

06;07;12

## Экспериментальное исследование температурной стабильности датчиков магнитного поля на основе кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$

© Т.В. Потапов

Институт радиотехники и электроники РАН (Фрязинская часть)

Поступило в Редакцию 15 октября 1997 г.

Экспериментально исследованы температурные характеристики коэффициента преобразования чувствительного элемента волоконно-оптического датчика магнитного поля на основе кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . Создан макет чувствительного элемента датчика магнитного поля, температурный дрейф коэффициента преобразования которого составляет  $\sim 0.15\%$  в интервале изменения температур от  $+15$  до  $+70^\circ\text{C}$ .

Известно, что одной из проблем, сдерживающих применение волоконно-оптических датчиков магнитного поля и электрического тока на основе кристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  в измерительных системах, является относительно высокая чувствительность коэффициента преобразования датчика к изменениям температуры окружающей среды. Поэтому в последнее время значительное число работ посвящено решению проблемы создания термостабильных чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков магнитных полей и электрических токов [1–3]. В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований температурной зависимости коэффициента магнитооптической модуляции в  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , определяющего чувствительность и стабильность датчика на основе этого кристалла.

В работе [4] было теоретически показано, что для однопроходного датчика переменного магнитного поля, использующего эффект Фарадея, в  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  интенсивность излучения  $I$  на выходе чувствительного элемента будет иметь вид

$$I = \frac{1}{2}I_0 \left[ 1 - 2 \cdot VHL \cdot \sin(2 \cdot \theta L + 2 \cdot \alpha) \right], \quad (1)$$

где  $I_0$  — интенсивность излучения на входе чувствительного элемента;  $V, \theta$  — константа Верде и коэффициент оптической активности соответственно (их значения приведены в таблице);  $L$  — длина кристалла;  $H$  — проекция вектора напряженности магнитного поля на направление распространения света в кристалле;  $\alpha$  — угол между разрешенными направлениями входного и выходного поляризаторов.

$V_0, \text{rad/A}$	$\theta_0, \text{rad/m}$	$\Delta V/\Delta t, \text{rad/A}\cdot^\circ\text{C}$	$\Delta\theta/\Delta t, \text{rad}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}$
$3.66 \cdot 10^{-5}$	183	$5.56 \cdot 10^{-9}$	$-5.24 \cdot 10^{-2}$

Анализ этого выражения показывает, что величина коэффициента преобразования  $S = \frac{1}{I_0} \left| \frac{dI(H)}{dH} \right|_{H=0}$  является максимальной при определенной взаимной ориентации разрешенных направлений поляризаторов, а именно при выполнении условия  $\theta L + \alpha = \pi/4$ . При этом, как показывает расчет, величина относительного изменения коэффициента преобразования от температуры определяется только температурным дрейфом константы Верде и составляет 1.5% в интервале изменения температур от 0 до 100°C.

Однако, как было показано в [4], существует такое соотношение между длиной кристалла чувствительного элемента  $L$  и углом между разрешенными направлениями поляризаторов  $\alpha$ , при котором температурный дрейф коэффициента преобразования, вызванный изменением константы Верде, компенсируется температурным дрейфом коэффициента оптической активности  $\theta$ :

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

При выполнении условия (2) температурный дрейф коэффициента преобразования датчика будет определяться членами более высокого порядка малости и при длине кристалла  $\sim 5 \text{ mm}$  величина температурного отклонения составляет  $\sim 0.2\%$  в диапазоне температур от 0 до 100°C. Таким образом, подобрав величину угла между разрешенными направлениями поляризаторов  $\alpha$  для конкретной длины кристалла  $L$ , в соответствии с (2) мы можем существенно улучшить температурные характеристики датчика.

## Экспериментальное исследование термостабильности чувствительного элемента

Блок-схема экспериментальной установки, разработанной для исследования температурных характеристик чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков на основе кристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  представлена на рис. 1. Исследуемый кристалл (11), представлявший собой цилиндр диаметром 1.5 mm и длиной 3 mm, помещался в дюралюминиевую оправу (4), служившую также и теплопроводом. На плечо оправы, заключавшее в себе кристалл, был намотан соленоид (5), поле в соленоиде создавалось при помощи генератора переменного тока (1). На другом плече оправы/теплопровода был смонтирован нагревательный элемент (3), представлявший собой вольфрамовую спираль; нагревательный элемент позволял менять температуру системы от комнатной  $+15^\circ\text{C}$  до  $+80^\circ\text{C}$ . Для питания нагревателя использовался источник постоянного тока (2). Для измерения температуры

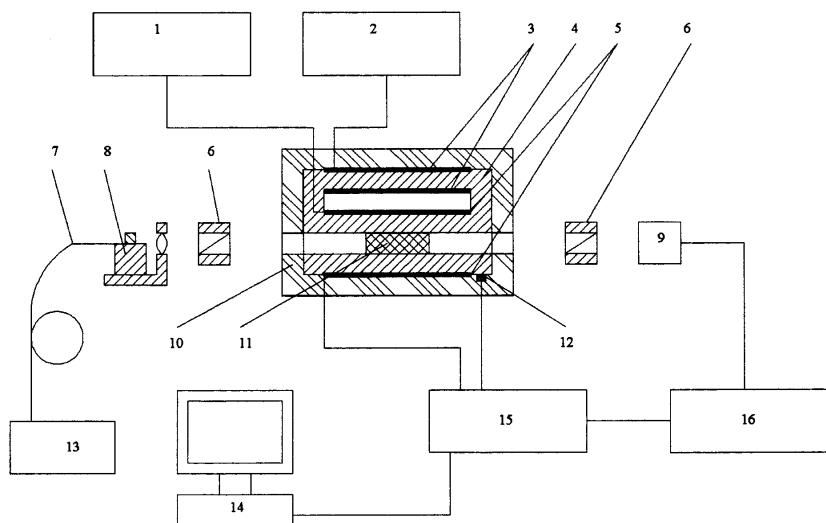


Рис. 1.

использовался миниатюрный датчик (12), выполненный на основе П/П диода. С целью обеспечения равномерности прогрева вся система была заключена в теплоизолирующий кожух (10). Оптическая часть установки состояла из отрезка многомодового световода (7) с диаметром ведущей жилы  $65 \mu\text{m}$ , коллиматора (8) (трехкоординатная юстировка с короткофокусной  $\sim 3 \text{ mm}$  линзой), двух призматических поляризаторов (6), закрепленных на угловых юстировках, исследуемого кристалла (11), фотоприемника (9) и источника излучения (13). Входной торец световода был снабжен оптическим разъемом стандарта ST, что позволяло легко подключать различные источники излучения. В работе использовались три источника: полупроводниковый лазер, He-Ne лазер и полупроводниковый диод с внутренней стабилизацией мощности излучения по обратной связи. Видимое излучение He-Ne лазера также использовалось для юстировки оптической схемы. Излучение на выходе системы регистрировалось при помощи измерителя оптической мощности (9). Сигнал с измерителя оптической мощности подавался на селективный усилитель (16), использовавшийся для устранения влияния электрических помех и наводок. Следует отметить, что, согласно проведенным выше расчетам, минимальная величина температурного дрейфа коэффициента преобразования датчика должна была составлять 0.2% в диапазоне температур от 0 до  $100^\circ\text{C}$ . Для измерения таких величин необходимо иметь относительную временную стабильность сигналов не хуже  $10^{-4} \div 10^{-5}$ . Поэтому основной проблемой, с которой пришлось столкнуться при проведении экспериментальных исследований, являлось исключение влияния флуктуаций, шумов и дрейфов в измерительных каналах сигналов модуляции, контроля температуры и тока соленоида. Для решения этой задачи был разработан и включен в установку блок интерфейса сопряжения с ЭВМ. Блок интерфейса сопряжения автоматически, с интервалом в 20 с производил измерения сигналов по трем каналам (сигнал с фотоприемника, сигнал, пропорциональный величине тока в соленоиде, и сигнал с датчика температуры); длительность цикла измерения трех сигналов составляла  $\sim 150 \text{ ms}$ . Полученные данные затем преобразовывались к цифровому виду и сохранялись в памяти прибора. По окончании измерений данные вводились в компьютер через стандартный интерфейс RS-232. Дальнейшая обработка файла данных производилась с помощью пакета математических программ MathCad.

## Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 2 представлена шумовая характеристика полупроводникового диода с внутренней стабилизацией мощности по оптической обратной связи. Из приведенной на рисунке кривой видно, что флуктуации мощности излучения составляют  $\pm 0.15\%$ , что позволяет использовать данный источник для проведения измерений.

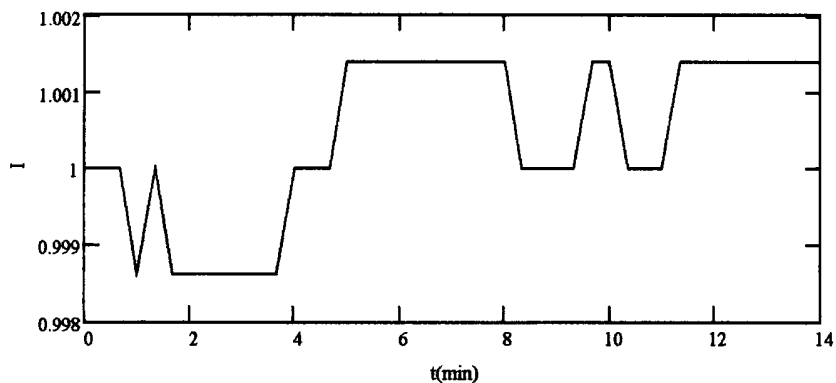


Рис. 2. Флуктуации интенсивности излучения полупроводникового светодиода.

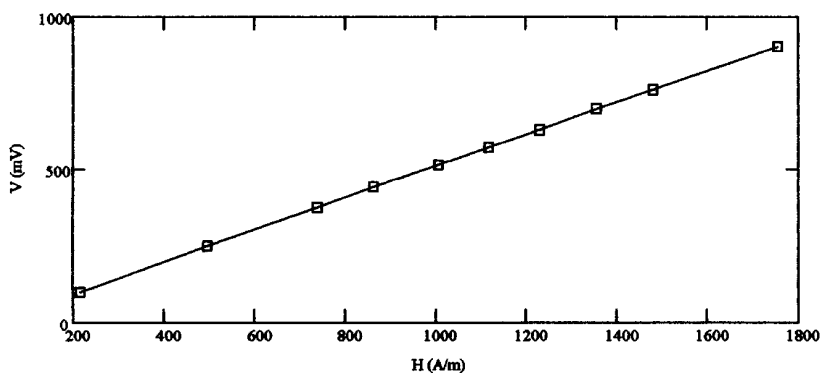
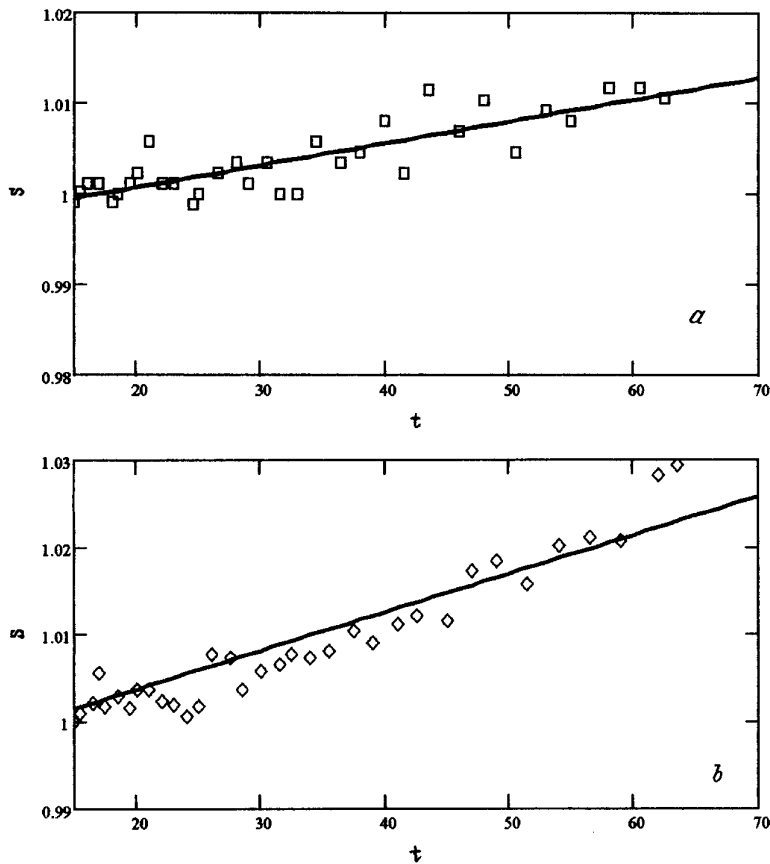


Рис. 3. Зависимость величины напряжения на выходе фотоприемника/усилителя от приложенного магнитного поля.



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента преобразования от температуры для значения угла: *a* —  $\theta L + \alpha = 45^\circ$ ; *b* —  $\theta L + \alpha = 45^\circ + 13^\circ$ ; *c* —  $\theta L + \alpha = 45^\circ - 13^\circ$ .

На рис. 3 представлена зависимость величины напряжения на выходе фотоприемника/усилителя от приложенного магнитного поля для кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  длиной  $L = 3 \text{ mm}$  в случае максимального коэффициента преобразования, когда выполняется условие  $(\theta L + \alpha) = 45^\circ$ . Из этого рисунка видно, что зависимость  $I(H)$  представляет собой прямую, что показывает работоспособность экспериментальной установки и то,

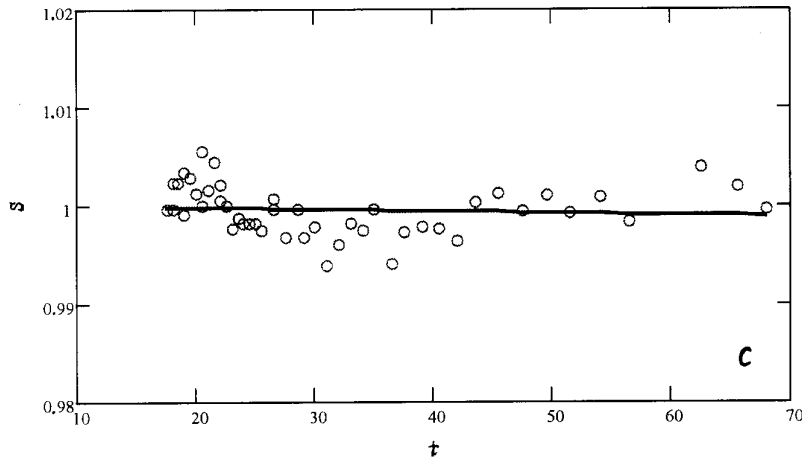


Рис. 4 (продолжение).

что при приложенных магнитных полях  $H$  отклик системы  $I(H)$  находится на линейном участке, т.е. справедливо примененное в расчетах положение:  $VHL \ll \pi/4$ .

На рис. 4, *a, b, c* приведены результаты исследования температурных характеристик чувствительного элемента ВОД с кристаллом длиной  $L = 3$  мм. Рис. 4, *a* представляет собой зависимость нормированного коэффициента преобразования  $\frac{S(t)}{S(t_0)} \Big|_{H=\text{const}}$  при постоянной величине магнитного поля  $H$  для максимального значения коэффициента модуляции ( $\frac{S_0}{V_0HL} = 1$ ). Согласно расчету (7), в данном случае температурная зависимость  $S(t)$  обуславливается только зависимостью от температуры константы Верде и составляет 1.5% в интервале изменения температур от 0 до 100°C. Из экспериментальной кривой на рисунке видно, что температурное отклонение составляет  $\sim 1.5\%$  в интервале температур от +15 до +70°C.

На рис. 4, *b* приведена температурная зависимость для значения угла  $\theta L + \alpha = 45^\circ + 13^\circ$ ; температурный уход в данном случае обуславливается как зависимостью от температуры константы Верде кристалла, так и температурной зависимостью коэффициента собственной оптической активности и составляет  $\sim 2.5\%$  в интервале температур от +15 до +70°C.

На рис. 4, с приведена зависимость  $S_n$  от  $t$  для значения угла  $\theta L + \alpha = 45^\circ - 13^\circ$ , вычисленного из выражения (2). В этом случае температурные уходы константы Верде и коэффициента собственной оптической активности кристалла должны компенсировать друг друга, и величина температурного ухода коэффициента преобразования  $S$  обуславливается уже членами второго порядка в разложении  $S(t)$  по  $t$ . Расчетное значение величины температурного ухода составляет  $\sim 0.2\%$  в интервале изменения температур от 0 до  $100^\circ\text{C}$  [4]. Экспериментальное значение этой величины составляет  $\sim 0.15\%$  в интервале температур от  $+15$  до  $+70^\circ\text{C}$ , что хорошо согласуется с теорией.

## Выводы

Экспериментально исследованы температурные характеристики чувствительного элемента датчика магнитного поля на основе кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , обладающего собственным круговым и линейным двулучепреломлением. Экспериментально подтверждена возможность создания чувствительных элементов датчиков магнитного поля, обладающих высокой термостабильностью ( $\sim 0.2\%$  в интервале изменения температур от 0 до  $100^\circ\text{C}$ ). Получено хорошее согласие экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю проф. В.Н. Листвину за руководство работой и обсуждение результатов, а также сотрудникам лаб. 278 ИРЭ РАН за помощь в создании экспериментальной установки.

## Список литературы

- [1] *Mitsui T., Hosoe K., Usami H., Miyamoto S.* // IEEE Trans. of Power Del. V. PWRD-2. N 1. January 1987.
- [2] *Yamagata Y., Oshi T., Katsukawa H., Kato S., Sakurai Y.* // IEEE Trans. of Power Del. V. 8. N 3. July 1993.
- [3] *Van den Tempel C.M.M.* // Appl. Opt. V. 32. N 25. 1 September 1993.
- [4] *Потанов Т.В.* Температурная стабилизация магнитооптической модуляции в кристаллах со структурой силленита. / Препринт ИРЭ РАН № 5 (619). М.: ИРЭ РАН, 1997.