

Оптические решеточно-волноводные сенсоры на основе халькогенидных стекол

© В.И. Наливайко¹, М.А. Пономарева^{1,2}

¹ Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск, Россия

e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 02.07.2018 г.

В окончательной редакции 28.11.2018 г.

Принята к публикации 18.12.2018 г.

Рассмотрен принцип работы оптических решеточно-волноводных сенсоров. Проведено сравнение волноводной чувствительности и предела обнаружения сенсоров с волноводами из оксидного и халькогенидного стекла. Показаны преимущества решеточно-волноводных сенсоров с волноводами с высоким контрастом показателей преломления. Сформулированы условия получения максимальной волноводной чувствительности решеточно-волноводных сенсоров.

DOI: 10.21883/OS.2019.04.47523.182-18

Введение

Оптические сенсоры в настоящее время являются актуальным направлением исследований, открывающим новые возможности, в частности дистанционную регистрацию на больших расстояниях, нечувствительность к электромагнитным помехам, а также безмаркерный количественный анализ в биосенсорных приложениях. Самыми чувствительными среди оптических сенсоров являются интерферометрические сенсоры [1–3], но они сложны в изготовлении и требуют особых условий при эксплуатации. Частный случай бимодовых интерферометрических сенсоров на основе халькогенидных волноводов рассмотрен нами в [4]. Более простую конструкцию имеют решеточно-волноводные сенсоры, состоящие из планарного волновода и решеточных элементов связи. Они могут быть использованы как газовые сенсоры, датчики влажности или биосенсоры.

О решеточных элементах ввода на планарных волноводах в качестве сенсоров было впервые сообщено в 1984 г. [5], и их развитие остается актуальным [6–13]. Основное преимущество использования сенсоров с планарными волноводами заключается в их миниатюрности и простоте эксплуатации. В качестве волноводного материала используются полимеры [6,7], кремний [8,9], материалы типа Ta₂O₅ [10], TiO₂ [11] и другие. В интегрально-оптических планарных приложениях перспективным является использование аморфных материалов, в частности халькогенидных стеклообразных полупроводников. Актуальность применения халькогенидных материалов обусловлена их прозрачностью в широком ИК диапазоне ($\lambda = 0.7–12 \mu\text{m}$) и высоким пространственным разрешением (более 10^4 mm^{-1}) при формировании в них субмикронных структур (например, дифракционных решеток) оптическими методами [12,13].

Принцип работы решеточно-волноводного сенсора основан на измерении интенсивности волноводной моды. При изменении условий в области решеточного элемента ввода меняется угол ввода излучения в волновод и соответственно меняется введенная в волновод мощность. В зависимости от типа анализируемых веществ рассматриваются два варианта конструкций. В первом случае изменяется показатель преломления среды над решеточным элементом ввода, например, в газовых сенсорах [5,7,8]. Во втором случае изменяется толщина и показатель преломления волновода за счет адсорбции молекул его поверхностью, например, в датчиках влажности или биосенсорах [9,10,14,15]. Чувствительность решеточно-волноводного сенсора и предел обнаружения анализируемого вещества определяются параметрами составляющих его элементов — планарного волновода и дифракционной решетки.

Настоящая работа посвящена анализу характеристик решеточно-волноводных сенсоров в зависимости от материала волновода и его толщины. В работе рассматривается тип сенсоров, используемых для анализа газов. Целью работы является сравнение волноводов с низким контрастом показателей преломления на основе оксидного стекла и волноводов с высоким контрастом показателей преломления на основе халькогенидного стекла. Число поддерживаемых волноводами мод варьируется от одной до 8 мод.

Методика расчета

На рис. 1 представлено схематическое изображение решеточно-волноводного сенсора. Анализируемый газ подается в область вводной дифракционной решетки.

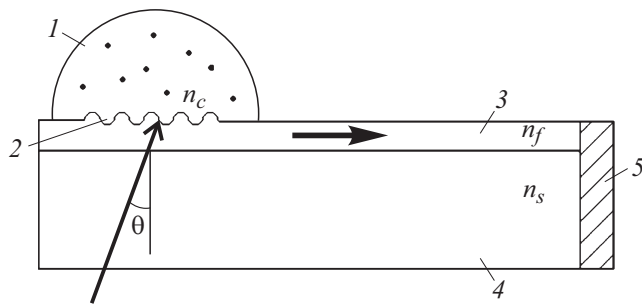


Рис. 1. Схематическое изображение решеточно-волноводного сенсора: 1 — камера с анализируемым веществом, 2 — решеточный элемент ввода излучения в волновод, 3 — планарный волновод, 4 — подложка, 5 — фотодетектор.

Монохроматический пучок света с длиной волны λ падает на дифракционную решетку со стороны подложки под углом θ . Возбужденная волноводная мода распространяется по волноводу в область детектора для измерения ее интенсивности. Угол падения пучка света настраивается для получения максимальной интенсивности моды при отсутствии аналита, фиксируется и принимается за нулевой отсчет. При этом для эффективного показателя преломления N_0 волноводной моды выполняются условие

$$N_0 = n_s \sin \theta + k(\lambda/\Lambda),$$

где k — порядок дифракции, Λ — период решетки, n_s — показатель преломления среды, из которой падает свет.

Изменение концентрации аналита приводит к изменению показателя преломления верхней среды волновода n_c и, соответственно, к изменению эффективного показателя преломления волноводной моды, который определяется из условия поперечного резонанса [16]. При этом эффективность ввода света решеточным элементом уменьшается (рис. 2). Ширина пика δN зависит от параметров решетки и определяет угловую селективность вводного элемента.

Таким образом, чувствительность решеточно-волноводных сенсоров определяется, во-первых, чувствительностью волновода, а, во-вторых, селективностью решеточного элемента ввода.

Согласно [16] чувствительность трехслойного волновода к изменению показателя преломления верхней среды определяется выражением

$$S = \frac{\partial N}{\partial n_c} = \frac{n_c(n_f^2 - N^2)}{N\gamma_c(n_f^2 - n_c^2)h_{ef}} \left[2 \left(\frac{N}{n_c} \right)^2 - 1 \right]^\rho, \quad (1)$$

где $\rho = 0$ для ТЕ-мод или $\rho = 1$ для ТМ-мод, h_{ef} — эффективная толщина волновода, вычисляемая по формуле

$$h_{ef} = h_f + \frac{1}{\gamma_c} + \frac{1}{\gamma_s},$$

$$\gamma_{c,s} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{N^2 - n_{c,s}^2},$$

а N — эффективный показатель преломления волноводной моды, n_c, n_f, n_s — показатели преломления верхней

среды, волновода и подложки соответственно, h_f — толщина волновода, λ — длина волны света.

Пределом обнаружения анализируемого вещества является минимально измеряемое сенсором изменение показателя преломления этого вещества Δn_c , определяемое по формуле [16]

$$\Delta n_c = \frac{\Delta N}{\partial N / \partial n_c} = \frac{1}{S} \Delta N, \quad (2)$$

где ΔN — минимальное изменение эффективного показателя преломления волноводной моды, которое определяется решеточным элементом ввода.

Для проведения оценок предположим, что регистрирующая фотоэлектрическая система обеспечивает погрешность измерения в 1%, т. е.

$$\Delta N \approx \delta N / 100. \quad (3)$$

Оценка величины δN была определена в работах [5,16] из принципа оптической неопределенности или дифракционной расходимости пучка на длине решетки

$$\delta N \approx \lambda / L_{gr}, \quad (4)$$

где L_{gr} — длина решеточного элемента ввода.

Поэтому для оценки предела обнаружения данного сенсора к изменению показателя преломления верхней среды с учетом выражений (3) и (4) можно пользоваться соотношением

$$\Delta n_c = \frac{1}{S} \frac{\lambda}{L_{gr}} 0.01. \quad (5)$$

Расчет и обсуждение результатов

Рассмотрим влияние толщины волновода и типа материала на волноводную чувствительность. Для сравнения выберем волноводы из оксидного стекла К-8 с

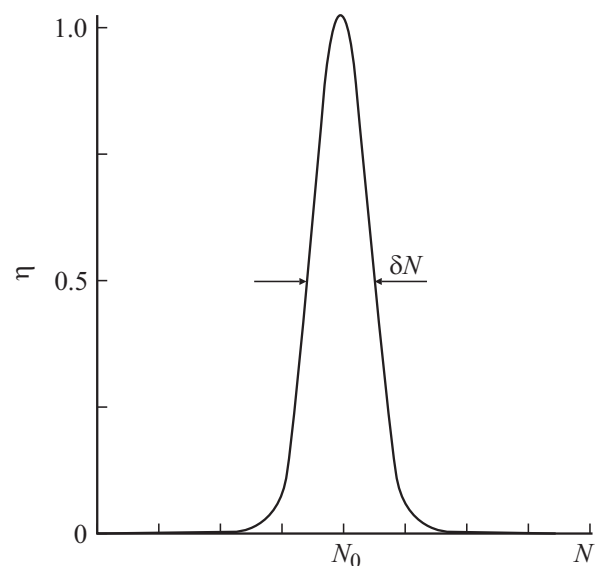


Рис. 2. Типичная форма зависимости относительной эффективности ввода излучения в волновод η от эффективного показателя преломления моды N .

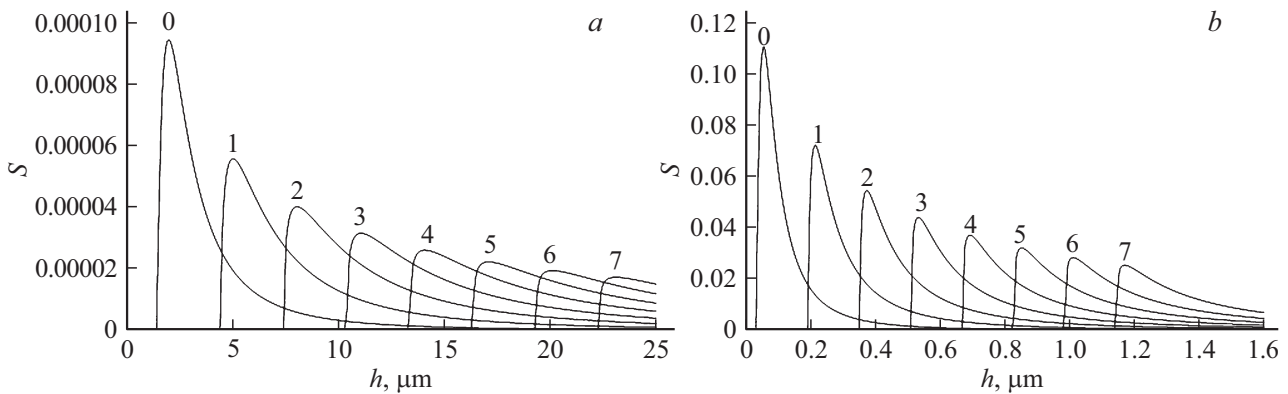


Рис. 3. Волноводная чувствительность S оксидных (а) и халькогенидных (б) волноводов в зависимости от толщины волноводов h для волноводных ТЕ-мод от 0-го до 7-го порядка.

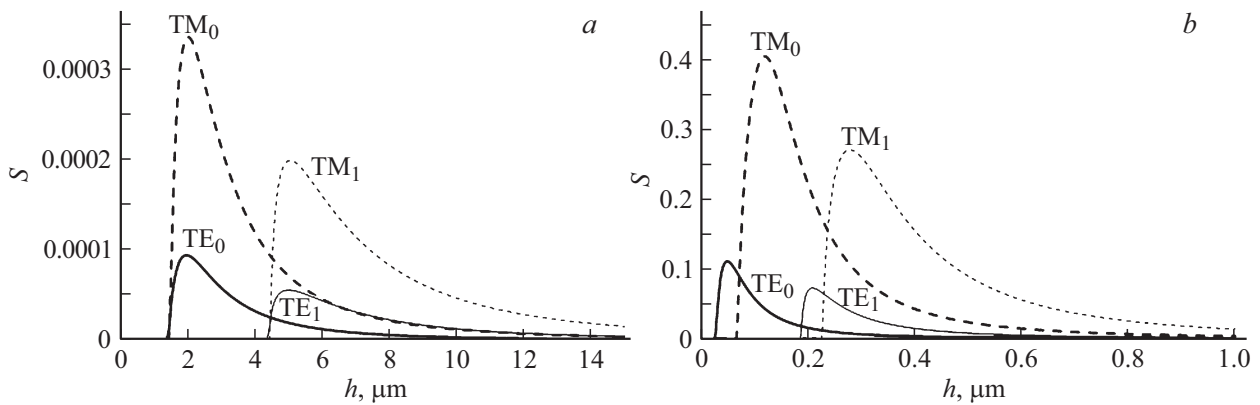


Рис. 4. Волноводная чувствительность S оксидных (а) и халькогенидных (б) волноводов в зависимости от толщины волноводов h для ТЕ- и ТМ-мод 0-го и 1-го порядков.

низким контрастом показателей преломления ($n_c = 1$, $n_f = 1.52$, $n_s = 1.5163$) и волноводы из халькогенидного стекла с высоким контрастом показателей преломления ($n_c = 1$, $n_f = 2.5$, $n_s = 1.5163$) для рабочей длины волны $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$. На рис. 3 приведены зависимости волноводной чувствительности S , рассчитанной по формуле (1), от толщины оксидных и халькогенидных волноводов. Предельная толщина волноводов на графиках соответствует 8-модовому волноводу для обоих типов волноводов. Для каждой волноводной моды существует оптимальное значение толщины волновода, при котором волноводная чувствительность имеет максимальное значение. В таблице приведены значения максимальной чувствительности для каждой моды, соответствующее ей значение толщины волновода и величина предела обнаружения, рассчитанная по формуле (5). Предел обнаружения оценивался для вводных решеточных элементов длиной 5 mm.

Анализ приведенных в таблице и на графиках рассчитанных величин позволяет сделать следующие выводы:

– сенсоры с оксидными волноводами при приведенных параметрах сенсоров являются малочувствительны-

ми, обладая пределом обнаружения изменения показателя преломления не выше 0.014;

– сенсоры с халькогенидными волноводами при приведенных параметрах сенсоров обладают пределом обнаружения, сравнимым по величине с пределом обнаружения интерферометрических сенсоров, до 10^{-5} ;

Мода	Оксидный волновод			Халькогенидный волновод		
	$h_{\text{opt}}, \mu\text{m}$	S	Δn_c	$h_{\text{opt}}, \mu\text{m}$	S	Δn_c
0	1.99	$9.44 \cdot 10^{-5}$	0.014	0.05	0.11	$1.18 \cdot 10^{-5}$
1	4.98	$5.59 \cdot 10^{-5}$	0.023	0.21	0.072	$1.8 \cdot 10^{-5}$
2	7.98	$4.02 \cdot 10^{-5}$	0.032	0.37	0.055	$2.36 \cdot 10^{-5}$
3	11.1	$3.16 \cdot 10^{-5}$	0.041	0.53	0.044	$2.95 \cdot 10^{-5}$
4	13.98	$2.61 \cdot 10^{-5}$	0.05	0.69	0.037	$3.51 \cdot 10^{-5}$
5	16.94	$2.23 \cdot 10^{-5}$	0.058	0.85	0.032	$4.06 \cdot 10^{-5}$
6	20.05	$1.95 \cdot 10^{-5}$	0.067	1.01	0.028	$4.64 \cdot 10^{-5}$
7	23.01	$1.73 \cdot 10^{-5}$	0.075	1.17	0.025	$5.2 \cdot 10^{-5}$

– волноводы с высоким контрастом показателей преломления обладают на 3 порядка более высокой чувствительностью по сравнению с волноводами с низким контрастом показателей преломления;

– с увеличением толщины волновода чувствительность сенсора уменьшается;

– в многомодовом волноводе определенной толщины максимальной чувствительностью обладает мода с наивысшим порядком;

– чем выше номер моды, тем меньше значение максимальной чувствительности, при этом характер уменьшения максимальной чувствительности близок к экспоненциальному закону.

Дополнительно проводились исследования влияния поляризации волноводной моды на волноводную чувствительность. На рис. 4 приведены зависимости волноводной чувствительности для ТЕ- и ТМ-мод нулевого и первого порядков от толщины оксидного и халькогенидного волноводов. Видно, что переход на использование ТМ-мод дает увеличение чувствительности в несколько раз для оксидных и халькогенидных волноводов.

Заключение

В работе представлены результаты сравнения характеристик решеточно-волноводных сенсоров на основе оксидного и халькогенидного стекол. Показаны преимущества сенсоров на основе халькогенидного стекла по сравнению с оксидными, обусловленные высоким контрастом показателей преломления. Установлено, что предел обнаружения по показателю преломления у одномодовых волноводов выше, чем у многомодовых, при этом чувствительность халькогенидных решеточно-волноводных сенсоров приближается к чувствительности более сложных в изготовлении и эксплуатации интерферометрических сенсоров и составляет $1 \cdot 10^{-5}$. Для изготовления волноводно-решеточных сенсоров с максимальной чувствительностью рекомендуется использовать ТМ-одномодовые волноводы с высоким контрастом показателя преломления.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки № гос. рег АААА-А17-117053110007-0.

Список литературы

- [1] Passaro V.M.N., Dell'Olio F., Casamassima B., Leonardis F. // *Sensors*. 2007. V. 7. P. 508. doi 10.3390/s7040508
- [2] Kozma P., Kehl F., Ehrentreich-Förster E., Stamm C., Bier F.F. // *Biosensors and Bioelectronics*. 2014. V. 58. P. 287. doi 10.1016/j.bios.2014.02.049
- [3] Duval D., Osmond J., Dante S., Dominguez C., Lechuga L.M. // *IEEE Photonics J.* 2013. V. 5. N 2. P. 3700108. doi 10.1109/JPHOT.2013.2251873
- [4] Наливайко В.И., Пономарева М.А. // *Опт. и спектр.* 2015. Т. 119. № 1. С. 147. doi 10.7868/S003040341507020X
- [5] Tiefenthaler K., Lukosz W. // *Opt. Lett.* 1984. V. 9. P. 137. doi 10.1364/OL.9.000137
- [6] Wang L., Li Y., Porcel M.G., Vermeulen D., Han X., Wang J., Jian X., Baets R., Zhao M., Morthier G. // *J. Appl. Phys.* 2012. V. 111. P. 114507. doi 10.1063/1.4724335
- [7] Prokop C., Schoenhardt S., Laegel B., Wolff S., Mitchell A., Karnutsch C. // *J. Lightwave Technol.* 2016. V. 34. P. 3966.
- [8] Maikisch J., Gaylord T. // *Appl. Opt.* 2012. V. 51. P. 4325. doi 10.1364/AO.51.004325
- [9] Lambeck P.V., Lith J., Hoekstra H.J.W.M. // *Sens. Actuat. B: Chemical*. 2006. V. 113. P. 718. doi 10.1016/j.snb.2005.07.024
- [10] Gartmann Th.E., Kehl F. // *Biosensors*. 2015. V. 5. P. 187. doi 10.3390/bios5020187
- [11] Karasiński P. // *Opto-Electron. Rev.* 2011. V. 19. P. 10. doi 10.2478/s11772-010-0056-1
- [12] Ródenas A., Martín G., Arezki B., Psaila N., Jose G., Jha A., Labadie L., Kern P., Kar A., Thomson R. // *Opt. Lett.* 2012. V. 37. P. 392. doi 10.1364/OL.37.000392
- [13] Ромашкин А.В., Мурзанов А.А., Киселев А.М., Корытин А.И., Кудряшов М.А., Нежданов А.В., Мочалов Л.А., Маушин А.И., Степанов А.Н. // *Опт. и спектр.* 2018. Т. 124. № 5. С. 706. doi 10.21883/OS.2018.05.45957.314-17
- [14] Vörös J., Ramsden J.J., Csúcs G., Szendrő I., De Paul S.M., Textor M., Spencer N.D. // *Biomaterials*. 2002. V. 23. I. 17. P. 3699. doi 10.1016/S0142-9612(02)00103-5
- [15] Kunz R.E. // *Sens. Actuat. B: Chemical*. 1993. V. 11. P. 167. doi 10.1016/0925-4005(93)85251-5
- [16] Tiefenthaler K., Lukosz W. // *J. Opt. Soc. Am. B*. 1989. V. 6. N 2. P. 209. doi 10.1364/JOSAB.6.000209