

УДК 687.586.5

В. И. Смыслов, А. Т. Клементьев, А. Н. Демин

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ТОКА НА ОСНОВЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ
 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ И $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ
ОДНОПРОХОДНОГО ТИПА**

V. I. Smyslov, A. T. Klement'ev, A. N. Demin

**OPTICAL FIBER ELECTRICAL CURRENT TRUNSDUCER WITH
SENSE ELEMENT ONEWAY TYPE ON BASE MAGNETOOPTIKAL
KRISTALLS $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ AND $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$**

А н н о т а ц и я. В настоящее время все более широкое применение находят волоконно-оптические датчики электрического тока. Проведенные расчеты и конструктивная проработка показали, что создание датчиков возможно на основе кристаллов типа $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ с чувствительным элементом однопроходного типа. Такое решение позволяет в максимальной степени удовлетворить требования по миниатюрности, чувствительности, минимальной основной и дополнительной температурной погрешности датчиков.

A b s t r a c t. Currently, more and more applications are fiber-optical sensors of electric current. Calculations and design study has shown that the establishment of the sensors is possible on the basis of crystals of type $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ with a sensitive element of one-pass type. This solution allows the maximum extent possible to meet demands for miniaturization, sensitivity, the minimum basic and additional temperature error of sensor.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрический ток, волоконно-оптический датчик тока, чувствительный элемент, основная погрешность, температурная погрешность.

К e y w o r d s: electrical current, optical fiber current trunduser, sense element, temperature distortion.

Исследованиям и разработкам миниатюрных волоконно-оптических датчиков электрических токов (ВОДТ), в том числе для подвижных объектов, посвящено достаточно большое число работ. Это обусловлено необходимостью разработки новых, более совершенных методов измерения электрических токов в энергетически насыщенном оборудовании, в том числе в цепях электропитания мобильных объектов. Такие ВОДТ обладают рядом преимуществ [1–5], которые вызывают к ним значительный практический интерес и уже обеспечивают их применение. Основными из этих преимуществ являются пассивность чувствительных элементов (отсутствие электрического питания), помехозащищенность, миниатюрность, дистанционность измерений при высокой чувствительности и быстродействии.

С точки зрения указанного, включая миниатюрность конструкции, из всех типов ВОДТ наиболее перспективными являются ВОДТ на основе эффекта Фарадея в оптически активных кристаллах с кубической симметрией $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. Кубическая структура этих кристаллов обуславливает изотропность диэлектрической проницаемости и, как следствие этого, отсутствие естественного линейного двулучепреломления. Отсутствие естественного линейного двулучепреломления, в свою очередь, снимает жесткие ограничения на апертуры световых пучков в кристаллах, что позволяет согласовывать чувствительные элементы с многомодами оптическими трактами с достаточно малыми потерями. Кроме этого, отсутствие есте-

ственного линейного двулучепреломления, которое весьма чувствительно к температуре, существенно может упростить задачу создания термостабильных чувствительных элементов ВОДТ [6, 7]. Кристаллы со структурой силленита обладают относительно низкой температурой плавления (около 930 °C), поэтому выращивание достаточно больших однородных кристаллов высокого оптического качества является относительно несложной задачей.

Кристаллы со структурой силленита и, в частности $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, являются диамагнетиками. Они обладают значительной величиной константы Верде $V = 0,1$ мин/Гс·см для $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $V = 0,188$ мин/Гс·см для $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, что в несколько раз превышает значения V для диамагнитных стекол.

Область прозрачности $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ лежит в диапазоне длин волн $\lambda > 0,5$ мкм. Особенностью данных кристаллов является наличие в них собственного кругового двулучепреломления или оптической активности. Поэтому при анализе эффектов, связанных с модуляцией света электромагнитными полями, необходимо учитывать влияние оптической активности.

Анализ магнитооптической модуляции света в чувствительных элементах ВОДТ электрического тока на основе кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$

Магнитооптическая модуляция света в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ возникает как следствие наводимого магнитным полем H кругового двулучепреломления (эффект Фарадея), приводящего к повороту плоскости поляризации световой волны. Особенностью данных кристаллов является наличие у них естественной оптической активности, поэтому угол поворота плоскости поляризации световой волны, проходящей через кристалл, будет определяться как

$$\varphi = VHL + \Theta L, \quad (1)$$

где V – константа Верде $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$; H – проекция вектора приложенного магнитного поля на направление распространения световой волны в кристалле; L – длина кристалла; Θ – коэффициент оптической активности $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.

Чувствительность ВОДТ к магнитному полю и электрическому току определяется коэффициентом преобразования чувствительного элемента (ЧЭ) или первичного измерительного преобразователя, который пропорционален углу Фарадея φ . Для расчета коэффициента преобразования при заданной интенсивности света на входе ЧЭ необходимо определить состояние поляризации световой волны и ее интенсивности на выходе. Расчет проведен с помощью формализма матриц Джонса.

Матрица Джонса для среды, обладающей как линейным, так и круговым двулучепреломлением (эллиптической фазовой пластины в базисе осей линейного двулучепреломления), имеет вид

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} \cos(mL) + i \frac{\beta}{m} \sin(mL) & \frac{C}{m} \sin(mL) \\ -\frac{C}{m} \sin(mL) & \cos(mL) - i \frac{\beta}{m} \sin(mL) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $m = \sqrt{C^2 + \beta^2}$; C – коэффициент кругового двулучепреломления; β – коэффициент линейного двулучепреломления; L – длина кристалла.

Для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ в магнитном поле суммарное круговое двулучепреломление складывается из собственного и наведенного полем (эффект Фарадея) двулучепреломлений: $C = \Theta + F$, где Θ – коэффициент собственного кругового двулучепреломления (оптической активности) в кристалле; $F = VH$; V – константа Верде; H – проекция приложенного магнитного поля на направление распространения световой волны. В идеальных кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ собственное линейное двулучепреломление β отсутствует, так как кристалл имеет кубическую симметрию и является изотропным. На практике, вследствие несовершенств и дефектов кристаллов, могут возникать внутренние напряжения и, как следствие этого, возникает и наведенное этими эффектами линейное двулучепреломление. Однако для ограниченных длин оптического пути света в кристалле величина его мала по сравнению с величиной собственного

кругового двулучепреломления Θ [8], что позволяет упростить расчеты коэффициентов преобразования чувствительных элементов. На практике применяют три типичные оптические схемы чувствительных элементов ВОДТ: «проходная» схема, когда излучение проходит через кристалл один раз; «отражательная» схема, когда излучение проходит через кристалл дважды туда и обратно, отражаясь от задней грани кристалла чувствительного элемента, и многопроходная схема, в которой луч света несколько раз проходит через кристалл, что позволяет повысить чувствительность ВОДТ за счет увеличения длины оптического пути. Из них наиболее простым с точки зрения практической реализации является схема с однопроводным ЧЭ.

Анализ характеристик однопроводного ЧЭ

Для построения миниатюрных ВОДТ в наибольшей степени подходит схема однопроводного ЧЭ, представленная на рис. 1.

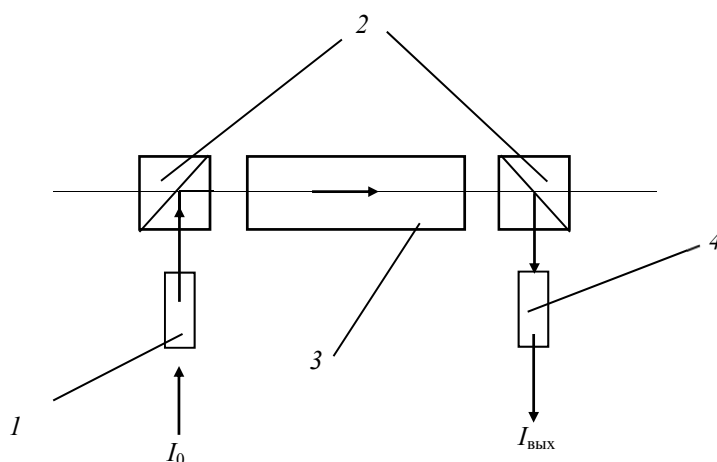


Рис. 1. Оптическая схема чувствительного элемента проходного типа:

I , 4 – градиентные линзы; 2 – поляризационные делительные кубики; 3 – магнитооптический кристалл; I_0 , $I_{\text{вых}}$ – интенсивность света на входе и выходе соответственно

Матрица Джонса для такой схемы имеет вид

$$\hat{M} = \hat{R}(\alpha) \cdot \hat{P} \cdot \hat{R}(-\alpha) \cdot \hat{M}_{BSO} \cdot \hat{P}, \quad (3)$$

где $R(\alpha)$ – матрица поворота на угол α ; α – угол между разрешенными направлениями входного и выходного поляризаторов; $\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ – матрица идеального линейного поляризатора;

$\hat{M}_{BSO}$ – матрица кристалла, описываемая выражением (2). Расчет состояния поляризации и интенсивности света на выходе такой системы, аналогичный предыдущему, с учетом особенностей схемы дает следующие значения для интенсивности света I на выходе:

$$I = I_0 \left[\frac{1}{2} (1 + \cos(2\alpha + 2CL)) - \beta L \frac{\beta}{2C} \sin(2\alpha + 2CL) + \frac{\beta^2}{4C^2} [2 \cos(2\alpha) - \cos(2\alpha + 2CL) + \sin(2\alpha) \sin(2CL)] \right]. \quad (4)$$

Для того чтобы коэффициент преобразования и глубина модуляции магнитным полем были максимальными, необходимо выбрать значения L и α так, чтобы величина $\Theta L + \alpha$ была близка к $\pi/4$. В этом случае

$$I \cong \frac{1}{2} I_0 \left[1 - 2FL \sin(2\alpha + 2\Theta L) + \cos(2\alpha + \Theta L) - \beta L \frac{\beta}{\Theta + F} \sin(2\alpha + 2CL) \right]. \quad (5)$$

При получении выражения (5) мы пренебрегли членами порядка $\frac{\beta^2}{C^2}$.

Из выражения (5) следует, что наличие в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ большой величины собственной оптической активности Θ ослабляет влияние собственного линейного двулучепреломления пропорционально коэффициенту $\frac{\beta}{\Theta}$, что позволяет не учитывать β в дальнейшем рассмотрении.

В случае измерения переменного магнитного поля $H = H_0 \cos(\omega t)$ сигнал представляет собой сумму переменной составляющей с амплитудой, пропорциональной H_0 , и постоянной составляющей, зависящей от меняющейся температуры. Используя полосовой фильтр, мы можем выделить переменную составляющую сигнала на частоте ω и не учитывать в дальнейшем рассмотрении постоянную составляющую сигнала, пропорциональную $\cos(2\Theta L + 2\alpha)$. Следовательно, для переменного магнитного поля H интенсивность I на выходе ЧЭ будет иметь вид

$$I = -I_0 V H L \sin(2\Theta L + 2\alpha). \quad (6)$$

Таким образом, изменение коэффициента преобразования ЧЭ при изменении температуры окружающей среды определяется в основном двумя факторами: температурным дрейфом константы Верде V материала и изменением от температуры величины коэффициента собственной оптической активности Θ .

Для достижения максимальной величины коэффициента преобразования необходимо сориентировать поляризаторы таким образом, чтобы выполнялось соотношение $2\Theta L + 2\alpha = 90^\circ$, где α – угол между разрешенными направлениями входного и выходного поляризаторов. В этом случае температурный коэффициент преобразования ЧЭ будет, как и в отражательной схеме, определяться только дрейфом константы Верде V и составит 1,5 на 100°C . В то же время поскольку V и Θ в выражении (6) имеют температурные коэффициенты противоположных знаков, в принципе, должны существовать условия, при которых температурный дрейф коэффициента преобразования ЧЭ может быть уменьшен. Теоретически для определенных длин кристаллов и ориентаций поляризаторов температурный дрейф ЧЭ может быть снижен до величины $\sim 0,2\%$ на 100°C .

Конструкция однопроходного ЧЭ ВОДТ

Вариант конструкции миниатюрного ЧЭ приведен на рис. 2. Принцип его работы следующий.

Поступающий по входному волокну свет с одной или двумя (если это требуется) длинами волн λ_1 и λ_2 коллимируется градиентной линзой 1, проходит последовательно через поляризатор, кристалл $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, анализатор и далее с помощью градиентной линзы вводится в многомодовое волокно. Основными отличительными особенностями этой конструкции являются ее простота и универсальность. Один из основных элементов ВОДТ – коллиматор. Конструкция коллиматора приведена на рис. 3.

Коллиматор состоит из керамического наконечника волоконно-оптического коннектора LC-типа диаметром 1,25 мм, градиентной линзы и стеклянной или керамической оправы. Внутренний диаметр оправы подобран так, чтобы был приблизительно на 50 мкм больше, чем диаметр градиентной линзы, который составляет 1,5 мм. Достижимые габариты ЧЭ могут составлять до $4 \times 4 \times 35$ мм.

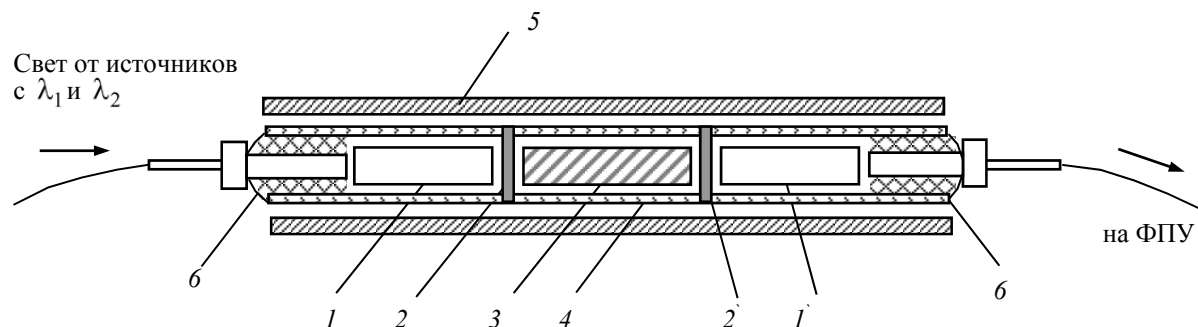


Рис. 2. Конструкция чувствительного элемента однопроходного типа:
1 – коллиматор; 2 – поляризатор; 3 – кристалл $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$; 4 – стеклянная оправы;
5 – защитная кварцевая трубка; 6 – керамический наконечник коллиматора

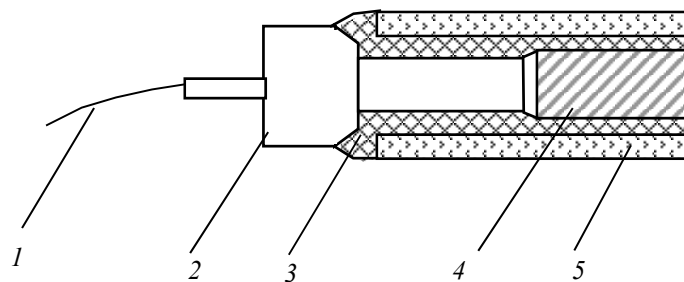


Рис. 3. Схема коллиматора в сборке: 1 – многомодовое оптическое волокно 62,5/125 мкм; 2 – керамический наконечник (ферула) коннектора LC-типа; 3 – эпоксидный клей; 4 – градиентная линза; 5 – стеклянная или керамическая втулка.

Указанный чувствительный элемент подходит для измерений электрического тока как в линейном режиме, так и в качестве индикатора превышения электрического тока над некоторым пороговым значением. Как показали проведенные проработки, такое пороговое значение может составлять ~ 7 мА.

Выводы

Проведенный теоретический анализ и проработка вариантов конструкции ВОДТ для применения на мобильных объектах показали:

1. Целесообразно использовать ВОДТ на основе эффекта Фарадея в кристаллах типа $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ как вариант, максимально удовлетворяющий комплексу требований по миниатюрности, чувствительности, быстродействию, помехозащищенности, пассивности чувствительных элементов (отсутствию электрического питания), отсутствию необходимости разрыва электрической цепи для проведения измерений.

2. Из схем конструкций ЧЭ наиболее предпочтительной является конструкция ЧЭ однопроходного типа, которая при относительной простоте реализации позволяет наиболее просто оптимизировать вышеуказанные требования в сочетании с высокими метрологическими характеристиками.

3. Основным источником дополнительной погрешности ВОДТ является температурная погрешность. Уменьшение температурной погрешности возможно путем соответствующего подбора длин кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и ориентации поляризаторов. Теоретически для определенных длин кристаллов и ориентаций поляризаторов температурный дрейф ЧЭ может быть снижен до величины $\sim 0,8$ % на 100 °С. Дополнительное снижение температурной погрешности может быть достигнуто термостатированием ЧЭ ВОДТ. При использовании чувствительного элемента в качестве индикатора превышения над пороговым значением может быть измерено пороговое значение в ~ 7 мА.

Список литературы

1. A Fiber-Optic Current Sensor for Aerospace Applications / R. L. Patterson, A. N. Rose, D. Tang, G. W. Day // IEEE AES System Magazine, December. – 1990.
2. Development of Optical Current Transformer and Application to Fault Location Systems for Substations / Y. Yamagata, T. Oshi, H. Katsukawa, S. Kato, Y. Sakurai // IEEE Trans. of Power Del. – 1993. – Vol. 8, № 3 (July).
3. Rogers, A. J. Optical fiber current measurement / A. J. Rogers // Intern. Journ. Optoelectronics. – 1998. – Vol. 3, № 5. – P. 120–126.
4. Задворнов, С. А. Многофункциональный оптоэлектронный датчик тока / С. А. Задворнов, А. А. Соколовский // Всероссийская конференция по волоконной оптике (г. Пермь, 10–12 октября 2007 г.). – Пермь, 2007. – С. 16–34.
5. Бурков, В. Д. Научные основы создания устройств и систем волоконно-оптической техники / В. Д. Бурков, Г. А. Иванов. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. – 300 с.
6. Потапов, Т. В. Экспериментальное исследование температурной стабильности датчиков магнитного поля на основе кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ / Т. В. Потапов // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24, № 11. – С. 112–118.

7. Кухта, А. В. Волоконно-оптический датчик магнитного поля и электрического тока с термостабильным чувствительным элементом на основе $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ / А. В. Кухта, В. Т. Потапов, Т. В. Потапов // Экология, мониторинг и рациональное природопользование. – Вып. 294 (II). – М. : Изд-во МГУЛ, 1998. – С. 129–138.
8. Ураксеев, М. А. Информационно-измерительная система с оптическими преобразователями электрического тока и магнитного поля / М. А. Ураксеев, Н. А. Авдоница // Королевские чтения : сб. ст. Всерос. молодежной науч. конф. – Самара : СГАУ, 2009. – С. 26–32.
9. Свидетельство ОФАП об отраслевой регистрации разработки МГУЛ № 2561 от 17.06.2003. Лабораторный комплекс «Математическое моделирование чувствительного элемента волоконно-оптического датчика магнитного поля и электрического тока» / Бурков В. Д. – М., 2003. – 6 с.

Смыслов Владимир Иванович

кандидат технических наук,
начальник отделения,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
E-mail: vladismyslov@yandex.ru

Smyslov Vladimir Ivanovich

candidate of technical sciences,
head of department,
Scientific-production
Association measurement technique

Клементьев Алексей Терентьевич

кандидат технических наук,
начальник сектора,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
E-mail: vladismyslov@yandex.ru

Klement'ev Aleksey Terent'evich

candidate of technical sciences,
the head of the sector,
Scientific-production
Association measurement technique

Демин Андрей Николаевич

аспирант,
Московский государственный университет леса
E-mail: vladismyslov@yandex.ru

Demin Andrey Nikolaevich

postgraduate student,
Moscow State Forest University

УДК 687.586.5

Смыслов, В. И.

Волоконно-оптический датчик электрического тока на основе магнитооптических кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ с чувствительным элементом однопроходного типа / В. И. Смыслов, А. Т. Клементьев, А. Н. Демин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 3 (9). – С. 41–46.