

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОДНОПРОХОДНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ КРИСТАЛЛОВ С КУБИЧЕСКОЙ СИММЕТРИЕЙ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ И $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

В.Д. БУРКОВ, проф. каф. ИИС и ТП МГУЛ, д-р техн. наук,  
Н.А. ХАРИТОНОВ, ст. науч. сотрудник каф. ИИС и ТП МГУЛ, канд. техн. наук,  
А.Н. ДЕМИН, асп. каф. ИИС и ТП МГУЛ

*burkov@msfu.ru*

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»  
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ

*Рассмотрены вопросы возникновения и проявления температурной погрешности волоконно-оптического датчика электрического тока на основе оптически активных кристаллов с кубической симметрией  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  с однопроходной оптической схемой чувствительного элемента (ЧЭ). Такие датчики без дополнительных усовершенствований обладают достаточно высокой дополнительной температурной погрешностью измерения, которая достигает 10–15 % в диапазоне температур 0–100°C, что является весьма существенной величиной. На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований показано, что уменьшение температурной погрешности возможно за счет усовершенствования оптической схемы ЧЭ датчика. Для этого следует использовать зависимости температурных дрейфов коэффициентов преобразования ЧЭ с кристаллом  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  заданной длины от углов между разрешенными состояниями поляризатора и анализатора. Такая зависимость определена для кристаллов различной длины. Полученные зависимости эффективны при применении кристаллов длиной до 10 мм. Температурная стабилизация оказывается возможной и для кристаллов длиной более 10 мм, однако при этом более строгими становятся требования к учету точности угловой юстировки и качеству выполнения оптических элементов ЧЭ датчика. Теоретически возможен подбор такого сочетания длины кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  и взаимной ориентации оптических осей поляризатора и анализатора чувствительного элемента, при котором происходит практически полная компенсация дополнительной температурной погрешности датчика. Однако реально достижимой без использования особо сложных оптических схем ЧЭ является температурная погрешность 0,3–0,8 % в диапазоне температур 0–100°C. Указанная величина погрешности является приемлемой для подавляющего числа практических применений. Дополнительной мерой по снижению температурной погрешности является термостатирование ЧЭ датчика в сочетании с уменьшением габаритно-весовых характеристик датчика.*

*Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, электрический ток, магнитооптический материал, температурная погрешность.*

Из существующих оптических схем волоконно-оптических датчиков электрического тока (ВОДТ) на активных кристаллах с кубической симметрией  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  с точки зрения минимизации габаритно-весовых характеристик предпочтительной является схема однопроходного типа, которая при относительной простоте реализации позволяет наиболее просто оптимизировать требования по минимально-весовым характеристикам в сочетании с достаточно высокими метрологическими характеристиками [1, 2].

В такой схеме поступающее по волокну на вход ЧЭ излучение коллимируется градиентной линзой (коллиматором), преобразуется в линейно-поляризованное с помощью входного поляризатора проходит через кристалл  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  и далее, проходя через выходной поляризатор, с помощью градиен-

тной линзы (второго коллиматора) вводится в выходное оптическое волокно, подключенное к входу фотоприемного устройства (ФПУ). Второй поляризатор, устанавливаемый после кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  на его выходе, выполняет роль анализатора, позволяющего преобразовать поворот плоскости поляризации света в изменение амплитуды (или интенсивности) света на выходе ЧЭ. Угол между осями входного и выходного поляризаторов выбирается таким образом, чтобы получить максимальный коэффициент преобразования поляризационной модуляции на входе ФПУ. В отсутствие магнитного поля свет проходит через ЧЭ, не изменяя направления вектора поляризации, интенсивность света на входе ФПУ является постоянной и определяется углом между осями поляризаторов (при определенных углах – скрещенные поляризаторы).

ры), она может быть равна 0. При наложении на кристалл магнитного поля  $\vec{H}$ , направление поляризации света изменяется, что приводит к изменению интенсивности света на выходе ЧЭ. Таким образом, с помощью магнитного поля осуществляется модуляция света, проходящего через ЧЭ [10, 11].

Однако, как показала практика, однопроводные датчики без дополнительных усовершенствований обладают достаточно высокой дополнительной температурной погрешностью измерения, доходящей до 10–15 % в диапазоне температур 0–100 °С [3, 4, 7].

Эффективным путем уменьшения такой погрешности является усовершенствование его оптической схемы. Действительно, уменьшение погрешности возможно за счет использования зависимости температурных дрейфов коэффициентов преобразования чувствительного элемента с кристаллом  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  заданной длины от углов между разрешенными состояниями поляризатора и анализатора. При этом возможен подбор такого сочетания длины кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  и взаимной ориентации оптических осей поляризатора и анализатора чувствительного элемента, при котором происходит практически полная компенсация дополнительной температурной погрешности датчика ВОДТ [6–8].

Матрица однопроводного ВОДТ описывается следующим выражением [5, 7]

$$\hat{M} = \hat{R}(\alpha) \cdot \hat{P} \cdot \hat{R}(-\alpha) \cdot \hat{M}_{\text{BSO}} \cdot \hat{P}, \quad (1)$$

где

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

– матрица идеального линейного поляризатора,

$\hat{M}_{\text{BSO}}$  – матрица кристалла;

$R(\alpha)$  – матрица поворота на угол  $\alpha$ ;

$\alpha$  – угол между разрешенными направлениями входного и выходного поляризаторов.

Состояние поляризации света на выходе такой системы описывается вектором Максвелла  $\vec{A}$ , который имеет следующий вид

$$A = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \hat{R}(\alpha) \cdot \hat{P} \cdot \hat{R}(-\alpha) \cdot \hat{M}_{\text{BSO}} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cdot \frac{\left( m \cdot \cos(\alpha) \cos(mL) - C \cdot \sin(\alpha) \times \right.}{m} \\ \left. \times \sin(mL) + i\beta \cdot \cos(\alpha) \sin(mL) \right)}{\sin(\alpha) \cdot \frac{\left( m \cdot \cos(\alpha) \cos(mL) - C \cdot \sin(\alpha) \times \right.}{m} \\ \left. \times \sin(mL) + i\beta \cdot \cos(\alpha) \sin(mL) \right)} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Интенсивность излучения на выходе датчика записывается следующим образом

$$I = \vec{A}^* \cdot \vec{A} = I_0 \frac{1}{\sqrt{C^2 + \beta^2}} \cdot \left[ \left( \sqrt{C^2 + \beta^2} \right) \times \cos(\alpha) \cos \left( \sqrt{C^2 + \beta^2} L \right) - C \sin(\alpha) \times \sin \left( \sqrt{C^2 + \beta^2} L \right) + \beta^2 \cos^2(\alpha) \sin^2 \left( \sqrt{C^2 + \beta^2} L \right) \right] \quad (3)$$

где:  $\vec{A}^*$  – эрмитово сопряжение;

$I_0$  – интенсивность излучения на входе чувствительного элемента.

Используя, что  $\beta \ll C$  и при условии, что  $\beta L \ll \pi/2$ , получим

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

Для того чтобы глубина модуляции магнитным полем была максимальной, необходимо выбрать значения  $L$  и  $\alpha$  так, чтобы величина  $\Theta L + \alpha$  была близка к  $\pi/4$ . Откуда следует, что выражение (4) можно записать в виде:

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

При получении выражения (4) мы пренебрегли членом порядка  $\beta^2/C^2$ .

Проведем оценку влияния температурного дрейфа линейного двулучепреломления  $\beta$  на величину интенсивности излучения. Из выражения (4) можно записать:

$$\Delta p \cong \left( (\beta + \Delta\beta) L \frac{\beta + \Delta\beta}{\Theta + F} - \beta L \frac{\beta}{\Theta + F} \right) \times \sin(2\alpha + 2CL) \cong 2 \frac{\Delta\beta}{\beta} \beta L \frac{\beta}{\Theta} \sin(2\alpha + 2CL) \quad (6)$$

где  $\Delta\beta = 10^{-3}$  рад/мм – величина дрейфа линейного двулучепреломления на 100 °С,  $\beta = 10^{-2}$  рад/мм. Здесь мы пренебрегли членами порядка  $\Delta\beta^2$  и использовали то, что  $F \ll \Theta$ .

Из (6) следует, что

$$\Delta I_p \leq 2 \frac{\Delta \beta}{\beta} \beta L \frac{\beta}{\Theta}$$

для длины кристалла  $L \sim 10$  мм эта величина не превышает 0,01 % в интервале температур от 0 до 100 °С, что мало по сравнению с отклонениями, вызванными температурной зависимостью константы Верде и величины собственной оптической активности.

Таким образом, наличие в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  большей, по сравнению с собственным линейным двулучепределением, собственной оптической активности ослабляет влияние собственного линейного двулучепределения пропорционально коэффициенту  $\beta/\Theta$ , что позволяет не учитывать линейное двулучепределение в дальнейшем рассмотрении.

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

$$I = \frac{1}{2} I_0 [1 - 2VHL \cdot \sin(2\Theta L + 2\alpha)] \quad (7)$$

Изменение коэффициента преобразования датчика 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  $\Theta$ . В первом приближении зависимость коэффициента преобразования от температуры можно записать в виде

$$S = \frac{1}{I_0} \left| \frac{dI}{dH} \right|_{H=0}$$

$$S(t) = \left( V_0 + \frac{\Delta V}{\Delta t} t \right) L \sin \left( 2 \left( \Theta_0 + \frac{\Delta \Theta}{\Delta t} t \right) L + 2\alpha \right) \quad (8)$$

где  $V_0$  и  $\Theta_0$  значения, взятые при  $t_0 = 20$  °С.

Запишем величину относительного отклонения коэффициента преобразования  $S$  от температуры в виде

$$\Delta S(t) = \left| \frac{S(t) - S(t_0)}{S(t_0)} \right| = \left| \frac{\left( 1 + \frac{1}{V_0} + \frac{\Delta V}{\Delta t} t \right) \sin \left( 2 \left( \Theta L + \alpha + \frac{\Delta \Theta}{\Delta t} L t \right) \right) - \sin(2(\Theta L + \alpha))}{\sin(2(\Theta L + \alpha))} \right| \quad (9)$$

Рассмотрим температурные характеристики датчика, выходной поляризатор которого сориентирован относительно входного так, что глубина модуляции максимальна. Это означает, что  $2(\Theta L + \alpha) = 90^\circ$  ( $\alpha$  – угол между разрешенными направлениями входного и выходного поляризаторов, который мы можем выбирать по собственному усмотрению). Для такого датчика относительное отклонение коэффициента преобразования от температуры будет иметь вид

$$\Delta S(t) = \left| \left( 1 + \frac{1}{V_0} + \frac{\Delta V}{\Delta t} t \right) \cos \left( 2 \frac{\Delta \Theta}{\Delta t} L t \right) - 1 \right| \quad (10)$$

Разложим (10) в ряд по  $t$

$$\Delta S(t) \cong \frac{1}{V_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} t + \Theta(t^2).$$

Откуда следует, что величина относительного отклонения коэффициента преобразования от температуры для датчика, настроенного на максимальную глубину модуляции, определяется только отклонением от температуры величины константы Верде материала. Для датчика на основе  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  эта величина составляет ~15 % на 100 °С. Такая величина температурного отклонения для некоторых применений является недостаточной.

Рассмотрим возможность улучшения температурных характеристик данного датчика. Для этого найдем такое соотношение между длиной кристалла чувствительного элемента  $L$  и углом между разрешенными направлениями поляризаторов  $\alpha$ , при котором, отклонение от температуры величины константы Верде  $V$  будет компенсироваться отклонением от температуры величины оптической активности кристалла  $\Theta$ . Для этого разложим выражение (9) в ряд по  $t$

$$\Delta S(t) \cong \left( \frac{1}{V_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} + 2 \frac{\Delta \Theta}{\Delta t} L \cdot \text{ctg} (2(\Theta L + \alpha)) \right) \cdot t + \left( \frac{2}{V_0} \frac{\Delta \Theta \Delta V}{\Delta t^2} L \times \text{ctg} (2(\Theta L + \alpha)) - 2 \frac{\Delta \Theta^2}{\Delta t^2} \cdot L^2 \right) \cdot t^2 + \Theta (t^3) \quad (11)$$

Найдем такие  $L$  и  $\alpha$ , при которых выполняется условие

$$\frac{1}{V_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} + 2 \frac{\Delta \Theta}{\Delta t} L \cdot \text{ctg} (2(\Theta L + 2\alpha)) = 0. \quad (12)$$

Решив (12) относительно  $\alpha$  получим

$$\alpha(L) = -\Theta \cdot L - \frac{1}{2} \alpha \cdot \tan \left( 2V_0 L \frac{\Delta \Theta}{\Delta t} \cdot \left( \frac{\Delta V}{\Delta t} \right)^{-1} \right). \quad (13)$$

При выполнении условия (12) температурные характеристики датчика определяются вторым членом в выражении (11), при длине кристалла 5 мм величина температурного отклонения составляет  $\sim 0,2\%$  на  $100^\circ\text{C}$ .

Таким образом, подобрав угол между разрешенными направлениями поляризаторов  $\alpha$  для конкретной длины кристалла  $L$ , в соответствии с (13) можно существенно улучшить температурные характеристики датчика.

Очевидно, что при увеличении длины кристалла чувствительного элемента до некоторого значения, величина второго порядка в разложении (11) станет сравнимой с величиной первого порядка. Для определения этого значения проведем следующую оценку: возьмем случай, когда поляризаторы ориентированы так, что  $2(\Theta L + \alpha) = \pi/2$  (максимальный коэффициент преобразования), тогда из (11) можно записать

$$\Delta S(t) \cong \frac{1}{V_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot t - 2 \frac{\Delta \Theta^2}{\Delta t^2} \cdot L^2 \cdot t^2 + \Theta (t^3). \quad (14)$$

Зависимости первого и второго членов разложения (14) от  $L$  при изменении температуры  $t$  в диапазоне  $0-100^\circ\text{C}$  представлены на рисунке 1, величина первого порядка не зависит от длины кристалла и составляет  $0,015$ , величина второго порядка достигает значения  $0,015$  при  $L = 17\text{ мм}$ . Из рис. 1 можно заключить, что проделанные выше расчеты имеют смысл только для длин кристаллов не превышающих  $10\text{ мм}$ . Расчеты по оптимизации датчика ВОДТ с чувствительными элементами большей длины приведены ниже.

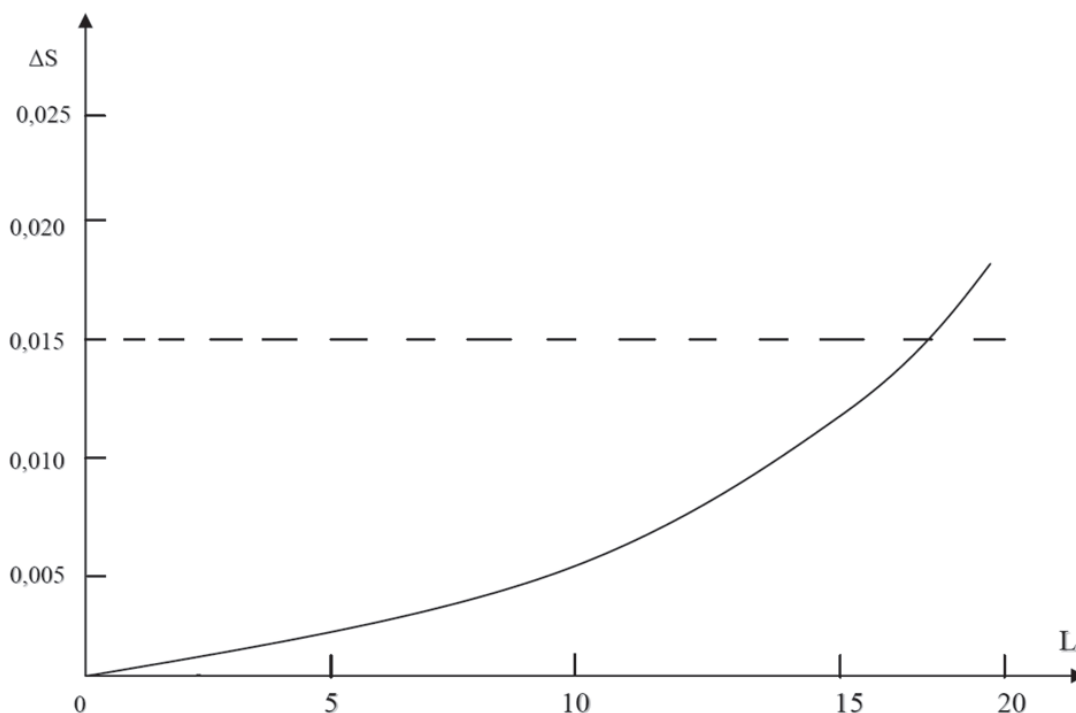


Рис. 1. Зависимость величины температурного дрейфа от длины кристалла: — — первый порядок; \_\_\_\_\_ второй порядок

Fig. 1. The dependence of the temperature drift on the crystal length: — — the first order; \_\_\_\_\_ second order



Полученное в выражении (13) позволяет скомпенсировать влияние температурных дрейфов константы Верде и коэффициента оптической активности на коэффициент преобразования чувствительного элемента в первом порядке. Этого, однако, недостаточно когда длина кристалла превышает 5 мм.

Для проверки и уточнения приближенных аналитических расчетов, приведенных выше, а также для исследования возможности термостабилизации чувствительных элементов с более длинными кристаллами было проведено численное моделирование температурных дрейфов коэффициента преобразования чувствительного элемента ВОД для различных длин кристалла. Для этого интенсивность излучения на выходе чувствительного элемента была записана следующим образом

$$I(H, L, \alpha, \Delta t) = [\bar{A}(H, L, \alpha, \Delta t)]^+ \cdot \bar{A}(H, L, \alpha, \Delta t), \quad (15)$$

где  $H$  – проекция магнитного поля на направление распространения света;

$L$  – длина кристалла;

$\alpha$  – угол между разрешенными направлениями поляризаторов;

$\Delta t$  – отклонение температуры от «комнатной»;

$\bar{A}$  – вектор Максвелла

$$A(H, L, \alpha, \Delta t) = \hat{P}(\alpha) \cdot \hat{M}_{BSO}(H, L, \Delta t) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$\hat{P}(\alpha) = \hat{R}(-\alpha) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \hat{R}(\alpha)$$

– матрица Джонса идеального линейного поляризатора, разрешенное направление которого развернуто на угол  $\alpha$ ;

$\hat{R}(\alpha)$  – матрица поворота;

$$\hat{M}_{BSO}(H, L, \Delta t) =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(mL) + i \frac{\beta}{m} \sin(mL) & \frac{C}{m} \sin(mL) \\ -\frac{C}{m} \sin(mL) & \cos(mL) - i \frac{\beta}{m} \sin(mL) \end{pmatrix} \quad (17)$$

– матрица Джонса кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ,

где:

$$m(H, \Delta t) = \sqrt{(C(H, \Delta t))^2 + \left(\beta(\Delta t^2)\right)^2},$$

$C(H, \Delta t) = \Theta(\Delta t) + V(\Delta t)H$  – коэффициент суммарного кругового двулучепреломления;

$$\Theta(\Delta t) = \Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{\Delta t} \Delta t$$

– коэффициент оптической активности кристалла,

$$V(\Delta t) = V_0 + \frac{\Delta V}{\Delta t} \Delta t$$

– константа Верде;

$$\beta(\Delta t) = \beta_0 + \frac{\Delta\beta}{\Delta t} \Delta t$$

– коэффициент собственного линейного двулучепреломления:  $\Theta_0, V_0, \beta_0$  – значения, взятые при комнатной температуре;

$$\frac{\Delta\Theta}{\Delta t}, \frac{\Delta V}{\Delta t}, \frac{\Delta\beta}{\Delta t}$$

– коэффициенты температурной зависимости констант  $\Theta_0, V_0, \beta_0$ ; соответственно, значения этих констант и их температурных коэффициентов были приведены ранее;

$H$  – проекция вектора магнитного поля на направление распространения света в кристалле;

$L$  – длина кристалла.

В соответствии с записанными выражениями была сформирована подпрограмма-функция  $I$  с аргументами  $H, L, \alpha, \Delta t$ , затем в соответствии с выражением

$$S = \frac{1}{I_0} \left| \frac{dI}{dH} \right|_{H=0}$$

вычислялось значение коэффициента преобразования  $S$  для конкретных значений  $L, \alpha, \Delta$ . Численное дифференцирование функции  $I$  при  $H=0$  производилось при помощи подпрограммы из состава математической библиотеки MS Fortran PowerStation 4.0, заложенная в программу точность вычислений составляла 0,01 %. Для проверки правильности работы программы была построена зависимость  $S/V_0 L$  от  $\Theta L + \alpha$ , для  $L = 3$  мм (рис. 2). Как видно из рисунка, полученные данные подтверждают проведенными ранее расчетами (7).

На рис. 3 представлена зависимость относительного дрейфа коэффициента преобразования

$$\Delta S = (S_{\max} - S_{\min}) / S_{\max} \times 100\%$$

в диапазоне  $\Delta t$  0–100 °C от угла  $\Theta L + \alpha$ , для чувствительного элемента с длиной кристалла 3 мм.

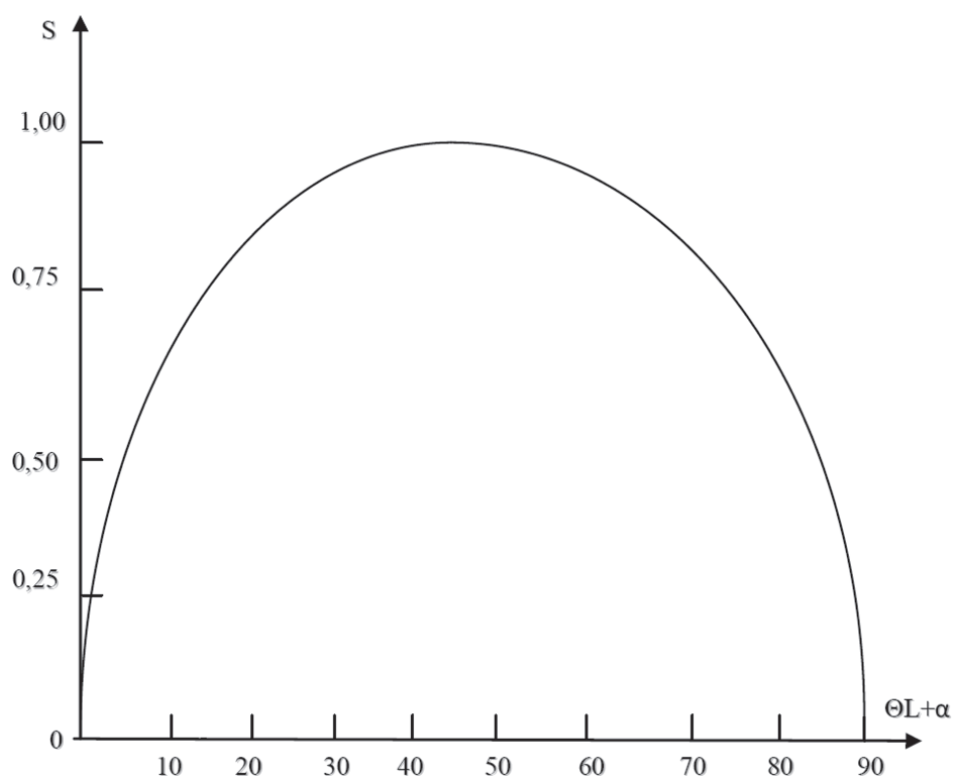


Рис. 2. Зависимость нормированного коэффициента преобразования от угла  $\Theta L + \alpha$  для кристалла длиной 3 мм, построенная для проверки метода численного расчета

Fig. 2. Dependence of the normalized conversion factor on the corner  $\Theta L + \alpha$  crystal 3 mm long, built to test the method of numerical calculation

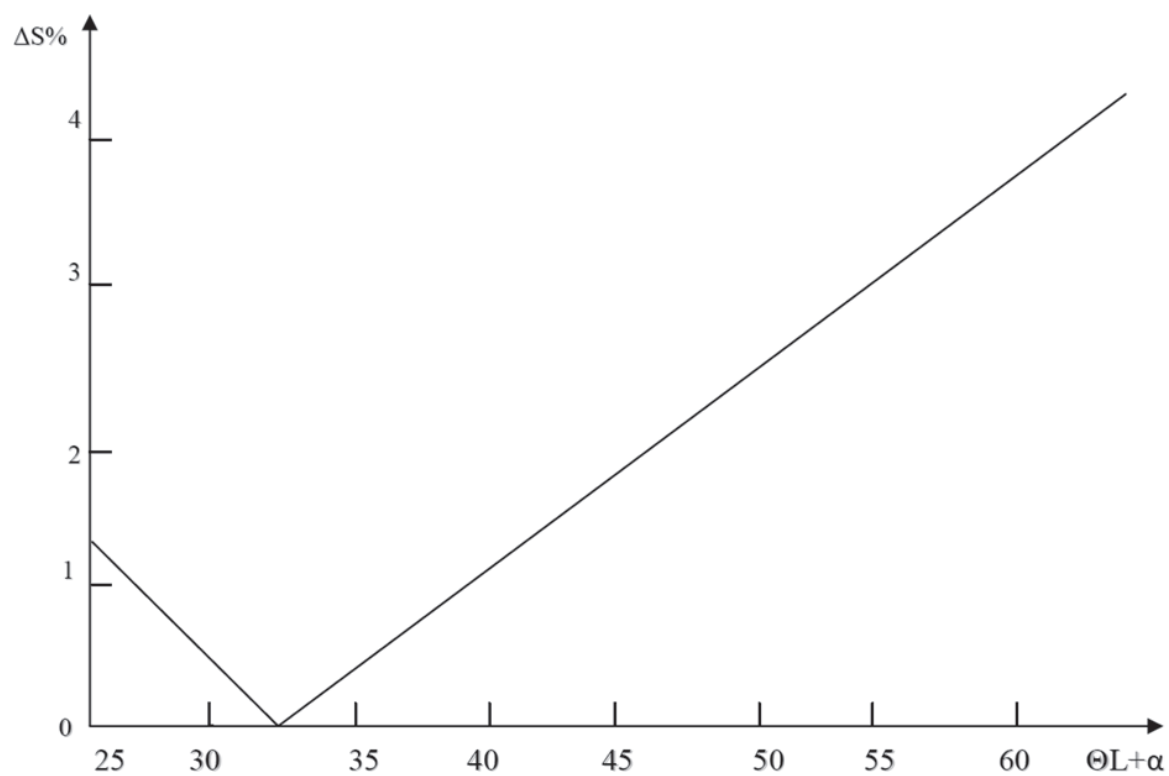


Рис. 3. Зависимость величины температурного дрейфа от угла  $\Theta L + \alpha$  для кристалла длиной 3 мм

Fig. 3. The dependence of the temperature drift on the angle  $\Theta L + \alpha$  for a crystal length of 3 mm

Из рисунков видно, что минимальные значения температурного дрейфа достигаются при отклонении угла от  $45^\circ$  на  $12,5^\circ$  для 3 мм.

Таким образом, значения температурного дрейфа и угла между поляризаторами чувствительного элемента с кристаллом длиной 3 мм, полученные с помощью численной модели, практически совпадают с соответствующими значениями, полученными по формуле (13).

Дополнительными путями уменьшения температурной погрешности датчика ВОДТ также являются: уменьшение габаритов датчика [8], что приводит к уменьшению неравномерности распределения температуры по датчику ВОДТ и позволяет считать температуру датчика постоянной по всему объему его конструкции и ввести температурную поправку в результат измерения на основании контроля температуры чувствительного элемента; термостатирование чувствительного элемента датчика ВОДТ позволяет считать температуру датчика постоянной и полностью исключить температурную погрешность измерения.

### Заключение

1. Из существующих оптических схем ВОДТ на активных кристаллах с кубической симметрией  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  (однопроходная схема, схема с отражением, многопроходная схема) с точки зрения минимизации габаритно-весовых характеристик предпочтительной является схема однопроходного типа, которая при относительной простоте реализации имеет высокие метрологические характеристики.

2. Применение обычной однопроходной оптической схемы для ряда применений с точки зрения метрологии ограничено повышенной дополнительной температурной погрешностью измерения, достигающей 10–15 % в диапазоне рабочих температур 0–100 °С.

3. Эффективным путем уменьшения дополнительной температурной погрешности является усовершенствование оптической схемы ВОДТ. Уменьшение погрешности возможно за счет использования зависимости температурных дрейфов коэффициентов

преобразования чувствительного элемента с кристаллом  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  заданной длины от углов между разрешенными состояниями поляризатора и анализатора чувствительного элемента датчика. Теоретически возможно полное исключение дополнительной температурной погрешности. Практически достижимой без использования особо сложных технических решений является погрешность 0,3–0,8 % в диапазоне рабочих температур 0–100 °С.

4. Дополнительной мерой по снижению температурной погрешности является термостатирование чувствительного элемента ВОДТ в сочетании с уменьшением габаритно-весовых характеристик.

### Библиографический список

1. Бурков, В.Д. Научные основы создания устройств и систем волоконно-оптической техники. Монография / В.Д. Бурков, Г.А. Иванов. – М.: МГУЛ, 2008. – 332 с.
2. Бурков, В.Д. Экоинформатика: Алгоритмы, методы и технологии. Монография / В.Д. Бурков, В.Ф. Крапивин. – М.: МГУЛ, 2009. – 431 с.
3. Бурков, В.Д. и др. Теория, расчет и проектирование приборов и систем: лабораторный практикум. – М.: МГУЛ, 2010. – 56 с.
4. Бабаев, О.Г. Методика исследования магнитооптического эффекта в кристаллах BSO для датчика магнитного поля / О.Г. Бабаев, С.А. Матюнин, Г.И. Леонович // Фотон-экспресс. – 2013. – № 6. – С. 66–67.
5. Бурков, В.Д. Теория, расчет и проектирования волоконно-оптических приборов и систем: практикум / В.Д. Бурков, В.Т. Потапов. – М.: МГУЛ, 2011. – 82 с.
6. Бурков, В.Д. Отработка технологических параметров и режимов изготовления волоконно-оптических световодов методом регрессионного анализа. Учебно-методическое пособие / В.Д. Бурков и др. – М.: МГУЛ, 2013. – 102 с.
7. Бурков, В.Д. Лабораторный комплекс «математическое моделирование чувствительного элемента волоконно-оптического датчика магнитного поля и электрического тока». Свидетельство ОФАП об отраслевой регистрации разработки МГУЛ № 2561 от 17.06.2003 / В.Д. Бурков и др. – 36 с.
8. Бурков, В.Д. Лабораторный комплекс «Математическое моделирование технологического процесса измерения параметров волоконно-оптических световодов и волоконно-оптических кабелей. Свидетельство ОФАП об отраслевой регистрации разработки МГУЛ № 2562 от 17.06.2003 / В.Д. Бурков и др. – 38 с.
9. Бурков, В.Д. Миниатюрный волоконно-оптический датчик электрического тока / В.Д. Бурков, А.Н. Демин // Сб. аспирантов и докторантов МГУЛ. – 2013. – С. 34–38.
10. Бурков, В.Д. Анализ и выбор оптимальной системы волоконно-оптического датчика электрического тока / В.Д. Бурков, Н.А. Харитонов, А.Н. Демин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – № 2. – 2014. – С. 225–257.
11. Бурков, В.Д. Волоконно-оптический датчик магнитного поля и электрического тока. Патент РФ №2213356, 2003.

THE WAYS TO REDUCE THE TEMPERATURE ERROR OF A SINGLE PASS FIBER-OPTIC SENSOR BASED ON THE OPTICALLY ACTIVE CRYSTAL WITH THE CUBIC SYMMETRY  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  AND  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

Burkov V.D., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.); Kharitonov N.A., Senior Researcher MSFU, Ph.D (Tech.); Demin A.N., pg. MSFU

burkov@msfu.ac.ru

Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moscow reg., Russia

*The issues of emergence and manifestation of a temperature fault of an optical fiber electric current sensor on the basis of the optically active crystals with cubic symmetry  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  and  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  with a single pass optical scheme of the sensing element (SE). Such sensors have a high enough temperature measurement fault which reaches 10-15 % in the temperature range of 0-100° C without additional improvements. That is a substantial amount. The theoretical analysis and experimental studies have shown that reducing the temperature fault can be reached through improvements in the optical scheme of the SE sensor. It should be used according to the temperature drifts of SE transformation coefficients with a crystal  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  of specified length from the angles within the allowed points of the polarizer and analyzer. This dependence is determined for crystals of different lengths. The obtained dependence can be used effectively with crystal length up to 10 mm. Temperature stabilization is possible for crystals with length of more than 10 mm, however, more stringent requirements including accuracy of angular alignment and the quality of optical elements SE of the sensor are needed. Theoretically, it is possible to select a combination of the crystal length  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  and mutual orientation of the optical axes of the polarizer and analyzer of the sensing element, in which there is almost complete compensation for additional temperature error sensor. However, the achievable temperature error without the use of particularly complex optical SE schemes, is of 0,3–0,8 % in the temperature range of 0-100 ° C. This fault value is acceptable for most practical applications. An additional measure to reduce the temperature fault is the sensor thermal regulation in combination with reduced weight and size characteristics of the sensor.*

*Keywords:* fiber-optic sensor; electric current, magneto-optical material, temperature error.

#### References

1. Burkov V.D., Ivanov G.A. *Nauchnye osnovy sozdaniya ustroystv i sistem volokonno-opticheskoy tekhniki* [Scientific basis for the development of devices and systems, optical fiber equipment]. Moscow: MSFU, 2008, 332 p.
2. Burkov V.D., Krapivin V.F. *Ekoinformatika: Algoritmy, metody i tekhnologii* [Ecoinformatics: Algorithms, methods and technologies]. Moscow: MSFU, 2009, 431 p.
3. Burkov V.D. and other. *Teoriya, raschet i proektirovanie priborov i sistem* [Theory, calculation and design of devices and systems]. Moscow: MSFU, 2010, 56 p.
4. Babaev O.G., Matyunin S.A., Leonovich G.I. *Metodika issledovaniya magnitoopticheskogo effekta v kristallakh BSO dlya datchika magnitnogo polya* [Research methodology the magneto-optical effect in BSO crystals for magnetic field sensor]. Photon-Express-science, 2013, No.6, pp. 66-67.
5. Burkov V.D., Potapov V.T. *Otrabotka tekhnologicheskikh parametrov i rezhimov izgotovleniya volokonno-opticheskikh svetovodov metodom regressiionnogo analiza* [The theory, calculation and design of fiber-optic devices and systems: workshop]. Moscow: MSFU, 2011, 82p.
6. Burkov V.D. and other. *Otrabotka texnologicheskix parametrov i rezhimov izgotovleniya volokonno-opticheskix svetovodov metodom regressiionnogo analiza. uchebno-metodicheskoe posobie* [Development of technological parameters and modes of production of fiber-optic fibers by regression analysis. Educational-methodical manual]. Moscow: MSFU, 2013, 102 p.
7. Burkov V.D. and other. *Laboratornyy kompleks «matematicheskoe modelirovanie chuvstvitel'nogo elementa volokonno-opticheskogo datchika magnitnogo polya i elektricheskogo toka»* [Laboratory complex «Mathematical modeling of the sensing element of a fiber-optic magnetic field sensor and the electric current»]. Testimony OFAP about branch registration development at MSFU No. 2561 from 17.06.2003, 2010, 36 p.
8. Burkov V.D. and other. *Laboratornyy kompleks «Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa izmereniya parametrov volokonno-opticheskikh svetovodov i volokonno-opticheskikh kabeley»* [The laboratory complex «Modeling process measurement parameters of optical fiber optical fibers and fiber-optic cables»]. Testimony OFAP about branch registration development at MSFU No. 2562 from 17.06.2003, 38 p.
9. Burkov V.D., Demin A.N. *Miniatyurnyy volokonno-opticheskiy datchik elektricheskogo toka* [Miniature fiber optic sensor of the electric current]. *Sb. aspirantov i doktorantov MSFU (2014)* [Sat. graduate and doctoral students at MSFU (2014)]. Moscow: MSFU, 2013, pp. 34-38.
10. Burkov V.D., Xaritonov N.A., Demin A.N. *Analiz i vybor optimal'noy sistemy volokonno-opticheskogo datchika elektricheskogo toka* [Analysis and selection of the optimal system of fiber-optic sensor of the electric current]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, No. 2, 2014, pp. 225-257.
11. Burkov V.D. and other. *Volokonno-opticheskiy datchik magnitnogo polya i elektricheskogo toka* [Fiber-optic magnetic field sensor and the electric current]. Patent RF No. 2213356, 2003.