



Использование зеemanовского кольцевого лазера для измерения магнитного поля

Ю. Ю. Колбас, М. Е. Грушин, А. А. Медведев
АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия

Настоящая работа посвящена построению точного магнитометра на основе зеemanовского кольцевого лазера (ЗКЛ). Показано, что ЗКЛ позволяет с высокой точностью измерять магнитные поля напряженностью до 10 Э в широком диапазоне рабочих температур. Такой ЗКЛ обладает узкой диаграммой направленности, что особенно важно при измерении вертикальной составляющей магнитного поля Земли или направления на магнитные полюса. Выявлены основные причины, воздействующие на чувствительность ЗКЛ к магнитному полю. Приведены экспериментальные результаты использования ЗКЛ при измерении магнитных полей различной напряженности.

Ключевые слова: кольцевой лазер, эффект Зеемана, смещение нуля, магнитный дрейф нуля

Статья получена: 30.10.2020

Статья принята к публикации: 15.11.2020

ВВЕДЕНИЕ

Измерители напряженности магнитных полей (магнитометры) широко используются в геологии, геодезии, археологии [1, 2]. Для измерения магнитного поля используются феррозондовые, протонные, квантовые магнитометры. Такие приборы обеспечивают измерение магнитных полей напряженностью от 5 до 50 Э и обладают чувствительностью в диапазоне 10^{-5} – 10^{-7} Э.

Одной из разновидностей квантового измерителя магнитного поля является зеemanовский кольцевой лазер (ЗКЛ). Принцип его действия основан на эффекте Зеемана – разделении по частотам кон-

Using Zeeman Ring Laser to Measure Magnetic Field

Yu. Yu. Kolbas, M. E. Grushin, A. A. Medvedev
JSC “Research Institute “Polyus” n. a. M. F. Stelmakh, Moscow,
Russia

This work is devoted to the construction of a precision magnetometer based on a Zeeman ring laser (ZRL). It is shown that the ZRL allows high-precision measurements of magnetic fields up to 10 Oe in a wide range of operating temperatures. Such a ZRL has a narrow directivity pattern, which is especially important when measuring the vertical component of the Earth's magnetic field or the direction to the magnetic poles. The main reasons affecting the sensitivity of the ZRL to the magnetic field are revealed. Experimental results of the use of ZRL for measuring magnetic fields of various strengths are presented.

Key words: ring laser, Zeeman effect, zero bias, magnetic drift

Received on: 30.10.2020

Accepted on: 15.11.2020

INTRODUCTION

Magnetic field strength meters (magnetometers) are widely used in geology, geodesy, archeology [1, 2]. Fluxgate, proton, and quantum magnetometers are used to measure the magnetic field. Such devices provide measurement of magnetic fields of strength from 5 to 50 Oe and have a sensitivity in the range of 10^{-5} – 10^{-7} Oe.

One of the varieties of a quantum magnetic field meter is a Zeeman ring laser (ZRL). The principle of its operation is based on the Zeeman effect: frequency division of the gain circuit of a helium-neon gas laser into two – for left and right circularly polarized light. As a result of the pulling of waves to the maxima of the gain curves, a difference in the frequencies of counter-propagating waves propagating in opposite directions in the non-planar cavity of the ZRL arises [3].

This difference in frequencies of counterpropagating waves is called the magnetic component of the ZRL zero displacement. This is what we will use to measure the magnetic field strength.



тура усиления гелий-неонового газового лазера на два: для лево- и правополяризованного по кругу света. В результате затягивания волн к максимумам кривых усиления возникает разность частот встречных волн, распространяющихся в противоположных направлениях в неплюском резонаторе ЗКЛ [3].

Эта разность частот встречных волн называется магнитной составляющей смещения нуля ЗКЛ. Именно ее мы будем использовать для измерения напряженности магнитного поля.

Интерес исследования возможности использования именно ЗКЛ в качестве магнитометра обусловлен исключительной прочностью и устойчивостью этих приборов к механическим ударам и вибрациям, а также к изменению внешней температуры [4–6]. Очень немногие приборы способны работать при ударах амплитудой до 100 g, вибрациях до амплитудой 15g, без какой-либо амортизации и при температурах от -55 °C до 75 °C без подогрева или охлаждения. При этом масса одноосного ЗКЛ со всей электроникой не превышает 1,5 кг.

1. МАГНИТНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ ЗКЛ

Магнитной составляющей смещения нуля в ЗКЛ называют зависящую от магнитного поля на активной среде составляющую, которая может быть выделена в квазичетырёхчастотном режиме генерации ЗКЛ (режим с периодическим переключением поляризаций) или в четырехчастотном режиме, когда в генерации одновременно находятся две продольные моды резонатора ЗКЛ [4,5].

Как уже говорилось выше, при наложении на активную среду продольного магнитного поля с напряженностью H вследствие эффекта Зеемана возникает расщепление линии излучения активных атомов на величину $\mu = g \cdot \mu_B \cdot H$, где g – фактор Ланде, μ_B – магнетон Бора. Зеемановское расщепление, вследствие эффекта затягивания, приводит к разности частот встречных волн – магнитной составляющей смещения нуля f_m , зависящей от величины H и относительной расстройки резонатора $\Delta\lambda$ от максимума усиления. При настройке на максимум усиления $\Delta\lambda = 0$ разность частот встречных волн – магнитная составляющая смещения нуля f_m равна [3, 6]

$$f_m(0) = \Delta\nu_r \cdot \frac{\eta}{\eta_0} \cdot Z \left(\frac{-\mu + i \cdot \gamma_{ab}}{k \cdot u} \right), \quad (1)$$

где $\Delta\nu_r$ – ширина полосы резонатора, $\eta = \frac{G}{p}$ – превышение усиления над потерями, G – коэффициент

The interest in studying the possibility of using precisely the ZRL as a magnetometer is due to the exceptional strength and resistance of these devices to mechanical shocks and vibrations, as well as to changes in the external temperature [4–6]. Very few devices are capable of operating at shocks with an amplitude of up to 100 g, vibrations up to an amplitude of 15 g, without any shock absorption, and at temperatures from -55 °C to 75 °C without heating or cooling. Moreover, the mass of a uniaxial ZRL with all the electronics does not exceed 1.5 kg.

1. MAGNETIC COMPONENT OF THE ZRL ZERO BIAS

The magnetic component of the zero bias in the ZRL is called the component dependent on the magnetic field on the active medium, which can be isolated in the quasi-four-frequency mode of the ZRL generation (the mode with periodic switching of polarizations) or in the four-frequency mode, when two longitudinal modes of the ZRL cavity are simultaneously generated [4, 5].

As mentioned above, when a longitudinal magnetic field with strength H is applied to the active medium, due to the Zeeman effect, the emission line of active atoms splits by $\mu = g \cdot \mu_B \cdot H$, where g is the Lande factor, μ_B is the Bohr magneton. Due to the pulling effect, the Zeeman splitting leads to a frequency difference of counterpropagating waves, the magnetic component of the zero bias f_m , which depends on the value of H and the relative detuning of the cavity $\Delta\lambda$ from the gain maximum. When tuned to the maximum gain $\Delta\lambda = 0$, the frequency difference of counterpropagating waves, the magnetic component of the zero offset f_m is equal to [3, 6]

$$f_m(0) = \Delta\nu_r \cdot \frac{\eta}{\eta_0} \cdot Z \left(\frac{-\mu + i \cdot \gamma_{ab}}{k \cdot u} \right), \quad (1)$$

where $\Delta\nu_k$ is the cavity bandwidth, $\eta = \frac{G}{p}$ is the excess of gain over losses, G is the gain per cavity pass, p is the loss per pass $\eta_0 = \max Z_i \left(\frac{i \cdot \gamma_{ab}}{k \cdot u} \right)$, Z_i and Z_r are the real and imaginary parts of the plasma dispersion function, respectively, μ is the value splitting of the Zeeman sub-levels in a magnetic field, γ_{ab} is the parameter of uniform line broadening, k is the wave number, and u is the average thermal velocity of atoms.

The cavity bandwidth is related to the cavity losses

$$\Delta\nu_r = \frac{c}{L} \cdot p, \quad (2)$$

усиления на один проход резонатора, ρ – коэффициент потерь на один проход, $\eta_0 = \max Z_i \left(\frac{i \cdot \gamma_{ab}}{k \cdot u} \right)$,

Z_i и Z_r – действительная и мнимая части дисперсионной функции плазмы соответственно, μ – величина расщепления зеемановских подуровней в магнитном поле, γ_{ab} – параметр однородного уширения линии, k – волновое число, u – средняя тепловая скорость атомов.

Ширина полосы резонатора связана с потерями резонатора

$$\Delta\nu_r = \frac{c}{L} \cdot \rho, \quad (2)$$

где c – скорость света, L – длина резонатора, ρ – коэффициент потерь на один проход.

В доплеровском пределе при $\frac{\gamma_{ab}}{k \cdot u} \rightarrow 0$ в максимуме кривой усиления в линейном приближении по $\frac{\mu}{k \cdot u}$ получим [6]

$$f_m(0) = a \cdot H, \text{ где } a = \frac{3,64 \cdot \lambda \cdot c \cdot G}{\sqrt{\pi} \cdot L \cdot u}. \quad (3)$$

Величина магнитной чувствительности a , как следует из формулы (3), определяется усилением G и тепловой скоростью движения атомов u . С учетом насыщения усиления при $G > \rho$ большую роль играют потери ρ .

Для типичных значений параметров кольцевого лазера $a \approx 1,7$ кГц/Э [6].

2. УСТРОЙСТВО МАГНИТОМЕТРА НА ЗКЛ

На рис. 1 представлен рисунок неплоского резонатора ЗКЛ [5], функциональная схема и фотография квазичетырехчастотного ЗЛК К-5 производства АО НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха на рис. 2 и 3 соответственно.

Резонатор ЗКЛ имеет неплоский контур, образованный 4 зеркалами. В таком контуре в каждом плече резонатора вращения круговой поляризации световой волны меняется на противоположное, поэтому при приложении поля по всем направлениям, кроме перпендикулярного основанию ЗКЛ, магнитного смещения нуля не возникает. Конечно при условии, что резонатор идеален и усиление во всех плечах одинаково.

Работа такого ЗКЛ и выделение магнитной составляющей смещения нуля подробно опи-

where c is the speed of light, L is the length of the cavity, ρ is the loss factor per pass.

In the Doppler limit with $\frac{\gamma_{ab}}{k \cdot u} \rightarrow 0$ at the maximum of the gain curve in the linear approximation $\frac{\mu}{k \cdot u}$, we obtain [6]

$$f_m(0) = a \cdot H, \text{ where } a = \frac{3,64 \cdot \lambda \cdot c \cdot G}{\sqrt{\pi} \cdot L \cdot u}. \quad (3)$$

The magnitude of the magnetic sensitivity a , as follows from formula (3), is determined by the amplification G and the thermal velocity of motion of atoms u . With allowance for gain saturation where $G > \rho$, losses ρ play an important role.

For typical values of the parameters of a ring laser, $a \approx 1.7$ kHz/Oe [6].

2. ARRANGEMENT OF THE MAGNETOMETER ON THE ZRL

Fig. 1 shows a drawing of a non-planar cavity ZRL [5], a functional diagram and a photograph of a quasi-four-frequency ZRL K-5 manufactured by JSC NII “Polyus” n. a. M. F. Stelmakh is shown in Figs. 2 and 3, respectively.

The ZRL cavity has a non-planar contour formed by 4 mirrors. In this circuit, in each arm of the cavity, the rotation of the circular polarization of the light wave is reversed, therefore, when the field is applied in all directions, except for the one perpendicular to the base of the ZRL, no magnetic displacement of zero occurs. Of course, provided that the cavity is ideal and the gain in all arms is the same.

The operation of such ZRL and the separation of the magnetic component of the zero bias are described in detail in [4]. It is important for us that the frequency

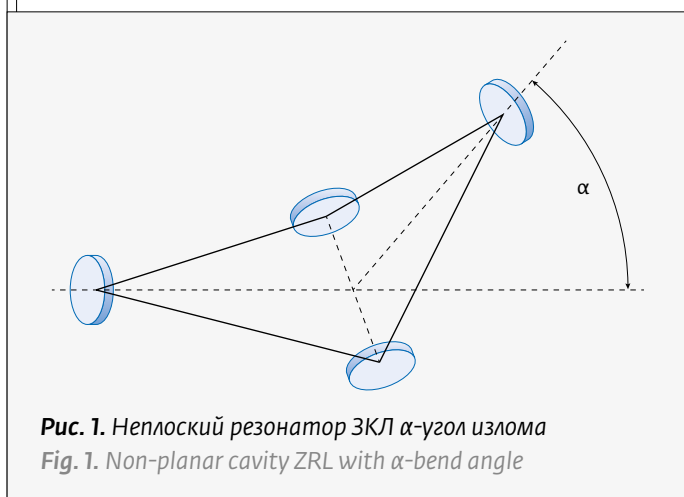


Рис. 1. Неплоский резонатор ЗКЛ α -угол излома
Fig. 1. Non-planar cavity ZRL with α -bend angle

сано в [4]. Для нас важно, что частотная подставка, создаваемая путем наложения магнитного поля от катушек, намотанных на газоразрядные промежутки, позволяет точно определить изменение коэффициента a при эксплуатации кольцевого лазера, поскольку ток в этих катушках стабилизирован с точностью не хуже 0,01%.

Для вычленения магнитной составляющей смещения нуля в ЗКЛ К-5 используется попеременная работа на продольных модах с противоположным направлением поляризации [4,5]. На этапе заводской настройки путем создания эталонного внешнего магнитного поля при температуре 25 °С, определяется коэффициент a_0 , а также соответствующая ему частота подставки A_0 . В дальнейшем

bias created by applying a magnetic field from the coils wound on the gas-discharge gaps allows us to accurately determine the change in the coefficient a during the operation of the ring laser, since the current in these coils is stabilized with an accuracy of no worse than 0.01%.

To isolate the magnetic component of the zero bias in the ZRL K-5, alternating work on longitudinal modes with opposite polarization direction is used [4, 5]. At the stage of factory setting, by creating a reference external magnetic field at a temperature of 25 °C, the coefficient a_0 is determined, as well as the corresponding dithering frequency A_0 . Further, at any temperature, the magnetic field strength is calculated by the formulas

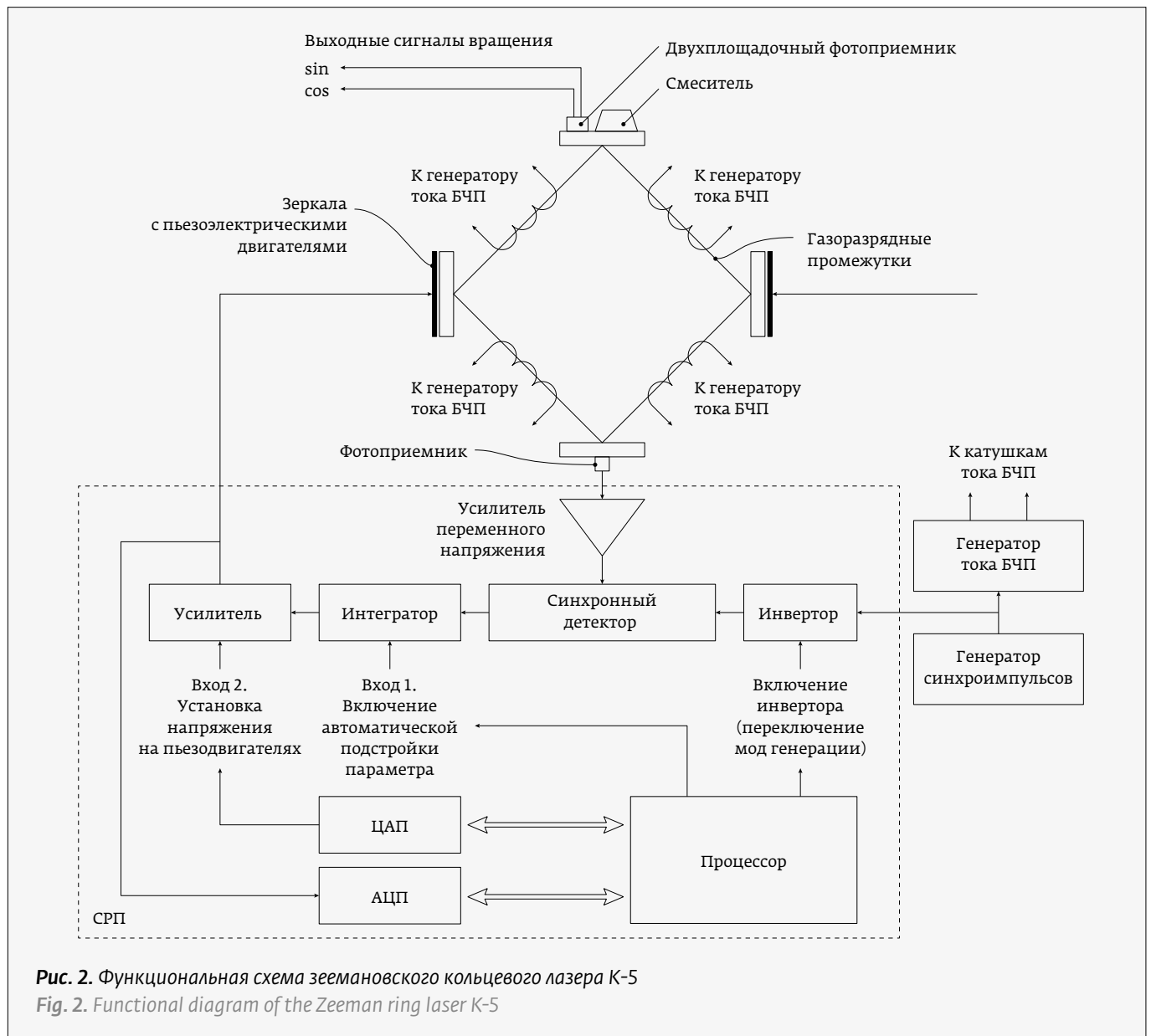


Рис. 2. Функциональная схема зеemanовского кольцевого лазера К-5
 Fig. 2. Functional diagram of the Zeeman ring laser K-5

при любой температуре напряженность магнитного поля вычисляется по формулам

$$H = \frac{f^+ - f^-}{a_0 \cdot \frac{A}{A_0}} \quad (4)$$

Здесь f^+ и f^- – смещение нуля ЗКЛ на продольных модах с противоположным направлением поляризации, A – частота подставки.

Очевидно, что помимо внешних магнитных полей в ЗКЛ существует внутреннее магнитное поле, также вызывающее магнитную составляющую смещения нуля [6]. Для его измерения перед непосредственным применением следует провести измерения магнитного поля в основном и развернутом на угол 180° положениях ЗКЛ. Поскольку внутреннее магнитное поле при этом сохранит свое значение и направление, а направление внешнего изменится на противоположное, то нетрудно вычислить величину напряженности внутреннего магнитного поля и в дальнейшем вычитать ее из показаний.

3. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МАГНИТОМЕТРА НА ЗКЛ

Чувствительность ЗКЛ ограничивается шумом частоты генерации ЗКЛ и дискретом частотомера, используемого для измерения смещения нуля ЗКЛ на продольных модах с противоположным направлением поляризации f^+ и f^- .

$$\Delta f_g = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_\Phi}{t}}, D_\Phi = \frac{4\hbar\omega_0\Delta\omega_{\text{рез}}^2}{P}, \quad (5)$$

где D_Φ – спектральная плотность флуктуаций разности частот встречных волн лазера на нулевой частоте, c – скорость света, L – периметр резонатора, S – площадь, охватываемая оптическим контуром, $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ – частота генерации лазера, $\Delta\omega_{\text{рез}} = 2\pi\Delta\nu_{\text{рез}}$ – ширина полосы резонатора, \hbar – постоянная Планка, P – мощность лазерного излучения внутри резонатора, δ – относительные потери света в резонаторе за круговой проход.

Для ЗКЛ К-5 $L = 0,2$ м, $S = 0,0025$ м², $\nu_0 = 4,73 \cdot 10^{14}$ Гц, $\Delta\nu_{\text{рез}} = 5,6 \cdot 10^5$ Гц, $P = 5 \cdot 10^{-2}$ Вт, $T = 6$ с, $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Джс, $\Delta f_g = 0,0012$ Гц.

Дискрет частотомера [7, 8] равен $0,125/t$. Для $t = 6$ с это составит $0,02$ Гц, для $t = 60$ с соответственно $0,002$ Гц, для $t = 600$ с составит $0,0002$ Гц.

Поскольку резонатор ЗКЛ имеет неплоский контур, а чувствительным является только магнит-

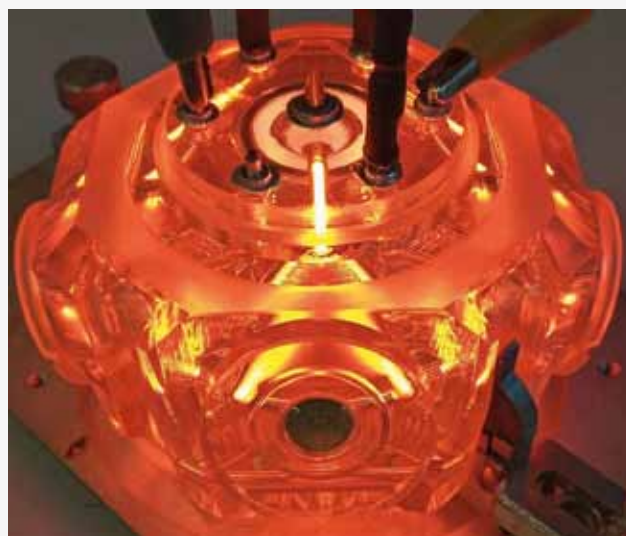


Рис. 3. Резонатор ЗКЛ К-5

Fig. 3. Cavity ZRL K-5

$$H = \frac{f^+ - f^-}{a_0 \cdot \frac{A}{A_0}} \quad (4)$$

Here f^+ and f^- are the bias of the ZRL zero on longitudinal modes with opposite polarization direction, A is the bias frequency.

It is obvious that, in addition to external magnetic fields in the ZRL, there is an internal magnetic field, which also causes the magnetic component of the zero displacement [6]. To measure it, before direct use, it is necessary to measure the magnetic field in the main and rotated at an angle of 180° to the ZRL positions. Since the internal magnetic field in this case will retain its value and direction, and the direction of the external will change to the opposite, it is easy to calculate the value of the internal magnetic field strength and then subtract it from the readings.

3. SENSITIVITY OF THE ZRL MAGNETOMETER

The sensitivity of the GCL is limited by the noise of the generation frequency of the GCL and the sampling frequency of the frequency meter used to measure the offset of the GCL zero at longitudinal modes with opposite polarizations f^+ and f^- .

$$\Delta f_g = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_\Phi}{t}}, D_\Phi = \frac{4\hbar\omega_0\Delta\omega_{\text{рез}}^2}{P}, \quad (5)$$

ное поле, направление которого параллельно оси канала резонатора, величина a в направлении перпендикулярном основанию резонатора оказывается существенно меньше, чем была приведена выше в разделе 1.

У прибора ЗЛК К-5 угол α составляет 32° , что уменьшает величину a примерно в 6 раз, то есть до 250 Гц/Э.

Отметим, что по двум другим ортогональным направлениям, параллельным основанию, влияние магнитного поля в четырех промежутках оказывается попарно одинаковым, но противоположным по знаку. Поэтому ЗЛК обладает пространственной избирательностью и может работать в качестве однокомпонентного магнитометра.

При $a \approx 250$ Гц/Э порог чувствительности ЗКЛ может быть оценен в $7 \cdot 10^{-7} - 7 \cdot 10^{-5}$ Э, в зависимости от времени измерения, что соответствует современным образцам квантовых магнитометров.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте использовался прибор ЗКЛ К-5. Были проведены следующие измерительные процедуры:

1. Измерения зависимости магнитной составляющей смещения нуля ЗКЛ в НКУ при приложении внешнего магнитного поля напряженностью до 2,5 Э по трем ортогональным направлениям и вычисление коэффициента a по оси чувствительности.
2. Измерение стабильности коэффициента a в диапазоне температур от -55 до 75 °C при приложении магнитного поля 1 Э.
3. Измерение некомпенсированной по частоте подставки относительной погрешности коэффициента a в диапазоне температур от -55 до 75 °C.

Результаты измерений приведены на рис. 4–9. Из анализа рис. 4–6 видно, что зависимость магнитной составляющей смещения нуля ЗКЛ К-5 от напряженности магнитного поля носит линейный характер. При этом ЗКЛ демонстрирует хорошую избирательность к направлению магнитного поля, что позволяет осуществлять измерения проекций магнитного поля на каждое из трех направлений в пространстве отдельно. Взаимовлияние не превышает 1,7% (см. табл.)

Функциональные зависимости величины магнитной составляющей смещения нуля ЗКЛ и частоты подставки от температуры практически одинаковы (рис. 7, 8). Это дает возможность

where D_f is the spectral density of fluctuations of the frequency difference of counter-propagating laser waves at zero frequency, c is the speed of light, L is the cavity perimeter, S is the area covered by the optical circuit, $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ is laser generation frequency, $\Delta\omega_{\text{cav.}} = 2\pi\Delta\nu_{\text{cav.}}$ is the cavity bandwidth, h is the Planck constant, P is the power of laser radiation inside the cavity, δ is the relative loss of light in the cavity for a circular passage.

For ZRL K-5, $L=0,2$ m, $S=0,0025$ m², $\nu_0=4,73 \cdot 10^{14}$ Hz, $\Delta\nu_{\text{cav.}}=5,6 \cdot 10^5$ Hz, $P=5 \cdot 10^{-2}$ W, $T=6$ s, $h=1,054 \cdot 10^{-34}$ J·s, $D_{f_g}=0,0012$ Hz.

The discrete frequency meter [7, 8] is equal to $0.125/t$. For $t=6$ s, this will be 0.02 Hz, for $t=60$ s, respectively, 0.002 Hz, for $t=600$ s it will be 0.0002 Hz.

Since the ZRL cavity has a non-planar contour, and only the magnetic field is sensitive, the direction of which is parallel to the axis of the cavity channel, the value of a in the direction perpendicular to the cavity base turns out to be significantly less than that given above in Section 1.

For ZRL K-5, the angle α is 32° , which reduces the value of a by about 6 times, to 250 Hz/Oe.

Note that along the other two orthogonal directions parallel to the base, the influence of the magnetic field in four gaps turns out to be pairwise the same, but opposite in sign. Therefore, the ZRL has spatial selectivity and can work as a single-component magnetometer.

At $a \approx 250$ Hz/Oe, the sensitivity threshold of the ZRL can be estimated at $7 \cdot 10^{-7} - 7 \cdot 10^{-5}$ Oe, depending on the measurement time, which corresponds to modern samples of quantum magnetometers.

4. EXPERIMENTAL RESULTS AND THEIR DISCUSSION

The ZRL K-5 device was used in the experiment. Measurement procedures were carried out:

1. Measurements of the dependence of the magnetic component of the zero displacement of

Таблица. Коэффициенты a для основной и ортогональных осей чувствительности ЗКЛ К-5 при $T_0 = 25$ °C

Table. Coefficients a for the main and orthogonal axes of sensitivity of ZRL K-5 at $T_0 = 25$ °C

Ось	a_0 , Гц/Э
X	237,4
Y	2,1
Z	4,0

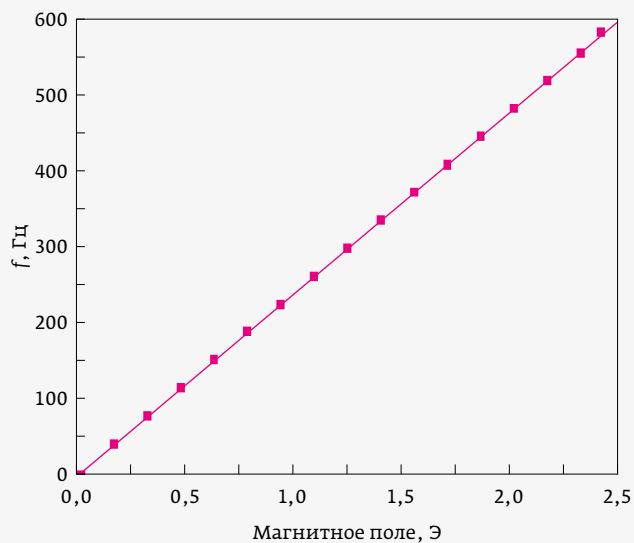


Рис. 4. Зависимость магнитной составляющей смещения нуля f_m от внешнего магнитного поля. Поле направлено вдоль оси чувствительности датчика (ось X)

Fig. 4. Dependence of the magnetic component of the zero displacement f_m on the external magnetic field. The magnetic field is directed along the sensor sensitivity axis (X axis)

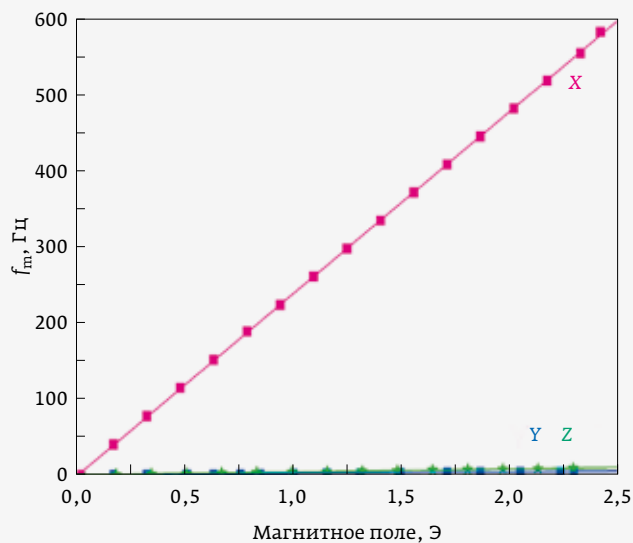


Рис. 6. Зависимость магнитной составляющей смещения нуля f_m от внешнего магнитного поля по трем направлениям внешнего магнитного поля

Fig. 6. Dependence of the magnetic component of the zero displacement f_m on the external magnetic field in three directions of the external magnetic field

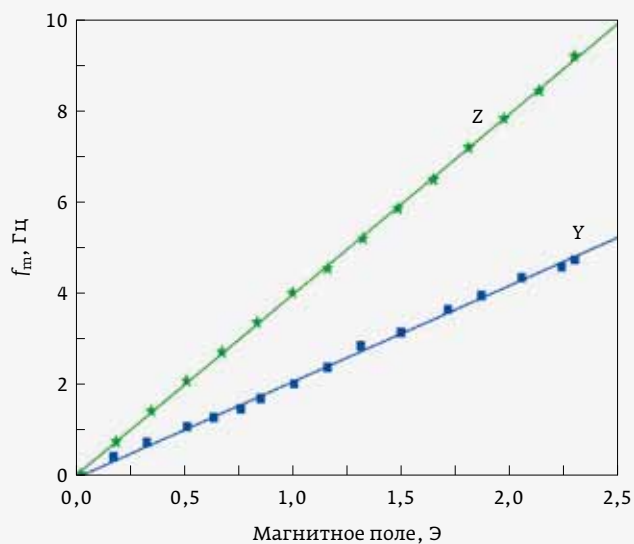


Рис. 5. Зависимость магнитной составляющей смещения нуля f_m от внешнего магнитного поля. Поле направлено перпендикулярно оси чувствительности датчика (ось Y, Z). Ток накачки –1,2 мА в одном плече

Fig. 5. Dependence of the magnetic component of the zero displacement f_m on the external magnetic field. The field is directed perpendicular to the sensor sensitivity axis (Y, Z axis). Pump current is 1.2 mA in one arm

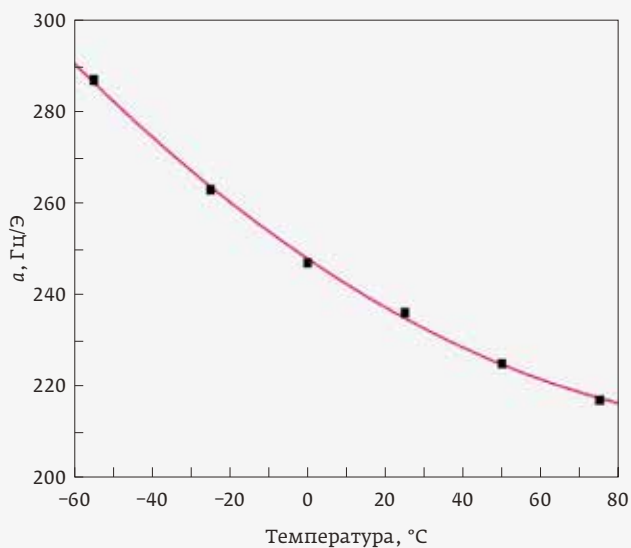
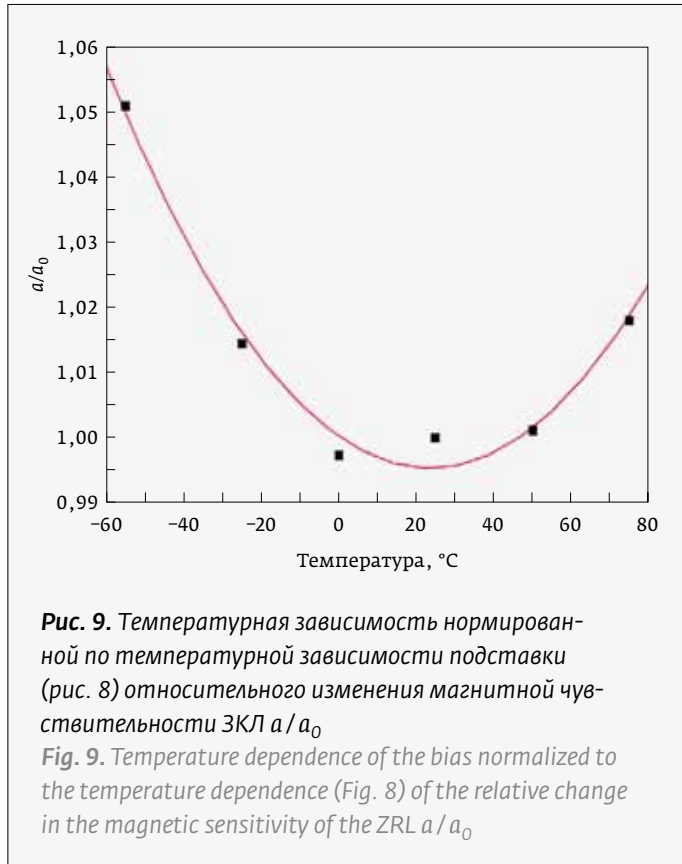
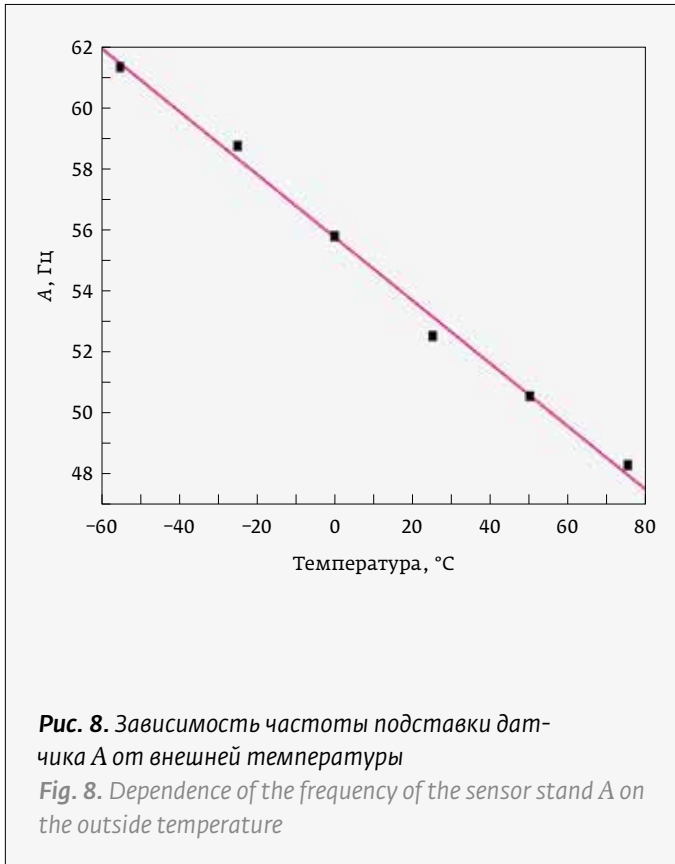


Рис. 7. Зависимость магнитной чувствительности датчика a от внешней температуры при напряженности магнитного поля 1 Э

Fig. 7. Dependence of the magnetic sensitivity of the sensor a on the external temperature at a magnetic field strength of 1 Oe





Современным компаниям – инновационные решения!

Универсальная терагерцовая платформа TeraFlash pro
 для исследований во временной области

Новая настольная универсальная терагерцовая платформа TeraFlash pro TOPTICA (Германия) устанавливает новые стандарты с точки зрения динамического диапазона полосы пропускания и скорости измерения терагерцовых систем. Благодаря усовершенствованной конструкции лазера и прогрессу в области фотопроводящих антенн, система теперь достигает пикового динамического диапазона 100 дБ и полосы пропускания более 6 ТГц. Благодаря высокоточной механической ступени задержки, система регистрирует 60 трасс/с при диапазоне сканирования 50 пс или 95 трасс / с при 20 пс на переменном терагерцовом тракте от 15 см до 110 см. Задающий фемтосекундный лазер генерирует импульсы 80 фс на длине волны 1560 нм.

Новая версия «Dual» позволяет одновременно работать с двумя излучателями и / или двумя приемниками.

Области применения: контроль пластиковых изделий, измерение толщины красочных и лаковых покрытий, мониторинг гидратации, исследование новых материалов, безопасность.

Эксклюзивным представителем компании TOPTICA (Германия) в РФ является компания «ЕвроЛэйз».

www.eurolase.ru





компенсировать обе эти зависимости, используя формулу (4). Как следует из рис. 9, погрешность измерения не превышает 5% в диапазоне температур от -55 до 75 °C и 1,8% в диапазоне температур от -25 до 75 °C.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зеэмановский кольцевой лазер может быть использован в качестве однокомпонентного магнитометра. Его чувствительность составляет $7 \cdot 10^{-7} - 7 \cdot 10^{-5}$ Э.

ЗКЛ имеет линейную характеристику, его температурная погрешность не превышает 5% в самом широком диапазоне температур от -55 до 75 °C и 1,8% в реально рабочем диапазоне температур от -25 до 75 °C.

ЗКЛ имеет хорошую пространственную избирательность, взаимовлияние осей не превышает 1,7%.

Таким образом, на зеэмановском кольцевом лазере может быть построен удобный магнитометр для эксплуатации в жестких условиях.

REFERENCES

1. Parkinson U. D. Introduction to geomagnetism. – Edinburg; London: Elsevier Science. 1983. 446 p. ISBN: 978-0444007735. (In Russ.: M.: Mir. 1986. 582 p.).
2. Gordin V. M., Roze E. N., Uglov B. D. *Morskaya magnitometriya* (In Russ.). – M.: Nedra. 1986. 232 p.
3. Savel'ev I. I., Khromykh A. M., Yakushev A. I. Influence of pressure on the Zeeman effect in a ring gas laser. *Quantum Electronics*. 1979; 9 (6): 682–687. DOI: 10.1070/QE1979v009n06ABEH009098.
4. Vahitov N. G., Golyaev YU. D., Dronov I. V., Ivanov M. A., Kolbas YU. YU., Krutikov A. P. Zeemanovskij lazernyj giroskop s pereklyucheniem prodol'nyh mod generacii. (In Russ.). *Vestnik MGTU imeni N. E. Baumana, Ser. Priborostroenie*. 2013; 3 (90): 112–125.5.
5. Azarova V. V., Golyaev Yu. D., Dmitriev V. G. Ring gas lasers with magneto-optical control for laser gyroscope. *Quantum Electronics*. 2000; 30 (2): 96–104. DOI:10.1070/QE2000v030n02ABEH001668.
6. Kolbas Yu. Yu., Saveliev I. I., Khokhlov N. I. Effect of external and internal magnetic fields on the bias stability in a Zeeman laser gyroscope. *Quantum Electronics*. 2015; 45 (6): 573–581. DOI: 10.1070/QE2015v045n06ABEH015538.
7. Golyaev Yu. D., Kolbas Yu. Yu. Oshibka diskretnosti vyhodnogo signala kol'cevogo lazera s periodicheskoy podstavkoj. (In Russ.). *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 1991; 17 (8): 162–165.
8. Golyaev Yu. D., Kolbas Yu. Yu. Application of ring lasers to determine the directions to the poles of Earth's rotation. *Quantum Electronics*. 2012; 42 (10): 949–952. DOI: 10.1070/QE2012v042n10ABEH014898.

АВТОРЫ

Колбас Юрий Юрьевич, д. т. н., tigra-e@rambler.ru, АО «НИИ „Полус“ им. М. Ф. Стельмаха» (Москва); специалист в области инерциальной навигации и лазерной гироскопии.
SCOPUS id: 6504072429

Грушин Михаил Евгеньевич, к. ф.-м. н., mihail.grushin1968@gmail.com, АО «НИИ „Полус“ им. М. Ф. Стельмаха» (Москва); специалист в области физики газового разряда, плазмохимии, плазменной медицины, инерциальной навигации и лазерной гироскопии.
SCOPUS id: 6603354719

Медведев Алексей Александрович, alexdyn92@yandex.ru, АО «НИИ „Полус“ им. М. Ф. Стельмаха» (Москва); специалист в области инерциальной навигации и лазерной гироскопии.
ORCID id: 0000-0002-7308-1839

the ZRL in the GCC when an external magnetic field with a strength of up to 2.5 Oe is applied in three orthogonal directions and the calculation of the coefficient a along the sensitivity axis.

2. Measurement of the stability of the coefficient a in the temperature range from -55 to 75 °C when a magnetic field of 1 Oe is applied.
3. Measurement of the frequency-uncompensated bias relative error of the coefficient a in the temperature range from -55 to 75 °C.

The measurement results are shown in Fig. 4–9. Analysis of Fig. 4–6 shows that the dependence of the magnetic component of the zero bias of the K-5 ZRL on the magnetic field strength is linear. In this case, the ZRL demonstrates good selectivity to the direction of the magnetic field, which makes it possible to measure the projections of the magnetic field to each of the three directions in space separately. The mutual influence does not exceed 1.7% (see Table).

The functional dependences of the magnitude of the magnetic component of the ZRL zero bias and the bias frequency on temperature are practically the same (Fig. 7, 8). This makes it possible to compensate for both these dependences using formula (4). As follows from Fig. 9, the measurement error does not exceed 5% in the temperature range from -55 to 75 °C and 1.8% in the temperature range from -25 to 75 °C.

6. CONCLUSION

The Zeeman ring laser can be used as a single-component magnetometer. Its sensitivity is $7 \cdot 10^{-7} - 7 \cdot 10^{-5}$ Oe.

ZRL has a linear characteristic, its temperature error does not exceed 5% in the widest temperature range from -55 to $+75$ °C and 1.8% in the actual operating temperature range from -25 to 75 °C. ZRL has good spatial selectivity, the mutual influence of the axes does not exceed 1.7%.

Thus, a convenient magnetometer for operation in harsh conditions can be constructed based on a Zeeman ring laser.

ABOUT THE AUTHORS

Kolbas Yuri Yurievich, Doctor of Technical Sciences, tigra-e@rambler.ru, JSC "Research Institute "Polyus" n. a. M. F. Stelmakh" (Moscow); specialist in the field of inertial navigation and laser gyroscope.
SCOPUS id: 6504072429

Grushin Mikhail Evgenievich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, mihail.grushin1968@gmail.com, JSC "Research Institute "Polyus" n. a. M. F. Stelmakh" (Moscow); specialist in the field of physics of gas discharge, plasma chemistry, plasma medicine and inertial navigation and laser gyroscope.
SCOPUS id: 6603354719

Medvedev Aleksey Aleksandrovich, alexdyn92@yandex.ru, JSC "Research Institute "Polyus" n. a. M. F. Stelmakh" (Moscow); specialist in the field of inertial navigation and laser gyroscope.
ORCID id: 0000-0002-7308-1839

Использование программно-целевого подхода в организации развития фотоники в стране

Традиционно фотоника объединяет прикладные аспекты лазерной физики, оптоволоконную и нелинейную оптику, оптоэлектронику, медицинскую диагностику, лазерную и ТГц-спектроскопию, квантовые вычисления. Текущий уровень развития фотоники может быть обеспечен только за счет формирования консорциумов и ассоциаций, способных объединить и консолидировать усилия ученых и разработчиков. Для обеспечения своих лидирующих позиций в фотонике страны идут по пути создания программ поддержки исследований и разработок.

22 октября 2020 года состоялось очередное заседание Экспертного совета по фотонике при Комиссии по правовому обеспечению развития организаций ОПК Государственной Думы Российской Федерации. Участниками заседания стали: члены Экспертного совета – А. В. Баранов, А. Л. Ветлужских, В. В. Валувев, И. Б. Ковш, О. Е. Наний, Д. А. Рогаткин, В. Е. Черковец; уполномоченные представители членов Экспертного

совета – С. Ю. Исаев (ПАО «ПНППК»), А. В. Морозов (АО «Лазерные системы»), П. И. Абрамов (АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха») А. А. Чубыкин (АО «НПК СПП»); приглашенные эксперты – П. С. Дорожкин, зам. нач. Департамента квантовых коммуникаций ОАО «РЖД», В. М. Исаев, директор по научно-техническому развитию АО «Росэлектроника», Н. Л. Истомина, зам. академика-секретаря Отделения физических наук РАН, А. И. Каширин, зам. председателя НТС ГК «Ростех», Ю. Н. Кульчин, зам. председателя ДВО РАН, Н. А. Смазнов, зам. директора Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, И. Б. Шарпов, нач. отдела Департамента инноваций и перспективных исследований Минобрнауки России, Д. В. Шерстнев, директор по развитию оптико-электронных систем АО «КРЭТ», А. О. Фомичева, зам. директора Департамента науки и инновационного развития Минздрава России, А. Н. Чебуркин, нач. отдела ООО «Т8». Председательствовал А. Л. Ветлужских, депутат



Андрей Леонидович Ветлужских

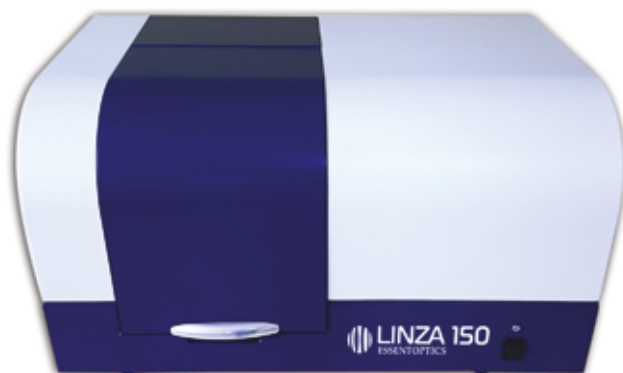
Государственной Думы, председатель Экспертного совета. Подробно о ходе заседании читайте на страницах «Лазер-информ». 2020; 22(685).

По материалам «Лазер-информ». 2020; 22(685)

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