

А. А. Чувызгалов^{1}, Д. Г. Гилев¹, К. А. Овчинников¹, В. А. Максименко¹, В. В. Криштон¹*

Влияние магнитного поля на вращение плоскости поляризации излучения в SPUN волокне

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация
* e-mail: chuvyzgalov_anton@mail.ru

Аннотация. В работе обсуждается возможность применения SPUN волокна в волоконно-оптических магнитометрах. Такое волокно имеет свойство сохранять циркулярную поляризацию излучения, проходящего через него. При воздействии на SPUN волокно внешних факторов происходит изменение длины поляризационных биений. Показано, что внешние механические воздействия и приложенное магнитное поле вносят основной вклад в изменение длины поляризационных биений SPUN волокна. В данной работе представлена схема макета, которая позволяет регистрировать внешнее магнитное поле величиной порядка 0,01 Тл.

Ключевые слова: магнитометр, SPUN волокно, длина биений

A. A. Chuvyzgalov^{1}, D. G. Gilev¹, K. A. Ovchinnikov¹, V. A. Maksimenko¹, V. V. Krishtop¹*

Effect of Magnetic Field on the Rotation of the Plane of Polarization of Radiation in SPUN Fiber

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
* e-mail: chuvyzgalov_anton@mail.ru

Abstract. The paper discusses the possibility of using SPUN fiber in fiber-optic magnetometers. Such a fiber has a property to preserve the circular polarization of radiation passing through it. When SPUN fiber is affected by external factors, the length of polarization beats changes. It is shown that external mechanical effects and the applied magnetic field make the main contribution to the change in the length of polarization beats of SPUN fiber. In this paper a layout scheme is presented, which allows to register an external magnetic field of the order of 0.01 Tesla.

Keywords: magnetometer, SPUN fiber, beat length

Введение

Магнитометр - это прибор, который измеряет характеристики магнитного поля, такие как направление, величину или относительные изменения магнитной индукции. Одним из примеров использования магнитометра является измерение намагниченности материалов, например, ферромагнетиков.

Современная тенденция заключается в миниатюризации устройств с сохранением или улучшением их технических характеристик, при уменьшении массогабаритных параметров. Магнитометры представлены различными типами и находят широкое применение в науке и технике, например, поиск подводных лодок, затонувших судов, обнаружение опасности для бурильных машин, в уголь-

ных шахтах, для поиска неразорвавшихся боеприпасов, поиск широкого диапазона месторождений полезных ископаемых и геологических структур [1], медицинские исследования (мониторинг мозга и сердца) [2].

Магнитометры широко используются для измерения магнитного поля Земли и в геофизических исследованиях для обнаружения магнитных аномалий различных типов. Также магнетометры могут использоваться в навигационных системах воздушных судов [3].

Существующие магнитометры можно классифицировать на две категории в зависимости от принципов их функционирования: квантовые и классические [4].

Таблица 1

Виды магнитометров

Магнитометры			
Квантовые		Классические	
Протонные	Оверхаузера	Индукционные	На эффекте Холла
На эффекте магнитного резонанса	На эффекте Джозефсона (СКВИД)	На эффекте Фарадея	Магниторезистивные
Атомный магнитометр на щелочных металлах с оптической накачкой		Магнитостатические	На эффекте Гаусса

Оптические магнитометры на основе эффекта Фарадея представляют собой наиболее перспективное направление развития. Теоретически они обладают высокой точностью измерения индукции магнитного поля (до 10^{-12} Тл) и компактными размерами. Кроме того, они могут использоваться в качестве бесконтактных датчиков тока. Исследование и разработка подобных устройств является актуальной и практически значимой задачей, поскольку в российской промышленности в настоящее время отсутствуют производители подобных датчиков

Методы и материалы

Измерение магнитного поля с помощью волоконной оптики возможно благодаря эффекту Фарадея - магнитооптическому явлению, при котором линейно-поляризованный свет, проходящий через среду под воздействием магнитного поля, испытывает вращение плоскости поляризации (рис. 1).

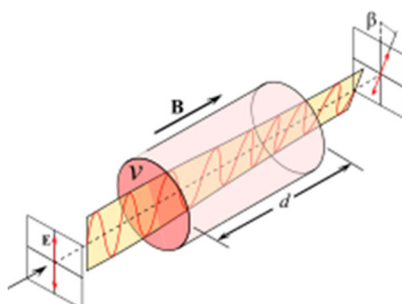


Рис. 1. Вращение плоскости поляризации вследствие воздействия продольного магнитного поля

Под воздействием магнитного поля на световую волну с круговой поляризацией происходит изменение фазовой скорости этой волны. Иными словами, магнитное поле влияет на скорость распространения волны с круговой поляризацией [5] (рис.2).

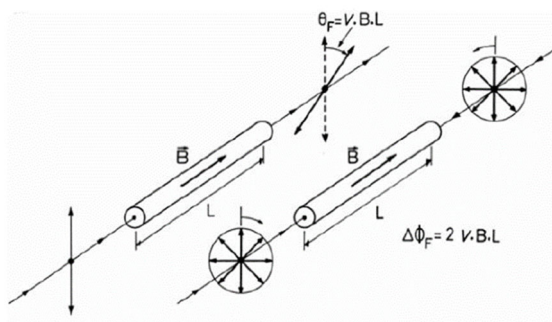


Рис. 2. Вращение линейной и циркулярной плоскости поляризации

Для изготовления высокочувствительного волоконно-оптического магнитометра может использоваться волокно с сохранением циркулярной поляризации (SPUN волокно).

SPUN волокна характеризуются периодом спиральной структуры, т.е. длиной полного оборота волновода (длиной биений линейного двулучепреломления L_b) (рис. 3).

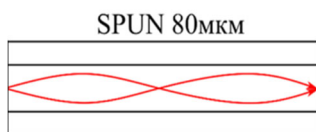


Рис. 3. Структура SPUN волокна

SPUN волокно имеет встроенное линейное двулучепреломление (ДЛП), определяющееся формулой (1).

$$B = n_s - n_f, \quad (1)$$

что эквивалентно длине биений (2)

$$L_b = \frac{2\pi}{\beta}, \quad (2)$$

где $\beta = \frac{2\pi B}{\lambda}$, λ – длина волны в вакууме.

При изгибе SPUN волокна, вносится дополнительная длина биений

$$L_w = \frac{2\pi}{\delta}, \quad (3)$$

Разность констант распространения волн, обозначаемая как δ , определяет поляризацию волн вдоль осей двулучепреломляющего (ДЛП) световода. Величина ДЛП при изгибе зависит от радиуса оболочки световода и радиуса его изгиба. Другими словами, ДЛП увеличивается с уменьшением радиуса изгиба и увеличением радиуса оболочки волокна. Зависимость для SPUN волокна будет выглядеть следующим образом:

$$L_w = \frac{2\pi}{\delta} = 22,792 \frac{\lambda}{n_0^3} \frac{R_w^2}{r_{cl}^2} \sim R_w^2, \quad (4)$$

где R_w^2 – радиус намотки волновода, r_{cl}^2 – радиус оболочки волновода

Под воздействием внешнего магнитного поля в волоконном световоде возникает эффект Фарадея, который приводит к появлению циркулярного двулучепреломления (ДЛП). Это циркулярное ДЛП характеризуется длиной биений (5).

$$L_f = \frac{2\pi}{\gamma}, \quad (5)$$

где $\gamma = 2VH_z$, V – постоянная Верде, H_z – проекция вектора напряженности на направление распространения излучения в волноводе.

Были произведены расчеты длин биений по трем данным факторам и получены следующие результаты: $L_b = 0,0082\text{м}$, $L_w = 3,6288\text{м}$, $L_f = 0,0007\text{м}$.

Можно сделать вывод, что, при воздействии внешним магнитным полем, вносится значительный вклад в изменение длины биений SPUN волокна.

В исследовании была предложена схема магнитометра, аналогичная схеме гироскопа Саньяка. [6] (рис. 4).

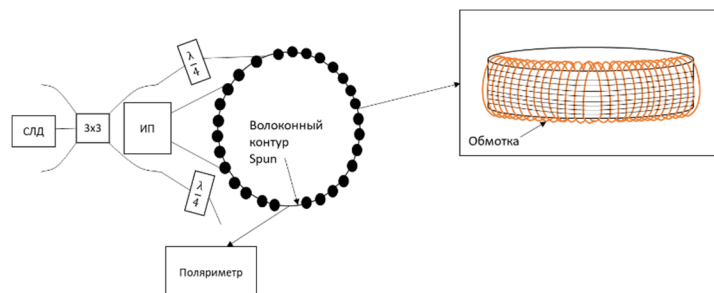


Рис. 4. Схема магнитометра

В данной схеме во всех компонентах используется волокно с сохранением поляризации, кроме волоконного контура, так как последний выполнен из SPUN волокна.

Для преобразования линейно поляризованного света в свет с круговой поляризацией необходим специальный элемент волоконно-оптической системы, называемый ретардером ($\lambda/4$). Ретардер выполняет функцию четвертьволновой пластинки и представлен на рис. 5.

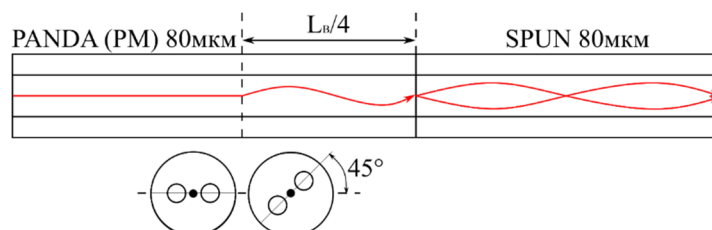


Рис. 5. Схема конструкции ретардера

Круговая поляризация света в волокне типа Panda возникает из-за биения между двумя ортогональными поляризациями. Это происходит потому, что поляризация света не совпадает с собственными состояниями поляризации волокна, что обусловлено анизотропной структурой волокна. Биения поляризации в волокне типа Panda показаны на (рис. 6).

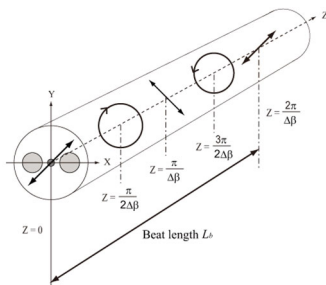


Рис. 6. Биения поляризации в волокне типа Panda

Свет, выходящий из первой части волокна Panda, имеет вертикальную поляризацию. Вторая часть волокна Panda, которая сварена со Spun-волокном, повернута на 45° относительно первой части. Это приводит к разделению света на две ортогонально поляризованные волны с разной скоростью распространения. Подбирая длину второй части волокна так, чтобы она равнялась четверти длины биений L_b , мы получаем на выходе волокна круговую поляризацию.

Результаты

Линейно-поляризованное излучение, выходя из источника, делилось на две ортогонально поляризованные составляющие. Далее линейно-поляризованное излучение преобразовывалось на четверть-волновых пластинках в циркулярно-

поляризованное и регистрировалось на поляриметре. При подаче тока на обмотку вокруг катушки Srip волокна регистрировался поворот плоскости поляризации. Результат представлен на (рис. 7).

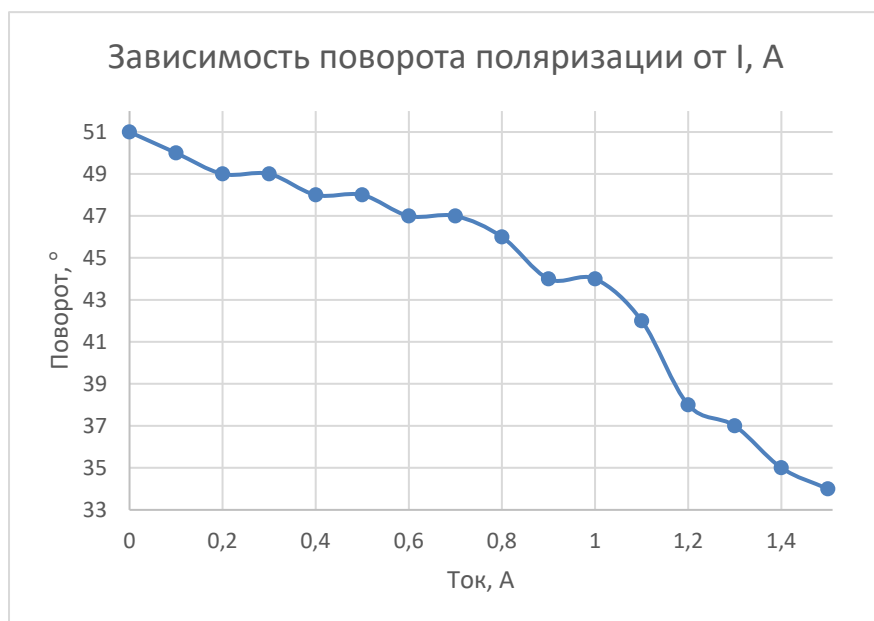


Рис. 7. Зависимость поворота плоскости поляризации в градусах от силы тока в обмотке

Обсуждение

По полученным результатам можно судить о применимости данной схемы в качестве оптического магнитометра. Необходимо варьировать параметры обмотки оптического волокна и обмотки проводника с током.

Заключение

Можно сделать вывод, что теоретическое описание вращения плоскости поляризации подтверждается экспериментально. Недостатком является низкая чувствительность такого магнитометра. В дальнейшем планируется улучшить чувствительность представленной системы.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов Н. А., Рычков А. В. Повышение поисковых возможностей автономных необитаемых подводных аппаратов за счет применения многоканальных магнитометрических систем //Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2021. – №. 1 (218). – С. 59-72.
2. Зуева Е. А. Применение датчиков магнитного поля в биомедицине //Дни науки и инноваций НовГУ. – 2021. – С. 217-224.

3. Быкова В. С., Машошин А. И., Пашкевич И. В. Алгоритм маневрирования автономного необитаемого подводного аппарата при проводке судна через заминированный район //Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2021. – №. 1 (218). – С. 93-101.

4. Афанасьев Ю. В., Студенцов Н. В., Щелкин А. П. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки. Л.: Энергия, 1972. 400

5. Чувызгалов А. А., Гилев Д. Г., Криштоп В. В. миниатюрный магнитометр на основе оптического резонатора //xii международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ. – 2023. – С. 172.

6. Чувызгалов А. А. и др. Волоконно-оптический датчик тока на основе интерферометра Саньяка с волоконно-оптическим кольцевым резонатором //Фотон-экспресс. – 2023. – №. 6 (190). – С. 307-307.

© А. А. Чувызгалов, Д. Г. Гилев, К. А. Овчинников,
В. А. Максименков, В. В. Криштоп, 2024