

09;15

Электросенсор на основе эффекта электрогирации в кристалле вольфрамата свинца

© М.А. Новиков¹, А.А. Степанов², А.А. Хышов^{1,¶}¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

¶ E-mail: khysh@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 27 сентября 2016 г.

Представлены оригинальные результаты исследования особенностей оптической электрохиральности в кристалле вольфрамата свинца. В этом кристалле отсутствуют эффект Поггеля и обратный пьезоэффект, что позволяет на его основе создать быстродействующий электросенсор для диагностики быстропротекающих процессов в высоковольтных электросетях. Представлен дистанционный волоконно-оптический вариант такого электросенсора на основе оптических комплекующих, созданных для целей оптоволоконной связи.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.08.44530.16496

Явление оптической электрохиральности было открыто более 50 лет назад и до настоящего времени привлекает исследователей [1,2]. Первое предложение использовать эффект электрохиральности для измерения высоковольтных электрических напряжений было сделано в работе [3] на примере кристаллического кварца. Однако константа электрохиральности этого кристалла очень мала, и в настоящее время кварц для этой цели считается неперспективным. Важным с точки зрения практического применения было наблюдение эффекта электрохиральности в центросимметричном кристалле PbMoO_4 [4], где константа электрогирации оказалась очень большой. Однако до настоящего времени нам неизвестны работы, в которых бы обсуждались вопросы, связанные с возможностью реального использования эффекта электрогирации для создания приборов для измерения напряжения в высоковольтных электросетях.

В настоящей работе впервые приводится исследование дисперсии электрохиральности в кристалле PbWO_4 и рассматривается возможность создания на его основе электрогирационных дистанционных оптоволоконных приборов для высоковольтных электросетей. Вольфрамат свинца, как и кристалл PbMoO_4 , — центросимметричный кристалл симметрии $4/m$, в котором отсутствуют естественная хиральность, эффект Поккельса и обратный пьезоэффект. Последнее обстоятельство позволяет использовать такой прибор для диагностики быстропротекающих процессов в электросетях при ударах молнии и оперативных переключениях, что очень трудно сделать с помощью электросенсоров на основе эффекта Поккельса из-за акустических резонансов, связанных с присутствием обратного пьезоэффекта. Структура этого кристалла подобна кристаллу PbMoO_4 , поэтому можно ожидать, что в нем также будет большой эффект электрогирации. Кроме того, в настоящее время в России налажена технология выращивания таких кристаллов больших размеров хорошего оптического качества, связанная с их широким применением для детектирования элементарных частиц [5]. По своим электрофизическим и оптическим свойствам этот кристалл более предпочтителен, чем кристалл PbMoO_4 [6].

Поскольку в этом кристалле имеется центр симметрии, то для феноменологического описания оптических эффектов во внешнем электрическом поле можно использовать известное выражение для тензора обратной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_{ij}^{-1}(\mathbf{k}, \mathbf{E}^{ext}) = \varepsilon_{0ij}^{-1} + \gamma_{ijkl} k_k E_l^{ext} + \delta_{ijkl} E_k^{ext} E_l^{ext} + \dots, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{0ij}^{-1}(\omega)$ — тензор обратной диэлектрической проницаемости для невозмущенного кристалла, тензор $\gamma_{ijkl}(\omega)$ описывает электрогирацию, δ_{ijkl} — тензор, ответственный за электрооптический эффект Керра. Из соотношения Онсагера [7] для тензора обратной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon_{ij}^{-1}(\mathbf{k}, \mathbf{E}^{ext}) = \varepsilon_{ji}^{-1}(-\mathbf{k}, \mathbf{E}^{ext}),$$

можно легко получить ограничения на тензоры в (1)

$$\varepsilon_{0ij}^{-1}(\omega) = \varepsilon_{0ji}^{-1}(\omega), \quad \gamma_{ijkl} = -\gamma_{jikl}, \quad \delta_{ijkl} = \delta_{jikl} = \delta_{ijlk}.$$

С учетом этого тензор γ_{ijkl} можно записать в следующем виде:

$$\gamma_{ijkl} = i e_{ijm} \gamma_{mkl},$$

где e_{ijm} — единичный антисимметричный тензор, а γ_{mkl} — псевдотензор, в общем случае произвольной симметрии относительно перестановки индексов.

Будем использовать только симметричную по первым индексам $\hat{\gamma}^s$ часть псевдотензора γ_{mkl} , поскольку только эта часть дает вклад в эффект вращения плоскости поляризации.

Псевдотензор $\hat{\gamma}^s$ для кристалла вольфрамата свинца имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}^s = & \gamma_1(\mathbf{e}_1\mathbf{e}_1\mathbf{e}_3 + \mathbf{e}_2\mathbf{e}_2\mathbf{e}_3) + \gamma_2(\mathbf{e}_3\mathbf{e}_1\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1\mathbf{e}_3\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2\mathbf{e}_3\mathbf{e}_2 + \mathbf{e}_3\mathbf{e}_2\mathbf{e}_2) \\ & + \gamma_3(\mathbf{e}_2\mathbf{e}_3\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_3\mathbf{e}_2\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_3\mathbf{e}_1\mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_1\mathbf{e}_3\mathbf{e}_2) + \gamma_4\mathbf{e}_3\mathbf{e}_3\mathbf{e}_3. \end{aligned} \quad (2)$$

Вид тензора δ_{ijkl} можно найти из [8]. Здесь для записи тензоров в (2) используем инвариантный метод Федорова [9], где единичные векторы $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ направлены вдоль кристаллофизических осей согласно принятым в кристаллографии обозначениям. Решая задачу о распространении волн в кристалле [10], с учетом электрогирации и эффекта Керра при распространении света вдоль оптической оси, получим, что собственные волны будут циркулярно поляризованы, а их показатели преломления равны

$$n_{1,2} = n_o \pm (\pi n_o^4 / \lambda) \gamma_{333} E^{ext} - \frac{1}{2} n_o^3 \delta_{1133} (E^{ext})^2, \quad (3)$$

где λ — длина волны, n_o — показатель преломления обыкновенной волны, E^{ext} — внешнее поле, приложенное вдоль оптической оси. Как видно из (3), член, ответственный за эффект Керра, в этом случае не вносит анизотропии и поэтому не будет влиять на измерения.

Угол вращения плоскости поляризации в этом случае будет

$$\theta = \pi \Delta n l / \lambda = (2\pi^2 n_o^4 / \lambda^2) \gamma_{333} E^{ext}. \quad (4)$$

В поперечном внешнем электрическом поле при распространении света вдоль оптической оси электрогирация отсутствует, но эффект Керра в этом случае может вносить линейное двупреломление. К сожалению, константы эффекта Керра для кристалла PbWO_4 неизвестны. Из литературных данных [11] для кристалла нитрата свинца $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ эта

константа порядка $10^{-21} \text{ м}^2/\text{В}^2$. С учетом этих данных, как показывают наши оценки, даже при напряжении 100 кВ и длине образца 10 см вклад в изменение оптической анизотропии за счет эффекта Керра на три порядка меньше, чем оптическая анизотропия за счет электрохиральности. Таким образом, можно считать, что в данной конфигурации электрохиральность проявляется в чистом виде, и это обстоятельство как раз и позволяет создать электросенсоры для измерения полного напряжения в высоковольтных линиях.

В настоящей работе эффект электрогирации экспериментально исследовался в кристалле PbWO_4 при распространении света вдоль оптической оси кристалла в продольном электрическом поле. В эксперименте использовалась стандартная модуляционная однопроходная оптическая схема измерения, обычно применяемая для измерения эффекта Фарадея. Источником излучения служили полупроводниковые лазеры (длины волн от 0.63 до $1.55 \mu\text{м}$). Кристалл помещался между металлическими пластинами с дырками, через которые проходило излучение. На пластины подавалось переменное напряжение с амплитудой 300 В и частотой 70 Гц. Свет после прохождения через кристалл и поляризатор, ориентированный под 45° к падающей поляризации, попадает на фотоприемник. Сигнал регистрировался синхронным детектором.

Интенсивность, падающая на фотоприемник, будет равна

$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \sin \varphi),$$

где I_0 — интенсивность падающего оптического излучения, $\varphi = \varphi_0 \cos(\Omega t)$, Ω — частота модуляции электрического поля. Так как величина эффекта мала, можно положить $\sin \varphi \approx \varphi$ и таким образом сигнал будет пропорционален константе электрогирации кристалла. Из выражения (4) можно найти эту константу.

Были проведены эксперименты по измерению вращения плоскости поляризации света при прохождении вдоль оптической оси кристаллов в видимом и ближнем ИК-диапазонах света. Результаты измерений приведены на графике (рис. 1, *a*). Также была измерена зависимость эффекта от угла расстройки от оптической оси кристаллов. Результаты измерения представлены на рис. 1, *b*.

На основании этих измерений предложен дистанционный волоконно-оптический датчик высокого напряжения с оптической головкой на основе кристалла вольфрамата свинца. Для создания реальных волоконно-

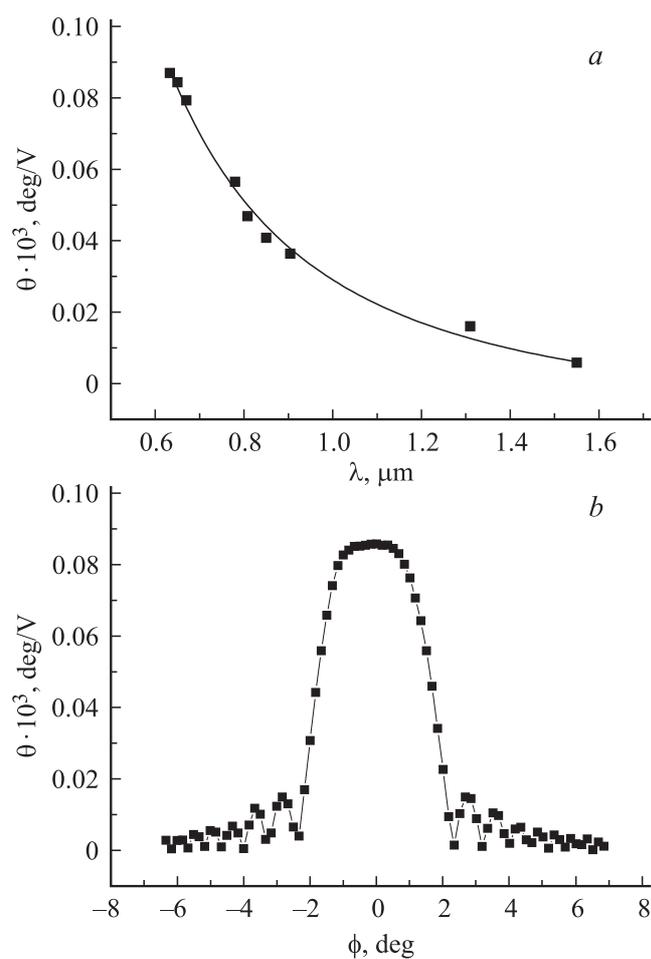


Рис. 1. Экспериментальные результаты: *a* — дисперсия электрогирации; *b* — угловая зависимость электрогирации.

оптических дистанционных датчиков целесообразно использовать двух-проходные оптические схемы отражательного типа. Поскольку при двукратном прохождении эффект электрохиральности зануляется,

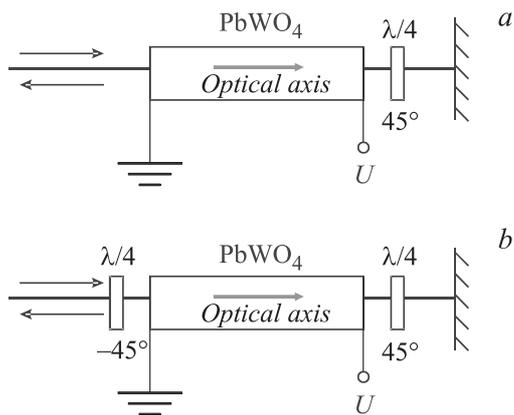


Рис. 2. Двухпроходные оптические схемы измерения напряжения: *a* — с одной четвертьволновой фазовой пластинкой; *b* — с двумя пластинками.

здесь предлагаются две оптические схемы для суммирования эффекта при двукратном прохождении (рис. 2, *a, b*).

Попутно стоит заметить, что в обеих схемах автоматически исключается влияние на показания электросенсора эффекта Фарадея, возникающего за счет магнитных полей, создаваемых силовым током, текущим по высоковольтным линиям.

Матрицы Джонса в этом случае имеют вид, соответствующий линейной фазовой пластике:

$$\hat{\mathbf{M}}_1 = \begin{pmatrix} -\sin(2\theta) & \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta) & \sin(2\theta) \end{pmatrix}, \quad \hat{\mathbf{M}}_2 = \begin{pmatrix} \exp(2i\theta) & 0 \\ 0 & \exp(-2i\theta) \end{pmatrix}.$$

Оптическая схема дистанционного волоконного электродатчика приведена на рис. 3. Оптическая схема дистанционного прибора была выполнена по оригинальной методике, впервые предложенной независимо в работах [12,13]. Прибор состоит из приемного модуля, оптической головки и связывающего их дупреломляющего световода. Сенсорная часть оптической головки выполнена из кристалла PbWO₄ по схеме (рис. 2, *b*). Оптическая ось кристалла ориентируется вдоль направления распространения света и силовых линий электрического поля. Входная четвертьволновая пластина ориентируется под углом 45°

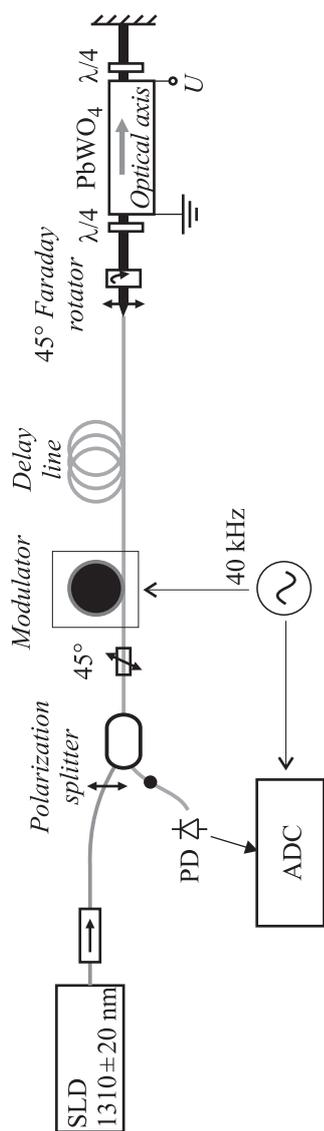


Рис. 3. Оптическая схема датчика.

к осям связующего анизотропного световода, а между ними помещается 45-градусная ячейка Фарадея.

Приемная часть датчика выполнена на основе двупреломляющих волоконных компонентов по модуляционной схеме. Источником излучения является суперлюминесцентный диод (SLD) с центральной длиной волны $1.3 \mu\text{m}$ с линейно поляризованным оптическим выходом вдоль быстрой оси световода. Перед пьезоакустическим поляризационным модулятором, выполненным из части связующего световода, делается сварка волокон с поворотом осей на 45° для равного возбуждения поляризационных мод. Поскольку статическое двупреломление модулятора и связного волокна компенсируется вращателем Фарадея, а модуляция поляризации осуществлялась за счет оптической задержки в связующем световоде, эллиптичность поляризации отраженного излучения на сварке 45° определяется суммарным набегом фаз в модуляторе и наведенным электрическим полем набегом фаз между циркулярными собственными волнами сенсорного кристалла.

Реальная демонстрация датчика проводилась при рабочих напряжениях до 10 kV , ограничивающихся электрической стойкостью кристалла длиной 2 см . В этом диапазоне была линейная зависимость от напряжения. Исходя из экспериментально измеренной фазовой чувствительности приемного модуля $2 \cdot 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$, для датчика с описанной выше оптической головкой чувствительность по напряжению следует ожидать $\sim 5 \text{ V} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$.

Очевидно, что для оптимальной работы такого прибора, как видно из дисперсии электрогирации (рис. 1, *a*), нужно было бы выбирать частоту света в видимой области диапазона. Однако для дистанционного варианта оптоволоконного прибора была выбрана длина волны $1.3 \mu\text{m}$, поскольку необходимые элементы для оптической схемы имелись только для ИК-диапазона, разработанные для целей оптической связи.

В работе проведено исследование электрогирации в кристаллах вольфрамата свинца. Измерены дисперсия вращения плоскости поляризации света, а также угловая зависимость эффекта при отклонении направления распространения от оптической оси. На основании этих измерений предложен дистанционный вариант электрохирального волоконно-оптического датчика высокого напряжения с оптической головкой на основе кристалла вольфрамата свинца.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям

развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы“ (соглашение № 14.578.21.0041 от 21.08.2014 г., уникальный идентификатор: RFMEFI57814X0041).

Список литературы

- [1] *Kaminsky W.* // Rep. Prog. Phys. 2000. V. 63. P. 1575–1640.
- [2] *Eremites A. et al.* // J. Appl. Crystallogr. 2011. V. 44. P. 1100–1110.
- [3] *Rogers A.J.* // Proc. R. Soc. Lond. A. 1977. V. 353. P. 177–192.
- [4] *Влох О.Г., Желудев И.С., Климов И.М.* // ДАН СССР. 1975. Т. 223. В. 6. С. 1391–1393.
- [5] *Vaccarj S. et al.* // Nucl. Instrum. Methods A. 1997. V. 385. P. 209.
- [6] *Kim J.S., Lee H.S., Jeong C.H.* // J. Korean Phys. Soc. 2003. V. 42. P. 1042–1045.
- [7] *Агранович В.М., Гинзбург В.Л.* Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. М.: Наука, 1979. 432 с.
- [8] *Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П.* Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1975. 680 с.
- [9] *Федоров Ф.И.* Теория гиротропии. Минск: Наука и техника, 1976. 456 с.
- [10] *Най Дж.* Физические свойства кристаллов. М.: Мир, 1967. 386 с.
- [11] *Weber Y.J., Yaussuhl S.* // Zeit. Kristallogr. 1977. V. 146. P. 303–307.
- [12] *Уставщиков С.С., Комарова С., Новиков М.А.* // Фотон-Экспресс. 2009. V. 78. P. 154–155.
- [13] *Wildermuth S., Bohnert K., Brändle H.* // Proc. SPIE. 2009. V. 7503.