

ОПТОВОЛОКОННЫЙ АМПЛИТУДНЫЙ ДАТЧИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА 5СВ

А.И. Гордеева¹, Д.И. Нурмухаметов^{1,2}, Р.С. Пономарёв¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

Аннотация. В работе предложен и экспериментально протестирован амплитудный оптоволоконный датчик электромагнитного поля, изготовленный на основе полости микронного размера, заполненной жидким нематическим кристаллом 5СВ. Определена его чувствительность. Предложены варианты дальнейшей модификации.

Ключевые слова: оптоволоконный датчик, магнитное поле, жидкий кристалл.

Введение

Измерение магнитных и электрических полей в настоящее время является неотъемлемой частью построения электромагнитных устройств. В отличие от электрических датчиков, оптические датчики, основанные на оптоволоконных технологиях, обладают рядом значительных преимуществ: высокая частота сигнала и скорость передачи, электрическая пассивность и устойчивость к электромагнитным помехам. В настоящее время микрорезонаторные оптоволоконные датчики пользуются наибольшей популярностью благодаря простоте изготовления, дешевизне и малым размерам [1, 2]. В некоторых случаях для производства чувствительных элементов таких датчиков используют жидкие кристаллы (ЖК), которые меняют свои оптические свойства под действием внешних электромагнитных или температурных полей [3-8].

Многочисленные работы по использованию жидких кристаллов для изготовления датчиков электромагнитных полей описаны в работе [9]. В частности, представлен датчик высокого напряжения, который позволяет напрямую измерять электрическое поле до 800 кВ/м в распределенных точках вдоль линий электропередачи с точностью 0,1% при расстоянии измерения от 0,02 м до 200 м. В работе [10] подробно описана методика формирования волоконно-оптического датчика температуры на основе микрорезонатора. В работах [11, 12] представлены датчики электрического поля на основе фотонно-кристаллического волокна (ФКВ) с чувствительностью к электрическому полю в 1,1 нм/Vrms.

В работе [13] описано электрически перестраиваемое волоконно-оптическое устройство на основе интерферометра Маха-Цендера, который формируется путем сваривания участка полого волокна, заполненного ЖК Е7, с входным и выходным одномодовым волокном. Резонансная длина волны спектра, отраженная от чувствительной части датчика, модулируется приложенным электрическим полем переменного тока. Такой датчик дешев и прост в изготовлении, имеет малые размеры, высокую чувствительность

и хорошую повторяемость измерений. В работе [14] представлены результаты исследований статического двулучепреломления в нематическом жидком кристалле МВВА. Данные демонстрируют, что в зависимости от температуры среды в системе наблюдается сдвиг спектра поглощения, который может быть использован для оценки параметра порядка ЖК, а также для измерения температуры и электромагнитных полей.

В настоящей работе предложен и экспериментально протестирован амплитудный оптоволоконный датчик электромагнитного поля, изготовленный на основе полости микронного размера, заполненной ЖК 5СВ.

1. Экспериментальная методика

1.1. Изготовление чувствительного элемента

Создание чувствительного элемента амплитудного датчика электромагнитных полей осуществлялось в несколько этапов. На первом этапе на торце оптического волокна формировалась полость диаметром порядка 100 мк, которая образуется при сваривании волокна-диффузора с одномодовым волокном SMF. В результате действия электрической дуги пузырьки газа внутри диффузора объединяются, образуя в месте сварки каверну объемом около $7 \cdot 10^4$ мкм³. Скалывание волокна позволяет обеспечить доступ к внутреннему объему полости для её дальнейшего заполнения различными жидкостями в том числе ЖК. Подробнее этапы создания полости, режимы сварки и итоговый размер формирующейся полости описан в работе [15]. В настоящей работе было изготовлено и заполнено две полости с диаметром устья 68 и 125 мкм.

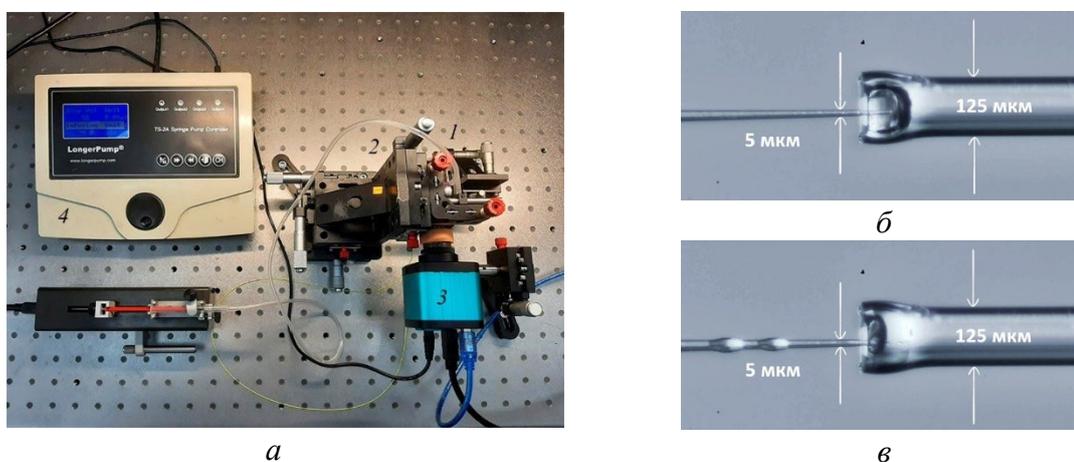


Рис. 1. Фото установки (а): 1 – микрокапилляр, 2 – трехосный позиционер, 3 – видеокамера, 4 – шприцевой насос; этапы заполнения полости ЖК (б, в)

Для контролируемого ввода ЖК в рабочую полость использовалась установка, фото которой приведено на рис. 1. Микрокапилляр 1 Femtotip Eppendorf (Германия) внешним диаметром 2 мкм фиксировался в держателе трехосного позиционера 2. Напротив капилляра располагался торец оптического волокна. С помощью позиционера под контролем видеокамеры 3 осуществлялась настройка соосности элементов. После юстировки кончик капилляра вводился в полость (рис. 1б) и с помощью шприцевого насоса 4 LongerPump TS-2A (UK) осуществлялось заполнение каверны ЖК заданного объема (рис. 1в).

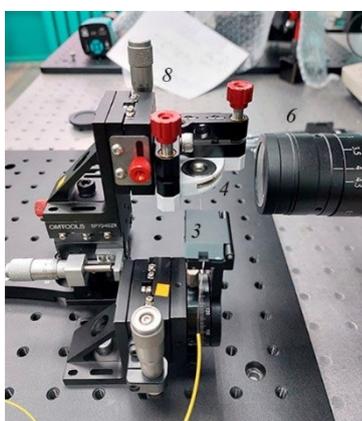
В качестве рабочего вещества в исследованиях использовался нематический жидкий кристалл 5CB ($T_{NI}=35,5^\circ\text{C}$, $\rho=1,0065\text{ г/см}^3$, $n_e=1,7$, $n_o=1,5$, $K=6,5 \cdot 10^{-7}$ дин, $\chi_a=1,7 \cdot 10^{-7}$ СГСЭ) взяты при $T=20^\circ\text{C}$, молекулы которого под действием внешнего магнитного поля значением H выше критического ориентируются по полю, меняя свои оптические свойства. В случае слабых полей силы упругости превосходят действие внешнего поля и нематик остается однородно ориентированным. Переориентация молекул носит название эффекта Фредерикса, а условие, определяющее критическое значение поля H_c , рассчитывается по формуле

$$H_c = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{K}{\chi_a}},$$

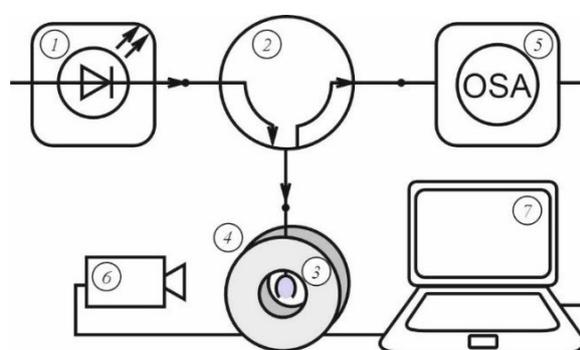
где K – это среднее значение трех модулей Франка, d – толщина слоя ЖК, $\chi_a = \chi_{\parallel} - \chi_{\perp}$ – разность магнитной восприимчивости [16]. Оценка порога напряженности магнитного поля 5CB, заполняющего полость диаметром 125 мкм, показала, что величина H_c равна 12,4 кА/м.

1.2. Тестирование чувствительного элемента

Проверка датчика и определение его чувствительности к воздействию внешнего магнитного поля осуществлялась на установке, фото и оптическая схема которой приведены на рис. 2. В ходе эксперимента лазерное излучение длиной волны 1550 нм от перестраиваемого узкополосного источника 1 Golight (США) при помощи циркулятора 2 направлялось в исследуемую полость 3.



а



б

Рис. 2. Фото установки (а); оптическая схема установки по тестированию чувствительного элемента амплитудного датчика электромагнитных полей: 1 – источник лазерного излучения, 2 – циркулятор, 3 – полость, заполненная ЖК, 4 – кольцевые магниты, 5 – оптический спектроанализатор, 6 – видеокамера, 7 – ПК, 8 – трехосный позиционер (б)

Полость, заполненная ЖК, помещалась в область однородного магнитного поля, создаваемого двумя соосно расположенными постоянными кольцевыми магнитами 4 (рис. 2а). Магниты (внешний диаметр 25 мм, внутренний – 10 мм, высота 2 мм) были зафиксированы в оснастке на расстоянии 3 мм друг от друга. Картина силовых линий магнитного поля для данной конструкции приведена на рис. 3а. Известно, что в центре системы существует зона однородного магнитного поля в виде цилиндра, в которой

величина неоднородности не превышает 2 % [17]. В работе для системы используемых магнитов была измерена индукция магнитного поля тесламетром с помощью датчика Холла. Рассчитаны значения напряженности магнитного поля H для точек, обозначенных на рис. 3а, которые равны $H_2= 191$ кА/м, $H_3= 159$ кА/м, $H_4=29,5$ кА/м.

В ходе эксперимента положение полости между точками варьировалось с помощью трехкоординатной подвижки δ . Оптический сигнал, прошедший через волокно и полость и отраженный от границы раздела ЖК-воздух, детектировался оптическим спектроанализатором 5 EXFO (США). Визуальный контроль за перемещением и прозрачностью ЖК осуществлялся видеокамерой δ . Запись видео и обработка сигнала велась на ПК 7.

2. Результаты и их анализ

В ходе эксперимента в работе были измерены значения мощности отраженного сигнала (рис. 3б) для трех положений полости относительно системы постоянных магнитов: 1 – в области с $H_1= 0$ А/м, в точке 2, где H_2 имело значение 191 кА/м, и точке 3 с $H_3= 159$ кА/м (рис. 3а). Точка 4 с аномально низким значением $H_4=29,5$ кА/м в экспериментах не рассматривалась. Графики $P(\lambda)$ для чувствительных элементов с диаметрами устья 68 и 125 мкм приведены на рис. 3б и рис. 3в соответственно.

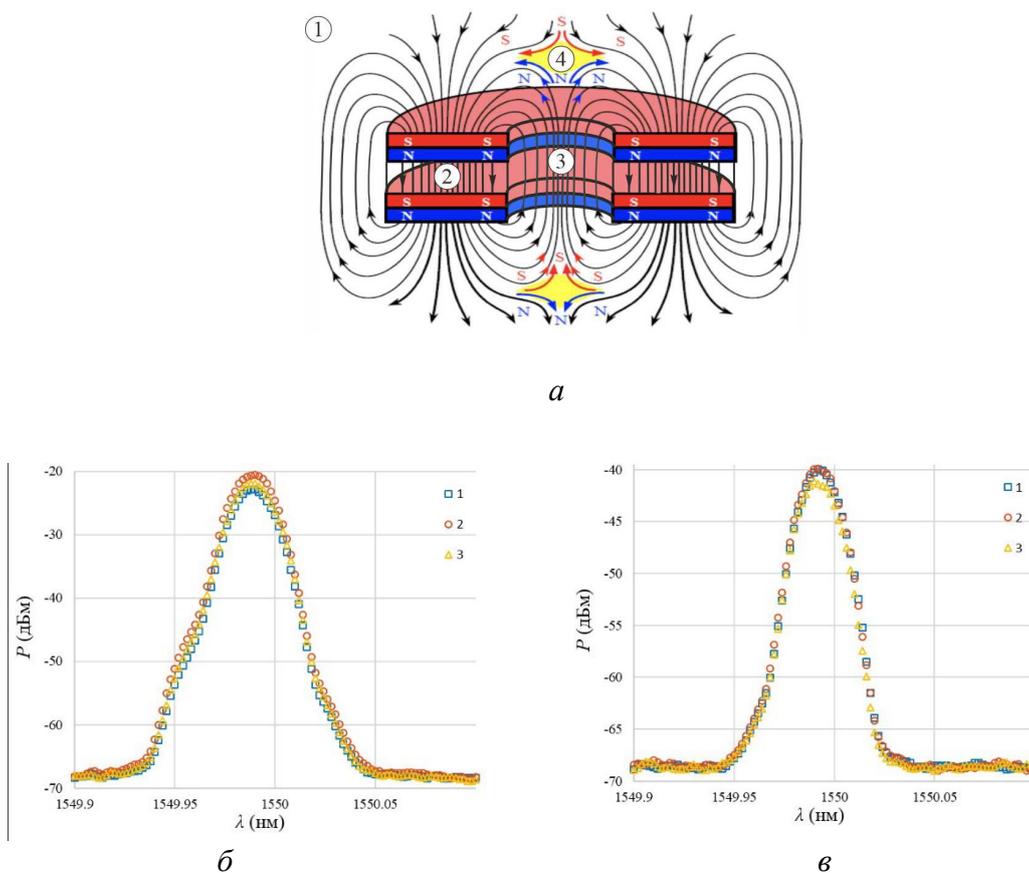


Рис. 3. Силовые линии в системе кольцевых магнитов (а); результаты измерения $P(\lambda)$ для полости с диаметром устья $d=68$ мкм (б), $d=125$ мкм (в)

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что различное позиционирование полости относительно магнитов не влияет на форму и положение пиков оптического спектра. На графиках наблюдается лишь незначительный рост амплитуды мощности отраженного сигнала с ростом напряженности магнитного поля (Таблица 1). При этом большее значение амплитуды детектировалось при использовании полости с меньшим диаметром устья. Также необходимо отметить тот факт, что визуально полость оставалась прозрачной не зависимо от положения чувствительного элемента в системе магнит-волокно во время всего проведения эксперимента.

Таблица 1. Значение мощности сигнала от величины магнитного поля

H , кА/м	P , дБм, $d=68$, мкм	P , дБм, $d=125$, мкм
0	- 22,828	- 40,939
191	- 21,937	- 40,762
159	- 20,615	- 38,824

Заключение

В работе описан процесс изготовления амплитудного оптоволоконного датчика электромагнитного поля в полости микронного размера с использованием жидкого нематического кристалла 5СВ. Ожидалось, что молекулы ЖК, слой которого при нормальных условиях толщиной ≥ 100 мкм обычно слабо прозрачны, под действием внешнего магнитного поля будут менять свои оптические свойства в широких пределах. Однако, в работе было показано незначительное изменение амплитуды сигнала $P(\lambda)$, детектируемого при измерении величины напряжённости магнитного поля. Эффект можно объяснить тем, что введение вещества в каверну на торце волокна микронного размера через иглу диаметром 2 мкм могло механически выстроить вектор директора вдоль стенок полости. Ориентация молекул привела к тому, что кристалл стал прозрачен, а рабочий элемент датчика при этом потерял чувствительность к воздействию внешнего магнитного поля.

В качестве модификации разработанного устройства предлагается заменить нематик 5СВ на холестерик. Для изготовления полости планируется использовать фотонно-кристаллические волокна с сохранением поляризации. Измерения проводить, основываясь на существовании в системе эффекта Фарадея, который вызывает вращение плоскости поляризации света при его распространении через чувствительный к магнитному полю кристалл.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания FSNF-2024-0001.

Список литературы

1. Chen W. Recent Progress of Optical Fiber Fabry-Perot Sensors / W. Chen, L. Xiaohua, W. Zhang, L. Xianming, L. Changrong // Acta Optica Sinica. – 2018. – 38(3). – P. 0328010.
2. Islam M.R. Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review / Islam M.R., Ali M., Lai M.-H., Lim K.-S., Ahmad H. // Sensors. – 2014. – 14. – P. 7451–7488.

3. Ki D. Oh Fiber-optic extrinsic Fabry–Perot dc magnetic field sensor / K.D. Oh, A. Wang, R.O. Claus // *Optics Letters*. – 2004. – 29(18). – P. 2115–2117.
4. Mozafari M. Design and fabrication of piezo-optical Fabry-Perot voltage sensor / Mozafari M., Sanjabi Z., Granpayeh N. // *Proceedings of the Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology* – 2008. – P. 39–40.
5. Chen Y. Recent Progress in MEMS Fiber-Optic Fabry–Perot Pressure Sensors / Y. Chen, D. Lu, H. Xing, H. Ding and et al // *Sensors* – 2024. – 24(4). – P.1079;
6. Humar M. Liquid-crystal-droplet optical microcavities / Humar M. // *Liquid Crystals* – 2016. – 43:13-15. – P. 1937-1950.
7. Chen X. Liquid Crystal-Embedded Tilted Fiber Grating Electric Field Intensity Sensor / Chen X., Du F., Guo T., Lao J. and et al. // *Journal of Lightwave Technology* – 2017. –35(16).
8. Ma M. Highly sensitive temperature sensor based on Sagnac interferometer with liquid crystal photonic crystal fibers / Ma M., Chen H., Li S-G. and et al. // *Optik – International Journal for Light and Electron Optics* – 2019. – 179. – P. 665–671.
9. Kaur Bal H. Optical Fiber Refractive Index, Voltage and Strain Sensors: Fabrication and Applications / Kaur Bal H. // *Centre for Telecommunication and Microelectronics Faculty of Health, Engineering and Science Victoria University* – 2011. – P. 98 –121.
10. Zhou D. Liquid crystal optical fiber sensor based on misaligned core configuration for temperature and mixed volatile organic compound detection / Zhou D., Lan Z., Cao W. and et al. // *Optics & Laser Technology* – 2022. – 156. – 108545.
11. Zhao C. An optical fiber electric field sensor based on polarization-maintaining photonic crystal fiber selectively filled with liquid crystal / Zhao C., Cai L., Zhao Y. // *Microelectronic Engineering* – 2021. – 250. – 111639.
12. Liu Y. Fiber Optic Electric Field Intensity Sensor Based on Liquid Crystal-Filled Photonic Crystal Fiber Incorporated Ring Laser / Liu Y., Lin W., Vai M. I and et al. // *IEEE Photonics Journal* – 2022. – 14(1).
13. Liu Y. Electrically tunable optical fiber device based on hollow-core fiber infiltrated with liquid crystal / Liu Y., Zhao C., Zhang Ya-nan and et al. // *Sensors and Actuators A: Physical* – 2021. – 318. – 112500
14. Гилев В.Г. Температурная зависимость двулучепреломления в нематическом жидком кристалле MBVA / Гилев В.Г., Платунова А.С. // *Вестник пермского университета. Физика*. – 2012. – 2(20). – С. 64-68.
15. Нурмухаметов Д.И. Формирование открытой полости на торце оптического волокна, как элемент чувствительной части универсального датчика Фабри-Перо / Нурмухаметов Д.И., Луценко А.С., Пономарев Р.С., Шмырова А.И. и др. // *Фотон-Экспресс* – 2023. – 5(189).
16. Романов В.П. Пороговые эффекты в жидких кристаллах / Романов В.П. // *Соровский образовательный журнал* – 2001. – 7(1). – С. 96-101.
17. https://imlab.narod.ru/M_Fields/2R_Magnets/2R_Magnets.htm.

FIBER-OPTIC AMPLITUDE SENSOR OF ELECTROMAGNETIC FIELDS BASED ON 5SV LIQUID CRYSTAL

*A.I. Gordeeva*¹, *D.I. Nurmuhametov*^{1,2}, *R.S. Ponomarev*¹

¹ Perm State University

15, Bukireva St., Perm, 614068, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University

29 Komsomolsky pr., Perm, 614990, Russian Federation

Abstract. A new amplitude fiber-optic electromagnetic field sensor based on a micron-sized cavity filled with 5SB liquid nematic crystals has been proposed and tested experimentally. The sensitivity of the sensor has been determined, and options for further improvement have been suggested.

Keywords: fiber optic sensor, magnetic field, liquid crystal.

Статья представлена в редакцию 02.12.2024