

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ
ДВУМЯ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ:
РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ,
А ТАКЖЕ ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

© 2023 г. **В. В. Осипов^а, А. Н. Орлов^{а,*}, В. В. Лисенков^а,
Р. Н. Максимов^{а,**}, В. А. Шитов^а**

^аИнститут электрофизики УрО РАН
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

*e-mail: orlov@iep.uran.ru

**e-mail: romanmaksimov@e1.ru

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 19.05.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования распределения магнитного поля в пространстве между двумя постоянными магнитами цилиндрической формы со сквозными отверстиями в центре. В середине пространства размерами $2 \times 2 \times 2$ мм³ вблизи оси симметрии обнаружено магнитное поле с неоднородностью не более чем 3%, а в области $1 \times 1 \times 1$ мм³ – менее 1%. На основе расчетных и экспериментальных результатов разработана и изготовлена установка для определения постоянной Верде (V) с применением постоянных магнитов из неодима. Определены магнитооптические постоянные для образцов оптической керамики из Tb₂O₃ и Tb₃Ga₅O₁₂ на длинах волн 0.628 и 1.06 мкм.

DOI: 10.31857/S003281622306006X, EDN: WWVDAG

1. ВВЕДЕНИЕ

В современной оптоэлектронике и световолоконной технике немаловажную роль играют магнитооптические элементы, используемые для управления длительностью и частотой импульсов излучения. В последнее время для этой цели широко разрабатывается магнитооптическая керамика, обладающая большой по сравнению с магнитооптическими стеклами величиной постоянной Верде. Так, для керамики из Tb₃Ga₅O₁₂ постоянная Верде на длине волны 1.06 мкм составляет 40 рад/(Тл · м), а у образцов из оксида тербия (Tb₂O₃) на той же длине волны постоянная Верде увеличивается до 140 рад/(Тл · м), что позволяет уменьшить длину магнитооптического элемента более чем в три раза [1].

Как известно, постоянная Верде характеризует магнитное вращение плоскости поляризации в веществе. Образец, помещенный в магнитное поле, поворачивает плоскость поляризации света, распространяющегося по направлению поля, на угол $\varphi = V \cdot l \cdot B$, где l – длина пути луча в образце (м), B – индукция магнитного поля (Тл), V – постоянная Верде (рад/(Тл · м)). При этом величина V не зависит от направления распространения

света вдоль оси магнитного поля, но сильно зависит от температуры образца и длины волны излучения [2, 3].

В технологии производства магнитооптической керамики существенную роль играют аппаратура и методика для определения постоянной Верде. Необходимым элементом при измерении магнитооптической постоянной является источник постоянного магнитного поля, в качестве которого используются соленоиды, электромагниты с зазором между полюсами и редко постоянные магниты из разных материалов. Первоначально нами в установке для определения постоянной Верде был применен электромагнит панцирного типа с источником стабилизированного тока до 10 А и напряжением до 60 В [1]. Установлено, что существенными недостатками электромагнита являются большие габаритные размеры, наличие в измерительной установке достаточно мощного источника стабилизированного тока и быстрый нагрев его обмоток. В данной работе описывается методика для определения постоянной Верде с источником магнитного поля на постоянных неодимовых магнитах. Хотя в ряде работ упоминается применение постоянных магнитов в каче-

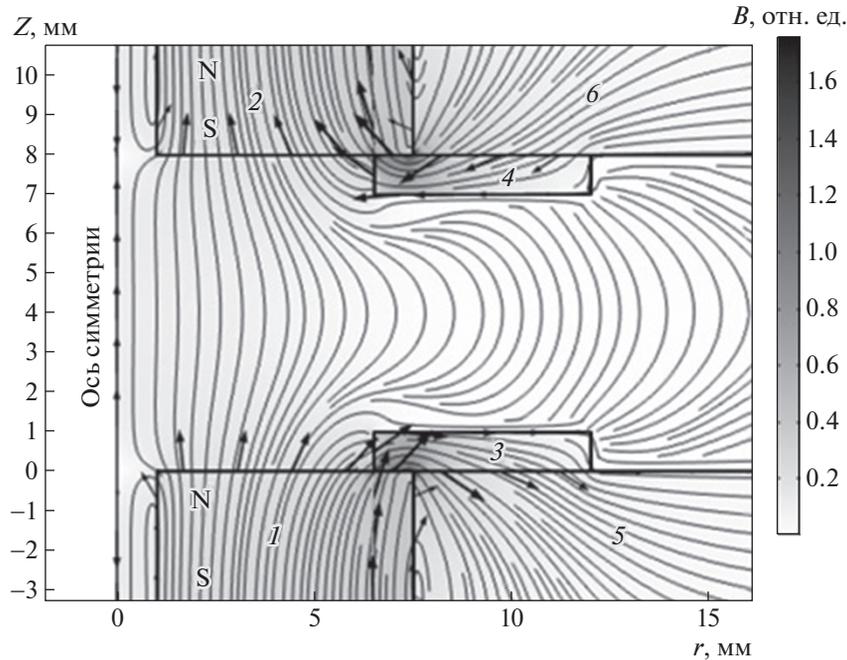


Рис. 1. Геометрия расчетной области в цилиндрических координатах и общая картина распределения магнитной индукции между двумя магнитами. Ось симметрии (ось Z) проходит через центры отверстий в неодимовых магнитах (1, 2). От перемещения магнитов друг к другу из-за действия силы притяжения магниты зафиксированы ограничительными шайбами (3, 4), закрепленными к стальному основанию (5, 6). Стрелками показаны локальные направления вектора магнитной индукции. Показаны также силовые линии магнитного поля.

стве источников магнитного поля (см., например, [4]), в них отсутствуют сведения о характеристиках магнитного поля в зазоре между полюсами магнитов и погрешности измерений, обусловленные его неоднородностью. Поэтому для обоснования правомерности применения постоянных магнитов нами был проведен численный расчет магнитной индукции с использованием программного пакета COMSOL, а также было экспериментально измерено распределение индукции магнитного поля в области размещения исследуемого образца между полюсами магнитов.

2. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ МЕЖДУ ДВУМЯ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Нами был проведен расчет напряженности электромагнитного поля в максимальном приближении к реальной геометрии экспериментальной установки. Расчеты проводились в цилиндрической системе координат. Геометрия расчетной области и качественная картина распределения магнитного поля приведены на рис. 1.

Ввиду отсутствия электрического поля и токов для расчетов достаточно только одного из уравнений Максвелла:

$$\nabla \mathbf{B} = 0. \quad (1)$$

Оно решалось численно в программном пакете COMSOL. В этом пакете оно преобразуется к виду

$$\Delta \varphi_m = 0, \quad (2)$$

где

$$\mathbf{B} = \nabla \varphi_m. \quad (3)$$

Видно, что в центре системы магнитное поле направлено вдоль оси Z и достаточно однородно (рис. 1). Эта направленность нарушается только при приближении к поверхности магнитов или удалении от центральной оси системы. Распределение величины (амплитуды вектора) магнитного поля приведено на рис. 2. На рис. 1 и 2 видно, что распределение магнитной индукции достаточно однородно только в центральной области пространства между магнитами.

Таким образом, как показывают расчеты, центральную область пространства между магнитами можно использовать для определения постоянной Верде. Для выяснения реального распределения магнитной индукции в зазоре между магнитами были проведены экспериментальные измерения.

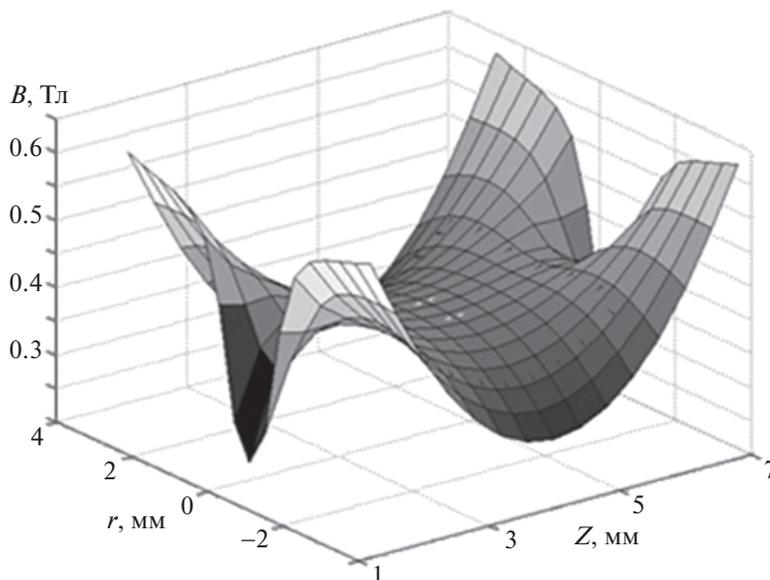


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в зазоре.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ МЕЖДУ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

На основе полученных результатов расчета собрана измерительная установка со следующими элементами и параметрами. Постоянное магнитное поле создавалось двумя цилиндрическими магнитами диаметром 15 мм и высотой 9 мм, установленными соосно на расстоянии 8 мм. В магнитах были проделаны сквозные отверстия диаметром 2 мм (см. рис. 1). Экспериментальное измерение величины магнитной индукции в пространстве между ними проводилось на отрезке ± 2.5 мм от центра. В зазоре между магнитами на расстоянии до 1.5 мм от их поверхностей магнитное поле не определялось.

Распределение магнитного поля в пространстве между магнитами измерялось с помощью трехкоординатного стола с возможностью перемещения датчика магнитометра по трем осям X , Y , Z в пределах 15 мм с точностью до 5 мкм. Определение величины магнитного поля осуществлялось с помощью магнитометра NOVOTEST МФ-1. Измерительный щуп с датчиком Холла фиксировался на вертикальной платформе трехкоординатного столика.

На рис. 3 представлены графики распределения магнитного поля вдоль оси Z и перпендикулярно направлению магнитного поля вдоль оси X . Видно, что магнитное поле вдоль и поперек оси распространения излучения сильно неоднородно. Но в центральной области зазора между маг-

нитами размерами примерно $1.5 \times 1.5 \times 1.5$ мм³ неоднородность магнитной индукции не превышает 2.5%. Это наглядно показано на рис. 3, 4.

На рис. 4а, б каждый отдельный график, обозначенный геометрической фигурой, показывает значение магнитной индукции вдоль магнитного поля. При этом разные графики получены на разных расстояниях относительно оси магнитного поля. Данные по величине магнитной индукции B получены следующим образом: при фиксированном положении датчика Холла на определенной высоте измерение магнитной индукции проводилось как вдоль, так и поперек магнитной оси. Далее датчик Холла устанавливался на другую высоту (высота менялась по вертикали на 0.5 мм) и вновь проводились измерения магнитной индукции вдоль и поперек оси магнитного поля.

Распределение магнитной индукции по вертикальному сечению на площади 6.5×6.5 мм² на расстоянии 4 мм от поверхности магнита представлено на рис. 5. В пределах выбранной области неоднородность магнитного поля по его вертикальному сечению аналогична распределению вдоль поля, она составляет примерно 30% от максимального значения.

На рис. 5, 6 видно, что распределение магнитной индукции в центральной области на расстоянии 4 ± 0.75 мм от поверхности постоянного магнита достаточно равномерное, и неоднородность величины магнитной индукции составляет не более 2.5%. На расстоянии 4 ± 1 мм от поверхности постоянного магнита неоднородность магнитной индукции не превышает 3%. Таким образом, центральная область около оси магнитного поля в пределах 1.5 мм вполне пригодна для измерения

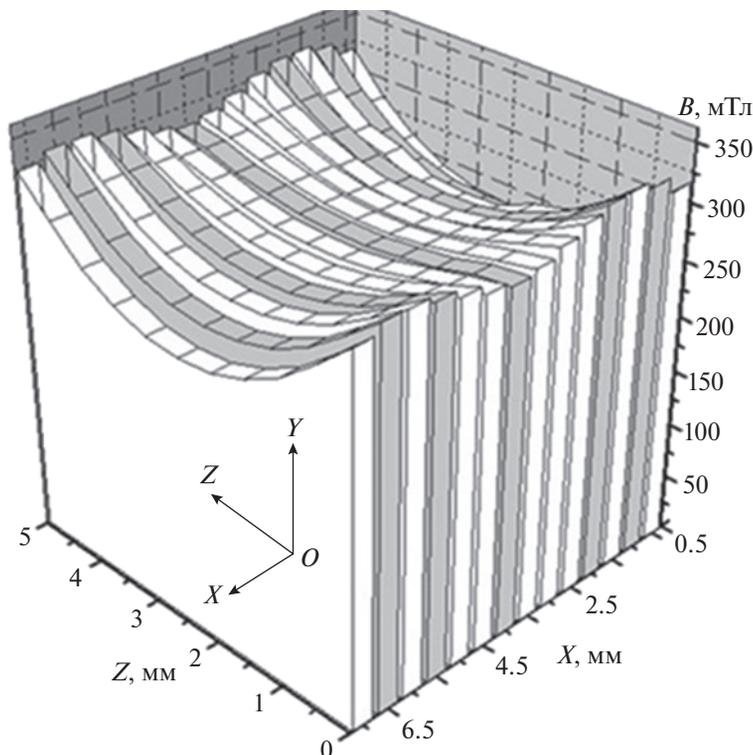


Рис. 3. Распределение величины магнитной индукции вдоль (Z) и перпендикулярно (X) оси магнитного поля в зазоре между магнитами.

постоянной Верде образцов толщиной до 1.5 мм с точностью до 2.5%.

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для удобства сравнения расчетных данных (рис. 1, 2) с экспериментальными (рис. 3, 5) было сделано симметричное отображение распределения по радиусу. В результате, данный рисунок можно интерпретировать как распределение магнитного поля по сечению плоскости, содержащей ось симметрии системы, которая соответствует $r = 0$. За нуль по оси Z принята поверхность одного из магнитов. Черные стрелки на поверхности показывают линии, ограничивающие область экспериментальных значений, приведенных на рис. 3. Белыми стрелками показана центральная линия распределения, соответствующая рис. 5 (вертикальное сечение по центру на расстоянии 4 мм от поверхности магнита). Поскольку расчеты проводились в цилиндрических координатах, центральная кривая на рис. 2 соответствует распределению во всей центральной плоскости на рис. 5.

Видно, что ход линии при $Z = 5.5$ мм хорошо соответствует линии $Z = 5$ мм на рис. 3 в направлении перпендикулярном магнитному полю. Также хорошее соответствие наблюдается у ли-

нии при $r = -3.5$ мм на рис. 2 с линией $X = 7.0$ мм на рис. 3 по направлению вдоль магнитного поля. Распределение вдоль центральной линии (отмеченной белыми стрелками) также хорошо соответствует распределению в центральной плоскости, приведенному на рис. 5.

Падение напряженности магнитного поля при приближении к плоскости поверхности магнитов и к центральной оси обусловлено бифуркацией силовых линий (рис. 1), обусловленной сменой направлений вектора магнитной индукции. При движении по r от оси наблюдается резкий рост поля, обусловленный влиянием ограничительной шайбы, обладающей другой магнитной проницаемостью μ , что хорошо видно на рис. 1.

Увеличение длины зазора между полюсами магнитов приведет к увеличению области однородности магнитного поля в зоне размещения образца. (Создание однородного распределения магнитной индукции между двумя постоянными магнитами для измерения постоянной Верде образцов толщиной до 10–15 мм является предметом отдельного рассмотрения.) При этом, к сожалению, уменьшается величина напряженности магнитного поля в зоне измерения, но поворот угла плоскости поляризации будет примерно такой же за счет увеличения толщины образца.

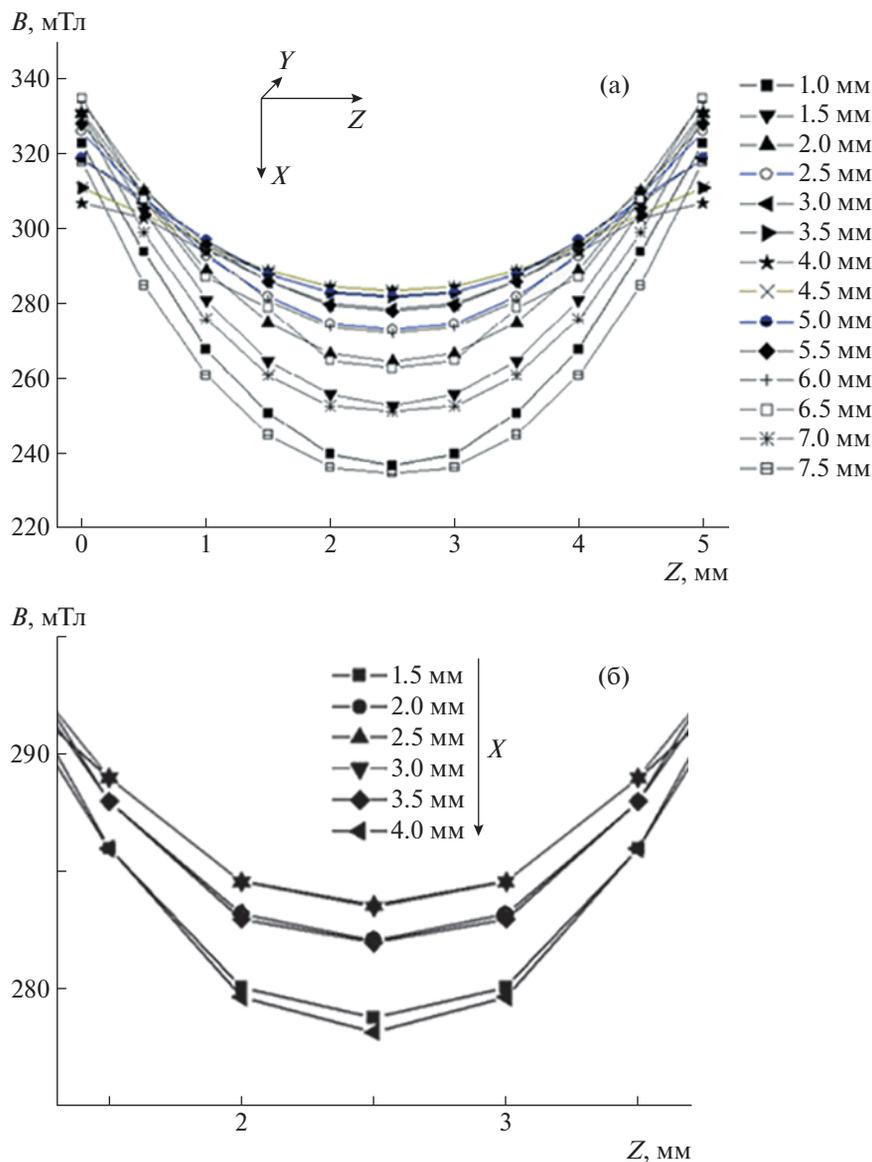


Рис. 4. Распределение магнитного поля вдоль и перпендикулярно оси магнитного поля в пространстве между постоянными магнитами: а – в интервале 1.0–7.5 мм по оси X , б – в интервале 1.3–3.7 мм по оси X .

Диаметр отверстия в магнитах значительно влияет на распределение магнитного поля в зазоре. Чем больше центральное отверстие, тем меньше однородность. Так, при отверстии величиной 5 мм неоднородность в центральной зоне составила более 5%. Поэтому в нашей работе такие магниты не применялись. Весьма желательно устанавливать цилиндрические магниты с отверстием меньше 2 мм (например, 1 мм).

В соответствии с полученными расчетными и экспериментальными данными для измерения постоянной Верде разных образцов оптической керамики была собрана экспериментальная установка.

5. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Из керамических заготовок были изготовлены образцы с плоскопараллельными полированными поверхностями толщиной около 2 мм. Определение значения постоянной Верде для образцов керамики проводилось на установке нулевого типа. Образец устанавливали между двумя постоянными магнитами, с обеих сторон от него на оптической оси размещены поляризационные призмы Глана–Тейлора. В нулевом поле (скрещенные поляризаторы) интенсивности проходящего через образец света были приравнены нулю. В качестве источника излучения использовались гелий-неоновый лазер на длине волны 633 нм и

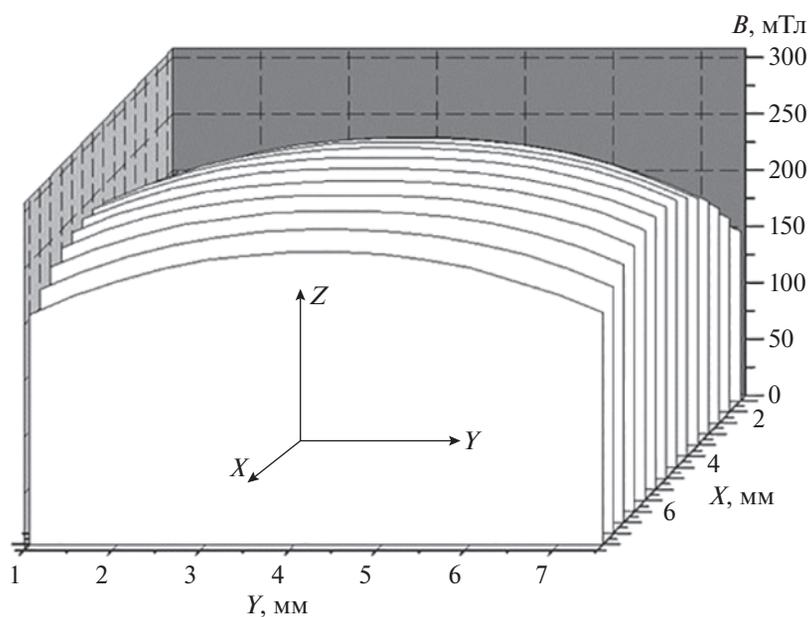


Рис. 5. Вертикальное и горизонтальное распределения магнитной индукции B по перпендикулярному сечению относительно оси симметрии OZ на расстоянии 4 мм от поверхности магнита на площади $6.5 \times 6.5 \text{ мм}^2$: X – горизонтальное перемещение датчика Холла в мм, Y – вертикальное перемещение датчика Холла в мм, B – магнитная индукция в выбранной точке.

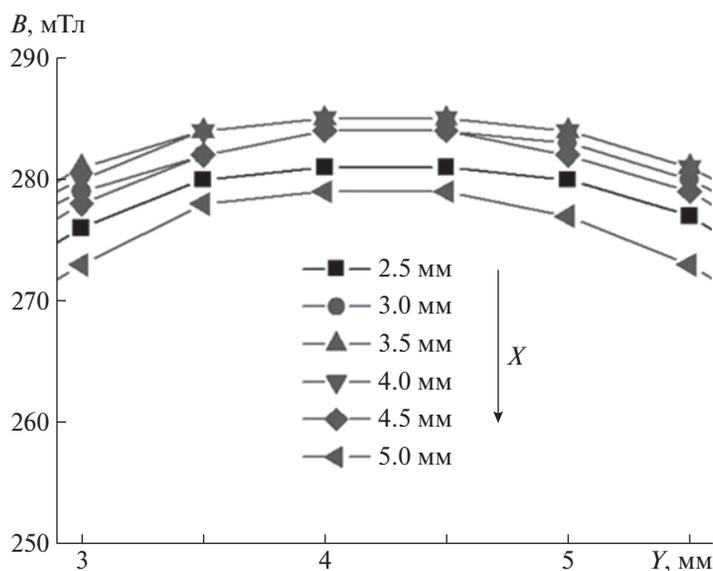


Рис. 6. Распределение магнитного поля по сечению магнитного поля в центральной области на расстоянии 4 мм от поверхности магнита: X и Y – оси перемещения датчика Холла соответственно в вертикальном и горизонтальном направлениях перпендикулярно оси Z в мм, B – магнитная индукция.

неодимовый лазер с диодной накачкой на длине волны 1060 нм. Излучение лазера модулировалось обтюратором на частоте 1515 Гц. В процессе развертки магнитного поля фарадеевское вращение образца компенсировалось обратным вращением выходной призмы (анализатора) до получения интенсивности света равной нулю. Измерение угла вращения плоскости поляризации света осу-

ществлялось по лимбу анализатора. Ошибка измерения угла вращения составляла примерно 2–3 угл. мин. Магнитная индукция между двумя постоянными неодимовыми магнитами определялась магнитометром NOVOTEST МФ-1.

В измерениях были использованы призмы Глана–Тейлора, которые в настоящее время являются наиболее часто используемыми из поля-

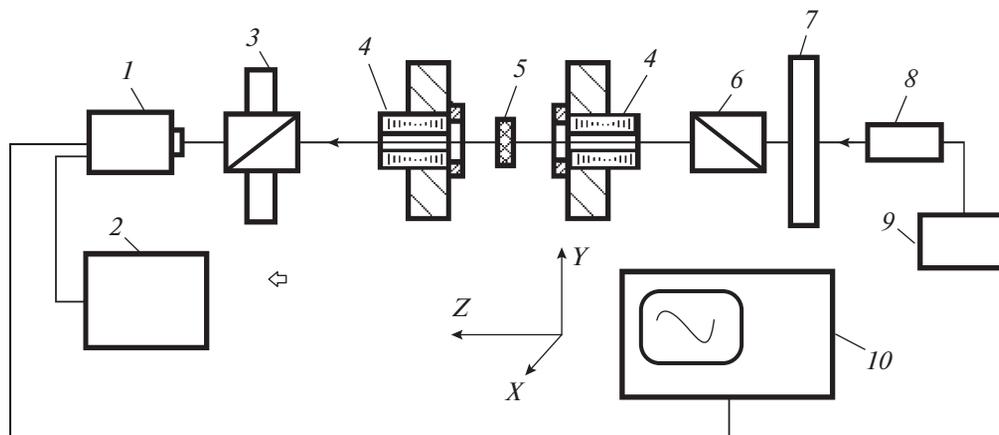


Рис. 7. Блок-схема измерительной установки: 1 – фотодиод ФДК-24К с усилителем, 2 – блок питания к фотодиоду ФДК-24К, 3 – анализатор; 4 – постоянные магниты из неодима, 5 – исследуемый образец между двумя магнитами, 6 – поляризатор, 7 – модулятор-обтюратор, 8 – гелий-неоновый лазер ($\lambda = 633$ нм) или неодимовый лазер ($\lambda = 1060$ нм), 9 – блок питания к неодимовому (или гелий-неоновому) лазеру, 10 – цифровой осциллограф Tektronix TDS5034В.

ризационных призм, они предназначены для преобразования излучения с произвольной поляризацией в линейно-поляризованное.

На рис. 7 представлена блок-схема измерительной установки. Излучение лазера 8 с блоком питания 9, промодулированное модулятором-обтюратором 7 и линейно поляризованное призмой Глана–Тейлора 6, падает на исследуемый образец 5. Далее излучение лазера, проходя через измерительный образец 5 и анализатор 3, регистрируется фотодиодом 1. Постоянное напряжение 27 В на фотодиод ФД-24К подается от источника постоянного напряжения 2. Электрические сигналы от фотоприемника после усиления поступают на осциллограф TDS5034В фирмы Tektronix 10.

Методика измерений поворота угла поляризации заключается в следующем. Исследуемый образец помещается между полюсами двух постоянных магнитов. Плоскополяризованный свет пропускается через вещество так, чтобы направление распространения света совпало с направлением магнитного поля (для этого в постоянных магнитах по центру просверлены отверстия диаметром 2 мм). Поляризующие призмы 3 и 6 выполняют обычные функции: 3 – анализатор, 6 – поляризатор. Они устанавливаются так, чтобы электрический сигнал от фотозлемента ФДК-24К был равен нулю. При помещении образца между двумя магнитами вновь появляется электрический сигнал. Поворотом анализатора 3 на определенный угол электрический сигнал уменьшают вновь до нуля, что означает, что в магнитном поле исследуемое вещество поворачивает плоскость поляризации на некоторый угол.

Для того чтобы отфильтровать полезный сигнал от помех и фонового излучения, был применен модулятор-обтюратор 7 (рис. 7). Переменный

электрический сигнал после усилителя регистрировался цифровым осциллографом Tektronix TDS5034В. Для этой же цели можно использовать любой милливольтметр. В качестве источника питания для фотозлемента были использованы три элемента по 9 В.

Для измерений постоянной Верде вдоль направления магнитного поля применялись два неодимовых магнита в форме цилиндра диаметром 15 мм, толщиной 9 мм и с отверстием диаметром 2 мм. Данные магниты позволяли создавать магнитное поле величиной до 0.34 Тл.

В измерениях были использованы два образца из оксида тербия и один образец из $Tb_3Ga_5O_{12}$. Поворот угла поляризации измерялся на длинах волн 628 и 1060 нм. При величине магнитной индукции $B = 0.28$ Тл углы поворота плоскости поляризации ϕ на длине волны излучения 628 нм от воздействия магнитного поля на данные образцы составили $10^\circ 9'$, $12^\circ 1'$, $6^\circ 20'$ и коэффициенты Верде соответственно составили 452, 471, 138 рад/(Тл · м). На длине волны излучения 1060 нм постоянная Верде по величине значительно меньше. Для предыдущих образцов величины постоянной Верде, определенные по формуле $\phi = V \cdot l \cdot B$, соответственно равнялись 138, 142, 41 рад/(Тл · м). Полученные значения постоянной Верде в пределах погрешности измерений совпадают с литературными сведениями [5, 6], что свидетельствует о целесообразности применения постоянных магнитов для создания однородного магнитного поля. Частота модуляции лазерного излучения, вычисленная по осциллограмме импульсов излучения твердотельного лазера 8 (на рис. 7), составила 1515 Гц.

Из формулы $V = \phi / (l \cdot B)$ следует, что погрешность определения постоянной Верде зависит от

точности измерений угла поворота плоскости поляризации ϕ , толщины образца l и величины магнитной индукции B . Основную погрешность в вычисление V вносит неоднородность распределения магнитной индукции в пространстве между магнитами.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность использования постоянных магнитов вместо громоздкого электромагнита для определения постоянной Верде магнитооптических материалов с точностью до 1% при значениях напряженности магнитного поля 0.28–0.3 Тл. Толщина образца при этом не должна превышать 1 мм.

Если же толщина образца равна 2 мм, то при диаметре измерительного пучка излучения 2 мм точность измерения постоянной Верде составит 3%, что тоже является вполне допустимой погрешностью данной методики измерения. При диафрагмировании измерительного светового пучка до 1 мм для данных образцов точность определения постоянной Верде будет находиться в пределах 1–2.5%.

Тщательная экранизация, применение автономных источников питания для фотоэлемента и усилителя, модуляция излучения, соединение фотодиода в режиме обратного включения, минимизация длины соединительных проводов в схеме усиления фотосигнала и ряд других мер позволили нам в методике измерения постоянной Верде обходиться без дифференциального нановольтметра. При этом уровень помех снизился до 200–300 мкВ, что составило около 0.1% от уровня обычного полезного сигнала амплитудой 0.2–0.3 В и выше.

Как показали предварительные расчеты, постоянные магниты могут образовать однородное магнитное поле с большой протяженностью. Поэтому создание однородного распределения магнитной индукции между двумя постоянными магнитами для измерения постоянной Верде прозрачных образцов толщиной до 10–15 мм является интересной задачей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-23-00658, <https://rscf.ru/project/22-23-00658/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов В.В., Шитов В.А., Максимов Р.Н., Соломонов В.И., Лукьяшин К.Е., Орлов А.Н. // Фотоника. 2018. Т. 12. № 3. С. 318. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2018.71.3.318.334>
2. Валиев У.В., Малышева М.Е., Рахимов Ш.А., Султонов О.З. // Опт. и спектр. 2022. Т. 130. № 6. С. 937. <https://doi.org/10.21883/OS.2022.06.52637.2892-21>
3. Железнов Д.С., Войтович А.В., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. // КЭ. 2006. Т. 36. № 4. С. 383. <https://doi.org/10.1070/QE2006v036n04ABEH013154>
4. Maksimov R.N., Osipov V.V., Karagedov G.R., Platonov V.V., Yurovskikh A.S., Orlov A.N., Spirina A.V., Shitov V.A. // J. Inorganics. 2022. V. 10. P. 173. <https://doi.org/10.3390/inorganics10100173>
5. Veber P., Velazquez M., Gadret G., Rytz D., Peltz M., Decourt R. // Cryst. Eng. Comm. 2015. V. 17. P. 492. <https://doi.org/10.1039/C4CE02006E>
6. Slezak O., Yasuhara R., Lucianetti A., Mocek T. // Opt. Mater. Express. 2016. V. 6. P. 3683. <https://doi.org/10.1364/OME.6.003683>