

МАТРИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ВИДИМЫЕ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ

© 2008 г. **В. А. Пилипович**, доктор физ.-мат. наук; **А. К. Есман**, доктор физ.-мат. наук;
И. А. Гончаренко, доктор физ.-мат. наук; **В. К. Кулешов**, канд. техн. наук

ГНУ “Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси”,
г. Минск, Беларусь

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

В работе предложен новый метод преобразования изображений инфракрасного диапазона в видимый диапазон спектра электромагнитных волн с использованием в качестве чувствительного элемента волноводных резонаторных структур микронных размеров. Метод основан на явлении модуляции собственного эквидистантного спектра резонатора под действием внешнего воздействия электромагнитного излучения инфракрасного спектрального диапазона за счет изменения оптических свойств материала, из которого выполнен чувствительный элемент. Рассмотрены структура и принцип работы преобразователя инфракрасных изображений в видимые на базе матрицы волноводных кольцевых микрорезонаторов. Показано, что чувствительность такого преобразователя на изменение мощности инфракрасного излучения может достигать $2,6 \times 10^{-12}$ Вт.

Коды OCIS: 110.0110, 110.3080, 3000.33080.

Поступила в редакцию 16.10.2007.

Введение

Сдерживающими факторами широкого практического использования тепловизионной техники являются высокая стоимость, неудовлетворительные массогабаритные характеристики, а также недостаточная надежность входящих в их состав инфракрасных (ИК) датчиков, т. е. фотоприемных устройств. Сегодня промышленностью выпускаются два вида (охлаждаемые и неохлаждаемые) и пять типов фотоприемных устройств на основе:

композиций индий–сурьма InSb,
барьеров Шоттки,
материалов кадмий–ртуть–теллур,
микроболометров,
структур с квантовыми ямами.

В последние годы активно ведутся исследования по разработке матричных ИК приемников нового типа – неохлаждаемых болометрических, пироэлектрических и термоэлектрических [1, 2]. Неохлаждаемые приемники благодаря отсутствию систем охлаждения и оптико-механического сканирования наиболее предпочтительны с точки зрения массогабаритных характеристик и стоимости. В этом смысле неохлаждаемые болометрические матрицы являются перспективными. Однако ряд нерешенных к настоящему времени проблем, связанных с большими контактными шумами, низким температурным коэффициентом сопротивления и т. д., не позволяет достичь требуемой чувствительности ИК приборов и тем самым делает их пока не до-

ступными для решения широкого класса задач как гражданских, так и военных ведомств.

Наиболее доступной в настоящее время формой технологии тепловидения являются микроболометрические датчики [3]. Хотя цена микроболометров резко уменьшилась (по сравнению с прежними “охлаждаемыми” методами), камеры на основе микроболометров все еще имеют цены от 8000 до 20 000 долларов США в зависимости от разрешения. Кроме того, их производство, основанное на использовании большого числа масок, очень сложное и дорогостоящее. Микроболометры имеют ограничение по потребляемой мощности: они требуют примерно 2 Вт для нормальной работы и даже выше для матриц больших размеров. Кроме того, они не позволяют получать высокое качество изображения.

В последнее время интенсивно исследуются методы передачи информации, переносимой волной ИК диапазона, на волну видимого диапазона с ее последующим детектированием и обработкой обычными методами. Оптические методы считывания ИК излучения основаны на зависящих от температуры изменениях оптических свойств. Такие изменения считываются оптически с использованием стандартных цифровых камер. Подобное преобразование может быть получено с помощью пассивных оптических резонаторов Фабри–Перо [3] либо резонаторов полупроводниковых лазеров [4]. Однако из-за отсутствия направляющих свойств таких резонаторов распространяющееся по ним оптическое излучение может частично рассеиваться, что

приводит к дополнительным потерям. При использовании резонаторов полупроводниковых лазеров [4] для преобразования ИК изображения в видимое возможно ухудшение пороговых свойств, определяемое мощностью накачки лазеров и их шумовыми свойствами.

В данной работе мы предлагаем использовать для преобразования ИК изображения в видимое матрицу волноводных микрорезонаторов.

Принцип работы и оптимизация параметров матричного ИК преобразователя

Отдельный элемент матрицы представляет собой замкнутый оптический волновод с радиусом изгиба порядка десятка микрон (рис. 1). Волновод расположен на диэлектрической подложке. Для получения условий полного внутреннего отражения между волноводом и подложкой расположен буферный слой из материала с показателем преломления, меньшим показателя преломления волновода. На волноводе нанесена пленка из материала, хорошо поглощающего тепловое излучение. В качестве такого материала можно, например, использовать платиновую или золотую чернь или другие пленки, обычно используемые в болометрах [5]. Под буферным слоем может быть расположена отражающая пленка, обеспечивающая концентрацию ИК излучения в области волновода, а также предотвращающая нежелательное нагревание подложки. Ввод и вывод оптических сигналов в микрорезонатор осуществляется с помощью прямых оптических волноводов, которые связаны с кольцевым волноводом через спадающие поля и расположены на той же подложке. Микрорезонатор обладает набором резонансных длин волн, поэтому излучение, распро-

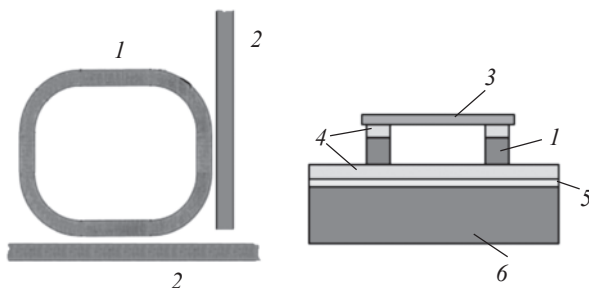


Рис. 1. Структурная схема отдельного элемента матрицы преобразователя ИК изображения в видимое. 1 – кольцевой волновод, 2 – подводящие волноводы, 3 – поглощающая пленка, 4 – буферный слой, 5 – отражающая пленка, 6 – подложка.

страняющееся по входному волноводу на длине волны, совпадающей с резонансной, переходит в кольцевой волновод. Излучение на других длинах волн распространяется дальше, практически не ответвляясь в микрорезонатор. Ответвленное в кольцевой волновод излучение переходит из него в выходной волновод. Любое изменение оптической длины резонатора Ln , где L – длина резонатора, n – показатель преломления материала волновода, приводит к смещению его резонансной длины волны. В результате интенсивность сигнала на несущей длине волны, совпадающей с резонансной длиной волны невозмущенного резонатора, на выходе резонатора меняется.

В волноводном кольцевом микрорезонаторе для измерения температуры необходимо использовать материал, с одной стороны, прозрачный для заданного спектрального диапазона излучения, а с другой – обладающий незначительной термоэмиссией. Увеличение концентрации свободных носителей заряда под воздействием температуры (термоэлектронная эмиссия) приводит к уменьшению коэффициента преломления материала [6]. Таким образом эффекты термоэлектронной эмиссии и температурного расширения оказывают противоположное влияние на оптическую длину резонатора, что снижает чувствительность ИК преобразования. Для длин волн ближнего ИК диапазона, чаще всего используемого в оптической связи и обработке информации, подходящим материалом является плавленый или кристаллический кварц. В этом случае кольцевой волновод микрорезонатора и входной и выходной волноводы могут быть получены по хорошо отработанной технологии диффузией легирующих примесей в кварцевую подложку.

В стационарном режиме интенсивность сигнала E_1^2 , проходящего через кольцевой резонатор на выходной волновод, определяется выражением [7, 8]

$$(E_1/E_0)^2 = k_1^2 k_2^2 / \left[1 - 2\sqrt{(1-k_1^2)(1-k_2^2)}(1-\alpha)\cos\phi + (1-k_1^2)(1-k_2^2)(1-\alpha)^2 \right], \quad (1)$$

где E_0^2 – интенсивность сигнала на длине волны λ , поступающего по входному волноводу; $k_{1,2}$ – коэффициенты связи между микрорезонатором и соответственно входным и выходным волноводами, α – коэффициент потерь оптической волны в резонаторе,

$$\phi = 2\pi Ln/\lambda \quad (2)$$

– набег фазы сигнала в резонаторе. Под воздействием температуры радиус резонатора R изменяется в результате температурного расширения как

$$dR = \alpha_T R dT, \quad (3)$$

где α_T – линейный коэффициент температурного расширения. В то же время, при повышении температуры изменяется показатель преломления материала волновода. Изменения показателя преломления происходят как из-за температурного расширения материала, так и за счет вариаций ширины полосы электронной области поглощения [9, 10]

$$2n(dn/dT) = K^2 \left[-3\alpha_T S - \left(2/E_g \right) \left(dE_g/dT \right) S^2 \right] = GS + HS^2, \quad (4)$$

где n – показатель преломления материала волновода при комнатной температуре, dn/dT – его вариации с температурой, $K^2 = n^2 - 1$, $S = \lambda^2/(\lambda^2 - \lambda_g^2)$ – нормализованная длина волны, E_g – энергия пика поглощения с центральной длиной волны λ_g . Коэффициенты G и H , связанные соответственно с коэффициентом термического расширения и температурным коэффициентом ширины зоны поглощения, определяются для различных стекол на основе экспериментальных измерений.

По входному оптическому волноводу подается излучение на длине волны, совпадающей с одной из резонансных длин волн резонатора. Это излучение ответвляется в микрорезонатор и проходит через него на выходной волновод. Следовательно, в отсутствие изменений температуры на выходном волноводе имеется оптический сигнал с максимальной интенсивностью излучения. Изменение температуры резонатора приводит к изменению его оптической длины, что влечет за собой смещение резонансных длин волн. Длина волны входного излучения уже не будет полностью соответствовать резонансной длине волны микрорезонатора, и величина выходного сигнала соответственно уменьшится.

Таким образом, излучение видимого диапазона модулируется ИК излучением, т. е. с помощью оптического резонатора информация, переносимая излучением ИК диапазона, передается волне видимого диапазона. С помощью набора (матрицы) таких резонаторов можно осуществлять преобразование ИК изображений в видимые изображения.

На рис. 2 представлены расчеты изменения интенсивности выходного сигнала на длине волны 1,563 216 мкм при изменении температуры для резонаторов с радиусами 64, 256 и 512 мкм (соответственно кривые, показанные сплошными, штриховыми и пунктирными линиями) и коэффициентами связи 0,5 (рис. 2а) и 0,75 (рис. 2б). Расчеты проводились для волноводов, изготовленных из кварца (SiO_2). Для кварцевых стекол коэффициенты G и H ,

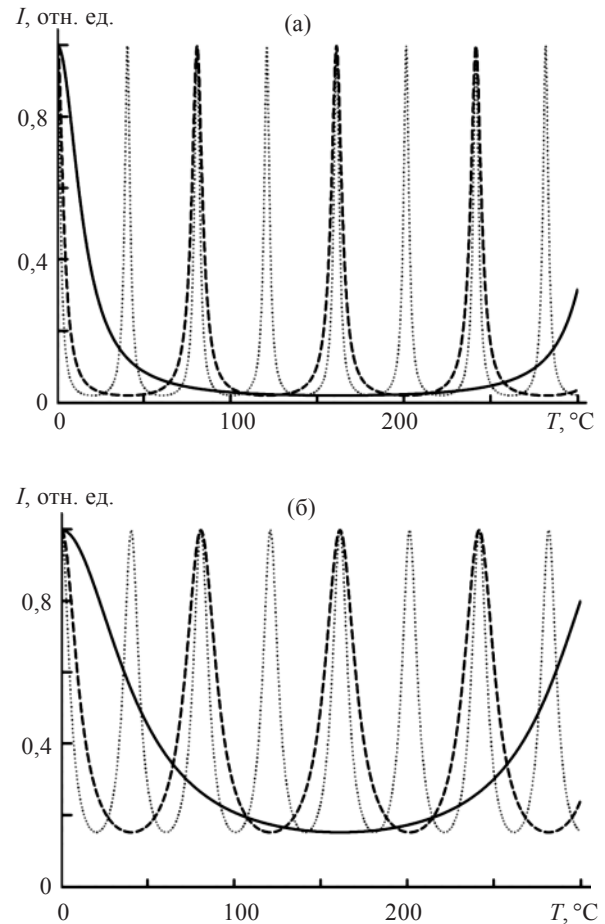


Рис. 2. Зависимости интенсивности выходного сигнала от изменения температуры для резонаторов с коэффициентами связи 0,5 (а) и 0,75 (б). Сплошными, штриховыми и пунктирными линиями показаны выходные сигналы резонаторов с радиусами 64, 256 и 512 мкм соответственно.

используемые в уравнении (4), равны $-1,6548$ и $31,7794$ соответственно [9]. Как видно из рисунка, интенсивность сигнала на выходе микрорезонаторов с малыми размерами и большими коэффициентами связи плавно изменяется с изменением температуры. Поэтому для фиксации незначительных изменений температур с большой точностью лучше использовать резонаторы большего радиуса и с малыми коэффициентами связи, поскольку интенсивность выходного сигнала таких микрорезонаторов, как показало моделирование, резко меняется при изменении температуры.

Следует отметить, что расчеты проводились для длины волны 1,563 216 мкм, которая относится не к видимому, а ближнему ИК диапазону. Это связано с тем, что для эффективного переключения волновод кольцевого микрорезонатора и подводящие волноводы должны функционировать в одномодовом режиме. Для получения условия одномодового

ности в видимом диапазоне размеры волноводов должны быть весьма малы, что неудобно с точки зрения технологии. Использование длины волны 1,563 216 мкм позволяет увеличить размеры волноводов. С другой стороны, фотоприемные устройства для этой длины волны достаточно хорошо разработаны. Таким образом, преобразование информации дальнего и среднего ИК диапазонов на эту длину волны вполне соответствует целям нашего исследования.

Для расширения шкалы диапазона измеряемых температур без потери точности можно использовать набор микрорезонаторов различных размеров. В этом случае микрорезонатор малого радиуса используется для отсчета десятков градусов (сплошная кривая на рис. 2), а резонаторы с большими радиусами – для отсчета изменения температуры на единицы и доли градусов (штриховая и пунктирные линии).

Расширение диапазона фиксирования изменения температур можно получить и на одном микрорезонаторе за счет использования входных оптических сигналов на нескольких длинах волн. Разность между длинами волн необходимо выбирать так, чтобы выходной сигнал на следующей длине волны достигал максимального своего значения в момент времени, когда уменьшение выходного сигнала на предыдущей длине волны соответствует заданному уровню. На практике, по аналогии с системами связи, можно использовать уровень, равный 10% от максимального значения. Рассчитанные зависимости интенсивности выходного оптического сигнала

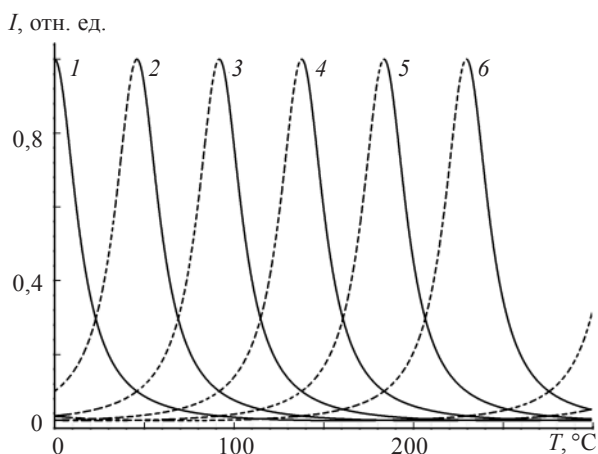


Рис. 3. Зависимости интенсивности выходных оптических сигналов на разных длинах волн от изменения температуры для резонатора с радиусом 64 мкм и коэффициентом связи 0,5. 1 – сигнал на длине волны 1,5632 мкм, 2–6 – сигналы на длинах волн, отличающихся друг от друга на 0,6 нм.

на разных длинах волн при изменении температуры для микрорезонатора с радиусом 64 мкм и коэффициентом связи 0,5 представлены на рис. 3. Разность между длинами волн составляет примерно 0,6 нм. Используемые для измерения температуры участки кривых на разных длинах волн показаны сплошными линиями. Как видно из рисунка, по изменению интенсивности сигнала на первой длине волны можно измерять вариации температуры примерно до 50°, изменение температуры на следующие 50° измеряется по интенсивности сигнала на второй длине волны и т. д. Измеряемый диапазон температур определяется количеством используемых длин волн и термостойкостью материала микрорезонатора. Пространственное разделение сигналов на разных длинах волн можно проводить с помощью оптических фильтров на таких же кольцевых резонаторах [11–13], где каждый из фильтров настраивается на определенную длину волны.

Динамический диапазон современных фотоприемников видимого излучения достигает 50 дБ без усилителя и 30–40 дБ с использованием усилителя. В реальных условиях ИК преобразователь должен работать при температурах от –40 °С до +40 °С, т. е. в диапазоне изменения температур порядка 80–100°. Такой диапазон температур позволяет измерять ИК преобразователь на основе кольцевого микрорезонатора с радиусом изгиба 64 мкм и коэффициентом связи 0,5 (рис. 2а). Таким образом, чувствительность такого ИК преобразователя с использованием фотоприемника с усилителем составляет порядка 0,01°. Диапазон измерения температур ИК преобразователем с микрорезонатором с радиусом изгиба 512 мкм равен примерно 10°. Поэтому его чувствительность может достигать 0,001°. Однако в таком преобразователе чувствительный элемент необходимо термостатировать.

Обнаружительную способность предлагаемого преобразователя можно оценить по предельной величине мощности ИК излучения, которая приведет к регистрируемому изменению температуры чувствительного элемента. Наличие объекта с температурой, превышающей фоновую на ΔT , обусловит увеличение мощности ИК излучения Φ , падающего на приемную площадку S отдельного элемента матричного преобразователя, на [4]

$$\Delta \Phi = (S/4)(d/f)^2(\Delta M/\Delta T)_\Phi \Delta T, \quad (5)$$

где $(\Delta M/\Delta T)_\Phi$ – температурный контраст, d/f – светосила входного объектива, определяемая как отношение диаметра входного зрачка d к фокусному расстоянию f . Поглощенная часть этой мощности приводит к нагреву чувствительного элемента (микрорезонатора) на

$$\Delta T_p = \varepsilon \Delta \Phi / G, \quad (6)$$

где $G = kS_p$ – теплопередача между резонатором и подложкой, k – коэффициент теплопередачи, S_p – площадь контакта резонатора с подложкой, ε – коэффициент поглощения ИК излучения. При использовании поглощающих пленок из золотой или платиновой черни коэффициент поглощения может достигать 90% [5]. При коэффициенте теплопередачи кварца $5,7 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ [15] для микрорезонатора радиусом 64 мкм и ширине волновода 1 мкм теплопередача контакта микрорезонатор/подложка равна $G \approx 2,3 \times 10^{-9} \text{ Вт К}^{-1}$. Таким образом, минимальная мощность ИК излучения, которая приводит к изменению температуры микрорезонатора ΔT_p на $0,01^\circ$, составляет $\Delta \Phi = 2,6 \times 10^{-11} \text{ Вт}$.

Для спектрального диапазона 8–12 мкм при температуре фона 300 К температурный контраст $(\Delta M / \Delta T)_\Phi$ составляет $2,0 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$. Тогда в соответствии с выражением (5) при светосиле оптической системы $d/f = 1$ минимальное изменение температуры излучающего тела, которое может зафиксировать чувствительный элемент, составляет $\Delta T = 0,004^\circ$. Такая малая величина фиксируемого оценочного изменения температуры объясняется тем, что ИК излучение принимается поглощающей пленкой, которая покрывает всю площадку, занимаемую резонатором, т. е. площадь принимающей площадки $S = \pi R^2$, где R – радиус резонатора. С учетом возможных потерь тепла при передаче от поглощающего покрытия к резонатору минимальное изменение температуры излучающего тела, фиксируемое чувствительным элементом, можно принять равным $\Delta T = 0,01^\circ$.

Быстродействие преобразователя определяется временем установления стационарного режима в микрорезонаторе, а также временем реагирования чувствительного элемента на изменение ИК сигнала. Как показали расчеты, время установления стационарного режима микрорезонаторов с радиусами 8–128 мкм составляет порядка десятков пикосекунд [14]. Постоянная времени чувствительного элемента преобразователя $\tau = C/G$, где C – теплоемкость микрорезонатора. Теплоемкость кварцевого микрорезонатора с радиусом изгиба 64 мкм, шириной и толщиной волновода 1 мкм и 0,5 мкм соответственно $C_p \approx 0,36 \times 10^{-9} \text{ Дж К}^{-1}$. Теплоемкость единицы площади поглощающего покрытия – золотой черни с коэффициентом поглощения 90% – равна $2 \times 10^{-6} \text{ кал см}^{-2} \text{ К}^{-1}$ [16]. Теплоемкость пленки площадью S равна $1,08 \times 10^{-9} \text{ Дж К}^{-1}$. Таким образом, суммарная теплоемкость составляет $1,44 \times 10^{-9} \text{ Дж К}^{-1}$, а постоянная времени, определяющая время реагирования приемника на изменение мощности ИК сигнала, $\tau = 0,626 \text{ с}$.

Заключение

Таким образом, показана возможность использования кольцевых волноводных микрорезонаторов для преобразования ИК изображений в изображения видимого диапазона. Такие преобразователи могут быть изготовлены по хорошо отработанной технологии в интегральном исполнении. Точность определения изменения температуры (чувствительности преобразователя) задается подбором оптической длины резонатора и коэффициента связи подводящих и кольцевого волноводов. Для фиксации малых перепадов температур необходимо использовать резонаторы с большими размерами и малыми коэффициентами связи, однако диапазон измерения температур при этом ограничивается десятками градусов. Для фиксации изменения температур в большем диапазоне необходимо применять микрорезонаторы меньшего радиуса и с большими коэффициентами связи. Однако при этом разрешение такого преобразователя уменьшается. Для фиксации изменения температуры в широком диапазоне с большим разрешением можно использовать несколько микрорезонаторов с разными радиусами или подавать оптические сигналы на нескольких длинах волн в один резонатор малых размеров. Кроме того, точность и диапазон измерения температур существенно зависят от используемого материала волноводного микрорезонатора.

Ожидаемые параметры предлагаемого ИК преобразователя:

диапазон измерения 100° ,
чувствительность по температуре $0,01^\circ$,
чувствительность по мощности $2,6 \times 10^{-11} \text{ Вт}$.
При использовании излучения на 6 длинах волн
диапазон измерения 60° (600°),
чувствительность по температуре $0,001^\circ$ ($0,01^\circ$),
чувствительность по мощности $2,6 \times 10^{-12}$ ($2,6 \times 10^{-11}$) Вт.

Время реагирования приемника на изменение мощности ИК сигнала 0,626 с. Время реагирования приемника можно уменьшить, увеличивая теплопередачу между резонатором и подложкой, например, за счет увеличения площади контакта. Однако это приведет к уменьшению чувствительности преобразователя.

Оценка предельной пороговой чувствительности преобразователя будет выполнена в отдельной работе после проведения анализа составляющих шума чувствительного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Малыров В.Г., Хребтов И.А., Куликов Ю.В. и др.* Сравнительные исследования болометрических свойств

- тонкопленочных структур на основе диоксида ванадия и аморфного гидрированного кремния // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 2–13.
2. Андрияшин С.Я., Кравченко Н.В., Кулыманов А.В. и др. Состояние разработок микроболометрических матриц в Государственном научном центре РФ НПО “Орион” // Прикладная физика. 2000. № 5. С. 5–17.
 3. Ostrower D. Novel technology could increase thermal imaging use // Photonics Spectra. 2006. № 10. P. 66–70.
 4. Лунатов Н.И., Бирюков А.С. Матричный лазерный преобразователь ИК изображения в видимое // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 4. С. 389–391.
 5. Синцов В.Н. Поглощающие покрытия для преобразователей теплового изображения // Труды I Всесоюз. симпозиума “Тепловые приемники излучения”. 21–25 октября 1966. Киев, 1967. С. 164–170.
 6. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1996. 546 с.
 7. Ibrahim T.A., Van V., Ho P.-T. All-optical time-division demultiplexing and spatial pulse routing with GaAs/AlGaAs microring resonator // Opt. Lett. 2002. V. 27. P. 803–805.
 8. Ibrahim T.A., Cao W., Kim Y. Lightwave switching in semiconductor microring devices by free carrier injection // J. Lightwave Technol. 2003. V. 21. P. 2997–3002.
 9. Hoffmann H.J., Jochs W.W., Westenberger G. Dispersion formula for the thermo-optic coefficient of optical glasses // Proc. SPIE. 1990. V. 1327. P. 219–228.
 10. Ghosh G. Temperature dispersion of refractive indexes in some silicate fiber glasses // IEEE Photon. Technol. Lett. 1994. V. 6. № 2. P. 431–433.
 11. Little B.E., Foresi J.S., Steinmeyer G. et al. Ultra-compact Si-SiO₂ microring resonator optical channel dropping filters // IEEE Photon. Technol. Lett. 1998. V. 10. P. 549–551.
 12. Melloni A. Synthesis of a parallel-coupled ring-resonator filter // Opt. Lett. 2001. V. 26. P. 917–919.
 13. Choi S.J., Djordjev K., Peng Z. et al. Microring resonators vertically coupled to buried heterostructure bus waveguide // IEEE Photon. Technol. Lett. 2004. V. 16. P. 2266–2268.
 14. Goncharenko I.A., Esman A.K., Kuleshov V.K., Pilipovich V.A. Optical broadband analog-digital conversion on the base of microring resonator // Opt. Commun. 2006. V. 257. № 1. P. 54–61.
 15. Лeko B.K., Мазурин O.B. Свойства кварцевого стекла. Л.: Наука, 1985. С. 165.
 16. Лысенко В.С., Мальнев А.Ф. Получение и свойства поглощающих покрытий // Труды I Всесоюз. симпозиума “Тепловые приемники излучения”. 21–25 октября 1966. Киев. 1967. С. 146–163.