

Датчик температуры на основе щелевого волновода с жидкокристаллическим заполнением

И. А. ГОНЧАРЕНКО*, В. П. КИРЕНКО**

* Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь,
e-mail: igor02@tut.by

** Белорусский Национальный технический университет, Минск, Беларусь

Рассмотрены методы построения и принципы функционирования быстродействующего оптического датчика для измерений небольших температурных вариаций с высокой точностью, основанного на кольцевых резонаторах микрометровых размеров, выполненных из волноводов с одной или несколькими щелями, заполненными жидким кристаллом.

Ключевые слова: кольцевой микрорезонатор, щелевой волновод, оптический датчик, жидкий кристалл, эффективный показатель преломления.

The design methods and operation principles of high speed optical sensor for precise measurement of small temperature variations based on micron size ring resonators made from waveguides with one or two slots filled by liquid crystal are considered.

Key words: ring microresonator, slot waveguide, optical sensor, liquid crystal, effective refraction index.

В настоящее время активно развиваются автоматизированные системы контроля и управления технологическими процессами и устройствами. Для таких систем необходимы быстродействующие первичные измерительные преобразователи, способные отслеживать в реальном времени и с большой точностью небольшие отклонения параметров процессов, в том числе и температурные изменения. Высокочувствительные быстродействующие датчики температуры также являются важными элементами систем противопожарной сигнализации и аварийной защиты. Кроме высоких метрологических характеристик, первичные измерительные преобразователи должны обладать высокой надежностью, долговечностью, стабильностью, малыми габаритными размерами, массой и энергопотреблением, совместимостью с микроэлектронными устройствами обработки информации. Этим требованиям в максимальной степени удовлетворяют волоконные и интегрально-оптические устройства [1]. В качестве сенсоров интегральные оптические устройства имеют большие преимущества, так как отличаются малыми размерами, высокими чувствительностью и степенью интеграции [2]. В частности, планарные волноводные устройства позволяют измерять небольшие изменения показателя преломления веществ.

В [3] предложен новый тип волноводных устройств — так называемый щелевой волновод (ЩВ). Он состоит из двух полосок материала с высоким показателем преломления, разделенных областью с низким показателем преломления (щелью), размеры которой меньше длины волны. Поскольку электрические поля неразрывны на границе раздела материалов с разными показателями преломления, в щелевой области можно достичь большой оптической интенсивности [4]. Это свойство делает ЩВ весьма перспективными для применения в качестве сенсоров [5, 6]. Щель в таком волноводе можно заполнить веществом, чувствительным к определенному параметру, и тем самым увеличить чувствительность датчика. На основе ЩВ разработаны и экспериментально исследованы химические и биохимические датчики [5, 7]. В [8] в качестве сенсоров предложено использовать волноводы с двойной щелью. Как оказалось, микрорезонаторы на основе таких волноводов более устойчивы к несовершенствам изготовления, чем волноводы с одной щелью.

Показатель преломления жидких кристаллов (ЖК) — весьма интересный и полезный с точки зрения практики параметр. В ряде оптических устройств (модуляторах света, дисплеях) показатель преломления ЖК изменяется наведенным электрическим полем, кроме того, на него влияют длина волны светового излучения и особенно температура [9, 10].

Структурная схема и принципы функционирования датчика. Волноводный кольцевой микрорезонатор представляет собой замкнутый оптический волновод с радиусом изгиба порядка десятка микрометров [11]. Волновод расположен на диэлектрической подложке. Чтобы обеспечить полное внутреннее отражение, между волноводом и подложкой расположен буферный слой с показателем преломления меньшим, чем у волновода. Ввод и вывод оптических сигналов в микрорезонатор осуществляются при помощи прямых оптических волноводов, которые связаны с кольцевым волноводом через спадающие поля и расположены на той же подложке. Поперечное сечение кольцевого микрорезонатора на ЩВ показано на рис. 1.

В качестве источника оптического излучения оптимально использовать полупроводниковый лазер, например

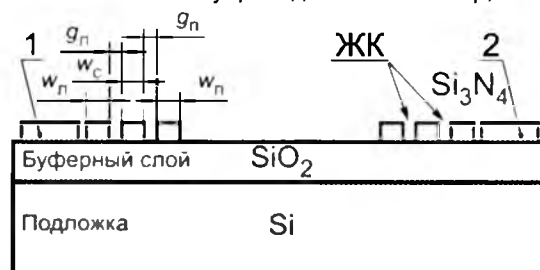


Рис. 1. Поперечное сечение кольцевого микрорезонатора на щелевых волноводах:

w_n , w_c , w_n — ширина левой, средней и правой кольцевых полосок; g_n , g_n — ширина левой и правой щелей; 1, 2 — параллельные полосы соответственно входного и выходного волноводов

FU-68PDF-V510M, с выходной оптической мощностью 15 мВт на длине волны 1,5 мкм. Оптическое излучение на выходе из кольцевого резонатора измеряется фотоприемником, например, *pin*-фотодиодом ФД161 на основе соединения InGaAs. Чувствительность по току такого фотодиода на рабочей длине волны 1,5 мкм не менее 0,8 А/Вт, темновой ток не более 20 нА [12]. Жидкий кристалл заполняет щель кольцевого волновода, а также может окружать его боковые поверхности.

Микрорезонатор имеет набор резонансных длин волн. Излучение, распространяющееся по входному волноводу на длинах волн, совпадающих с резонансными, поступает в кольцевой волновод. Оставшаяся часть излучения на других длинах волн распространяется дальше, практически не ответвляясь в микрорезонатор. Ответвленное в кольцевой волновод излучение переходит из него в выходной волновод. Таким образом, в выходной волновод поступает излучение узких спектральных диапазонов, центральные длины волн которых соответствуют резонансным длинам волн микрорезонатора. Ширина этих диапазонов задается коэффициентом связи кольцевого и прямых волноводов, а также параметрами самого микрорезонатора. Любые изменения оптической длины резонатора $L n_{эф}$, где L — геометрическая длина резонатора, $n_{эф}$ — 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.

Одним из основных факторов, приводящим к существенному изменению оптической длины резонатора, является температура. Ее изменение вызывает расширение материала, т. е. изменение длины резонатора

$$dR = \alpha_T R dT, \quad (1)$$

где R — радиус резонатора; α_T — температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала.

Одновременно с повышением температуры изменяется показатель преломления материала волновода, что связано как с ТКЛР материала, так и с вариациями ширины полосы электронной области поглощения [13, 14]:

$$2n \frac{dn}{dT} = (n-1)^2 \left[-3\alpha_T S - \frac{2}{E_n} \frac{dE_n}{dT} S^2 \right] = GS + HS^2, \quad (2)$$

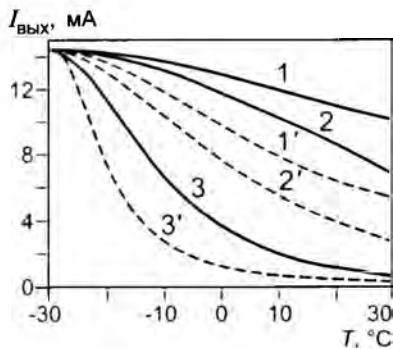


Рис. 2. Температурная чувствительность датчика на основе полоскового (кривые 1, 1'), щелевого (2, 2') и двойного щелевого (3, 3') волноводов с ЖК-заполнением при радиусах резонатора 16 и 32 мкм, соответственно сплошные и штриховые линии

где n — показатель преломления материала волновода при комнатной температуре, dn/dT — его вариации с температурой; λ_n — центральная длина волны, соответствующая энергии пика поглощения E_n ;

$S = \lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_n^2)$ — нормализованная длина волны; G, H — коэффициенты, связанные соответственно с ТКЛР и температурным коэффициентом ширины зоны поглощения,

которые определяются для различных стекол на основе экспериментальных измерений [15].

Принцип работы датчика основан на изменении волноводных свойств ЩВ и, как следствие, резонансных условий микрорезонатора в зависимости от показателя преломления ЖК, заполняющего щель. Поперечные размеры щели порядка 100—200 нм, поэтому молекулы ЖК располагаются таким образом, что его показатели преломления будут отличаться в поперечном n_o и продольном n_e направлениях (по длине волновода). Поскольку показатель преломления ЖК зависит от температуры, ее изменение приводит к вариациям эффективного показателя преломления ЩВ, причем в области щели его поле моды достаточно интенсивно [16]. Таким образом, изменение показателя преломления в области щели оказывает резкое влияние на свойства ЩВ. В этом проявляется его преимущество перед обычным плосковым волноводом.

Расчет поля мод и оптимизация конструкции датчика. Эффективный показатель преломления и распределение полей мод изогнутых щелевых волноводов с ЖК-заполнением рассчитывали по методу линий [17], модифицированному для исследуемой структуры. Изменение показателей преломления ЖК от температуры T определяли по формулам [8]:

$$n_e(T) \approx n_i + G_e (1 - T/T_c)^\beta; \quad n_o(T) \approx n_i - G_o (1 - T/T_c)^{\beta/2}, \quad (3)$$

где n_i — показатель преломления ЖК в изотропном состоянии; G_e, G_o — коэффициенты пропорциональности для соответствующих волн; T_c — температура просветления; β — параметр, зависящий от молекулярной структуры ЖК; для ЖК 5СВ эти параметры следующие: $n_i = 1,5865$; $T_c = 309,3$ К; $\beta = 0,1375$; $G_e = 0,1914$; $G_o = 0,1942$.

Чтобы сравнить чувствительности датчиков, построенных на волноводах различных типов, общие размеры диэлектрических составляющих волноводов и щелей с ЖК-заполнением при расчетах выбирали одинаковыми: ширина плоскового волновода составляла 1000 нм; ширина левой w_n и правой w_p полосок (см. рис. 1) 500 нм; ширина щели с ЖК-заполнением 100 и 200 нм; в волноводе с двумя щелями ширина левой g_n и правой g_p щелей 100 нм. Поскольку чувствительность датчиков на базе двухщелевого волновода зависит от соотношения размеров его частей [8], для сравнения был проведен расчет волновода с шириной левой w_n и правой w_p боковых полосок 300 нм, средней полоски (разнесением щелей) $w_c = 400$ нм, а также волновода с $w_n = w_p = 400$ нм и $w_c = 200$ нм. Высота полосок составляла 300 нм. Расчет выполнен для волноводов из Si_3N_4 , нанесенных на буферный слой SiO_2 , расположенный на кремниевой подложке. Использование Si_3N_4 для изготовления полосок ЩВ позволяет увеличить размеры щели и в итоге упростить ее заполнение ЖК [5]. Длина волны оптического излучения равна 1550 нм. При расчетах не учитывали потери в волноводе при вводе — выводе оптического излучения, а также потери на поглощение.

Как следует из расчетов, эффективный показатель преломления ЩВ с одной и двумя щелями меняется значительно больше по сравнению с обычным полосковым волноводом. Это объясняется тем, что вариации показателя преломления ЖК при изменении температуры сильнее, чем

материала, из которого изготовлен волновод. При этом поле моды в области щели и изменение показателя преломления ЖК в этой области существенно влияют на свойства такого волновода. В полосковом же волноводе ЖК расположен только в окружении волновода; поля мод, направляемых волноводом, резко спадают и незначительны.

Проанализируем влияние параметров волновода и резонатора на чувствительность и диапазон измерений датчика. Зависимость силы тока фотоприемника на выходе кольцевого резонатора на основе полоскового и щелевых волноводов с ЖК-заполнением при различных радиусах резонатора от температуры можно оценить по рис. 2 и табл. 1. Сплошные кривые 1—3 на рис. 2 относятся к датчикам с радиусом резонатора $R = 16$ мкм, штриховые 1'—3'—с $R = 32$ мкм. Коэффициенты связи между подводящими и кольцевым волноводами равны 0,5. Кривые 1, 1' представляют чувствительность по току датчиков на основе полоскового волновода, 2, 2'—ЩВ с шириной щели 200 нм, 3, 3'—двойного ЩВ с шириной щелей 2×100 нм и их разнесением в 400 нм. Как следует из рис. 2 и табл. 1, при увеличении R возрастает температурная чувствительность всех волноводных датчиков. Однако температурный диапазон, в котором наблюдается высокая чувствительность, сужается и смещается в область меньших температур. Так, датчик на основе двухщелевого волновода с радиусом резонатора 16 мкм имеет чувствительность порядка $0,45 \text{ мА/}^\circ\text{С}$ в диапазоне от -23 до -8 $^\circ\text{С}$ и всего лишь $0,06 \text{ мА/}^\circ\text{С}$ в диапазоне 12 — 35 $^\circ\text{С}$, что сравнимо с чувствительностью датчика на основе полоскового волновода.

Таблица 1

Чувствительность датчика по току в зависимости от радиуса резонатора

Тип волновода	Радиус резонатора R, мкм	Диапазон температур, $^\circ\text{С}$	Чувствительность по току, $\text{мА/}^\circ\text{С}$
Полосковый	16	$-10 \dots +32$	0,09
	32	$-15 \dots +18$	0,20
Щелевой	16	$0 \dots 28$	0,16
	32	$-18 \dots +2$ $10 \dots 35$	от 0,26 до 0,14
Двойной щелевой	16	$-23 \dots -8$	от 0,45 до 0,06
	32	$-27 \dots -18$ $20 \dots 32$	от 0,89 до нуля

Чувствительность к изменению температуры (показателя преломления) кольцевого микрорезонатора на основе ЩВ значительно превышает чувствительность датчика на полосковых волноводах. При этом наибольшую чувствительность имеют датчики на основе двойного ЩВ. Это обусловлено тем, что вариации показателей преломления n_e и n_o ЖК при изменении температуры значительно превышают изменения показателей преломления материала волновода и подложки.

Диапазон измерений и чувствительность датчика температуры можно также менять при помощи коэффициентов связи кольцевого и подводящих волноводов микрорезонатора [14, 16]. На рис. 3 и в табл. 2 показано влияние шири-

ны щели с ЖК-заполнением на чувствительность датчиков на основе щелевого (сплошные кривые) и двойного щелевого (штриховые линии) волноводов при радиусе резонатора 16 мкм. Кривые 1, 1' описывают чувствительность датчиков на основе волнопроводов шириной 100 нм ($g_n = g_p = 50$ нм); 2, 2'—200 нм ($g_n = g_p = 100$ нм); 3, 3'—300 нм ($g_n = g_p = 150$ нм). Разнесение щелей в двойном ЩВ для всех случаев равно 400 нм.

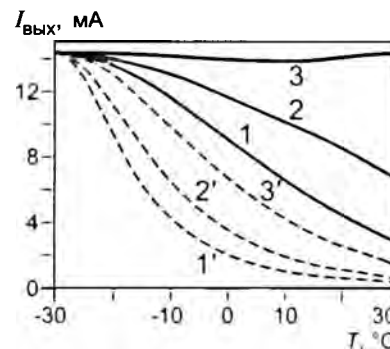


Рис. 3. Температурная чувствительность датчика на основе щелевого (сплошные кривые) и двойного щелевого (штриховые линии) волнопроводов в зависимости от ширины щели с ЖК-заполнением: 1, 1'—ширина щели 100 (2×50) нм; 2, 2'—200 (2×100) нм; 3, 3'—300 (2×150) нм

Таблица 2

Чувствительность датчика по току в зависимости от ширины щели

Тип волновода	Ширина щели, нм	Диапазон температур, $^\circ\text{С}$	Чувствительность по току, $\text{мА/}^\circ\text{С}$
Щелевой	100	$-18 \dots +34$	0,23
	200	$-2 \dots +32$	0,17
	300	$-30 \dots +39$	0
Двойной щелевой	2×50	$-26 \dots -14$ $10 \dots 30$	от 0,70 до 0,03
	2×100	$-23 \dots -9$ $20 \dots 36$	от 0,49 до 0,06
	2×150	$-19 \dots +1$ $18 \dots 36$	от 0,33 до 0,12

Как следует из рис. 3 и табл. 2, увеличение ширины щели в волноводах приводит к уменьшению температурной чувствительности датчика с одновременным расширением температурного диапазона, в котором наблюдается высокая чувствительность. Это можно объяснить тем, что с увеличением ширины щели уменьшается амплитуда поля волноводных мод в области щели [8].

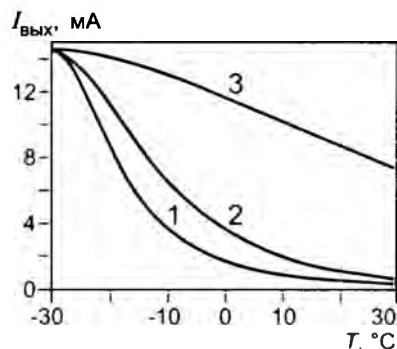


Рис. 4. Температурная чувствительность датчика на основе двойного щелевого волновода с разнесением щелей 600 (1), 400 (2) и 200 (3) нм

Влияние разнесения щелей на температурную чувствительность датчика на основе двойного ЩВ с ЖК-заполнением можно оценить из рис. 4 и табл. 3. Кривые 1—3 относятся соответственно к волноводам с разнесением щелей 600, 400 и 200 нм. Размеры щелей $g_n = g_p = 100$ нм, $R = 16$ мкм.

Таблица 3

Чувствительность по току датчика на основе двойного щелевого волновода в зависимости от разнесения щелей

Разнесение щелей, нм	Диапазон температур, °С	Чувствительность по току, мА /°С
200	-12 ... +35	0,14
400	-23 ... -11 15 ... 36	от 0,48 до 0,05
600	-26 ... -16 > 25	от 0,73 до 0

В соответствии с рис. 4 и табл. 3 увеличение разнесения между щелями в двойном ЩВ вызывает повышение чувствительности датчика при уменьшении диапазона наибольшей температурной чувствительности и его сдвиг в сторону меньших температур. Чувствительность такого датчика с небольшим разнесением щелей ($w_c = 200$ нм) практически не отличается от чувствительности аналогичного ЩВ (см. рис. 3, 4 и табл. 2, 3).

Таким образом, рассмотрены структурная схема и принцип работы интегрально-оптического датчика температуры, основанный на использовании оптического излучения, что позволяет применять датчик для измерения температуры легковоспламеняющихся жидкостей и газов, так как к измеряемой среде электрический ток не подается. Применение микрорезонаторов на основе ЩВ дает возможность, как показывают проведенные расчеты, более чем на порядок повысить чувствительность датчика по сравнению с традиционно используемыми интегральными устройствами [18]. Чувствительность по току можно регулировать изменением геометрических размеров и выбором типа резонатора. При этом чувствительность выше у датчиков на основе волноводов с двумя щелями и большим их разнесением.

Время установления стационарного режима в микрорезонаторе с $R = 32$ мкм составляет порядка 50 пс [19]. Таким образом, быстрое действие датчика определяется, в основном, временем температурного обмена между резонатором и измеряемой средой. Учитывая микрометровые размеры резонатора, это время достаточно мало (порядка 10^{-5} — 10^{-4} с / °С [14]). Датчик может иметь большое число чувствительных элементов, что позволяет одновременно контролировать температуру в различных точках потока или объема вещества.

Верхний предел измеряемой температуры датчиков на основе ЖК определяется температурой просветления, которая для жидкого кристалла 5СВ составляет 39,3 °С. Однако в настоящее время разработаны ЖК-материалы, анизотропные в температурном интервале от -40 до +110 °С. Показатели преломления n_e и n_o у ЖК имеют разную зависимость от температуры. При использовании двух волн с ортогональными поляризациями предложенный датчик позволяет получать одновременно две температурные зависимости, их усреднение повышает точность измерений.

Литература

1. Гармаш В. Б. и др. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-экспресс. 2005. № 6. С. 128—140.
2. Passaro V. M. N. e. a. Guided-wave optical biosensors // Sensors. 2007. V. 7. P. 508—536.
3. Almeida V. R. e. a. Guiding and confining light in void nanostructure // Opt. Lett. 2004. V. 29. N 11. P. 1209—1211.
4. Xu Q. e. a. Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material // Opt. Lett. 2004. V. 29. N 14. P. 1626—1628.
5. Barrios C. A. e. a. Slot-waveguide biochemical sensor // Opt. Lett. 2007. V. 32. N 21. P. 3080—3082.
6. Barrios C. A. e. a. Label-free optical biosensing with slotwaveguides // Opt. Lett. 2008. V. 33. N 7. P. 708—710.
7. Dell'Olivo F., Passaro V. M. Optical sensing by optimized silicon slot waveguides // Opt. Expr. 2007. V. 15. N 8. P. 4977—4993.
8. Kargar A., Chung-Yen Chao. Design and optimization of waveguide sensitivity in slot microring sensors // J. Opt. Soc. Am. A. 2011. V. 28. N 4. P. 596—603.
9. Jun Li, Shin-Tson Wu. Extended Cauchy equations for the refractive indices of liquid crystals // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. N 3. P. 896—901.
10. Беляев Б. А., Дрокин Н. А., Шабанов В. Ф. Температурные исследования диэлектрических характеристик жидкого кристалла 5СВ в области релаксации // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. № 4. С. 738—741.
11. Little B. E. e. a. Ultra-compact Si-SiO microring resonator optical channel dropping filters // IEEE Photon. Technol. Lett. 1998. V. 10. P. 549—551.
12. ФГУП «НПО «Орион» [Официальный сайт]. <http://www.ononir.ru/ru/product3-2.html> (дата обращения 06.11.2012 г.).
13. Ghosh G. Temperature dispersion of refractive indexes in some silicate fiber glasses // IEEE Photon. Technol. Lett. 1994. V. 6. N 2. P. 431—433.
14. Гончаренко И. А. и др. Цифровой оптический датчик для удаленного мониторинга температуры // Измерительная техника. 2007. № 3. С. 54—57; Goncharenko I. A. e. a. A digital optical sensor for the remote monitoring of temperature // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N 3. P. 319—324.
15. 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.
16. Гончаренко И. А., Конойко А. И., Поликанин А. М. Датчик концентрации жидкостей на основе щелевых волноводных микрорезонаторов // Измерительная техника. 2010. Т. 53. № 5. С. 66—69; Goncharenko I. A., Konoiko A. I., Polikanin A. M. Liquid concentration sensor based on slot waveguide microresonators // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 5. P. 563—568.
17. Pregla R. The method of lines for the analysis of dielectric waveguide bends // J. Lightwave Technol. 1996. V. 14. N 4. P. 634—639.
18. Иванов Е. Интегральные датчики температуры National Semiconductor // Новости электроники. 2007. № 10 (36). С. 16—19.
19. Goncharenko I. A. e. a. Optical broadband analog-digital conversion on the base of microring resonator // Opt. Communications. 2006. V. 257. N 1. P. 54—61.

Дата принятия 12.02.2013 г.