

ДАТЧИК ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНОГО КОЛЬЦЕВОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА

Гончаренко И.А., д.ф.-м.н., ст.н.с., доцент
Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь
e-mail: igor02@tut.by

Показана возможность использования кольцевых волноводных микрорезонаторов для дистанционного измерения температуры или мощности ИК излучения. Чувствительность датчика по температуре может составлять 0,01°, а по мощности ИК излучения – $2,6 \times 10^{-11}$ Вт при диапазоне измерения температуры 100°. Используя излучение на 6 длинах волн, можно увеличить в 10 раз либо чувствительность датчика, либо его диапазон измерений. Время реагирования приемника на изменение мощности ИК сигнала (быстродействие датчика) – 0,626 с.

The possibility of applying the waveguide ring microresonators for remote sensing the temperature or power of IR radiation is shown. Sensitivity of the sensor on temperature can be as high as 0,01°, and on the power of IR radiation is $2,6 \times 10^{-11}$ W, at that the range of temperature measurement is 100°. By using the radiation on 6 wavelengths it is possible to increase the sensor sensitivity or its range of measurements in 10 times. The response time of the receiver on IR signal power change (sensor speed) is 0,626 s.

(Поступила в редакцию 23 июля 2009 г.)

Введение

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по применению в качестве чувствительных элементов датчиков оптических волноводов. Волноводные и волоконно-оптические датчики позволяют измерять многие физические параметры: давление, расстояние, положение в пространстве, температуру, скорость вращения, скорость линейного перемещения, ускорение, колебание, массу, уровень жидкости, деформацию, коэффициент преломления, концентрацию газа, дозу радиационного излучения, характеристики звуковых волн, электрического поля, электрического тока, магнитного поля и т.д. [1–3].

Преимуществами волоконно-оптических датчиков являются [2]:

- 1) отсутствие влияния на результат измерения электромагнитных полей;
- 2) отсутствие побочных электромагнитных излучений;
- 3) отсутствие перекрестных помех каналов;
- 4) отсутствие проблем, связанных с контурами заземления и с напряжениями смещения в местах соединения разнородных проводников;
- 5) существенно меньшая электрическая опасность и отсутствие проблемы дугообразования и искрения;
- 6) высокая стойкость к вредным воздействиям среды;
- 7) более тонкий, более легкий (в 2 раза) и более прочный, чем электрический, многожильный кабель;
- 8) простота мультиплексирования сигналов;
- 9) высокая скорость передачи данных.

Кроме того, они:

- 1) могут использоваться во взрывоопасной среде ввиду абсолютной взрывобезопасности;
- 2) имеют высокую механическую прочность, малые габариты, простую конструкцию и, соответственно, высокую надежность;
- 3) химически инертны;
- 4) изготавливаются из диэлектрических материалов, что обеспечивает отсутствие путей прохождения через них электрического тока;

5) имеют высокую стойкость к повышенным температурам, механическим ударам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды;

6) позволяют производить бесконтактные и дистанционные измерения.

Вследствие этого волноводные датчики для измерения температуры могут найти широкое применение в системах противопожарной сигнализации и аварийной защиты.

В данной работе рассматриваются методы построения и принцип работы оптического датчика для бесконтактного измерения температуры на базе волноводных кольцевых микрорезонаторов.

Схема и принцип работы датчика

Чувствительный элемент датчика представляет собой замкнутый оптический волновод с радиусом изгиба порядка десятка микрометров, расположенный на диэлектрической подложке (рис. 1). Сверху волновода нанесена пленка из материала, поглощающего тепловое излучение. Ввод и вывод оптических сигналов в микрорезонатор осуществляется с помощью прямых оптических волноводов, связанных с кольцевым волноводом и расположенных на той же подложке. Излучение, распространяющееся по входному волноводу на длине волны, совпадающей с резонансной длиной волны микрорезонатора, ответвляется в кольцевой волновод и далее переходит в выходной волновод. Изменение оптической длины резонатора приводит к смещению его резонансной длины волны. В результате интенсивность сигнала на выходе резонатора меняется. С выходного волновода чувствительного элемента оптический сигнал с соответствующей интенсивностью по оптическому волокну передается к устройству регистрации.

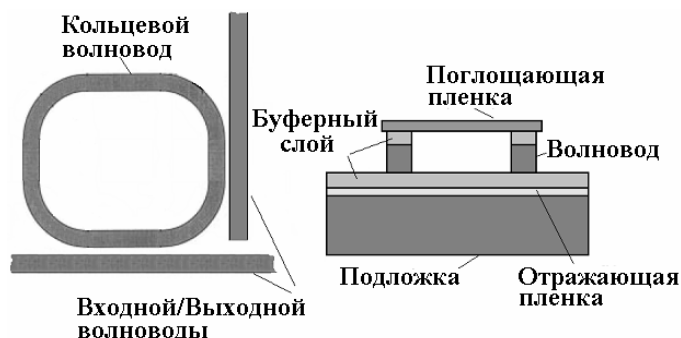


Рисунок 1 – Структурная схема чувствительного элемента датчика

Любые изменения оптической длины резонатора Ln (где L – геометрическая длина резонатора, n – эффективный показатель преломления волновода) приводят к изменению его резонансной длины волны. В результате интенсивность выходного сигнала на несущей длине волны, совпадающей с резонансной длиной волны невозмущенного резонатора, изменяется.

В стационарном режиме интенсивность сигнала E_1^2 , проходящего через кольцевой резонатор на выходной волновод, определяется выражением [4]

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

где E_0^2 – интенсивность сигнала, поступающего по входному волноводу, на длине волны λ ;

k_1, k_2 – коэффициенты связи между микрорезонатором и соответственно входным и выходным волноводами;

α – коэффициент потерь оптической волны в резонаторе;

φ – набег фазы сигнала в резонаторе,

$$\varphi = 2\pi Ln/\lambda.$$

Одним из факторов, приводящих к изменению оптической длины резонатора, является температура. Под воздействием температуры радиус резонатора R изменяется в результате температурного расширения как

$$dR = \alpha_T R dT, \quad (2)$$

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 [5]

$$2n(dn/dT) = K^2[-3\alpha_T S - (2/E_g)(dE_g/dT)S^2], \quad (3)$$

где n – показатель преломления материала волновода при комнатной температуре;

dn/dT – его вариации с температурой;

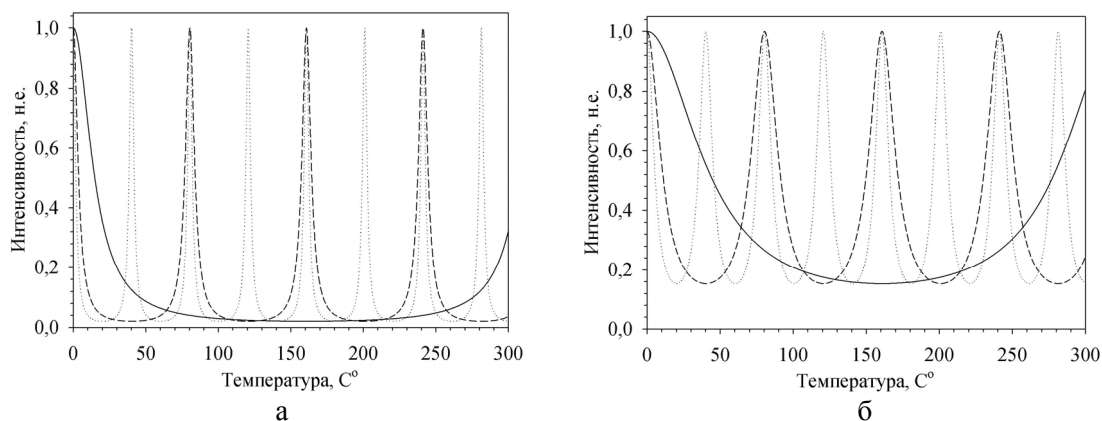
$K^2 = n^2 - 1$; $S = \lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_g^2)$ – нормализованная длина волны;

E_g – энергия пика поглощения с центральной длиной волны λ_g .

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.

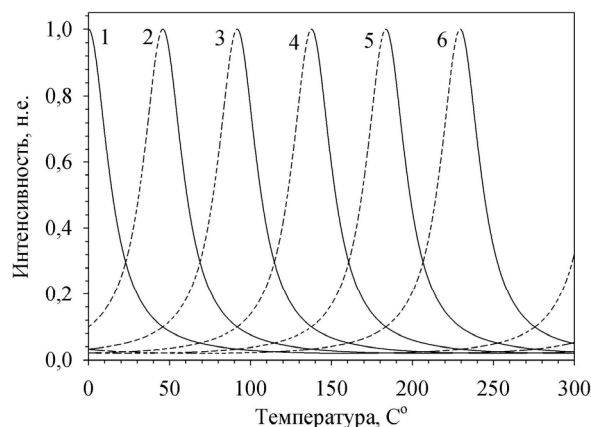
Таким образом, излучение видимого диапазона модулируется ИК излучением, т.е. с помощью оптического резонатора информация, переносимая излучением ИК диапазона, передается волне видимого диапазона.

На рис. 2 представлены расчеты изменения интенсивности выходного сигнала на длине волны 1,563216 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. 2, а) и 0,75 (рис. 2, б). Расчеты проводились для волноводов, изготовленных из кварца (SiO_2). 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 с малыми коэффициентами связи, поскольку интенсивность выходного сигнала таких микрорезонаторов, как показало моделирование, резко меняется при изменении температуры.



Зависимость интенсивности выходного сигнала от изменения температуры для резонаторов с радиусами 64 (сплошные линии), 256 (штриховые линии) и 512 мкм (пунктирные линии)

Рисунок 2 – Зависимость интенсивности выходного сигнала от изменения температуры для резонаторов с коэффициентами связи 0,5 (а) и 0,75 (б)



1 – сигнал на длине волны 1,5632 мкм; 2–6 – сигналы на длинах волн, отличающихся друг от друга на 0,6 нм

Рисунок 3 – Зависимость интенсивности выходных оптических сигналов на разных длинах волн от изменения температуры для резонатора с радиусом 64 мкм и коэффициентом связи 0,5

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 (сплошные кривые 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. Рассчитанная зависимость интенсивности выходного оптического сигнала на разных длинах волн при изменении температуры для микрорезонатора с радиусом 64 мкм и коэффициентом связи 0,5 представлена 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 градусов, изменение температуры на следующие 50 градусов измеряются 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 [6, 7], где каждый из фильтров настраивается на определенную длину волны.

Чувствительный элемент датчика представляет собой микрокольцевой волноводный резонатор, расположенный на диэлектрической подложке (см. рис. 1). Сверху волновода нанесена пленка из материала, поглощающего тепловое излучение. Это может быть, например, платиновая или золотая чернь, используемая обычно в болометрах [8, 9]. Под буферным слоем может быть расположена отражающая пленка для концентрации ИК излучения на волноводе и предотвращения нежелательного нагревания подложки.

Основными элементами волоконно-оптического датчика являются оптическое волокно, светоизлучающие (источник света) и светоприемные устройства, оптический чувствительный элемент (рис. 4). Кроме того, специальные линии необходимы для связи между этими элементами или для формирования измерительной системы с датчиком. Далее для практического внедрения волоконно-оптических датчиков необходимы элементы системной техники, которые в совокупности с вышеуказанными элементами и линией связи образуют измерительную систему.

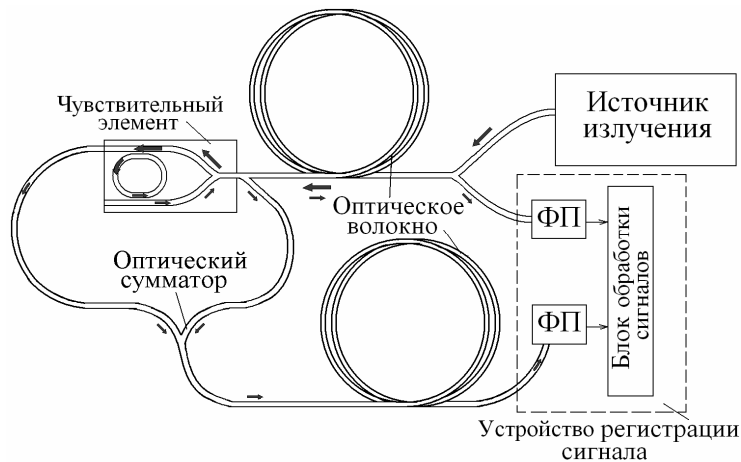


Рисунок 4 – Структурная схема датчика температуры

Для повышения достоверности измерений и компенсации временных флуктуаций интенсивности и частоты излучения источника используется опорный сигнал. В качестве опорного используется сигнал с выходного конца входного волновода микрорезонатора чувствительного элемента. Сигналы с выходов входного и выходного волноводов суммируются. Флуктуации интенсивности излучения источника приводят к изменению суммарного сигнала. Следовательно, пропорционально изменяется и сигнал, несущий информацию об измеряемой температуре. Это изменение необходимо учитывать при последующей обработке сигнала.

С помощью предлагаемого датчика можно измерять температуру без непосредственного контакта с объектом по величине его ИК излучения, а также температуру открытого пламени. Длинноволновое ИК излучение изменяет коэффициент пропускания резонатора в зависимости от температуры ИК излучения. Т.е. ИК излучение модулирует излучение видимого диапазона, распространяющееся в кольцевом волноводе.

Оценка обнаружительной способности датчика

Динамический диапазон современных фотоприемников видимого излучения достигает 50 дБ без усилителя и 30–40 дБ с использованием усилителя. В реальных условиях ИК датчик должен работать при температурах от -40° до $+40^{\circ}$, т.е. в диапазоне изменения температур порядка 80–100°. Такой диапазон температур позволяет измерять датчик на основе кольцевого микрорезонатора с радиусом изгиба 64 мкм и коэффициентом связи 0,5 (см. рис. 2, а). Следовательно, чувствительность такого датчика с использованием фотоприемника с усилителем составляет порядка $0,01^{\circ}$. Диапазон измерения температур ИК датчиком с микрорезонатором с радиусом изгиба 512 мкм равен примерно 10° . Поэтому чувствительность датчика может достигать $0,001^{\circ}$. Однако чувствительный элемент такого датчика необходимо термостатировать.

Обнаружительную способность предлагаемого датчика можно оценить по предельной величине мощности ИК излучения, которое 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 датчика, на величину [10]

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

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 величину

$$\Delta T_p = \varepsilon \Delta \Phi / G, \quad (5)$$

где ε – коэффициент поглощения ИК излучения;

G – теплопередача между резонатором и подложкой,

$$G = k S_p,$$

где k – коэффициент теплопередачи;

S_p – площадь контакта резонатора с подложкой.

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

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 датчика 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 десятки пикосекунд [12]. Постоянная времени чувствительного элемента датчика $\tau = C/G$, где C – теплоемкость микрорезонатора. Теплоемкость кварцевого микрорезонатора с радиусом изгиба 64 мкм, шириной и толщиной волновода соответственно 1 мкм и 0,5 мкм равна $C_p \approx 0,36 \times 10^{-9} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$. Теплоемкость единицы площади поглощающего покрытия – золотой черни с коэффициентом поглощения 90 % – равна $2 \cdot 10^{-6} \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ [8]. Теплоемкость пленки площадью S равна $C_n \approx 1,08 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$. Таким образом, суммарная теплоемкость составляет $C \approx 1,44 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$, постоянная времени, определяющая время реагирования приемника на изменение мощности ИК сигнала, равна $\tau = 0,626 \text{ с}$.

Заключение

Таким образом, показана возможность использования кольцевых волноводных микрорезонаторов для дистанционного измерения температуры. Точность определения изменения температуры (чувствительность датчика) задается подбором оптической длины резонатора и коэффициента связи подводных 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 датчика 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 датчика температуры:

- диапазон измерения 100° ;
- чувствительность по температуре $0,01^\circ$;
- чувствительность по мощности $2,6 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}$.

При использовании излучения на 6 длинах волн:

- диапазон измерения 60° (600°);
- чувствительность по температуре $0,001^\circ$ ($0,01^\circ$);
- чувствительность по мощности $2,6 \cdot 10^{-12}$ ($2,6 \cdot 10^{-11}$) 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 датчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Myatt, C.J. Wavelength monitoring of sensors: two approaches / C.J. Myatt // *Photonics*. – 2003. – Vol. 37, № 10. – P. 66–74.
2. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В.Б. Гармаш [и др.] // *Фотон-Экспресс – Наука*. – 2005. – № 6. – С. 128–140.
3. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы / Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, В.Т. Потапов, Ю.К. Чаморовский // *Радиотехника*. – 2005. – № 8. – С. 9–18.
4. Lightwave switching in semiconductor microring devices by free carrier injection / T.A. Ibrahim, W. Cao, Y. Kim // *J. Lightwave Technol.* – 2003. – Vol. 21. – P. 2997–3002.
5. Ghosh, G. Temperature dispersion of refractive indexes in some silicate fiber glasses / G. Ghosh // *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 1994. – Vol. 6, № 2. – P. 431–433.
6. Ultra-compact Si–SiO microring resonator optical channel dropping filters / B.E. Little, J.S. Foresi, G. Steinmeyer [et al.] // *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 1998. – Vol. 10. – P. 549–551.
7. Melloni, A. Synthesis of a parallel-coupled ring-resonator filter / A. Melloni // *Opt. Lett.* – 2001. – Vol. 26. – P. 917–919.
8. Получение и свойства поглощающих покрытий / В.С. Лысенко, А.Ф. Мальнев // *Труды I Всесоюз. симпозиума «Тепловые приемники излучения»*. 21–25 октября 1966 г. – Киев : Наукова думка, 1967. – С. 146–163.
9. Синцов, В.Н. Поглощающие покрытия для преобразователей теплового изображения / В.Н. Синцов // *Труды I Всесоюз. симпозиума «Тепловые приемники излучения»*. 21–25 октября 1966 г. – Киев : Наукова думка, 1967. – С. 164–170.
10. Матричный лазерный преобразователь ИК изображения в видимое / Н.И. Липатов, А.С. Бирюков // *Квантовая электроника*. – 2006. – Т. 36, № 4. – С. 389–391.
11. Свойства кварцевого стекла / В.К. Леко, О.В. Мазурин. – Л. : Наука, 1985. – С. 165.
12. Optical broadband analog-digital conversion on the base of microring resonator / I.A. Goncharenko, A.K. Esman, V.K. Kuleshov, V.A. Pilipovich // *Optics Communications*. – 2006. – Vol. 257, № 1. – P. 54–61.