



Нелинейная зависимость константы Верде от концентрации парамагнитных примесей в сердцевине волоконного световода

С. К. Моршнева, Н. И. Старостин, Я. В. Пржиялковский, А. И. Сазонов
ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН,
г. Фрязино, Московская обл., Россия

В волоконных световодах, сердцевины которых легированы парамагнитными примесями Gd^{+3} (0,4 ат. %) и Tb^{+3} (1 ат. %), измерены парамагнитные вклады в константы Верде. Установлено, что линейная зависимость константы Верде от малых концентраций парамагнитных примесей в сердцевине оптического волокна требует нелинейных поправок, когда концентрации существенно превышают 1–2 ат. %. Данное явление объясняется образованием обменных пар ионов парамагнитных примесей, обменных троек и т. д., вероятность появления которых обладает такой же зависимостью от концентрации парамагнитных примесей. Обменные пары магнитных моментов усиливают воздействие магнитного поля на образец и являются предвестниками магнитных доменов в ферромагнитных материалах.

Ключевые слова: эффект Фарадея, константа Верде, концентрация парамагнитных примесей, обменные пары ионов

Статья поступила: 23.08.2021

Статья принята: 30.09.2021

Nonlinear Dependence of the Verdet Constant on Concentrations of Paramagnetic Impurities Into the Optical Fiber Core

S. K. Morshnev, N. I. Starostin, Y. V. Przhiyalkovskiy, A. I. Sazonov
Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch) Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow region, Russia

Paramagnetic contributions to the Verdet constants were measured in optical fibers whose cores are doped with paramagnetic impurities Gd^{+3} (0.4 at. %) and Tb^{+3} (1 at. %). It is established that the linear dependence of the Verdet constant on small concentrations of paramagnetic impurities in the optical fiber core requires nonlinear corrections when the concentrations significantly exceed 1–2 at. %. This phenomenon is explained by the formation of exchange pairs of ions of paramagnetic impurities, exchange triples, etc., the probability of which has the same dependence on the concentration of paramagnetic impurities. Exchange pairs of magnetic moments enhance the effect of the magnetic field on the sample and are the precursors of magnetic domains in ferromagnetic materials.

Keywords: Faraday effect, Verdet constant, concentration of paramagnetic impurities, exchange pairs of ions

Article received: 23.08.2021

Article accepted: 30.09.2021

1. INTRODUCTION

The Faraday effect [1], which consists in the fact that when linearly polarized light propagates



1. ВВЕДЕНИЕ

Эффект Фарадея [1], заключающийся в том, что при распространении линейно поляризованного света через оптически неактивное вещество, находящееся в магнитном поле, наблюдается вращение плоскости поляризации света, проще всего представить на основе фундаментального эффекта Зеемана [2]. Под действием магнитного поля спектральная линия из области полосы электронного поглощения расщепляется на две линии, разделенные Ларморовской частотой и отличающиеся циркулярными поляризациями поглощаемого света. Их аномальные дисперсии чувствуются на большом расстоянии по спектру, в частности на рабочей частоте. Из-за Ларморовского сдвига аномальные дисперсии оказываются также сдвинутыми по частоте, а показатели преломления правой и левой циркулярных компонент излучения на рабочей частоте оказываются различными, что приводит к фазовой задержке между этими ортогональными компонентами (иначе, к повороту плоскости поляризации линейно поляризованного излучения), т.е. к эффекту Фарадея.

Физически этот эффект проявляется из-за Ларморовской прецессии электронных орбиталей, имеющих отличные от нуля орбитальные моменты и соответственно – магнитные моменты (диамагнитный эффект Фарадея) или из-за аналогичной прецессии нескомпенсированных спиновых магнитных моментов (парамагнитный эффект Фарадея). Прецессия электронных облаков (согласно принципу Ле-Шателье) уменьшает внешнее магнитное поле, тогда как прецессия парамагнитных спиновых моментов – увеличивает его (распределение Больцмана). Отсюда вывод: диамагнитный эффект Фарадея имеет другой знак по сравнению с парамагнитным эффектом. Кроме этого становится ясной сильная температурная зависимость парамагнитного эффекта Фарадея, зависящая от разности населенностей магнитных уровней.

Кварц, а также многие другие прозрачные материалы не содержат парамагнитных примесей, но обладают диамагнитными свойствами, что позволяет использовать их в волоконных световодах для датчиков магнитного поля и электрического тока. Этому способствует также очень слабая зависимость диамагнитных параметров от температуры [3] по сравнению с парамагнитными параметрами.

through an optically inactive substance in a magnetic field, the rotation of the plane of polarization of light is observed, is the easiest to imagine on the basis of the fundamental Zeeman effect [2]. Under the influence of a magnetic field, the spectral line from the region of the electronic absorption band is split into two lines separated by the Larmor frequency, and differing in the circular polarizations of the absorbed light. Their anomalous dispersions occur at a large distance along the spectrum, in particular at the operating frequency. Due to the Larmor shift, the anomalous dispersions are also frequency shifted, and the refractive indices of the right and left circular components of the radiation at the operating frequency are different, which leads to a phase delay between these orthogonal components (otherwise, to a rotation of the plane of polarization of linearly polarized radiation), i. e. to the Faraday effect.

Physically, this effect manifests itself due to the Larmor precession of electron orbitals with nonzero orbital moments and, accordingly, magnetic moments (diamagnetic Faraday effect) or due to a similar precession of uncompensated spin magnetic moments (paramagnetic Faraday effect). The precession of electron clouds (according to the Le Chatelier's principle) decreases the external magnetic field, while the precession of paramagnetic spin moments increases it (the Boltzmann distribution). Hence the conclusion: the diamagnetic Faraday effect has a different sign compared to the paramagnetic effect. In addition, the strong temperature dependence of the paramagnetic Faraday effect, which depends on the difference in the populations of the magnetic levels, becomes clear.

Quartz, as well as many other transparent materials, does not contain paramagnetic impurities, but has diamagnetic properties, which allows them to be used in optical fibers for magnetic field and electric current sensors. This is also facilitated by the very weak temperature dependence of the diamagnetic parameters [3], in comparison with the paramagnetic parameters.

The magnetic properties of materials in the Faraday effect reflect their Verdet constants, V , proportionality coefficients between the angle of rotation of the plane of polarization at an angle $d\theta$ and the action of the induction of the magnetic field \vec{B} over the length of the segment $d\vec{l}$:

$$d\theta = V(\vec{B} \cdot d\vec{l}).$$



Магнитные свойства материалов в эффекте Фарадея отражают их константы Верде V – коэффициенты пропорциональности между углом поворота плоскости поляризации на угол $d\theta$ и действием индукции магнитного поля \vec{B} на длине отрезка $d\vec{l}$:

$$d\theta = V(\vec{B} \cdot d\vec{l}).$$

В диамагнитной среде константа Верде положительна $V_d > 0$, а в парамагнитной среде – отрицательна $V_p < 0$. Как следует из теории Ван Флека [4], вклады в константу Верде от различных спектральных линий складываются аддитивно:

$$V = \sum_{i=1} \frac{K_i}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \cdot \eta_i, \quad (1)$$

где η_i – концентрация примесных центров соответствующей линии. Обычно λ_i – это экспериментальная величина, объединяющая несколько линий одного типа: диамагнитная $\lambda_i = \lambda_D$ или парамагнитная $\lambda_i = \lambda_P$; λ – рабочая длина волны. Так, например, плавный кварц обладает диамагнитной константой Верде V_q , описываемой формулой (1) с коэффициентом $K_i = 1,419 \text{ рад} \cdot \mu\text{м}^2 / (\text{T} \cdot \text{м}) > 0$ и $\lambda_i = \lambda_D = 0,118 \text{ мкм}$ [3] что, например, на длине волны $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ дает: $V(\lambda = 1,55 \text{ мкм}) = 0,594 \text{ рад} / (\text{T} \cdot \text{м})$.

Волоконные световоды являются комбинированными (слоистыми) средами, и вклад в константу Верде для волоконного световода дают как среда сердцевинны, так и среда светотражающей оболочки, так как часть излучения идет по ней в экспоненциально спадающих крыльях соответствующей моды [5]. Именно поэтому константа Верде в световодах часто меньше, чем в однородной среде. Некоторые примеси, например Ge, который вводят в сердцевину волокна, заметно увеличивают диамагнитную константу Верде по сравнению с чистым кварцем.

Парамагнитная примесь дает отрицательный вклад в константу V [4]:

$$V_p = -C \frac{g \cdot J(J+1)}{k_B T \cdot (\lambda^1 - \lambda_p^2)} \eta_p. \quad (2)$$

Ясно, что парамагнитная примесь малой концентрации, помещенная в диамагнитную сетку кварца может только уменьшить величину суммарной положительной константы Верде. Повышение концентрации парамагнетика приводит сначала к компенсации положительной диамагнитной компоненты и только после

In a diamagnetic medium, the Verdet constant is positive $V_d > 0$, and in a paramagnetic medium, it is negative $V_p < 0$. As follows from the Van Vleck theory [4], the contributions to the Verdet constant from various spectral lines add up additively:

$$V = \sum_{i=1} \frac{K_i}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \cdot \eta_i, \quad (1)$$

where η_i is the concentration of centers of the corresponding line. Usually, λ_i is an experimental value that combines several lines of the same type: diamagnetic $\lambda_i = \lambda_D$ or paramagnetic $\lambda_i = \lambda_P$; λ is the working wavelength. Thus, for example, fused quartz has a diamagnetic Verdet constant V_q , described by formula (1) with a coefficient $K_i = 1.419 \text{ rad} \cdot \mu\text{m}^2 / (\text{T} \cdot \text{m}) > 0$ and $\lambda_i = \lambda_D = 0.118 \mu\text{m}$ [3] that, e.g., at a wavelength $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ gives: $V(\lambda = 1.55 \mu\text{m}) = 0.594 \text{ rad} / (\text{T} \cdot \text{m})$.

Optical fibers are combined (layered) media, and both the core medium and the reflective cladding medium contribute to the Verdet constant for an optical fiber, since part of the radiation travels along it in exponentially decaying wings of the corresponding mode [5]. That is why the Verdet constant in optical fibers is often less than in a homogeneous medium. Some impurities, such as Ge, which is introduced into the fiber core, markedly increase the Verdet diamagnetic constant compared to pure quartz.

The paramagnetic impurity makes a negative contribution to the constant V [4]:

$$V_p = -C \frac{g \cdot J(J+1)}{k_B T \cdot (\lambda^1 - \lambda_p^2)} \eta_p. \quad (2)$$

It is clear that a paramagnetic impurity of low concentration placed in a diamagnetic quartz lattice can only decrease the value of the total positive Verdet constant. An increase in the concentration of the paramagnet leads first to the compensation of the positive diamagnetic component, and only after that to the appearance of the negative paramagnetic Verdet constant.

We observed a decrease in the diamagnetic component of the Verdet constant at relatively low ($\eta_i \leq 1$ at.%) concentrations of both Tb^{3+} and Gd^{3+} ions. In combination with the results of other authors, this made it possible to predict the nonlinear dependence of the Verdet constant on the concentration of paramagnetic impurities.

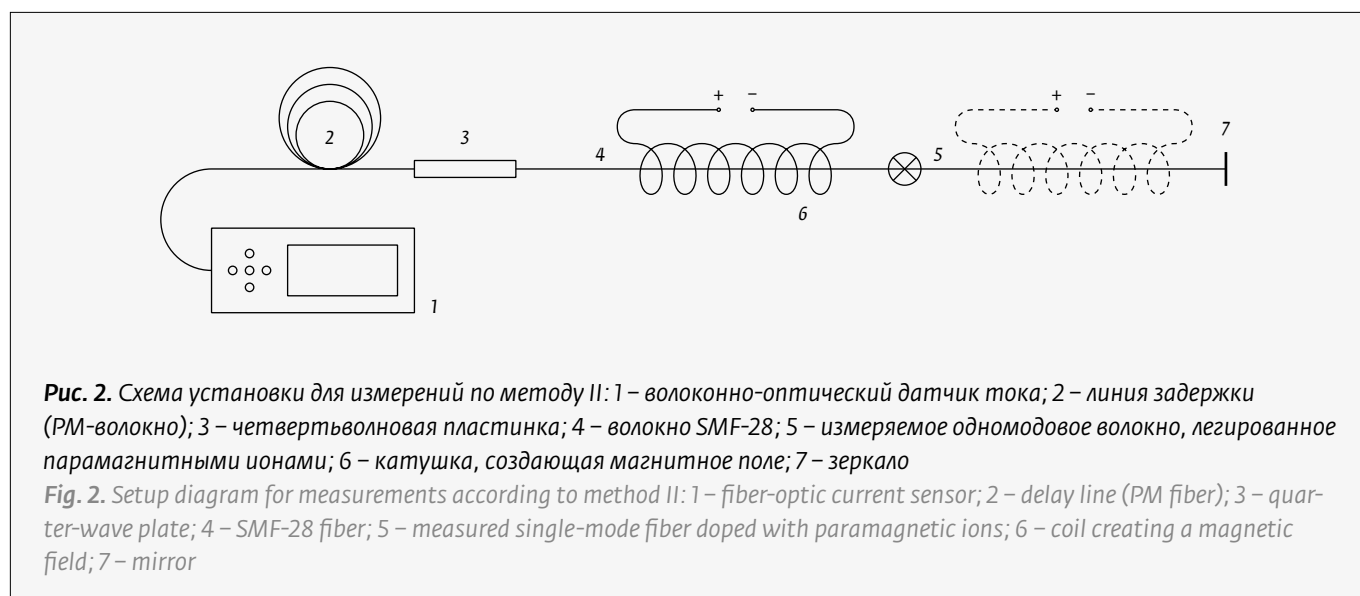
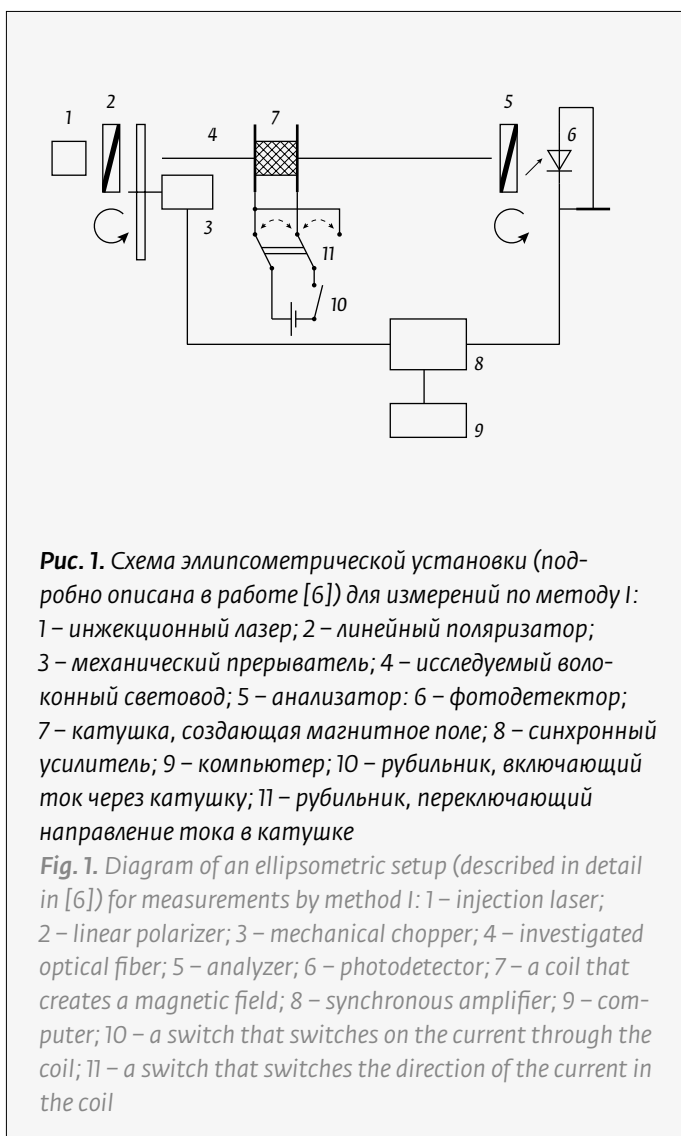
этого – к появлению отрицательной парамагнитной константы Верде.

Мы наблюдали уменьшение диамагнитной компоненты константы Верде при сравнительно малых ($\eta_i \leq 1$ ат. %) концентрациях как ионов Tb^{3+} , так и ионов Gd^{3+} . В комбинации с результатами других авторов это позволило предсказать нелинейную зависимость константы Верде от концентрации парамагнитных примесей.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

2.1. Методы

Исследования были проведены на установках, показанных на рис. 1 и рис. 2. На рис. 1 приведена обычная эллипсометрическая установка (подробно описана в работе [6]) для измерений фазовой задержки в ВС типа Lo-Vi (метод I). На этой установке исследовались образцы волокон с сердцевинной, легированной примесью тербия Tb^{3+} с концентрацией ~1 ат. %. В качестве источников оптического излучения I использовались диодные модули, работавшие на длинах волн $\lambda_1=670$ нм и $\lambda_2=820$ нм. Свет источника I (рис. 1), пройдя линейный поляризатор 2, становится линейно поляризованным, далее модулируется механическим прерывателем 3, поступает в волоконный световод 4 типа LoVi и становится слабо эллиптичным из-за небольшой фазовой задержки. Пусть напряженности электрических полей световой волны вдоль главных осей эллипса, выделяемых анализатором 5, равны соответственно a и b ($a \gg b$). Модулированный сигнал, снимаемый с фотодетектора 6, пропорционален a^2 (максимум)





или b^2 (минимум) в зависимости от ориентации анализатора 5.

Магнитное поле для эффекта Фарадея было создано катушкой 7 без сердечника, сквозь которую был пропущен ВС. В этих условиях угол поворота θ эллипса поляризации составляет: $\theta = A \cdot V \cdot I \cdot N$, где $A = 2,19$, I – ток в амперах, V – константа Верде в рад/(Т·м), $N \approx 5000$ – число витков катушки. Ток через катушку стабилизировался на уровне $1,07 \pm 0,01$ А. Для повышения отношения сигнал/шум ($S/N > 100$) модулированное излучение на выходе волокна подавалось на синхронный усилитель 8 вместе с опорным сигналом от модулятора 3. Далее сигнал подавали на компьютер 9, где его записывали в зависимости от времени. Сигнал начинали записывать до включения рубильника 10, в результате которого ток ~ 1 А протекал через катушку 7. Затем производили изменение направления тока через катушку на противоположное с помощью рубильника 11.

Сигналы при прямом протекании тока Δ_+ и при обратном $-\Delta_-$ записывались компьютером. Разность этих величин использовалась для определения угла поворота θ :

$$(\Delta_- - \Delta_+) = (a^2 - b^2) \cdot \sin 2\varphi \cdot \sin 2\theta.$$

Методика использует тот факт, что при фиксированном значении тока через катушку эллипс поляризации поворачивается на один и тот же угол θ вне зависимости от того, под каким углом φ ориентирован анализатор. Строится зависимость $(\Delta_- - \Delta_+)$ от $\sin(2\varphi)$, тангенс угла наклона которой пропорционален $\sin(2\theta)$. Относительная погрешность опыта 2–5%.

Исследования одномодового волокна, с сердцевинной легированной гадолинием Gd^{+3} с концентрацией 0,4 ат. %, проводили с использованием стандартного волоконно-оптического датчика тока (ВОДТ) [7] на основе отражательного интерферометра (метод II). Схема установки показана на рис. 2. Сформированное в электронно-оптическом блоке ВОДТ 1 излучение на длине волны 1550 нм в виде двух линейных ортогонально поляризованных волн транслируется по волокну 2, сохраняющему поляризацию излучения (РМ-линия) к четвертьволновой пластинке 3. С выхода пластинки 3 излучение в виде циркулярно поляризованных мод поступает в чувствительный элемент ВОДТ, состоящий из последовательно соединенных двух прямых волоконных отрезков одинаковой

2. EXPERIMENT

2.1. Methodology

The studies were carried out on the setup shown in Fig. 1 and Fig. 2. Fig. 1 shows a conventional ellipsometric unit (described in detail in [6]) for measuring the phase delay in optical fibers of type Lo-Bi (method I). This setup was used to study samples of fibers with a core doped with terbium Tb^{+3} with a concentration of ~ 1 at.%. Diode modules operating at wavelengths $\lambda_1 = 670$ nm and $\lambda_2 = 820$ nm were used as sources 1 of optical radiation. The light from the source 1 (Fig. 1), after passing through the linear polarizer 2, becomes linearly polarized, then modulated by a mechanical chopper 3 and enters the LoBi fiber 4 and becomes weakly elliptical due to a small phase delay. Suppose that the components of electric field of the light wave along the principal axes of the ellipse allocated by analyzer 5 are, respectively, a and b ($a > b$). The modulated signal taken from the photodetector 6 is proportional to a^2 (maximum) or b^2 (minimum), depending on the orientation of the analyzer 5.

The magnetic field for the Faraday effect was created by a coreless coil 7 through which fiber was passed. Under these conditions, the rotation angle θ of polarization ellipse is equal: $\theta = A \cdot V \cdot I \cdot N$, where $A = 2.19$, I is current in amperes, V is Verdet constant in rad/(T·m), $N \approx 5000$ – the number of turns of the coil. The current through the coil was stabilized at a level of 1.07 ± 0.01 A. To increase the signal-to-noise ratio ($S/N > 100$), the modulated radiation at the fiber output was fed to a lock-in amplifier 8 together with a reference signal from modulator 3. Then the signal was fed to computer 9, where it was recorded. The signal began to be recorded before the switch 10 was turned on, as a result of which a current of ~ 1 A flowed through the coil 7. Then the direction of the current through the coil was reversed using the switch 11.

Signals with the direct passing of current Δ_+ and with the reverse $-\Delta_-$ were recorded by a computer. The difference between these values was used to determine the angle of rotation θ :

$$(\Delta_- - \Delta_+) = (a^2 - b^2) \cdot \sin 2\varphi \cdot \sin 2\theta.$$

The technique uses the fact that for a fixed value of the current through the coil, the polarization ellipse rotates through the same angle θ , regardless of which angle φ the analyzer is oriented. The dependence $(\Delta_- - \Delta_+)$ on $\sin(2\varphi)$ is plotted, the slope of which is proportional to $\sin(2\theta)$. The relative error of the experiment is 2–5%.

длины (40 см): стандартного волокна 4 типа SMF-28 и приваренного к нему исследуемого одномодового волокна 5, легированного ионами гадолиния. Оба чувствительных волокна поочередно располагались внутри катушки при неизменных остальных параметрах схемы. Катушка имела $N=800$ витков медного провода, через которые пропусклся электрический ток величиной $I=2A$. Относительная погрешность метода 0,1%.

Выходной сигнал ВОДТ записывали как при воздействии магнитного поля катушки на волокно SMF-28 датчика, так и на волокно, легированное гадолинием. Отношение сигналов позволяет найти отношение констант Верде этих волокон.

2.2. Результаты

Полученные методом I (рис. 1) результаты приведены в таблице 1 для двух длин волн. В волокнах А, В и С отсутствовала парамагнитная примесь Tb^{+3} , но содержались различные кон-

Табл. 1. Результаты, полученные методом I

Table 1. Results obtained by method I

BC	Δn	$G_e \eta$ ат. %	$Tb^{3+} \eta$ ат. %	$\theta (\lambda=670 \text{ нм})$	$\theta (\lambda=820 \text{ нм})$
A	0,0058	1%	0	$1,36^\circ \pm 0,06$	$0,87^\circ \pm 0,04^\circ$
B	0,0095	1,6%	0	$1,52^\circ \pm 0,03^\circ$	$0,96^\circ \pm 0,03^\circ$
C	0,0120	2%	0	$1,67^\circ \pm 0,03^\circ$	$1,04^\circ \pm 0,04^\circ$
D	0,0160	2%	0,95%	$0,92^\circ \pm 0,04^\circ$	$0,66^\circ \pm 0,05^\circ$

A study of the single-mode fiber with a core doped with gadolinium Gd^{+3} with a concentration of 0.4 at. % was carried out using a standard fiber-optic current sensor (FOCS) [7] based on a reflective interferometer (method II). The setup diagram is shown in fig. 2. Formed in the electronic-optical unit of the FOCS 1 radiation at a wavelength of 1550 nm in the form of two linear orthogonally polarized waves is transmitted through fiber 2, which retains the polarization of radiation (PM line) to the quarter-wave plate 3. From the output of plate 3, radiation in the form of circularly polarized modes enters the sensing element of the FOCS, which consists of two series-connected straight fiber sections of the same length (40 cm):

Пространственные Модуляторы Света

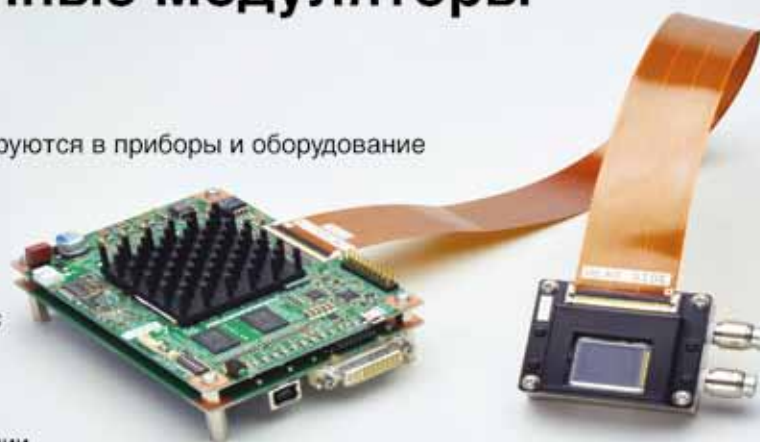
Модули LCOS-SLM легко интегрируются в приборы и оборудование

Характеристики:

- Высокая надежность при работе с излучением высокой мощности
- Высокая стабильность и точный контроль фазы
- Высокая эффективность дифракции
- Высокая светоотдача

Применения:

- Лазерная обработка материалов
- Оптические манипуляции (оптический пинцет)
- Коррекция волнового фронта
- Формирование импульсов
- Метрология
- Литография
- Голография



HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

www.hamamatsu.com

Представительство Hamamatsu Photonics в России и СНГ
Тел: +7 (495) 258-85-18. E-mail: info@hamamatsu.ru

Табл. 2. Зависимость константы Верде от концентрации
Table 2. Dependence of the Verdet constant on concentration

Ионы Ions	Концентрация, ионов/см ³ Concentration, ions/cm ³	Константа Верде $V(\lambda=820 \text{ нм}) \text{ рад}/(\text{T}\cdot\text{м})$ Verdet constant $V(\lambda=820 \text{ нм}) \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$	Относительная константа Верде V/V_q Verdet relative constant V/V_q
Gd ⁺³	0,106 · 10 ²¹ 0,4 ат. % [эта работа]	-0,30	-0,14
Tb ⁺³	0,265 · 10 ²¹ 1,0 ат. % [эта работа]	-1,17	-0,54
Tb ⁺³	5,86 · 10 ²¹ 54 вес. % [5]	-39,5	-18,33
Tb ⁺³	7,4 · 10 ²¹ * 65 вес. % [11]	-58,8	-27,28

* Наша оценка на основе плотности образца.

* Our estimate is based on sample density.

центрации Ge, что позволило определить угол поворота θ_q для диамагнитной константы Верде чистого кварца в условиях нашего эксперимента по пересечению графика зависимости θ от концентрации η_{Ge} германия с осью ординат при $\eta_{\text{Ge}}=0$. $\theta_q(\lambda=670 \text{ нм})=1,03^\circ$ и $\theta_q(\lambda=820 \text{ нм})=0,7^\circ$.

Из табл. 1 видно, что введение 1 ат. % Tb⁺³ привело к уменьшению угла поворота плоскости поляризации излучения в эффекте Фарадея без изменения направления вращения. Последнее означает, что введение 1 ат. % парамагнитной примеси Tb⁺³ не позволило преодолеть вклад диамагнитной компоненты константы Верде.

Измерения на двух длинах волн позволили получить важный параметр λ_p для сравнения данных различных авторов (см. (1)). Из табл. 1 следует: $\lambda_p=475 \text{ нм}$, что контрастирует с результатом из работы [8]: $\lambda_p=215 \text{ нм}$ и [9]: $\lambda_p=250 \text{ нм}$. В работе [5] для волоконного световода при высоких концентрациях был получен результат: $\lambda_p=385 \text{ нм}$, который также не совпадает с результатами работ [8,9]. Мы согласны с авторами работы [5], что эта величина зависит от концентрации Tb⁺³ и распределения интенсивности в световоде. Уменьшение его концентрации приводит к расширению области занимаемой волной в область оболочки, что отражается в увеличении длины волны λ_p до $\lambda_p=475 \text{ нм}$ при малой концентрации $\eta_{\text{Tb}} \sim 1 \text{ ат.}\%$. Величина λ_p нужна для пересчета данных (по формуле (1)) к единой рабочей длине волны (мы выбрали $\lambda=820 \text{ нм}$).

standard fiber 4 of the SMF-28 type and a single-mode fiber under study 5, doped with gadolinium ions, that was spliced to it. Both sensitive fibers were alternately located inside the coil, with the remaining parameters of the circuit unchanged. The coil had $N=800$ turns of copper wire, through which an electric current of $I=2\text{A}$ was passed. The relative error of the method is 0.1%.

The output signal of the FOCS was recorded both when the magnetic field of the coil was applied to the SMF-28 sensor fiber and to the gadolinium-doped fiber. The signal ratio allows you to find the ratio of the Verdet constants of these fibers.

2.2. Results

The results obtained by method I (Fig. 1) are shown in Table 1 for two wavelengths. Fibers A, B, and C did not contain the paramagnetic impurity Tb⁺³, but they contained different concentrations of Ge, which made it possible to determine the angle of rotation θ_q for the diamagnetic Verdet constant of pure quartz under the conditions of our experiment on the intersection of the graph of the dependence of θ on the Ge concentration η_{Ge} with the ordinate axis at $\eta_{\text{Ge}}=0$. $\theta_q(\lambda=670 \text{ нм})=1.03^\circ$ and $\theta_q(\lambda=820 \text{ нм})=0,7^\circ$.

Table 1 shows that the introduction of 1 at. % Tb⁺³ led to a decrease in the angle of rotation of the plane of polarization of radiation in the Faraday effect without changing the direction of rotation. The latter means that the introduction of 1 at. % of the paramagnetic impurity Tb⁺³ did not allow us to overcome the contribution of the diamagnetic component of the Verdet constant.

Measurements at two wavelengths made it possible to obtain an important parameter λ_p for comparing the data of various authors (see (1)). From Table 1 it follows: $\lambda_p=475 \text{ нм}$, which contrasts with the result from [8]: $\lambda_p=215 \text{ нм}$ and [9]: $\lambda_p=250 \text{ нм}$. In work [5], for a fiber with high concentrations, the result was obtained: $\lambda_p=385 \text{ нм}$, which also does not coincide with the data of works [8, 9]. We agree with the authors of [5] that this quantity depends on the Tb⁺³ concentration and the intensity distribution in the fiber. A decrease

Методом II (рис. 2) были получены результаты для Gd^{+3} на длине волны $\lambda=1550$ нм, а именно: отношение $V_{Cd}/V_q=-0,1$. Отсюда $V_{Cd}(\lambda=1550 \text{ нм})=-0,059 \text{ рад}/(T \cdot m)$. Обратный пересчет к длине волны $\lambda=820$ нм дает $V_{Cd}(0,4 \text{ ат. \%}, \lambda=820 \text{ нм})=-0,3 \text{ рад}/(T \cdot m)$, приведенный в табл. 2.

В последнем столбце табл. 2 приведены значения констант Верде по отношению к диамагнитной константе Верде кварца $V_q(\lambda=820 \text{ нм})=+2,155 \text{ рад}/(T \cdot m)$. Видно, что не только введение 0,4 ат. % парамагнитной примеси Gd^{+3} , но и введение 1 ат. % примеси Tb^{+3} не позволили превзойти диамагнитную компоненту чистого кварца, несмотря на то, что концентрация парамагнитных ионов достигла $0,26 \cdot 10^{21}$ ионов/ cm^3 (1 ат. %). Это находится в противоречии с данными работы [10] и частично с работой [11]. В последней демонстрируется линейная зависимость константы Верде от высоких значений концентрации (см. ниже).

3. ОБСУЖДЕНИЯ

Наши результаты и результаты других авторов были получены на различных оптических

in its concentration leads to the expansion of the region occupied by the wave into the cladding region, which is reflected in an increase in the wavelength λ_p to $\lambda_p=475$ nm at a low concentration $\eta_{Tb} \sim 1$ ат.%. The λ_p value is needed to recalculate the data (according to formula (1)) to a single operating wavelength (we chose $\lambda=820$ nm).

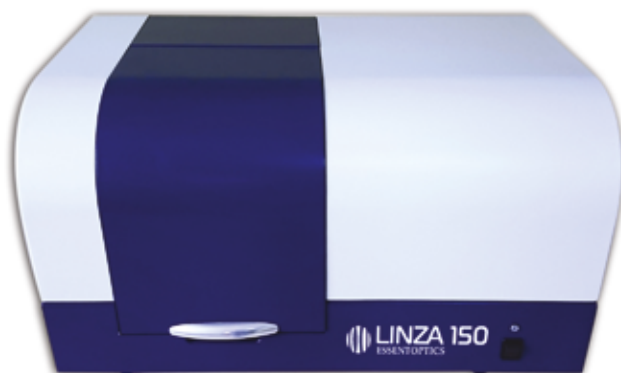
Method II (Fig. 2) was used to obtain results for Gd^{+3} at a wavelength of $\lambda=1550$ nm, namely: the ratio $V_{Cd}/V_q=-0.1$. Hence, $V_{Cd}(\lambda=1550 \text{ nm})=-0.059 \text{ rad}/(T \cdot m)$. Recalculation to the wavelength $\lambda=820$ nm gives $V_{Cd}(0.4 \text{ ат. \%}, \lambda=820 \text{ nm})=-0.3 \text{ rad}/(T \cdot m)$, given in Table 2.

The last column of Table 2 shows the values of the Verdet constants in relation to the diamagnetic Verdet constant of quartz $V_q(\lambda=820 \text{ nm})=+2.155 \text{ rad}/(T \cdot m)$. It can be seen that not only the introduction of 0.4 ат. % of the paramagnetic impurity Gd^{+3} , but also the introduction of 1 ат. % of the Tb^{+3} impurity did not allow to exceed the diamagnetic component of pure quartz, despite the fact that the concentration of paramagnetic ions reached $0.26 \cdot 10^{21}$ ions/ cm^3 (1 ат. %). This is in contradiction with the data of [10] and partially with [11]. The latter paper demonstrates the linear dependence of

ЭССЕНТОПТИКС ESSENTOPTICS

LINZA 150

Первый в мире спектрофотометр для измерения пропускания и отражения линз и объективов



Спектрофотометр LINZA 150
Новая функция: измерение пропускания и отражения от асферических поверхностей

LINZA 150 Spectrophotometer
New feature: transmittance and reflectance measurement of aspheric lens

ООО «ЭссентОптикс»

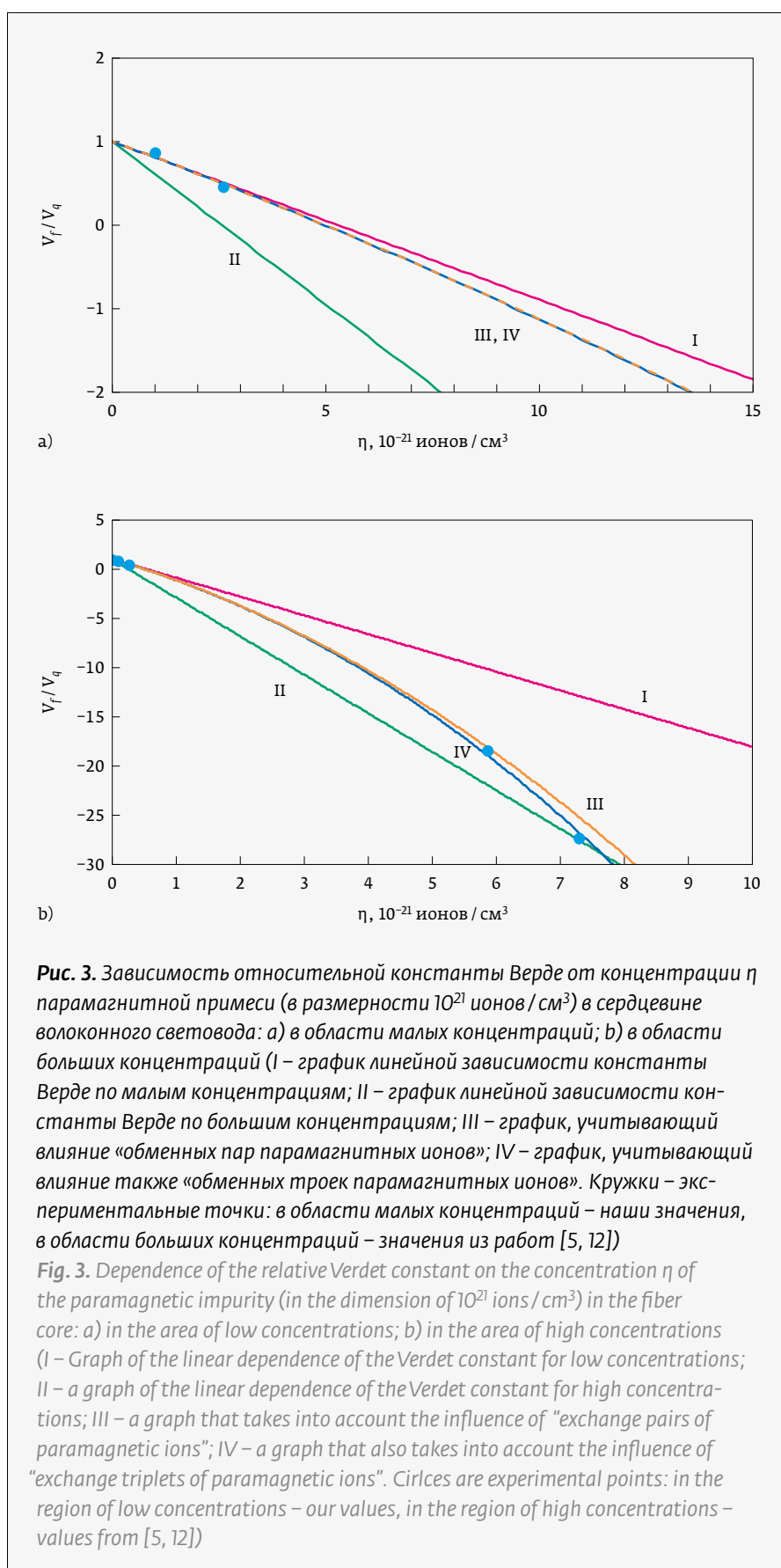
23а-81, ул. 40 лет Победы, Боровляны, Минская обл., Минский р-н, 223053 Беларусь
Тел.: +375-17-5112025 | Факс: +375-17-5112026 | www.essentoptics.com

длинах волн и для двух различных парамагнитных примесей: Tb³⁺ и Gd³⁺, что потребовало пересчета результатов. Концентрации рассчитаны для числа ионов в единице объема (ионов/см³). Пусть суммарная масса компонентов m_0 , а доля интересующего нас вещества (содержащего парамагнитные ионы) составляет γ вес. %. Пусть молярная масса этого вещества, скажем, Tb₂O₃, равна $\mu = 366$ г/моль, тогда число ионов Tb³⁺ в кубическом сантиметре будет:

$$\eta = 2 \cdot \frac{\gamma \cdot m_0}{\mu} \cdot N_A \cdot \frac{\rho}{m_0} = 2 \cdot \frac{\gamma \cdot \rho}{\mu} \cdot N_A, \quad (3)$$

где N_A – число Авогадро, ρ – плотность получившегося стекла. Расчет по атомным % проще: отношение внедренных ионов к числу атомов в сетке стекла единичного объема, однако расчет усложняется при больших концентрациях и большом числе составляющих компонентов. В работе [5] $\gamma_{Tb} = 54$ вес. %, и приведено значение плотности $\rho = 3,3$ г/см³, что позволяет точно вычислить концентрацию (приведена в таблице 2).

К сожалению, в работе [12] плотность полученного стекла (для сердцевины волокна) не приведена, поэтому точную концентрацию вычислить невозможно, а концентрация $\eta = 10,8 \cdot 10^{21}$, приведенная в работе [12] (рис. 3), дает при вычислениях по формуле (3) нереальную плотность $\rho = 5,0$ г/см³. Действительно, $\gamma_{Tb} = 54$ вес. % [5] дает увеличение плотности по сравнению с кварцем $\Delta\rho = 0,65$ г/см³, а дополнительное увеличение величины γ_{Tb} до $\gamma_{Tb} = 65$ вес. % [12], т.е. на $\Delta\gamma_{Tb} = 0,11$ вес. %, не может дать увеличение плотности



на $\Delta\rho=1,70 \text{ г/см}^3$. Пропорциональное увеличение плотности дает $\Delta\rho=0,13 \text{ г/см}^3$, и плотность стекла в работе [12] $\rho=3,43 \text{ г/см}^3$. По формуле (3) это значение приводит к концентрации η_{Tb} , указанной в табл. 2. В этом случае не получается линейной зависимости константы Верде, приведенной на рис. 2 в работе [12].

На рис. 3 приведены отношения величины константы Верде кварцевых волоконных световодов к диамагнитной константе Верде кварца V_f/V_q в зависимости от концентрации парамагнитных примесей гадолиния и тербия. Видно, что в отсутствии парамагнитных примесей $\eta_{\text{Gd, Tb}}=0$ константа Верде световода V_f положительна и равна диамагнитной величине $V_f/V_q=1$. Введение примеси парамагнитных ионов Tb^{+3} малых концентраций уменьшает положительную константу Верде, и лишь при концентрации порядка $\eta_{\text{Tb}} \sim 0,5 \cdot 10^{21}$ она меняет знак. Линейную зависимость V_f от малых концентраций здесь хорошо представляет график I, описываемый формулой (4):

$$(V_f/V_q)_I = 1 - 1,9 \cdot 10^{-21} \cdot \eta, \quad (4)$$

проходящий через две экспериментальные точки и нуль в области малых концентраций. Однако в области больших концентраций $\eta_{\text{Tb}} = 5,8 \cdot 10^{21}$ график I дает значение $V_f/V_q = -10,7$, тогда как экспериментально для волоконного световода получено $V_f/V_q = -18,6$ [5]. Наоборот, если через точку $V_f/V_q = -27,28$ и надежную точку $V_f/V_q = 1$ при $\eta_{\text{Tb}} = 0$ провести прямую (график II):

$$(V_f/V_q)_{II} = 1 - 3,9 \cdot 10^{-21} \cdot \eta, \quad (5)$$

the Verdet constant on high concentration values, see below.

3. DISCUSSIONS

Our results and those of other authors were obtained at different optical wavelengths and for two different paramagnetic impurities: Tb^{+3} and Gd^{+3} , which required a recalculation of the results. Concentrations are calculated for the number of ions per unit volume (ions/cm³). Let the total mass of the components be m_0 , and the fraction of the substance of interest (containing paramagnetic ions) is γ wt.%. Let the molar mass of this substance, say, Tb_2O_3 , be $\mu = 366 \text{ g/mol}$, then the number of Tb^{+3} ions in a cubic centimeter will be:

$$\eta = 2 \cdot \frac{\gamma \cdot m_0}{\mu} \cdot N_A \cdot \frac{\rho}{m_0} = 2 \cdot \frac{\gamma \cdot \rho}{\mu} \cdot N_A, \quad (3)$$

where N_A is Avogadro's number, ρ is the density of the resulting glass. The calculation in terms of atomic % is simpler: the ratio of embedded ions to the number of atoms in the glass network of a unit volume, however, the calculation becomes more complicated at high concentrations and a large number of constituent components. In work [5] $\gamma_{\text{Tb}} = 54 \text{ wt.}\%$, and the density value $\rho = 3,3 \text{ g/cm}^3$ is given, which makes it possible to accurately calculate the concentration (shown in Table 2).

Unfortunately, in [12] the density of the obtained glass (for the fiber core) is not given, therefore the exact concentration cannot be calculated, and the concentration shown in Fig. 2 in [12]

Диагностика и компоненты

- Фотоприемники с усилителем, лавинные, балансные
- Изоляторы Фарадея 400-1250 нм, до 60 дБ, до 15 мм
- Селекторы импульсов на 250-2700 нм до 2 МГц
- Измерители длительности импульсов, SPIDER
- Электроника ФАПЧ для синхронизации
- Спектрометры 190-3450 нм



Фемтосекундные лазерные системы

- Параметрические генераторы 340-4200 нм
- Волоконные лазеры на 780, 1030-1064, 1560 нм
- Лазеры со средней мощностью до 50 Вт
- Оптический синтезатор частоты ("комб-генератор")
- Титан-сапфировые генераторы от 6 до 100 фс
- Системы с пиковой мощностью до 15 ТВт





то в области малых концентраций будет столь же драматическое несовпадение теории с экспериментом. В частности, отрицательное значение V_f/V_q будет достигнуто уже при концентрации тербия равной $\eta_{Tb}=0,25 \cdot 10^{21}$, что не наблюдалось нами при $\eta_{Tb}=0,26 \cdot 10^{21}$ ионов/см³. Можно утверждать, что линейная зависимость от концентрации парамагнитной примеси может адекватно описывать поведение константы Верде только при малых концентрациях этой примеси, не более 1-2 ат. %.

Поправка к формуле (5) в виде квадратичной зависимости:

$$(V_f/V_q)_{III} = 1 - 1,9 \cdot 10^{-21} \cdot \eta - 0,23 \cdot (10^{-21} \cdot \eta)^2$$

приводит к графику III на рис. 3. Поправка же еще и кубической зависимости (6):

$$(V_f/V_q)_{IV} = 1 - 1,85 \cdot 10^{-21} \cdot \eta - 0,24 \cdot (10^{-21} \cdot \eta)^2 - 0,004 \cdot (10^{-21} \cdot \eta)^3 \quad (6)$$

позволяет графику IV на рис. 3 пройти через все экспериментальные точки.

Объяснением наблюдаемой нелинейности могут служить некоторые центры, формируемые из парамагнитных примесных ионов при их концентрациях выше 1 ат. %. На роль таких центров вполне могут подойти так называемые «обменные пары парамагнитных ионов» [12,13]. Начиная примерно с концентрации ~1 ат.% при случайном распределении существует заметная вероятность для двух ионов оказаться на столь малом расстоянии, что между ними возникнет обменное взаимодействие вида $I \cdot (S_1 S_2)$, где I – обменный интеграл. Величина I экспоненциально возрастает при сближении ионов. Поскольку обменное взаимодействие зависит как от спина S_1 , так и от спина S_2 , то сила этого взаимодействия зависит от квадрата концентрации парамагнитных ионов η^2 [12,13].

Известно, что обменное взаимодействие производит магнитное упорядочивание спинов в пространстве, что приводит к кооперативным эффектам, реализующихся, например, в образовании доменов в ферромагнетиках, и к многократному увеличению воздействия внешних магнитных полей на материал с парамагнитной примесью. По-видимому, нечто подобное происходит с эффектом Фарадея в волоконных световодах с высокой концентрацией парамагнитной примеси, что приводит к добавке к линейной зависимости константы Верде

$\eta = 10,8 \cdot 10^{21}$ gives when calculating by the formula (3) unrealistic density $\rho = 5,0 \text{ g/cm}^3$. Indeed, $\gamma_{Tb} = 54 \text{ wt. \%}$ [5] gives an increase in density compared to quartz $\Delta\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$, and an additional increase in the value of γ_{Tb} to $\gamma_{Tb} = 65 \text{ wt. \%}$ [12], i. e. by $\Delta\gamma_{Tb} = 0 \text{ wt. \%}$, cannot give an increase in density by $\Delta\rho = 1,70 \text{ g/cm}^3$. A proportional increase in density gives $\Delta\rho = 0,13 \text{ g/cm}^3$, and the density of glass in [12] $\rho = 3,43 \text{ g/cm}^3$. According to formula (3), this value leads to the concentration η_{Tb} indicated in Table 2. In this case, the linear dependence of the Verdet constant shown in Fig. 2 in [12] is not obtained.

Figure 3 shows the ratios of the Verdet constant of silica fibers to the diamagnetic Verdet constant of quartz V_f/V_q as a function of the concentration of paramagnetic impurities of gadolinium and terbium. It can be seen that in the absence of paramagnetic impurities $\eta_{Gd, Tb} = 0$, the Verdet constant of the fiber V_f is positive and equal to the diamagnetic value $V_f/V_q = 1$. The introduction of an impurity of paramagnetic Tb^{+3} ions of low concentrations decreases the positive Verdet constant and only at a concentration of the order of $\eta_{Tb} \sim 0,5 \cdot 10^{21}$ it changes sign. The linear dependence of V_f on low concentrations is well represented by graph I described by formula (4):

$$(V_f/V_q)_I = 1 - 1,9 \cdot 10^{-21} \cdot \eta, \quad (4)$$

passing through two experimental points and zero in the region of low concentrations. However, in the region of high concentrations $\eta_{Tb} = 5,8 \cdot 10^{21}$ graph I gives the value $V_f/V_q = -10,7$, while experimentally, for a fiber optic, $V_f/V_q = -18,6$ [5]. On the contrary, if through the point $V_f/V_q = -27,28$ and the reliable point $V_f/V_q = 1$ at $\eta_{Tb} = 0$ draw a straight line (graph II):

$$(V_f/V_q)_{II} = 1 - 3,9 \cdot 10^{-21} \cdot \eta, \quad (5)$$

then in the region of low concentrations there will be an equally dramatic discrepancy between theory and experiment. In particular, a negative value of V_f/V_q will be achieved already at a concentration of terbium equal to $\eta_{Tb} = 0,25 \cdot 10^{21}$, which was not observed by us at $\eta_{Tb} = 0,26 \cdot 10^{21}$ ions/cm³. It can be argued that a linear dependence on the concentration of a paramagnetic impurity can adequately describe the behavior of the Verdet constant only at low concentrations of this impurity no more than 1-2 ат. %.

поправки, квадратично зависящей от концентрации. Понятно, что с меньшей вероятностью (пропорционально третьей степени концентрации η^3) возможно объединение из трех спинов, и т.д. В нашем случае константа Верде нарастает с увеличением концентрации нелинейно из-за поочередного включения вкладов «обменных объединений магнитных моментов».

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

Авторы благодарны Голанду К.М., Чаморовскому Ю.К., Исаеву В.А., Аксенову В.А., Волошину В.В., Воробьеву И.Л. за предоставленные оптические волокна. Авторы также благодарны Ацаркину В.А. за плодотворные обсуждения.

REFERENCES

1. **Faraday M.** On the magnetization of light, and the illumination of magnetic lines of force. *Philos. Trans. Royal Soc.* 1846; 1: 104.
2. **Zeeman P.** Doubles and triplets in the spectrum produced by external magnetic forces. *Phil. Mag.* 1897; 44: 55.
3. **Williams P. A., Rose A. H., Day G. W., Milner T. E., Deeter M. N.** Temperature dependence of the Verdet constant in several diamagnetic glasses. *Appl. Opt.* 1991; 30(10): 1176–1178. DOI: 10.1364/AO.30.001176.
4. **Van Vleck J. H.** *The theory of electric and magnetic susceptibilities.* Oxford 1932.
5. **Balato J., Snitzer E.** Fabrication of fibers with high rare-earth concentrations for Faraday Isolator applications. *Appl. Opt.* 1995; 34(30): 6848–6854. DOI: 10.1364/AO.34.006848.
6. **Aksenov V. A., Voloshin V. V., Vorobyev I. L., Ivanov G. A., Isaev V. A., Kolosovsky A. O., Morshnev S. K., Chamorovsky Yu. K.** The Faraday Effect in Quartz Optical Fibers. *Journal of Communications Technology and Electronics.* 2002; 47: 919–925.
Аксенов В. А., Волошин В. В., Воробьев И. Л., Иванов Г. А., Исаев В. А., Колосовский А. О., Моршнева С. К., Чаморовский Ю. К. Особенности эффекта Фарадея в кварцевых волоконных световодах. *Радиотехника и электроника.* 2002; 47(8): 1011–1017.
7. **Gubin V. P., Starostin N. I., Przhivalkovskiy Ya. V., Morshnev S. K., Sazonov A. I., Otkhrov S. Yu.** Fiber-optic electric current transformers: physical bases and technical implementation.

Correction to formula (5) in the form of a quadratic dependence:

$$(V_f/V_q)_{III} = 1 - 1.9 \cdot 10^{-21} \cdot \eta - 0.23 \cdot (10^{-21} \cdot \eta)^2$$

leads to graph III in Fig. 3. The correction is also for the cubic dependence (6):

$$(V_f/V_q)_{IV} = 1 - 1.85 \cdot 10^{-21} \cdot \eta - 0.24 \cdot (10^{-21} \cdot \eta)^2 - 0.004 \cdot (10^{-21} \cdot \eta)^3 \quad (6)$$

allows plot IV in Figure 3 to go through all experimental points.

The observed nonlinearity can be explained by some centers formed from paramagnetic impurity ions at their concentrations above 1 at%. The so-called “exchange pairs of paramagnetic ions” [12, 13] may well fit the role of such centers. Beginning with a concentration of ~1 at. % with a random distribution, there is a noticeable probability for two ions to be at such a small distance that an exchange interaction of the form $I(S_1S_2)$ occurs between them, where I is the exchange integral. The quantity I exponentially increases as the ions approach each other. Since the exchange interaction depends on both spin S_1 and spin S_2 , the strength of this interaction depends on the square of the concentration of paramagnetic ions η^2 [12, 13].

It is known, that the exchange interaction produces a magnetic ordering of spins in space, which leads to cooperative effects that are realized, for example, in the formation of domains in ferromagnets, and to a multiple increase in the effect of external magnetic fields on a material with



Вакуумное оборудование для оптики и микроэлектроники



Проектирование и производство вакуумных напылительных установок «под ключ»



Программное обеспечение и автоматизация



Izovac

Разработка и изготовление тонкопленочных изделий



Разработка технологий формирования тонких пленок



Оптические элементы



Напылительный сервис

Сложные и уникальные покрытия

ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907, 220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42, факс: +375 17 2931845

www.izovac.com
www.izovac-coatings.com



Part II. *Photonics Russian*. 2018; 12(8): 762–769. DOI: 10.22184/1993-7296.2018.12.8.762.769.

Губин В. П., Старостин Н. И., Пржиялковский Я. В., Моршнев С. К., Сазонов А. И., Отрохов С. Ю. Волоконно-оптические трансформаторы электрического тока: физические основы и техническая реализация. Часть II. *Фотоника*. 2018; 12(8): 762–769. DOI: 10.22184/1993-7296.2018.12.8.762.769.

8. Berger S. B., Rubinstein C. B., Kurkjian C. R., Treptow A. W. Faraday rotation in rare-earth (III) phosphate glasses. *Phys. Rev.* 1964; 133: A723-A727. DOI: 10.1103/PhysRev.133.A723.
9. Petrovskii G. T., Edelman I. S., Zarubina T. V., Valakhovskii A. V., Zabluda V. N., Ivanov M. Yu. Faraday effect and spectral properties of high-concentrated rare earth oxide glasses in visible and near UV region. *J. Non-cryst. Solids*. 1991; 130: 35–40.
10. Ismaeel R., Masoudi A., Wang Y., Talataisong W., Chiodini N., Lee T., Beresna M., Brambilla G. Giant Faraday rotation in gadolinium doped silica optical fibers for high performance optical isolators. OFC 2018, San Diego, California USA. 11–15 March 2018. *Postdeadline Session II (Th4B)*. DOI:10.1364/OFC.2018.Th4B.2.
11. Sun L., Jiang S., Marciante J. R. Compact all-fiber optical Faraday components using 65-wt%-terbium-doped fiber with a record Verdet constant of $-32 \text{ rad} / (\text{T}\cdot\text{m})$. *Opt. Express* 2010; 18(12): 12191–12196. DOI: 10.1364/OE.18.012191.
12. Gill J. C. Spin-lattice relaxation of chromium ions in ruby. *Proc. Phys. Soc.* 1962; 79: 58–68. DOI: 10.1088/0370-1328/79/1/309.
13. Atsarkin V. A. On the mechanism of paramagnetic spin-lattice relaxation at low temperatures. *Soviet Phys. JETP*. 1966; 22(1): 106–113. Ацаркин В. А. Механизм парамагнитной спин-решеточной релаксации при низких температурах. *ЖЭТФ*. 1966; 22(1): 106–113.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

С. К. Моршнев: идея, планирование и проведение эксперимента; обработка и анализ результатов, написание статьи; Н. И. Старостин: организация и проведение экспериментов, анализ результатов, обсуждение, предложения, написание статьи; Я. В. Пржиялковский: проведение экспериментов анализ результатов, обсуждение, редактирование, оформление рукописи; А. И. Сазонов: подготовка и проведение эксперимента, обработка результатов, обсуждение и оформление рукописи.

АВТОРЫ

Моршнев Сергей Константинович: д. ф.-м. н., вед. н. с., e-mail: morshnev@profotech.com, ИРЭ им В. А. Котельникова (Фрязинский филиал) РАН, г. Фрязино, Моск. обл., Россия. Область научных интересов: физические принципы волоконной оптики. ORCID: 0000-0001-5095-2745

Старостин Николай Иванович: к. ф.-м. н., вед. н. с., e-mail: nistar53@mail.ru, ИРЭ им В. А. Котельникова (Фрязинский филиал) РАН, г. Фрязино, Моск. обл., Россия. Область научных интересов: волоконная оптика, волоконно-оптические датчики. ORCID: 0000-0001-9013-8588

Пржиялковский Ян Владимирович: к. ф.-м. н., ст. н. с., e-mail: yankus.p@gmail.com, ИРЭ им В. А. Котельникова (Фрязинский филиал) РАН, г. Фрязино, Моск. обл., Россия. Область научных интересов: волоконная оптика, волоконно-оптические датчики. ORCID: 0000-0003-0591-8323

Сазонов Александр Иванович: к. т. н., ст. н. с., e-mail: sazonov_alexandr_48@mail.ru, ИРЭ им В. А. Котельникова (Фрязинский филиал) РАН, г. Фрязино, Моск. обл., Россия. Область научных интересов: специальные волокна и волоконные датчики.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Все члены авторского коллектива согласны с текстом представленной рукописи и с указанным распределением вклада каждого из них, авторы гарантируют оригинальность результатов и что рукопись не находится на рассмотрении для публикации в других журнальных изданиях.

a paramagnetic impurity. Apparently, something similar it happens with the Faraday effect in fibers with a high concentration of paramagnetic impurity, which leads to the addition of a correction quadratically dependent on the concentration to the linear dependence of the Verdet constant. It is clear that a combination of three spins is possible with a lower probability (proportional to the third power of the concentration η^3), etc. In our case, the Verdet constant grows nonlinearly with increasing concentration due to the alternate inclusion of the contributions of “exchange unions of magnetic moments”.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences.

The authors are grateful to K. M. Goland, Yu. K. Chamorovskiy, V. A. Isaev, V. A. Aksyonov, V. V. Voloshin, I. L. Vorobyev for the fibers provided. The authors are also grateful to V. A. Atsarkin for fruitful discussions.

AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT

Morshnev S. K.: concept, concept, planning and conducting experiment, t, processing and analysis of the results, writing an article. Starostin N. I.: organization and conducting of the experiment, analysis of the results, discussion, suggestions, writing an article. Przhialkovskiy Y. V.: conducting an experiment, analysis of the results, discussing, editing, design. Sazonov A. I.: preparation and conducting of the experiment, processing of the results, discussion, design.

ABOUT AUTHORS

Morshnev S. K., Dr. of Science (Phys.&Math), Senior Researcher, e-mail: morshnev@profotech.com, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch) Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow region, Russia. Research interests: physical principles of fiber optics.

ORCID: 0000-0001-5095-2745

Starostin N. I., Cand. of Science (Phys.&Math), Leading Researcher, e-mail: nistar53@mail.ru, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch) Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow region, Russia. Research interests: fiber optics, fiber optic sensors. ORCID: 0000-0001-9013-8588

Przhialkovskiy Y. V., Cand. of Science (Phys.&Math), Senior Researcher, e-mail: yankus.p@gmail.com, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch) Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow region, Russia. Research interests: fiber optics, fiber optic sensors. ORCID: 0000-0003-0591-8323

Sazonov A. I., Cand. of Science (Eng.), Senior Researcher, e-mail: sazonov_alexandr_48@mail.ru, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch) Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow region, Russia. Research interests: special fibers and fiber sensors.

CONFLICT OF INTERESTS

All members of the authoring team agree with the text of the submitted manuscript and with the specified distribution of the contribution of each of them, the authors guarantee the originality of the results and that the manuscript is not being considered for publication in another journals.

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ И УЧАСТИИ:

Министерства промышленности, связи,
цифрового и научно-технического развития
Омской области,

Министерства региональной безопасности
Омской области,

Администрации города Омска,

ОРО ООО «Союз машиностроителей России»,

Представительства ГК «Ростех» в Омской области,

Союза «Омская Торгово-промышленная палата»,

Омская ассоциация промышленников и предпринимателей
(Региональное отделение Российского союза
промышленников и предпринимателей),

Ассоциации «Омский региональный центр компетенций ТЭК»,

АНО «Омский НОЦ»

2 - 4 марта 2022г. **ОМСК**

XXIII СИБИРСКИЙ ПРОМЫШЛЕННО- ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

ПРОМТЕХЭКСПО

В ЭКСПОЗИЦИИ ФОРУМА:

ОМСКГАЗНЕФТЕХИМ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

МЕТАЛЛООБРАБОТКА

СВАРКА

ЭНЕРГОСИБ, СИБМАШТЭК

ИНЭКСПО

АВТОМАТИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРОНИКА,

ИЗМЕРЕНИЯ

IT-ТЕХНОЛОГИИ

СВЯЗЬ

Одновременно проводится выставка
«ИНДУСТРИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И СВЯЗИ»

ОМСК-ЭКСПО
ВЫСТАВОЧНАЯ КОМПАНИЯ

ИнтерСиб

тел./факс: +7 (3812) 23-23-30

e-mail: expo@intersib.ru

www.intersib.ru