оригинальное матричное микрорезонаторное ИК фотоприемное устройство и рассчитаны его ожидаемые параметры: чувствительность единичного чувствительного элемента и быстродействие. Чувствительный элемент представляет собой кремниевый составной микрорезонатор, выполненный в виде двух оптически связанных замкнутых кольцевых волноводов на диэлектрической подложке, резонансная длина волны которого зависит от его температуры. Эта зависимость используется для регистрации ИК излучения, которое нагревает поглощающий элемент и термически связанный с ним составной микрорезонатор. Показано, что при пространственном разрешении 45 мкм быстродействие составляет 30 мс, а чувствительность равна 10^{-3} К при мощности ИК излучения $\sim 4.7 \times 10^{-8}$ Вт/элемент.

Ключевые слова: матричный преобразователь ИК изображения, составной микрорезонатор, лазер, фотоприемник.

1. Введение

Возрастающий интерес к использованию тепловизионной техники для решения широкого класса научных и прикладных задач стимулирует поиск новых методов преобразования изображений из ИК диапазона в видимый, а также исследование матричных ИК фотоприемных устройств (ФПУ), отличающихся лучшими эксплуатационными характеристиками при меньшей стоимости [1, 2].

В настоящее время научно-исследовательские работы в области ИК техники и научно-технические разработки преобразователей излучения ИК диапазона для различных применений ведутся весьма интенсивно. В первую очередь это обусловлено тем, что область практического использования тепловизионных приборов и систем неуклонно расширяется, в основном за счёт применения новых и совершенствования известных матричных ИК преобразователей изображений.

Практически важными характеристиками матричных ИК приборов являются, главным образом, чувствительность элемента матричного преобразователя, задающая минимальный перепад температуры, который может быть обнаружен, и постоянная времени, определяющая время реагирования приемника на изменение ИК сигнала.

В настоящей работе рассматривается оригинальное матричное микрорезонаторное ИК ФПУ, которое может послужить основой для разработки ИК преобразователей нового типа [3]. В качестве чувствительного элемента предложено использовать составной микрорезонатор, представляющий собой два оптически связанных замкнутых волновода на диэлектрической подложке, резо-

нансная длина волны которого зависит от его температуры. Эта зависимость, как будет показано ниже, используется для регистрации потока ИК излучения, который нагревает поглощающий элемент и термически связанный с ним составной микрорезонатор.

2. Принцип работы матричного микрорезонаторного ИК ФПУ

Работу устройства рассмотрим на примере функционирования одного его пикселя (рис.1). В исходном состоянии, когда ИК излучение на ФПУ не падает, подложка 1 и все элементы, расположенные на ней, имеют температуру окружающей среды T_0 . Частота излучения перестраиваемого волноводного лазера 7 выбирается равной собственной резонансной частоте составного микрорезонатора 14, выполненного из оптически связанных замкнутых волноводов 9 и 10 [4]. Для этого, кроме тока инжекции, протекающего через активную среду 3 лазера 7, на его выходной брэгговский отражатель 4 через электроды 6 подается электрическое напряжение смещения, при котором излучение этого лазера из входного волновода 8, в соответствии с коэффициентами оптической связи, поступает последовательно в замкнутые волноводы 9 и 10. Коэффициент оптической связи k_1 волноводов 8 и 9 задается величиной зазора между ними и длиной области взаимодействия этих элементов и может быть выбран существенно меньшим единицы. Поэтому для работы рассматриваемого пикселя матрицы ИК ФПУ используется лишь незначительная часть выходной оптической мощности лазера 7, а оставшаяся часть может быть направлена на входы остальных пикселей. В выходном волноводе 12 возникает оптический сигнал на частоте излучения лазера 7 с амплитудой, определяемой значением резонансной характеристики составного микрорезонатора 14 на этой частоте. ИК излучение мощностью P поступает через оптическую систему 15 на поглощающий элемент 11. В результате температура и линейные размеры поглощающего элемента 11 и обоих зам-

А.К.Есман, В.К.Кулешов, Г.Л.Зыков. Институт физики им. Б.И.Степанова НАНБ, Белоруссия, 220072 Минск, просп. Независимости, 68; e-mail: lomoi@inel.bas-net.by

Поступила в редакцию 5 мая 2009 г., после доработки – 3 августа 2009 г.

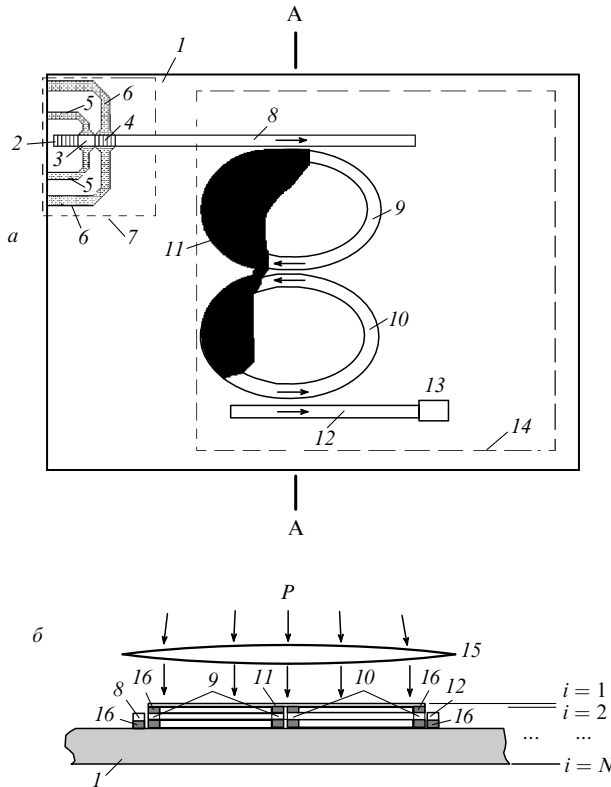


Рис.1. Схематическое изображение элементов пикселя (а) и разрез составного микрорезонатора 14 вдоль линии AA на рис.1,а (б): 1 – подложка; 2 и 4 – брэгговские отражатели; 3 – активная среда лазера; 5 и 6 – электроды для подачи тока инжекции и напряжения смещения; 7 – волноводный лазер; 8 и 12 – входной и выходной волноводы; 9 и 10 – замкнутые волноводы; 11 – поглощающий элемент; 13 – фотоприемник; 14 – составной микрорезонатор; 15 – оптическая система (например, объектив); 16 – буферные слои; i – номер слоя.

кнутых волноводов 9, 10 составного микрорезонатора 14 начинают изменяться, т. к. все эти элементы находятся в тепловом контакте. В связи с этим собственная резонансная полоса пропускания микрорезонатора 14 смещается по отношению к исходной. В зависимости от величины этого смещения изменяется доля мощности излучения лазера 7, поступающего в выходной волновод 12 из замкнутого волновода 10. Следовательно, амплитуды оптического сигнала в волноводе 12 и соответствующего ему электрического сигнала на выходе фотоприемника 13 изменятся.

Зависимость изменения доли мощности излучения лазера 7, поступающего в микрорезонатор 14 от входного волновода 8 и передаваемого далее в выходной волновод 12, от величины смещения резонансной длины волны микрорезонатора и оптических коэффициентов связи определялась математическим моделированием.

3. Анализ основных параметров чувствительного элемента

Для оценки основных параметров одного пикселя ИК ФПУ, образованного оптически последовательно связанными линейными (8, 12) и замкнутыми (9, 10) волноводами, ограничимся рассмотрением только одной компоненты ТМ волны E_z , для которой справедливо уравнение Даламбера [5]. Численное моделирование переходных характеристик рассматриваемого чувствительного элемента проводилось на основе двумерных урав-

нений Даламбера в декартовых координатах x, y для прямых волноводов 8, 12 и в цилиндрических координатах ρ, φ для замкнутых волноводов 9, 10:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} - \frac{n_w^2}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} - \frac{n_r^2}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где n_w и n_r – эффективные коэффициенты преломления материалов входного (8) и выходного (12) волноводов и замкнутых волноводов 9, 10 соответственно; c – скорость света в вакууме; t – время.

Уравнения (1), (2) были дополнены начальными и граничными условиями. Для расчетов в соответствии с этими уравнениями использовалась явная численная схема типа «крест» [6]. Пространственные и временные производные в волновых уравнениях (1), (2) выражались следующим образом:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} \approx \frac{E_z(x_{l+1}, y_m, t_n) - 2E_z(x_l, y_m, t_n) + E_z(x_{l-1}, y_m, t_n)}{(\Delta x)^2},$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} \approx \frac{E_z(x_l, y_{m+1}, t_n) - 2E_z(x_l, y_m, t_n) + E_z(x_l, y_{m-1}, t_n)}{(\Delta y)^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} \approx \frac{E_z(x_l, y_m, t_{n+1}) - 2E_z(x_l, y_m, t_n) + E_z(x_l, y_m, t_{n-1})}{(\Delta t)^2},$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial \rho} \approx \frac{E_z(\rho_{l+1}, \varphi_m, t_n) - E_z(\rho_l, \varphi_m, t_n)}{\Delta \rho},$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \rho^2} \approx \frac{E_z(\rho_{l+1}, \varphi_m, t_n) - 2E_z(\rho_l, \varphi_m, t_n) + E_z(\rho_{l-1}, \varphi_m, t_n)}{(\Delta \rho)^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} \approx \frac{E_z(\rho_l, \varphi_{m+1}, t_n) - 2E_z(\rho_l, \varphi_m, t_n) + E_z(\rho_l, \varphi_{m-1}, t_n)}{(\Delta \varphi)^2},$$

где l, m, n – целые числа.

Поскольку расчеты проводились для определенной конечной области, то на ее границах волновая функция приравнивалась нулю, а сигнал на входе волновода 8 задавался в виде

$$E_z(x_0 = 0, y, t) = E_0 \exp \left[-\frac{(y - y_0)^2}{a^2} \right] \sin(2\pi f t), \quad (5)$$

при этом распределение компоненты электромагнитного поля E_z в области взаимодействия входного волновода 8 и замкнутого волновода 9 вычислялось по формуле

$$E_z(\rho, \varphi, t) = E_1 \exp \left\{ -\frac{[(\rho - \rho_0) \cos \varphi]^2}{a^2} \right\} \sin(2\pi f t), \quad (6)$$

где E_0 – амплитуда сигнала на входе волновода 8; E_1 – амплитуда сигнала, поступившего в замкнутый волновод 9; f – несущая частота; значения x_0, y_0, ρ_0 ($\varphi_0 = 0$) и постоянная a задают форму и пространственное распределение входного сигнала.

При решении волнового уравнения (1) интервалы Δx и Δy задавались меньшими длинами волны входного из-

лучения, а при выборе временного шага дискретизации учитывалось обобщенное условие устойчивости Куранта [6]:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c[(1/\Delta x)^2 + (1/\Delta y)^2]^{1/2}} \quad (7)$$

Аналогичным образом задавалось соотношение переменных при решении волнового уравнения (2) в цилиндрических координатах. Сравнение полученных расчетных резонансных характеристик с экспериментально измеренными проводилось для кольцевого микрорезонатора радиусом 5 мкм, изготовленного из кремния [7]. При этом точность совпадения расчетной ширины полосы пропускания чувствительного элемента по уровню 0.5 с полученной экспериментально была не хуже 2%.

При моделировании составного микрорезонатора (см. рис.1) коэффициенты k_1 и k_3 оптической связи входного (8) и выходного (12) волноводов с соответствующими замкнутыми волноводами 9 и 10 задавались равными 0.224, а коэффициент оптической связи между замкнутыми волноводами k_2 выбирался из интервала 0.002 – 0.02.

Численное моделирование проводилось для волноводов, изготовленных из кремния с коэффициентом температурного расширения $2.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [8] и имеющих толщину и ширину 0.5 мкм. Длины прямых волноводов 8 и 12 выбирались равными 11 мкм, а радиусы замкнутых волноводов 9 и 10 составляли 10 мкм. Мощность излучения лазера 7 во входном волноводе 8 во всех расчетах была постоянна и равна 1 мВт. Для оценки характеристик рассматриваемого пикселя были рассчитаны его резонансные полосы пропускания (зависимости сигналов (E_{out}^2) на выходе волновода 12 от длины волны) (рис.2) и зависимости максимальных значений выходного оптического сигнала и ширин резонансной полосы пропускания по уровню 0.5 от коэффициента связи k_2 между замкнутыми волноводами 9 и 10 (рис.3). Кривые, приведенные на рис.3, демонстрируют существенную зависимость амплитуды выходного сигнала от коэффициента связи k_2 , которую можно использовать для обеспечения равенства выходной оптической мощности для всех чувствительных элементов, расположенных вдоль входного волновода 8. Для этого необходимо, чтобы коэффициенты

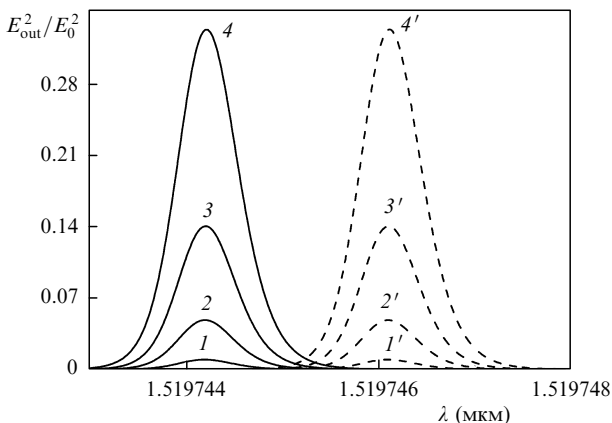


Рис.2. Резонансные полосы пропускания чувствительного элемента ИК ФПУ, изготовленного из кремния, для коэффициентов связи $k_2 = 0.002$ (1, 1'), 0.005 (2, 2'), 0.01 (3, 3') и 0.02 (4, 4'). Сплошные кривые – полосы пропускания при исходной температуре замкнутых волноводов 9 и 10, а штриховые – при изменении их температуры на 0.5 К.

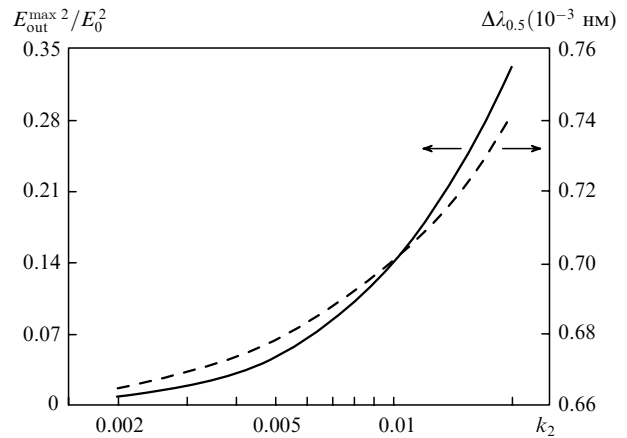


Рис.3. Зависимости максимальных значений выходного сигнала и ширины резонансной полосы пропускания по уровню 0.5 чувствительного элемента ИК ФПУ от коэффициента связи k_2 между замкнутыми волноводами 9 и 10.

связи k_2 линейно изменялись в пределах, например, от 0.002 до 0.02. Из рис.2 видно, что смещение резонансных переходных характеристик относительно их исходного положения происходит при изменении температуры на 0.5 К. При $k_2 = 0.02$ и выходной мощности волноводного лазера 1 мВт линейный участок резонансной переходной характеристики соответствует диапазону изменения мощности оптического сигнала 0.28 мВт. Для обеспечения отношения сигнал/шум не менее 16 на выходе используемых на практике фотоприемников на вход необходимо подавать оптическое излучение мощностью $\sim 1.85 \times 10^{-4}$ мВт [4, 9]. Отсюда следует, что минимальное изменение температуры, которое может быть зарегистрировано, равно 3.3×10^{-4} К, что в 1.8 раза больше предельной чувствительности тепловизионных приемников [10]. Время считывания информации с чувствительного элемента определяется временем установления амплитуды оптического сигнала в выходном волноводе 12, которое для составного микрорезонатора рассматриваемого размера составляет 27 пс [11], и быстродействием используемого фотоприемника.

Для оценки времени отклика пикселя на изменение ИК сигнала и его пороговых характеристик был выполнен анализ процесса передачи тепловой энергии из поглощающего элемента 11 в замкнутые волноводы 9 и 10 методом численного моделирования на основе одномерного уравнения теплопроводности [12]

$$\rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q(x, t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

при граничных и начальном условиях

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad T(x = d, t) = T_0, \quad T(x, t = 0) = T_0, \quad (9)$$

где i – номер слоя чувствительного элемента; ρ_i , c_i и k_i – его плотность, теплоемкость и теплопроводность соответственно; T – температура; $Q(x, t)$ – функция теплового источника; d – толщина рассматриваемого чувствительного элемента; T_0 – начальная температура.

Температурное поле в чувствительном элементе ИК ФПУ удовлетворяет условиям сопряжения на границах раздела $x = \xi$ его элементов, выполненных из различных материалов:

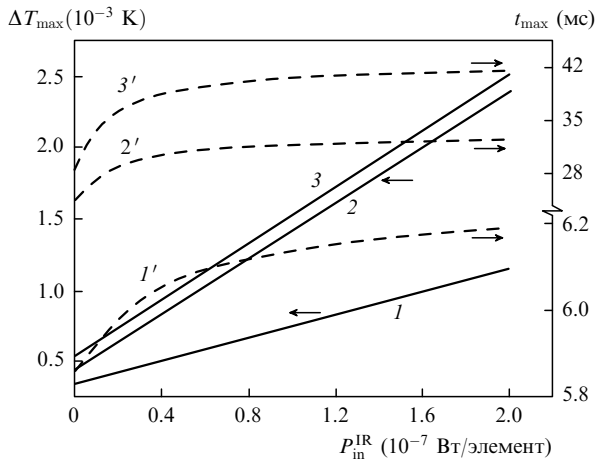


Рис.4. Зависимости максимальных изменений температуры замкнутых волноводов 9, 10 и времени отклика на изменение мощности ИК излучения от величины P_{in}^{IR} для длительностей воздействия 1 (1, 1'), 20 (2, 2') и 30 мс (3, 3').

$$T_j = T_{j+1} \text{ при } x = \xi, \quad j = 1, \dots, 4, \quad (10)$$

$$k_j \frac{\partial T_j}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - k_{j+1} \frac{\partial T_{j+1}}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = 0, \quad (11)$$

где индекс $j = 1$ соответствует поглощающему элементу 11, выполненному из золотой черни [13], $j = 2$ и 4 – верхнему и нижнему буферным слоям 16 из SiO_2 , $j = 3$ – замкнутым оптическим волноводам 9 и 10 из кремния, $j + 1 = 5$ – подложке 1 из кремния; T_j и T_{j+1} – температуры контактирующих поверхностей j -го и $j + 1$ -го элементов, изготовленных из различных материалов; k_j и k_{j+1} – теплопроводности соответствующих элементов.

Функция теплового источника $Q(x, t)$ в уравнении теплопроводности (8) описывает выделение тепла в i -м слое j -го элемента при теплопередаче:

$$Q(x, t) = \left\{ (1 - R) \frac{P}{S_i} \alpha_i(x) \exp \left[- \int_0^x \alpha_i(x') dx' \right] \right\}, \quad (12)$$

где R – коэффициент оптического отражения поглощающего элемента 11; $\alpha_i(x)$ – коэффициент поглощения i -го слоя j -го элемента; P – мощность падающего ИК излучения; S_i – площадь i -го слоя рассматриваемого чувствительного элемента.

Численное моделирование проводилось при толщине поглощающего элемента 2.5 мкм и теплоемкости единицы его площади $8.368 \times 10^{-3} \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ [13]; размеры верхнего и нижнего буферных слоев 16 и замкнутых оптических волноводов 9 и 10 одинаковы и указаны выше.

Зависимости максимальных изменений температуры составного микрорезонатора 14 и времени их установления от плотности входной мощности P_{in}^{IR} для различных длительностей воздействия ИК излучения приведены на рис.4. Зависимости изменения температуры чувствительного элемента при минимальном времени воздействия ИК излучения 1 мс и плотности его мощности $\sim 1.4 \times 10^{-2}$ и $\sim 2.8 \times 10^{-2} \text{ Вт/см}^2$ приведены на рис.5. При этом на каждый чувствительный элемент воздействовало излуче-

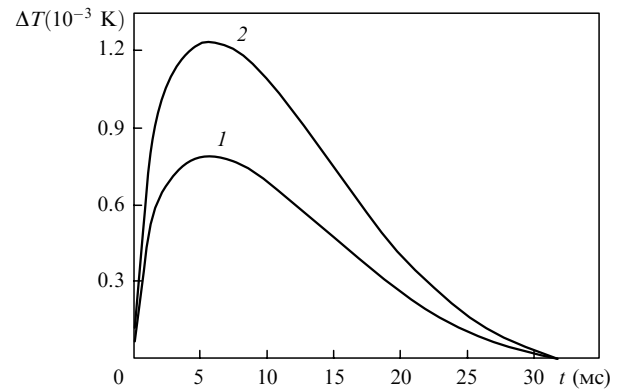


Рис.5. Зависимости изменения температуры ΔT замкнутых волноводов 9 и 10 от времени при длительности воздействия 1 мс и плотности мощности падающего ИК излучения $P_{in}^{IR} = 1 \times 10^{-7}$ (1) и $2 \times 10^{-7} \text{ Вт/элемент}$ (2).

ние мощностью 1×10^{-7} и $2 \times 10^{-7} \text{ Вт}$ соответственно. Как видно из этих зависимостей, время отклика чувствительного элемента при воздействии на него ИК излучения и время релаксации после прекращения этого воздействия при указанных выше плотностях мощности составляют соответственно 3 и 26.3 мс.

4. Заключение

Таким образом, ожидаемая постоянная времени, определяющая время отклика одного чувствительного элемента на изменение ИК сигнала с учетом быстродействия фотоприемника составляет 30 мс. Следовательно, возможно построение матричного микрорезонаторного ИК ФПУ с частотой полнокадровой развертки свыше 30 Гц.

Для достижения температурного контраста $\sim 10^{-3} \text{ К}$ необходимо, чтобы на вход рассматриваемого чувствительного элемента поступало ИК излучение с плотностью мощности $\sim 16.2 \times 10^{-8}$, $\sim 5.8 \times 10^{-8}$ и $\sim 4.7 \times 10^{-8} \text{ Вт/элемент}$ при длительностях воздействия соответственно 1, 20 и 30 мс.

1. *Опτικο-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений (сборник статей)*. Под ред. В.В.Тарасова, Ю.Г.Якушенкова (М.: Изд-во «Алтей», 2007, вып. 2).
2. Липатов Н.И., Бирюков А.С. *Квантовая электроника*, **36**, 389 (2006).
3. Есман А.К., Кулешов В.К., Зыков Г.Л. Патент РФ № 12232.
4. Schreiner R., Nagele P., Korbl M., et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **13**, 1277 (2001).
5. Логгинов А.С., Майоров А.Ш., Кряжимский С.А. *Радиотехника*, **1**, 24 (2005).
6. Калиткин Н.Н. *Численные методы* (М.: Наука, 1978).
7. Xu Q., Lipson M. *Opt. Express*, **15**, 924 (2007).
8. Okada Y., Tokumaru Y. *J. Appl. Phys.*, **56**, 314 (1984).
9. Филачев А.М., Пономаренко В.П., Таубкин И.И. и др. *Прикладная физика*, **6**, 52 (2002).
10. Таубкин И.И., Трищенко М.А. *Прикладная физика*, **6**, 48 (2001).
11. Пилипович В.А., Есман А.К., Гончаренко И.А. и др. *Докл. НАН Беларуси*, **52**, 48 (2008).
12. Мельников А.А. *Нано- и микросистемная техника*, **2**, 21 (2000).
13. Синцов В.Н. *ЖПТС*, **4**, 503 (1966).