

Расчёт датчика напряженности электрического поля в конфигурации фотонной интегральной схемы с делителем поляризации

© И.В. Кузнецов¹, А.С. Перин^{1,2}, А.А. Журавлев³

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН, Томск, Россия

³Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

e-mail: igor.v.kuznetsov@tusur.ru

Поступила в редакцию 03.05.2024 г.

В окончательной редакции 24.09.2024 г.

Принята к публикации 30.10.2024 г.

Рассмотрена модель датчика напряженности электрического поля, состоящая из ячейки Поккельса, делителя поляризации и интерферометра Маха-Цендера в одном из плеч. Представлены результаты расчёта зависимости нормализованной интенсивности оптического излучения от величины напряженности внешне приложенного электрического поля. Коэффициент экстинкции составил -1.5 dB, верхний предел измерения 500 V/m при полудлине дипольной антенны 2 mm, ширина полосы пропускания 10 GHz.

Ключевые слова: ниобат лития, ячейка Поккельса, делитель поляризации, фотонная интегральная схема.

DOI: 10.61011/OS.2024.11.59505.6493-24

Задача измерения напряженности электрического поля является актуальной для науки и промышленности. Особенно остро эта задача стоит в радиоэлектронной промышленности, поскольку, согласно современным требованиям, вся радиоэлектронная продукция должна проходить сертификацию на электромагнитную совместимость.

Наиболее распространенным в коммерческом секторе классом приборов для измерения напряженности электрического поля являются приборы на основе электронных преобразователей с дипольными антеннами [1,2].

Альтернативой электронным датчикам электрического поля являются сенсоры, использующие оптическое излучение в качестве несущей. Детектирование напряженности электрического поля в таких устройствах осуществляется за счёт модуляции оптического излучения посредством электрооптических эффектов [3–5].

Одной из возможных схем реализации электрооптического датчика напряженности электрического поля является конфигурация на основе интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ) [6,7]. Такое устройство представляет собой два Y-делителя, соединенных между собой прямыми волноводами, называемыми „плечами“. Одно из плеч, как правило, окружается антенной или массивом антенн (чаще используются дипольные или патч-антенны). Размер элементов антенн составляет порядка единиц миллиметров, что вынуждает обеспечивать миллиметровые расстояния между плечами интерферометра. В случае реализации оптической схемы на основе волноводов, сформированных методом диффузии титана в объемный кристалл ниобата лития (LiNbO_3) [6,7], этот факт не

является существенным ограничением, поскольку малый оптический контраст таких волноводов, в свою очередь, вынуждает закладывать большие радиусы изгиба в Y-делителе при проектировании. Иначе ситуация обстоит в случае фотонной интегральной схемы на основе тонкой плёнки LiNbO_3 на изоляторе из оксида кремния (SiO_2), поскольку высокий оптический контраст позволяет значительно уменьшить геометрические размеры оптической схемы по сравнению с реализацией на объемном кристалле.

В настоящей работе будет альтернативная оптическая схема, включающая в себя ячейку Поккельса (ЯП), делитель поляризации (ДП) и ИМЦ с конвертором поляризации в одном из плеч [8,9]. Использование ЯП в качестве чувствительного элемента позволит избежать ограничений, связанных с размерами антенн.

Таким образом, целью работы является расчёт датчика напряженности электрического поля в конфигурации ЯП с интегрированным ДП в ИМЦ с конвертором поляризации в виде фотонной интегральной схемы. В работе проведен расчёт коэффициентов передачи мощности при распространении оптического излучения через такую структуру с учетом внешне приложенного электрического поля.

Рассматриваемое устройство представляет собой ячейку Поккельса на основе тонкой пленки кристалла ниобата лития (LiNbO_3) на изоляторе SiO_2 , пристыкованную к делителю поляризации в виде направленного разветвителя с нулевым зазором [10,11], к выходу которого стыкуется ИМЦ с конвертором поляризации. Схема устройства представлена на рис. 1, координатные оси

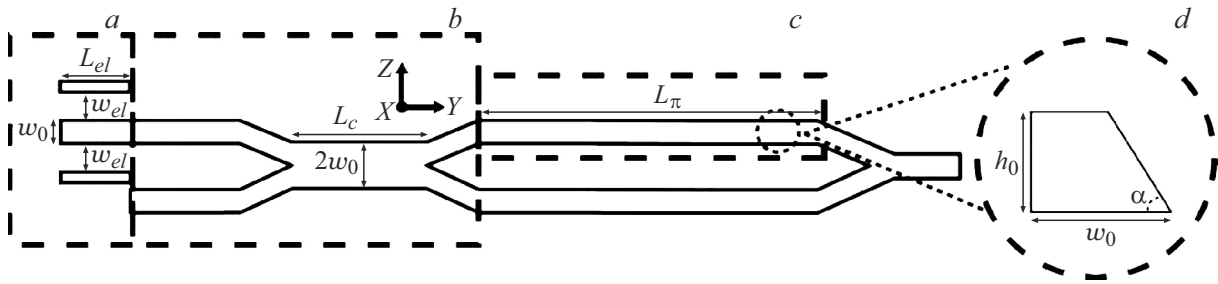


Рис. 1. Схема рассматриваемого устройства: (a) ЯП, (b) ДП, (c) конвертер поляризации, (d) поперечный срез сердцевины волновода конвертера поляризации.

Таблица 1. Геометрические параметры модели

Параметр	Параметр, ед.	Значение
w_0	Ширина сердцевины волноводов, nm	600
h_0	Высота сердцевины волноводов, nm	300
w_{el}	Зазор между волноводом и электродом, μm	1
L_{el}	Длина электродов, nm	5
L_c	Длина зоны двухмодовой интерференции, μm	20.65
L_π	Длина конвертера поляризации, μm	21.13
α	Угол скоса стенки конвертера поляризации, deg	70

на рисунке обозначают ориентацию кристалла $LiNbO_3$. Оболочка волноводов выполнена из SiO_2 .

В табл. 1 приведены параметры схемы, указанные на рис. 1, в табл. 2 — физические параметры модели [11].

В ячейку Поккельса (секция (a) на рис. 1) вводится линейно поляризованное оптическое излучение с углом φ_0 наклона к оси Z тонкой кристаллической плёнки $LiNbO_3$. В результате эффекта двойного лучепреломления линейная поляризация оптического излучения преобразуется в эллиптическую. Дополнительно, воздействие электрического поля, прикладываемого вдоль оси Z плёнки, приводит к изменению величины необыкновенного показателя преломления и, как следствие, к изменению фазового набега между компонентами, соответствующими обыкновенному и необыкновенному состояниям поляризации. Как было отмечено выше, в реальных устройствах для передачи внешнего электрического поля волноводным структурам используются антенны [6,7]. В настоящей работе вместо антенн при расчёте будут использоваться полосковые электроды, поскольку разработка приёмной антенны не относится к задачам работы. Также отметим, что при практической реализации электроды могут использоваться для задачи положения рабочей точки устройства путем подачи напряжения смещения. В работе расчёт воздействия эффекта Поккельса проводился только непосредственно по оси Z тонкой плёнки, поскольку электроды, связанные с антеннами, прикладывают поле именно по этому

направлению. Следовательно, в других направлениях электрическое поле не будет усилено и будет мало по сравнению с полем, приложенным вдоль оси Z .

Принцип работы используемого ДП заключается в двухмодовой интерференции, возникающей в широкой части ДП между фундаментальной модой и модой первого порядка. Ширина зоны интерференции подбирается для обеспечения двухмодового режима, а длина этой зоны выбирается достаточной для обеспечения разделения ортогонально поляризованных компонент в пространстве. Методика подбора геометрических параметров для достижения разделения поляризации подробно описана в работах [6,7]. Для расчёта геометрии использовался метод конечных элементов в частотной области: проводился расчёт распространения оптического излучения. Коэффициент передачи для ТЕ-моды составил порядка 40%, а для ТМ-моды — 71.3%. Наличие потерь в ДП объясняется наличием рассеяния излучения в оболочку волноводов.

В схеме используется конвертер поляризации на основе волновода со скошенной стенкой [8,9]. Принцип работы используемого конвертера поляризации заключается в гибридизации фундаментальных ТЕ- и ТМ-мод, распространяющихся в волноводе, достигающейся путем нарушения симметрии сердцевины волновода за счёт скоса одной из его стенок. Оптимальная длина конвертера для обеспечения 100% конвертации из ТЕ

Таблица 2. Физические параметры модели

Параметр	Параметр, ед.	Значение
n_0	Показатель преломления оболочки (SiO ₂)	1.44 [12]
n_1	Обыкновенный показатель преломления	2.2111 [13]
n_2	Необыкновенный показатель преломления	2.1376 [13]
λ	Длина волны излучения, nm	1550
ϵ_0	Относительная диэлектрическая проницаемость оболочки (SiO ₂)	4 [14]
ϵ_{11}	Компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости LiNbO ₃	84 [15]
ϵ_{33}		30 [15]
r_{13}	Компоненты тензора электрооптических коэффициентов LiNbO ₃	8.6 [15]
r_{22}		3.4 [15]
r_{33}		30.8 [15]
r_{51}		28 [15]
φ_0		Угол наклона плоскости поляризации к оптической оси кристалла, deg

в ТМ может быть найдена по формуле

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_1 - \beta_2}, \quad (1)$$

где β_1, β_2 — постоянные распространения фундаментальных ТЕ- и ТМ-мод. Для описанных в табл. 1 и 2 параметров постоянные распространения составили соответственно $\beta_1 \approx 6.22 \cdot 10^6$, $\beta_2 \approx 6.06 \cdot 10^6$ rad/m, таким образом, $L_\pi = 21.13 \mu\text{m}$.

Величина интенсивности оптического излучения на выходе ИМЦ зависит от разности фаз $\Delta\varphi$ между волнами, распространяющимися по разным плечам, и определяется по формуле

$$I = \frac{1}{2} I_0 (1 - \cos \Delta\varphi), \quad (2)$$

где I_0 — входная интенсивность. Величину $\Delta\varphi$ можно разложить на постоянную составляющую $\Delta\varphi_c$, определяемую волноводной структурой, и составляющую $\Delta\varphi_f$, зависящую от величины приложенного к ЯП электрического поля. Выразим обе составляющие через формулу

$$\Delta\varphi_c = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 - n_2)L, \quad (3)$$

где $L \approx 5060 \mu\text{m}$ — длина оптической схемы. Из (3) найдем, что постоянная разность фаз, обусловленная геометрией устройства, составляет 480.011π или 2.036° по модулю 360° .

Для определения непостоянной составляющей смещения фаз можно воспользоваться формулой

$$\Delta\varphi_f = -\frac{\pi n_2^3 r_{33} \left(E + \frac{U_B}{w_0 + 2w_{el}} \right) L}{\lambda}, \quad (4)$$

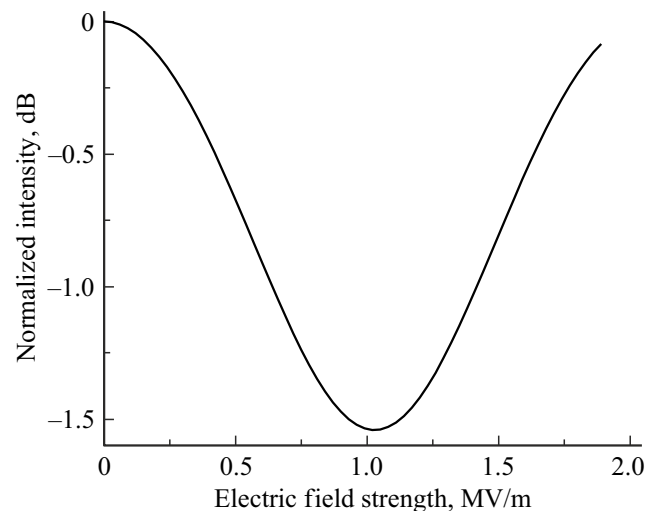


Рис. 2. Зависимость относительной интенсивности на выходе ИМЦ от величины приложенного электрического поля.

где E — внешне приложенное электрическое поле, U_B — напряжение смещения.

На рис. 2 представлена зависимость относительной интенсивности на выходе ИМЦ от величины приложенного электрического поля, полученная путем расчёта распространения оптического излучения через схему (рис. 1) с учётом приложенного к электродам электрического поля.

Как видно по рис. 2, полуволновая напряженность указанной конфигурации составляет порядка 1 MV/m, что, учитывая то, что расстояние между электродами составляет порядка $2.3 \mu\text{m}$, эквивалентно приложенному к электродам напряжению 2 V. Если вместо электродов

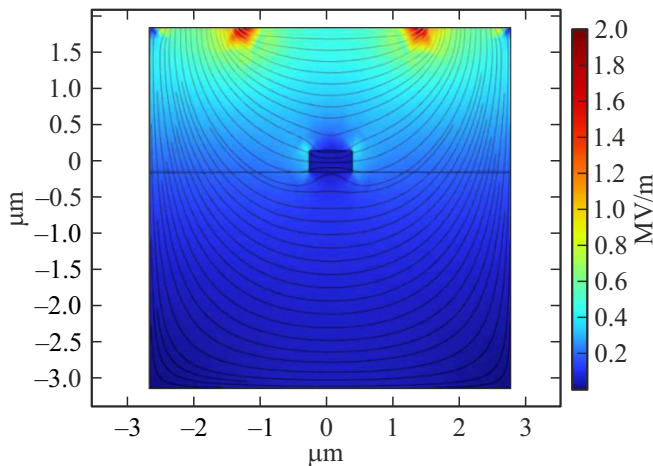


Рис. 3. Распределение электрического поля в поперечном сечении ЯП при приложенном напряжении 2 V.

будет установлена дипольная антенна с полудлиной диполя $L_d = 2 \text{ mm}$, то, учитывая усиление такой антенны, которое можно найти по формуле [9]

$$F = \frac{L_d}{w_{el}} = \frac{2 \text{ mm}}{10 \mu\text{m}} = 2000, \quad (5)$$

верхний предел измерения напряженности составит 500 V/m. Небольшой коэффициент экстинкции (-1.5 dB) объясняется большой разницей между коэффициентами передачи ДП.

Оценим частотный диапазон сенсора, для этого воспользуемся формулой, связывающей полосу пропускания электрода по уровню -3 dB с его длиной:

$$\Delta f_{-3\text{dB}} = \frac{1.4c}{\pi \left| n_e - \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2}} \right| L_{el}}, \quad (6)$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ — скорость света в вакууме, $\epsilon_r = 44$ — относительная диэлектрическая проницаемость LiNbO_3 [16]. Таким образом,

$$\Delta f_{-3\text{dB}} = \frac{1.4 \cdot 3 \cdot 10^8}{\pi \cdot \left| 2.137 - \sqrt{\frac{44+1}{2}} \right| \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 10.26 \text{ GHz}.$$

На рис. 3 представлено распределение электрического поля в поперечном сечении ЯП при приложенном напряжении 2 V и высоте оболочки $2 \mu\text{m}$.

На рис. 3 видно, что ввиду большой разницы диэлектрических констант между LiNbO_3 и SiO_2 наблюдаются преломление силовых линий поля в области сердцевин волновода и отражение электрического поля от её стенок. Большая величина отражений электрического поля снижает эффективность электрооптического эффекта и может быть минимизирована с помощью использования альтернативных буферных материалов с большей диэлектрической проницаемостью, например LaAlSiInO_x [17].

Таким образом, был проведен расчёт альтернативной оптической схемы электрооптического датчика напряженности электрического поля, включающего в себя ячейку Погкельса, делитель поляризации и ИМЦ с конвертором поляризации в одном из плеч. Коэффициент экстинкции составил -1.5 dB , верхний предел измерения 500 V/m (при полудлине дипольной антенны 2 mm), ширина полосы пропускания 10 GHz.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2022-0004 „Исследование и разработка способов изготовления интегральных оптических волноводов и элементов на их основе“) в части постановки задач и моделирования, а также в рамках государственного задания ИОА СО РАН в части проведения расчетов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Bassen, G. Smith. In: *IEEE Transactions on Antennas and propagation* (IEEE, 1983), vol. 31, p. 710. DOI: 10.1109/TAP.1983.1143126
- [2] Y. Yan, Y. Hu, L. Wang, X. Qian, W. Zhang, K. Reda, J. Wu, G. Zhang. *Measurement*, **169**, 108506 (2021). DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108506
- [3] J. Peng, S. Jia, J. Bian, S. Zhang, J. Liu, X. Zhou. *Sensors*, **19** (13), 2860 (2019). DOI: 10.3390/s19132860
- [4] H. Jung. *Fiber and Integrated Optics*, **35** (4), 161 (2016). DOI: 10.1080/01468030.2016.1198508
- [5] G.D. Boyd, Robert C. Miller, K. Nassau, W.L. Bond, A. Savage. *Appl. Phys. Lett.*, **5** (11), 234 (1964). DOI: 10.1063/1.1723604
- [6] J. Zhang, Z. Zhao, C. Li, Y. Li. *Fiber and Integrated Optics*, **36** (4–5), 157 (2017). DOI: 10.1080/01468030.2017.1357770
- [7] J. Zhang, F. Chen, B. Liu. *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, **30** (10), 1009 (2020). DOI: 10.1109/LMWC.2020.3019448
- [8] V.P. Tzolov, M. Fontaine. *Opt. Commun.*, **127** (1–3), 7 (1996). DOI: 10.1016/0030-4018(96)00039-9
- [9] Z. Huan, R. Scarmozzino, G. Nagy, J. Steel, R.M. Osgood. *IEEE Photonics Technology Lett.*, **12** (3), 317 (2000). DOI: 10.1109/68.826926
- [10] R. Sattibabu, P. Kunar Dey, B.N. Shivakiran Bhaktha, P. Ganguly. *Results in Optics*, **8**, 100262 (2022). DOI: 10.1016/j.rio.2022.100262
- [11] И.В. Кузнецов, А.С. Перин. *Опт. и спектр.*, **131** (11), 1529 (2023).
- [12] I.H. Malitson. *JOSA*, **55** (10), 1205 (1965). DOI: 10.1364/JOSA.55.001205
- [13] D.E. Zelmon, D.L. Small, D. Jundt. *JOSA B*, **14** (12), 3319 (1997). DOI: 10.1364/JOSAB.14.003319

- [14] S. Holten, H. Kliem. *J. Appl. Phys.*, **93** (3), 1684 (2003). DOI: 10.1063/1.1532939
- [15] R.S. Weis, T.K. Gaylord. *Appl. Phys. A*, **37**, 191(1985). DOI: 10.1007/BF00614817
- [16] O. Manoochehri, A. Darvazehban, M.A. Salari, S. Khaledian, D. Erricolo, B. Smida. *Microwave and Optical Technology Lett.*, **60** (6), 1552 (2018). DOI: 10.1002/mop.31195
- [17] H. Hara, J. Yoshinari, K. Sasaki, T. Kikukawa, H. Take, T. Mino, A. Shimura, Y. Takagi, H. Fukuzawa. *AIP Advances*, **14** (1), 015045 (2024). DOI: 10.1063/5.0171734