
**ЛАЗЕРЫ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

УДК 621.373.8

**ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРИЗОВАННОГО
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИЭЛЕКТРИКЕ
ПРИ ЕГО НИЗКОЧАСТОТНОМ ВРАЩЕНИИ И НАГРЕВЕ**

© 2015 г. В. О. Гладышев, Д. И. Портнов, С. В. Садовников,
В. Л. Кауц, Е. А. Шарандин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, Россия

E-mail: vgladyshv@mail.ru

Поступила в редакцию 29.01.2015 г.

Обсуждены результаты экспериментов по наблюдению поворота плоскости поляризации, смещения луча и изменения интенсивности когерентного излучения лазера с длиной волны $\lambda = 0.632991$ мкм, прошедшего наклеенный на гиromотор оптический диск, выполненный из стекла ТФ3 с показателем преломления $n = 1.71250$. Опыты проводились при угле падения луча на плоскую поверхность диска $\vartheta_0 = 60^\circ$, частота вращения диска изменялась от 2 до 10 Гц для двух направлений вращения оптического диска. В области низких частот вращения основным фактором, вызывающим механические деформации и, как следствие, изменение оптических характеристик излучения, прошедшего оптический диск, является нагрев границы раздела сред металл-стекло.

DOI: 10.7868/S0030403415070107

Широко известны методы дефектоскопии — определения механических напряжений в материале путем измерения угла поворота плоскости поляризации проходящего через образец излучения. Существует также обратная задача — модуляция оптических свойств при помощи механических напряжений. Однако довольно сложно создать управляемые механические напряжения большой амплитуды [1, 2].

В работе [3] были обнаружены явления поворота плоскости поляризации лазерного излучения и двулучепреломления, возникающие во вращающемся оптическом стекле в области до 200 Гц. Показано, что обнаруженные явления нелинейно зависят от частоты вращения оптического диска в области частот ниже 100 Гц. Кроме того, анизотропия оптических свойств имеет время релаксации $\tau = 10^2 \dots 10^3$ с при установившейся частоте вращения f . Эволюция оптических свойств диэлектрика в области частот ниже 10 Гц происходит сравнительно медленно [4], что приводит к необходимости дополнительных исследований.

В настоящей работе выполнены детальные измерения угла поворота поляризации лазерного излучения, эллиптичности, деполяризации, изменения яркости светового пучка и углового отклонения лучей, прошедших вращающуюся плоскопараллельную пластинку, выполненную из ТФ3. Измерения выполнялись в области инфра-

низких частот с длительным накоплением сигнала и контролем температуры поверхности электромотора и оптического диска.

Исследования проводились на установке, в которой механические напряжения используются для управления оптическими свойствами когерентного электромагнитного излучения (рис. 1).

Излучение стабилизированного по мощности лазера L проходит через поляризационную турель P , которая позволяет выбрать одночастотный режим излучения с горизонтальным или вертикальным вектором поляризации ортогонально поляризованных составляющих излучения. Далее излучение проходит оптический диск D , наклеенный на гиromотор G , обеспечивающий вращение диска на заданной частоте f . Затем луч проходит через анализатор A , позволяющий следить за поворотом плоскости поляризации. Часть излучения отражается от зеркала M , имеющего возможность поворота в двух плоскостях, и поступает в ветвь контроля параметров излучения, где рассеивается на линзе DL и попадает в систему фоторегистрации S . Детектором является высокоскоростной фототранзистор, сигнал с которого поступает в широкополосный предусилитель, 12-разрядный АЦП и затем в персональный компьютер. Оптический диск приводился во вращение трехфазным асинхронным двигателем G , частота которого задавалась цифровым преобразователем Delta Electronics VFD-EL.

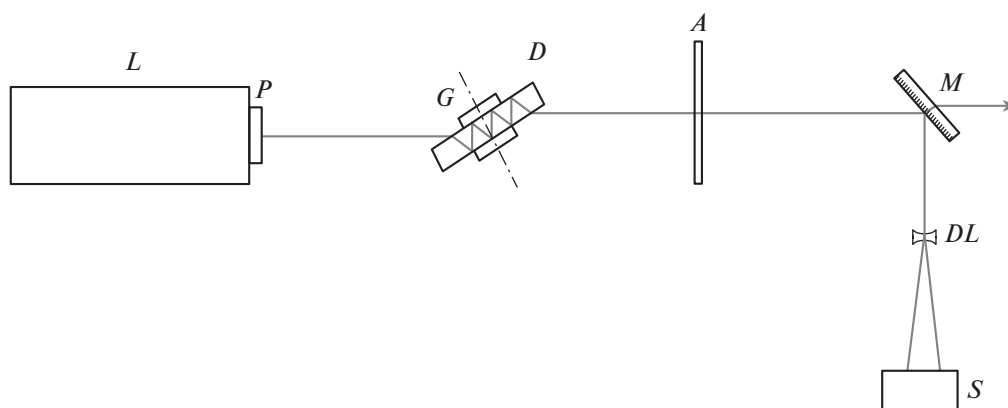


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента.

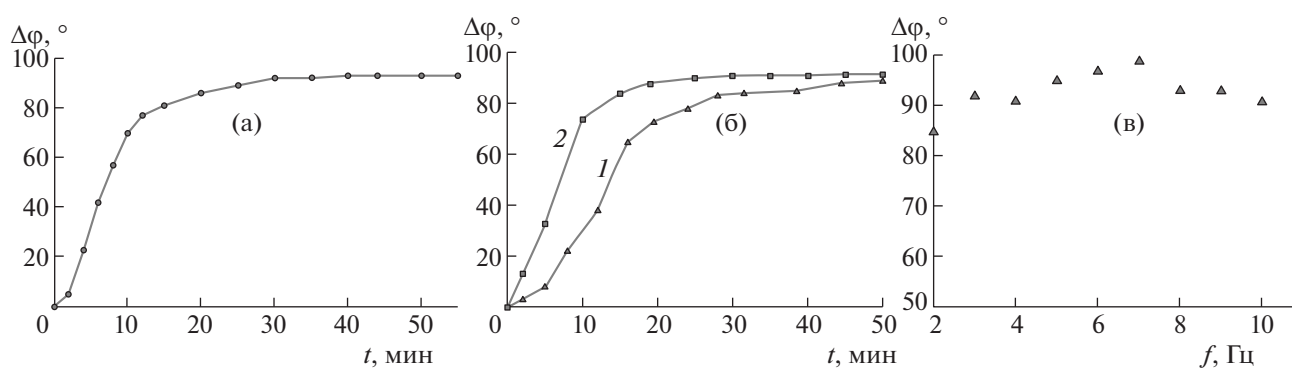


Рис. 2. Экспериментальная зависимость угла поворота плоскости поляризации при исходной горизонтальной поляризации от времени при вращении диска на частоте 8 Гц (а), 1.6 Гц (б, график 1), без вращении (б, график 2); зависимость угла поворота плоскости поляризации от частоты вращения диска (в).

В опытах использовался стабилизированный He–Ne-лазерный генератор непрерывного режима работы ЛГН 302 с мощностью 0.7 мВт в каждой поляризационной компоненте генерации.

Угол поворота плоскости поляризации определялся углом поворота анализатора A , в начале эксперимента расположенного так, чтобы плоскости поляризатора P и анализатора A были перпендикулярны, а проходящий через них на фотодетектор сигнал – минимален. В ходе эксперимента положение анализатора A изменялось так, чтобы сигнал, прошедший через него, оказывался минимальным.

Экспериментальные зависимости поворота поляризации от времени и частоты в области инфранизких частот вращения D изображены на рис. 2. Переходный процесс поворота поляризации, зафиксированный в процессе эксперимента на частоте 8 Гц, представлен на рис. 2а. Первой точке на графике соответствует момент запуска вращения гиromотора G . Как видно из графика, поворот плоскости поляризации составил 93° , а переходный процесс занял около 40 мин.

В экспериментах было обнаружено, что на низких частотах вращения изменение оптических характеристик стекла становится слабо зависящим от скорости вращения. На рис. 2б приведена зависимость поворота поляризации от времени на частоте вращения 1.6 Гц (график 1) и без вращения (график 2). Во втором случае электропитание гиromотора было таким же, как и в первом случае, но гиromотор удерживался неподвижным. Из сравнения графиков следует, что при вращении гиromотора с диском поворот поляризации происходит более медленно, что объясняется преобразованием части подводимой к двигателю электрической энергии в механическую и естественным охлаждением. При неподвижном диске вся электрическая энергия идет в тепло и влияние напряженного состояния вещества на поляризацию происходит быстрее.

В дальнейшем были измерены переходные процессы поворота поляризации в интервале частот (2–10) Гц с шагом 1 Гц и построена зависимость угла поворота плоскости поляризации от частоты вращения диска (рис. 2в) для установив-

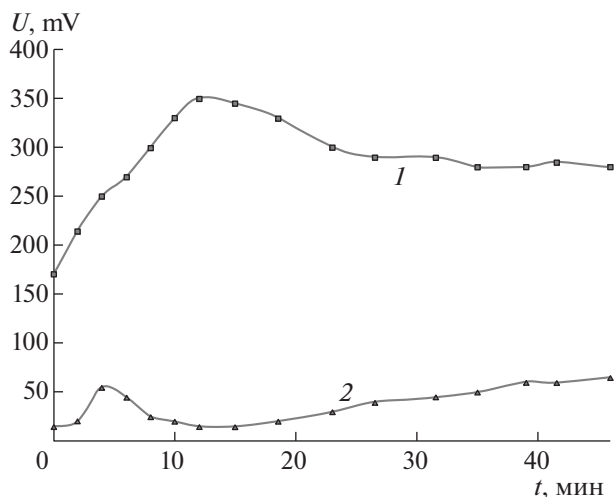


Рис. 3. Зависимость напряжения на фотодетекторе от времени при параллельном (1) и перпендикулярном (2) расположении осей анализатора A и поляризатора P .

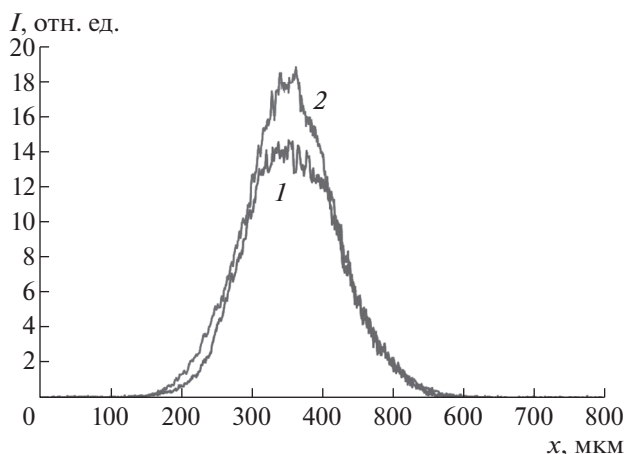


Рис. 4. Зависимость интенсивности лазерного излучения в плоскости фоторегистрации от координаты x при неподвижном (1) и вращающемся (2) дисках.

шихся значений поляризации. Нижняя граница диапазона ограничена предельно достижимой частотой вращения гиromотора.

Можно заметить, что во всей области частот вращения диска поворот плоскости поляризации имеет значения порядка 90° . Отсутствие резкого уменьшения эффекта при стремлении частоты вращения к нулю объясняется тем, что в этом пределе растёт ток в обмотке гиromотора, повышается его температура и, как следствие, развивается напряжённое состояние диэлектрика, находящегося в контакте с металлической поверхностью гиromотора.

Дальнейшие измерения позволили сделать вывод о том, что угол поворота плоскости поля-

ризации не зависит от выбранной на выходе лазера L компоненты излучения, а также от направления вращения.

Таким образом, нелинейную зависимость $\Delta\phi(f)$ в области до 100 Гц можно объяснить напряжениями в стекле, вызванными нагревом. С ростом частоты вращения уменьшается ток, увеличивается теплоотвод за счёт конвективного охлаждения вращающегося ротора двигателя, снижается нагрев диска, в результате уменьшаются напряжения в стекле и анизотропия оптических свойств. При частоте вращения более 100 Гц начинают проявляться упругие свойства стекла, вызванные его вращением, что приводит к изменению вида зависимости $\Delta\phi(f)$ [3, 4].

Помимо эффектов, связанных с поворотом плоскости поляризации, в ходе эксперимента был обнаружен эффект углового смещения лазерного луча в вертикальной плоскости. Смещение луча происходило значительно быстрее, чем поворот плоскости поляризации. Величина смещения во всем диапазоне инфранизких частот составила $0.075\text{--}0.077^\circ$. Так же как и в случае с углом поворота плоскости поляризации, эффект оказался независимым от выбранной компоненты на выходе лазерного генератора L и от направления вращения диска.

Как показал эксперимент, переходные процессы в материале стекла сопровождаются преобразованием линейно поляризованного излучения в эллиптически поляризованное. Для изучения изменения поляризации лазерного излучения были измерены временные зависимости напряжения на фотодетекторе, возникающего при падении излучения на детектор, при параллельном и перпендикулярном расположении осей поляризатора и анализатора (рис. 3). Результаты приведены для частоты вращения диска 9 Гц, измеряя в самой яркой точке рассеянного на линзе DL пятна — в его центре.

При этом можно считать, что интенсивность излучения пропорциональна напряжению на фотодетекторе S .

Как видно из графиков, в первые минуты эксперимента степень эллиптичности излучения наибольшая, затем на десятой минуте эксперимента излучение становится линейно поляризованным. Затем вклад интенсивности, обусловленный деполаризацией, начинает возрастать с течением времени по близкому к линейному закону.

По графику I видно, что интенсивность сигнала, прошедшего через поляризатор P и анализатор A , при параллельном расположении их осей изменяется. Это вызвало гипотезу о возможной фокусировке (сжатии) лазерного пятна в плоскости детектора S , вызванной механическими деформациями диска D под действием температуры. Для ис-

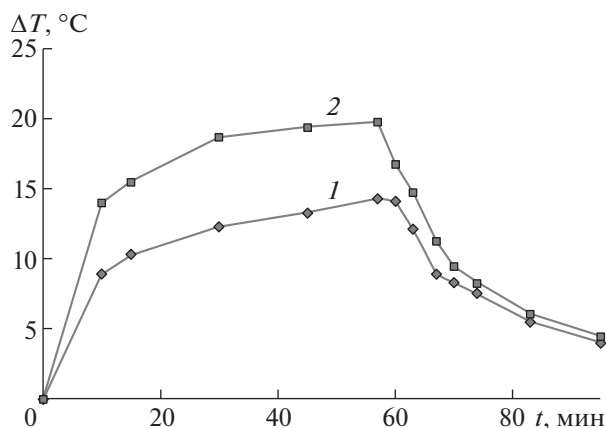


Рис. 5. Экспериментальная зависимость изменения температуры диска (1) и мотора (2) от времени при частоте вращения 8 Гц.

ключения возможности влияния фокусировки фотодетектор S был заменен на измеритель профиля пучка Spigicon, позволяющий сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии предполагаемого эффекта. Полученные графики распределения интенсивности излучения в сечении светового пятна представлены на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что наблюдается изменение интенсивности излучения в световом пятне в плоскости локализации — на светочувствительной площадке фотоприемной матрицы. При этом вид распределения интенсивности в сечении светового пятна не изменяется, что в первом приближении свидетельствует об отсутствии фокусировки (сжатия) пучка. Наблюдаемое изменение интенсивности, по-видимому, возникает вследствие уменьшения потерь при распространении излучения в диске при его нагреве.

Нелинейная зависимость поворота поляризации и других оптических свойств излучения, прошедшего через оптический диск, от частоты вращения [3] в области НЧ находит объяснение в рамках термоупругой модели. Токи, протекающие по обмоткам электромотора G , вызывают повышение его температуры, приводящее к увеличению линейных размеров двигателя и передаче тепла в оптический диск D , находящийся с ним в контакте. Коэффициент температурного расширения стали, из которой сделан гиromотор, $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, в то время как этот же коэффициент для стекла равен $\alpha = 9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [5]. Данная проблема особенно актуальна на инфранизких частотах, на которых скорость встречного воздушного потока невелика и он не может охлаждать вращающуюся систему. Можно предположить, что рост анизотропии оптических свойств стекла в области НЧ возникает из-за роста напря-

жения в стекле при повышении температуры в частях диска, находящихся ближе к гиromотору G .

Зависимость показателя преломления материала от длины волны излучения и изменения температуры имеет вид [5]

$$n_T = n_R + (T - R) \left(\frac{dn}{dT} \right)_{\text{smoothed}}, \quad (1)$$

где T — температура материала, R — комнатная температура, n_T и n_R — показатели преломления соответственно при температурах T и R , dn/dT — термооптический коэффициент.

Формула (1) позволяет оценить эффект изменения показателя преломления диска из тяжелого флинта по температурным данным, полученным в ходе эксперимента. Термооптический коэффициент для стекла марки ТФ3 в диапазоне температур от 20°C до 120°C равен $dn/dT = 57 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ [6]. Если принять показатель преломления при комнатной температуре $n_R = 1.71250$, то для градиента температур за время проведения измерений порядка 20°C получим $n_T = 1.71261$. Приращение $\Delta n = 10^{-4}$ слишком мало для того, чтобы объяснить наблюдаемые оптические явления.

Известно, что время переходных процессов поворота плоскости поляризации увеличивается с уменьшением частоты [3, 4], поэтому были выполнены продолжительные измерения нагрева и охлаждения диска D и мотора G , соответствующие времени поворота плоскости поляризации. На рис. 5 представлены результаты измерения температуры поверхности диска и гиromотора, которые вращались в течение 1 ч на частоте 8 Гц, после чего были остановлены.

Как следует из графиков, за время вращения гиromотор G нагрелся на 20°C , а диск на 14°C . Заметим, что в области высоких частот вращения существенного нагрева диска и гиromотора не было обнаружено.

Кроме того, нагрев отдельно диска на 20°C не приводит к появлению каких-либо заметных изменений в оптических свойствах стекла, если судить по поляризации лазерного излучения, прошедшего неподвижный диск.

Тем не менее данные результаты позволяют сделать вывод о необходимости учета влияния температурного фактора при исследовании эффектов, происходящих в оптическом диске D , наклеенном на вращающийся на инфранизких частотах гиromотор G .

Для расчета напряжений в оптическом диске будем считать гиromотор цилиндром из нержавеющей стали, который вставлен без зазора в диск с отверстием из стекла ТФ3. Поскольку температурный коэффициент линейного расширения у стали больше, чем у стекла, стальной диск будет

давить на стекло. Для оценки будем считать, что оба диска нагреваются на 15°C.

Для механических напряжений и деформаций круглого диска имеем соотношения [7]:

$$\sigma_r = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 r_2^2}{r^2} \frac{p_1 - p_2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (2)$$

$$u = \frac{(1 - \mu)(p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2)}{E} r + \frac{(1 + \mu)r_1^2 r_2^2}{E} \frac{p_1 - p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{\mu r}{E} \sigma_z, \quad (3)$$

где σ_r , σ_τ и σ_z – радиальное, окружное и осевое напряжения, p_1 и p_2 – давления на внутренней и внешней поверхностях диска, E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона.

В соотношении (2) верхнему индексу соответствует верхний знак, нижнему – нижний.

Для диска из нержавеющей стали $r_1 = 0$, $r_2 = a$, $p_2 = p_a$, $\sigma_z = 0$.

Для стеклянного диска $r_1 = a$, $r_2 = b$, $p_1 = p_a$, $p_2 = 0$, $\sigma_z = 0$.

Тогда для стального диска

$$\sigma_{1r} = -p_a, \quad (4)$$

$$u_1 = -\frac{(1 - \mu_1)}{E_1} p_a a^2 r. \quad (5)$$

Для стеклянного диска

$$\sigma_{2r} = \frac{p_a a^2}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2}{r^2} \frac{p_a}{b^2 - a^2}, \quad (6)$$

$$u_2 = \frac{(1 - \mu_2)}{E_2} \frac{p_a a^2}{b^2 - a^2} r - \frac{(1 + \mu_2) a^2 b^2}{E_2} \frac{p_a}{r b^2 - a^2}. \quad (7)$$

В свободном состоянии при нагреве на ΔT внешний радиус стального диска должен расширяться на величину $\alpha_1 a \Delta T$, а внутренний радиус стеклянного диска на величину $\alpha_2 a \Delta T$. В склеенном виде радиусы изменятся на $\alpha_1 a \Delta T + u_1(a)$ и $\alpha_2 a \Delta T + u_2(a)$, где $u_1(a) < 0$, а $u_2(a) > 0$, так как $\alpha_1 > \alpha_2$.

Приравнивая изменения радиусов с учетом (5) и (7), получим выражение для нахождения p_a :

$$p_a = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T}{\frac{(1 - \mu_1)}{E_1} + \frac{(1 - \mu_2) a^2 + (1 + \mu_2) b^2}{E_2 (b^2 - a^2)}}. \quad (8)$$

Выберем данные для оценки: для нержавеющей стали $\alpha_1 \approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $E_1 = 2 \times 10^{11} \text{ Па}$, $\mu_1 \approx 0.3$ [2]; для стекла ТФЗ $\alpha_2 = 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $E_2 = 5.5 \times 10^{10} \text{ Па}$, $\mu_2 \approx 0.221$ [6].

Подставив значения $\Delta T = 30 \text{ К}$, $a = 17 \text{ мм}$, $b = 40 \text{ мм}$, получим оценку: $p_a = 4 \times 10^6 \text{ Па}$.

Тогда механические напряжения стеклянного диска получим из (2):

$$\sigma_r = \frac{p_a a^2}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2}{r^2} \frac{p_a}{b^2 - a^2}, \quad (9)$$

$$\sigma_\tau = \frac{p_a a^2}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2}{r^2} \frac{p_a}{b^2 - a^2}. \quad (10)$$

Для $r = 33 \text{ мм}$ (7 мм от края диска) получим $\sigma_r = -4 \times 10^5 \text{ Па}$, $\sigma_\tau = 2.2 \times 10^6 \text{ Па}$, а для $r = 40 \text{ мм}$ (край диска) $\sigma_r = 0$, $\sigma_\tau = 1.8 \times 10^6 \text{ Па}$.

Согласно [8], разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей составляет

$$n_e - n_o = B(\sigma_\tau - \sigma_r), \quad (11)$$

где B – оптический коэффициент напряжения, который, согласно [6], для стекла ТФЗ равен $1.8 \times 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$. Тогда в нашем случае $n_e - n_o \approx 4 \times 10^{-6}$.

Угол падения луча лазера на плоскую поверхность диска составляет 60° (рис. 1). Угол преломления ϑ_2 имеет значение, близкое к 30°. Толщина диска составляет $d_1 = 10 \text{ мм}$. Луч отражается на плоских зеркальных поверхностях диска 6 раз и проходит расстояние, равное $l = \frac{7d_1}{\cos \vartheta_2} = 80.8 \text{ мм}$.

Оценим геометрическую длину пути, которую луч должен пройти через вещество диска для поворота плоскости поляризации на 90°, используя следующую упрощенную модель. Луч падает на поверхность диска нормально и распространяется в диске без переотражений. Разность $n_e - n_o$ в диске одинакова на всем пути следования луча и составляет 4×10^{-6} . Угол между плоскостью поляризации и главной плоскостью равен 45°.

Разность фаз обыкновенного и необыкновенного лучей составляет

$$\delta = \frac{(n_e - n_o) d}{\lambda_0} 2\pi. \quad (12)$$

Для нашего случая ($\lambda_0 = 0.63 \times 10^{-6} \text{ м}$, $\delta = \pi/2$) получаем оценочное значение $d = 80 \text{ мм}$, что вполне согласуется с истинным значением расстояния l , которое луч проходит внутри диска. Мы приходим к выводу, что исследуемые оптические явления, такие как поворот плоскости поляризации, эллиптичность, угловое отклонение пучка и изменение интенсивности, а также зависимости этих явлений от времени и частоты в области НЧ, можно качественно объяснить механическими напряжениями, возникающими на границе металл-стекло из-за нагрева.

При более точном расчете влияния двулучепреломления необходимо учесть, что луч проходит через разные области диска, а значения σ_r и σ_τ (и, следовательно, разность $n_e - n_o$) зависят от расстояния до его центра диска. Кроме того, постоянно меняется угол между исходной плоскостью поляризации луча и главной плоскостью. Точный расчет эффектов, возникающих за счет двойного лучепреломления при прохождении луча через диск с учетом тепловых процессов [9] и механических колебаний вращающегося диска, представляет самостоятельную задачу.

Исследованная в экспериментах оптическая схема может быть использована для разработки устройства управления параметрами лазерного излучения. Схема проста в изготовлении и характеризуется малой потребляемой мощностью и большим градиентом оптических параметров когерентного излучения в оптическом диске. Полученные результаты можно использовать в качестве основы для разработки устройства высокоточного измерения разности показателей преломления $n_e - n_o$ и непосредственного измерения коэффициента фотоупругости в оптически прозрачных средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малов Б.В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
2. Богуш М.В. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах. Т. 3. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. 346 с.
3. Гладышев В.О., Портнов Д.И., Кауц В.Л., Шарандин Е.А. // Опт. и спектр. 2013. Т. 115. № 3. С. 42–49.
4. Гладышев В.О., Портнов Д.И. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 4. С. 97–104.
5. Ghosh G., Endo M., Iwasaki T. // J. Lightwave Technol. 1994. V. 12. № 8. P. 1338–1342.
6. ГОСТ 3659-78. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры. 28 с.
7. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 590 с.
8. Физические величины. Справочник / Под ред. Григорьева И., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
9. Morozov A.N., Skripkin A.V. // Phys. Lett. A. 2011. V. 375. № 46. P. 4113–4115.