

На правах рукописи

Шадрин Геннадий Анатольевич

**УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ
ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНЫХ
ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК**

Специальности: 01.04.03 – Радиофизика
01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2010

Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики факультета автоматизации и телекоммуникаций ГОУ ВПО «Сургутский государственный университет ХМАО – Югры»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Табарин
Валерий Андреевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Шандаров
Владимир Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор

Климкин
Виктор Федорович

Ведущая организация: Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН

Защита состоится 11 марта 2010 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.04 при Томском государственном университете по адресу: 634050 г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан « » 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Б.Н. Пойзнер

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Развитие информационных технологий влечет за собой развитие компонентной базы, основывающейся на новых физических принципах работы. В этом отношении магнитооптика является одним из ведущих направлений развития современной физики. Наиболее перспективной представляется область оптической обработки информации, основанной на управлении сигналами в оптическом и субоптическом диапазонах длин волн.

Оптическая обработка сигналов имеет ряд преимуществ, в частности, большую скорость распространения сигналов, более вместительную полосу частот, независимость нескольких сигналов на одной линии и легкость сопряжения с устройствами, выполненными на основе волоконно-оптической технологии. Основным недостатком оптического метода заключается в более сложных способах генерации и усиления излучения, принципиально отличных от тех, что используются в электронных устройствах.

Актуальность. В настоящее время созданы различные типы магнитооптических приборов, позволяющих управлять интенсивностью светового пучка, его направлением распространения, поляризацией, спектральным составом и пространственной структурой. Одной из перспективных задач применения магнитооптических устройств является создание магнитооптических систем обработки информации.

Основные направления развития оптической технологии сегодня – это создание и усовершенствование основных элементов компонентной базы: оптических проводников, оптических матричных элементов и оптических нелинейных элементов. Особый интерес представляют нелинейные оптические устройства – аналоги транзисторов в электронике. Одно из наиболее перспективных явлений, на основе которого можно создать такие устройства, – оптическая бистабильность.

Исследования оптической бистабильности начались в конце 50-х годов XX века и интенсивно продолжаются в настоящее время. В указанном направлении работали Г. Сул и В.Н. Луговой (1979) (предсказавшие существование оптической бистабильности), С. Мак-Колл с коллегами (1975) (впервые ее наблюдавшие), Копель и Лохман (1986) (результаты их исследований представлены в работе «Поляризация и оптическая бистабильность»), А.А. Кастальский (1973) (первым описавший бистабильность в гибридных устройствах с внешней связью), P.W. Smith и E.H. Turner (1977–1980) (продолжившие ее изучение). Типы и направления применений оптической бистабильности описали S.F. Collins и R.S. Wasmundt (1980), L.A. Лугиато (1984) представил несколько специфических видов бистабильности, оптической бистабильности пос-

вятил монографию Х.М. Гиббс (1988), где представил основные разработки и исследования в этой области, а также рассмотрел перспективы и пути оптимизации оптических нелинейных устройств. Из последних исследований стоит выделить работы Ю.К. Фетисова (2001) и В.С. Днепровского (1999), изложивших все основы данного направления.

Магнитооптические явления, открытые еще в XIX веке, были объяснены только к середине XX века, а особый всплеск интереса к ним произошел в 60-е годы. Физика магнитооптических явлений стала бурно развиваться в связи с открытием уникальных прозрачных ферритов и появлением лазеров. С этого времени начинает интенсивно развиваться прикладная магнитооптика – создаются магнитооптические приборы, управляющие различными параметрами СВЧ и оптических пучков. В основе магнитооптических устройств с использованием магнитных решеток лежит эффект дифракции света на фазовой дифракционной решетке, созданной полосовой доменной структурой в ферромагнетике. Использование магнитных решеток началось в начале 70-х годов XX века. Вышел ряд работ, посвященных исследованию и использованию полосовой доменной структуры и ее рефлексов. Созданы различные дефлекторы, транспаранты и другие устройства управления оптическим сигналом. Однако с конца 80-х годов не было значительных публикаций на эту тему.

Особенная роль в современной физике магнитооптических взаимодействий, а также в магнитооптической технике принадлежит тонким пленкам и тонким монокристаллическим пластинам. В них возможно создание и управление с помощью магнитного поля и температуры сложных оптических неоднородностей (полосовой доменной структуры), позволяющих управлять оптическим сигналом.

Однако, за последние два десятилетия никаких разработок (теоретических и экспериментальных) по созданию и усовершенствованию систем оптической обработки информации на основе магнитных решеток не было.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена противоречием между высокими требованиями современного информационного общества, диктующего внедрение новых систем оптической обработки информации, – с одной стороны, и отсутствием разработанной и готовой к широкому применению компонентной базы для их создания – с другой.

Для разрешения данного противоречия необходимо разработать принципиальные схемы указанных компонентов, учитывая принципы и особенности их работы; определить спектр материалов, необходимых для их создания; в соответствии со схемами создать экспериментальные

образцы и исследовать их работу, а также определить основные пути реализации указанных разработок.

Целью диссертационной работы является изучение возможности использования полосовых доменных структур в оптических нелинейных устройствах и экспериментальное исследование оптического бистабильного элемента на основе магнитной дифракционной решетки.

Задачи работы:

1. Анализ научной, технической и нормативной литературы по теме исследования.

2. Математическое моделирование дифракции на полосовой доменной структуре.

3. Определение условий существования полосовой доменной структуры в монокристалле феррита, исследование параметров фазовой дифракционной решетки и дифракционной картины, полученной с помощью полосовой доменной структуры.

4. Разработка и реализация схемы магнитооптических устройств, использующих магнитную дифракционную решетку. Экспериментальная реализация магнитооптических устройств амплитудного и поляризационного управления оптическим сигналом. Изучение их практических возможностей.

5. Разработка на основе предложенных оптических бистабильных элементов принципиальных схем следующих устройств: логических оптических элементов, оптических модуляторов, оптических модуляторов добротности.

6. Сравнительный анализ полученных оптических устройств с уже существующими устройствами такого же назначения.

В соответствии с поставленными задачами исследование проводилось в несколько этапов.

1-й этап включал изучение и анализ литературы по проблеме исследования, а также изучение устройств, разрабатываемых для реализации систем оптической обработки информации. В результате были выявлены основные направления развития магнитооптики в сфере ее применения в современных технологиях, а также отсутствие основных элементов компонентной базы систем оптической обработки информации, пригодных для массового внедрения в производство современной техники.

2-й этап был посвящен теоретической разработке и экспериментальной реализации оптических нелинейных устройств. Были разработаны схемы магнитооптических устройств, использующих магнитную дифракционную решетку, исследованы режимы бистабильного амплитудного и поляризационного управления оптическим сигналом.

3-й этап связан с систематизацией полученных в ходе экспериментов результатов и проведением сравнительного анализа полученных оптических устройств с уже существующими устройствами такого же назначения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Математическое моделирование дифракции на доменах осуществлялось методом разложения по параметру гирации. Полученные уравнения решались методом Фурье. Вычисления производились численными методами. Изучение доменной структуры ферритов производилось магнитооптическими методами. Изучение оптической бистабильности проводилось с помощью селективного микровольтметра и фотодиодов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При значениях магнитного поля от 3 до 10 кА/м, действующего на образцы феррит-граната, вырезанные в плоскостях $\{110\}$ и $\{111\}$, образуется полосовая доменная структура, служащая фазовой дифракционной решеткой, которая при использовании излучения с длиной волны 1,15 мкм и электронной обратной связи приводит к режиму нелинейного бистабильного оптического пропускания устройств. Основные параметры ферритов, влияющие на работу устройств, это – толщина образца, близкая к оптимальной, фактор качества < 1 и магнитооптическая добротность выше 100.

2. Дифракцию на полосовой доменной структуре в монокристалле железоиттриевого граната в виде тонкого диска диаметром до 1,7 мм, и толщиной не менее 1,76 мкм и не более 1 мм адекватно описывает формула

$$\nabla^2 \overset{\text{r}}{E}_1 + k^2 \varepsilon \overset{\text{r}}{E}_1 = \frac{ig}{\varepsilon} \left\{ \text{grad div} \left[\overset{\text{r}}{E}_0 \times \overset{\text{r}}{M} \right] + k^2 \varepsilon \left[\overset{\text{r}}{E}_0 \times \overset{\text{r}}{M} \right] \right\}, \text{ получае-}$$

мая из уравнений Максвелла классическим методом возмущения в линейном приближении по параметру гирации, согласно, например, A. Thiaville, где $\overset{\text{r}}{E}_1$ – дифрагирующая магнитооптическая и $\overset{\text{r}}{E}_0$ – недифрагирующая части напряжённости электрического поля, $\overset{\text{r}}{M}$ – вектор намагниченности.

3. Внутррезонаторный магнитооптический модулятор трехзеркального He-Ne лазера на основе магнитной дифракционной решетки в железоиттриевом гранате, осуществляет при малых намагничивающих полях амплитудную модуляцию до частот 180 кГц с глубиной модуляции 50% и частотную модуляцию с девиацией в несколько мегагерц при намагничивающих полях, превышающих пороговые.

4. Трехзеркальный He-Ne лазер с внутррезонаторной модуля-

цией на основе магнитной дифракционной решетки на $\lambda=1,15$ мкм, генерирует, в отличие от известных, вместо 7–8 частот две с долговременной стабильностью, в связи с введением внутрь резонатора дисперсионного элемента в виде магнитной решетки.

Достоверность первого положения подтверждается согласием полученных теоретических и экспериментальных данных с фундаментальными положениями теории оптической бистабильности. Обнаруженный режим нелинейного пропускания устройств на основе магнитных решеток соответствует гибридной оптической бистабильности, описанной Х.М. Гиббсом (1988 г.) и др. Так, исследованные нами образцы имеют толщину 0,4 мм и диаметр 6 мм. При мощности излучения ~ 10 мВт характерное время переключения составляет $\sim 10^{-4}$ – 10^{-5} с, а энергия переключения $\sim 0,1$ мДж.

Достоверность второго защищаемого положения обеспечивается совпадением результатов расчетов на основе математической модели дифракции на полосовой доменной структуре в монокристалле железиттриевого граната в виде тонкого диска с данными экспериментов. Отмечается при рассмотрении пяти членов ряда и разрешении 1000 значений на единицу длины совпадение 73%.

Режимы работы предложенных магнитооптических устройств управления параметрами излучения соответствуют режимам работы известных магнитооптических модуляторов на основе эффекта Фарадея. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными данными и находятся в согласии с результатами других авторов (Hyuk Lee, 1987; Shinsuke, Hiroaki I., Toshihiko Y., 1981; Shenping L., Yizhou Z., 1991).

Научная новизна работы:

1. Предложена математическая модель дифракции, основанная на методе разложения по параметру гирации, для расчета дифракции на полосовой доменной структуре в монокристалле железиттриевого граната в виде тонкого диска определенного диаметра и толщины.

2. Обнаружены граничные значения магнитного поля (3–10 кА/м) для образцов феррит-граната, вырезанных в плоскостях $\{110\}$ и $\{111\}$, при которых в них наблюдается полосовая доменная структура.

3. Впервые обнаружен и исследован бистабильный режим работы оптических устройств на основе магнитных решеток. Доказано существование гибридной оптической амплитудной и поляризационной бистабильности на основе магнитных решеток.

4. Разработан и исследован внутрирезонаторный магнитооптический модулятор трехзеркального лазера на основе магнитных реше-

ток. Обнаружено, что при значениях магнитного поля меньших порогового имеет место амплитудная модуляция оптического излучения, при больших значениях – возникает частотная модуляция.

5. Впервые установлено, что при внутрирезонаторной модуляции лазера на основе магнитной дифракционной решетки, уменьшается число генерируемых частот и увеличивается их стабильность.

Научная ценность и практическая значимость защищаемых положений и других результатов:

1. Исследован бистабильный режим работы оптических устройств на основе магнитных решеток. Доказано существование гибридной амплитудной и поляризационной оптической бистабильности на основе магнитных решеток. Продемонстрирована возможность использования наблюдаемых явлений для создания логических элементов и элементов памяти оптических систем обработки информации.

2. Найдены параметры полосовой доменной структуры и дифракции на ней для монокристаллов феррит-граната. Теоретически и экспериментально изучены параметры магнитной решетки на основе полосовой доменной структуры в тонком монокристалле феррита в зависимости от величины внешнего магнитного поля, и толщины кристалла. Полученные данные имеют значение для проведения последующих разработки и создания промышленных образцов элементов оптических систем обработки информации.

3. Результаты расчетов, сделанных на основе математической модели дифракции на основе разложения по параметру гирации, на полосовой доменной структуре в монокристалле железиттриевого граната в виде тонкого диска, совпадают с данными экспериментов. Это позволяет сделать вывод о применимости математической модели для расчета дифракции на доменной структуре при вышеуказанных параметрах.

4. Создание магнитооптических устройств на основе полосовой доменной структуры в тонких монокристаллах феррит-граната предоставляет ряд преимуществ по сравнению с аналогами, а именно: малые размеры, порядка размеров доменов (до десятков нанометров), малые управляющие мощности (0,01 МВт/МГц) и время переключения (порядка долей наносекунд).

5. Магнитооптические устройства на основе магнитных решеток, благодаря своим характеристикам и простоте использования, могут стать высоко востребованными устройствами в современной науке, технике и производстве. Дальнейшая разработка позволит довести их до практического использования в оптронике, оптоэлектронике и системах детектирования.

Апробация исследования осуществлялась при проведении экспериментов сравнением ожидаемых теоретических выводов с результатами, получаемыми на практике. Теоретические и практические материалы исследования обсуждались на научных семинарах кафедр экспериментальной физики СурГУ, квантовой радиофизики ТГУ и отражены в публикациях, были представлены в докладах на всероссийских и международных конференциях «Датчик-99»; «Северный регион», Ханты-Мансийск – Сургут, 2000; «Наука и инновации ХМАО» (Сургут, 2002, 2003); «Сибирский поляризационный семинар» (2004); опубликованы в журналах «Датчики и системы». – № 9. – 1999 г.; «Письма в ЖТФ». – 2001. – Том 27, вып. 12; «Журнал прикладной спектроскопии». – № 2. – 2009.

Публикации:

По материалам диссертации опубликовано 8 работ, в том числе: 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ; 5 тезисов докладов на международных (1), всероссийских (1) и региональных (3) научных конференциях.

Личный вклад автора

Совместно с научным руководителем работы, д.ф.-м.н. профессором В.А. Табариним поставлена научная задача, обсуждены и опубликованы основные результаты исследований.

Диссертационная работа является результатом исследований, выполненных автором на протяжении 10 лет. Автор лично провел эксперименты и обработал полученные результаты.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 115 наименований. Общий объем составляет 101 страница, включая 41 рисунок, 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности темы диссертационного исследования, излагаются цель и задачи работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отмечаются научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, личный вклад, обосновывается достоверность полученных результатов.

Первая глава диссертации содержит полосовой доменной структуры и дифракции на магнитных решетках, а также обзор литературы по данным вопросам.

Во второй главе представлены необходимые для последующего изложения сведения из теории магнитооптического взаимодействия в оптически анизотропных средах. Рассмотрены оптические свойства полосовой доменной структуры. Дан анализ фазовой дифракционной решетки на основе полосовой доменной структуры, ее амплитудный и поляризационный коэффициенты пропускания. Рассмотрена зависимость параметров магнитной решетки от внешнего магнитного поля.

Далее приведено описание теоретических и экспериментальных исследований условий наблюдения оптической бистабильности на основе магнитной решетки.

Дифракционная картина определяется следующим соотношением:

$$I = F \cdot f,$$

где, функция f – зависимость от взаимного расположения доменов

$$f = \frac{\sin^2(NaZ)}{\sin^2(aZ)},$$

где, N – число полос; Z – период решетки,

$$a = \frac{\pi}{\lambda} \sin(\phi),$$

где, λ – длина волны излучения; ϕ – угол дифракции.

Функция F является функцией дифракции на единичном элементе:

$$F = I_0 \frac{\sin^2(aX)}{(aX)^2},$$

где, I_0 – интенсивность падающего излучения.

Такой вид F будет иметь в том случае, когда разность фаз от двух соседних доменов равна $\Delta\phi = \pi$ так же, как в обычной дифракционной решетке. В случае, если толщина отличается от оптимальной, функция F будет иметь вид:

$$F = I_0 \left(\frac{h_0}{\pi} \arccos \left(\cos \left(2\pi \frac{h}{h_0} \right) \right) \right) \cos^2(\Delta\phi) \frac{\sin(aX)}{(aX)^2},$$

где h – толщина кристалла в направлении падения излучения;

$$h_0 = \frac{1}{\theta_F} \arctg \Psi - \text{оптимальная толщина кристалла;}$$

Ψ – магнитооптическая добротность.

Проведенные численные эксперименты показали, что математическая модель, основанная на методе разложения по параметру гирации, может быть положена в основу алгоритмов математической интерпретации картин дифракции электромагнитных волн на неоднородностях в феррите. При анализе дифракционных картин можно сделать вывод о характере этих неоднородностей, структуре доменной границы. В нашем случае рассматривалась ситуация, когда электромагнитная волна падает нормально на плоскопараллельную пластинку толщины L , вырезанную перпендикулярно оси симметрии одноосного кристалла. Дифракция является следствием координатной зависимости тензора диэлектрической проницаемости в области доменной границы. В ферромагнетиках эта зависимость связана с линейным или квадратичным магнитооптическим эффектом. Был рассмотрен случай, когда квадратичный эффект мал по сравнению с линейным. Ось z было направлена перпендикулярно граням пластины в направлении падающей волны, а ось x – по нормали к доменной границе. Тогда

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_0 = \text{const}, \quad \varepsilon_{xy} = -\varepsilon_{yx} = -i\varepsilon_0\alpha_z M_z, \quad \varepsilon_{zz} = \text{const}$$

Разложение по параметру гирации

Пусть \vec{M} – вектор намагниченности. В первом порядке по g :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} + ig \left[\vec{M} \times \vec{E} \right].$$

Представим поле в виде суперпозиции недифрагирующей части \vec{E}_0 с $g = 0$ и магнитооптической части \vec{E}_1 , пропорциональной g . Запишем уравнения Максвелла для комплексных амплитуд, отбрасывая члены более высокого порядка:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_1, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \text{div} \left(\varepsilon \vec{E} + ig \left[\vec{M} \times \vec{E} \right] \right) = 0, \\ \text{rot} \vec{E} = ik \vec{B}, \\ \text{div} \vec{B} = 0, \\ \text{rot} \vec{B} = -ik \left(\varepsilon \vec{E} + ig \left[\vec{M} \times \vec{E} \right] \right). \end{cases} \quad (2)$$

Поскольку влияние намагниченности на оптические явления мало, то в четвертом уравнении магнитной анизотропией можно пренебречь и положить $\mu = 1$. Подставляя (1) в первое уравнение (2) и оставляя только члены первого порядка по g , получим:

$$\text{div} \vec{E}_1 = \text{div} \left(-\vec{E}_0 + \frac{ig}{\varepsilon} \left[\vec{E}_0 \times \vec{M} \right] \right). \quad (3)$$

Применяя ротор к четвертому уравнению (2), учитывая, что:

$$\text{rot rot} \vec{E}_1 = \text{grad div} \vec{E} - \nabla^2 \vec{E}.$$

и (3), приравнявая члены одного порядка по g , в результате имеем:

$$\nabla^2 \vec{E}_0 + k^2 \varepsilon \vec{E}_0 = 0,$$

$$\nabla^2 \vec{E}_1 + k^2 \varepsilon \vec{E}_1 = \frac{ig}{\varepsilon} \left\{ \text{grad div} \left[\vec{E}_0 \times \vec{M} \right] + k^2 \varepsilon \left[\vec{E}_0 \times \vec{M} \right] \right\}.$$

Будем решать систему уравнений Максвелла для напряженности электрического поля. Для другой составляющей уравнения Максвелла решаются относительно напряженности магнитного поля:

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E}_1 + k^2 \varepsilon \vec{E}_1 = \frac{ig}{\varepsilon} \left\{ \text{grad div} \left[\vec{E}_0 \times \vec{M} \right] + \varepsilon k^2 \left[\vec{E}_0 \times \vec{M} \right] \right\} \\ \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial z} + ik_{0z} \vec{E}_1 = 0, & z=0, \\ \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial z} - ik_{0z} \vec{E}_1 = 0, & z=h, \\ \vec{E}_1(0, y, z) = \vec{E}_1(l, y, z), \\ \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial x}(0, y, z) = \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial x}(l, y, z) \\ \vec{E}_1(x, d, z) = \vec{E}_1(x, -d, z), \\ \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial y}(x, d, z) = \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial y}(x, -d, z). \end{cases}$$

Решим систему уравнений и запишем коэффициенты Фурье.

Интенсивность излучения имеет вид:

$$I(x, z) = E_1(x, z) E_1(x, z)^* + E_3(x, z) E_3(x, z)^*.$$

В третьей главе рассмотрены описания оптической бистабильности и обзор литературы по ним. Изучены бистабильные амплитудные и поляризационные устройства на основе магнитных решеток, описано их экспериментальное исследование и изучение их характеристик.

Теоретически и экспериментально исследована схема на основе микрозеркала. Оптическое бистабильное устройство (рис. 1) работает следующим образом. Излучение лазера 1 с длиной волны $\lambda = 1,15$ мкм, падающее на диск из монокристалла железиттриевого граната (ЖИГ) 2, отражается зеркалом 4 и попадает на фотоприемник 8, выпрямленный ток которого после усиления в устройстве обратной связи (УОС) 7, поступает на катушки Гельмгольца 3.

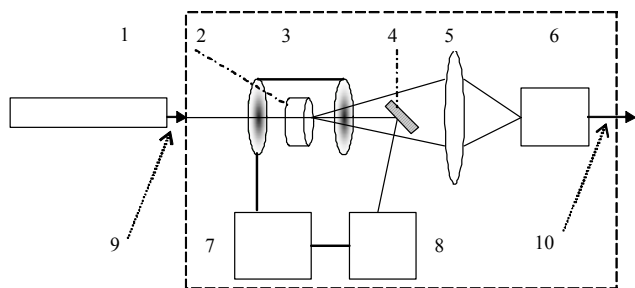


Рис. 1. Схема бистабильного устройства на основе магнитной дифракционной решетки:

- 1 – лазер; 2 – образец феррита; 3 – катушки Гельмгольца;
- 4 – зеркало; 5 – собирающая линза; 6 – первый фотоприемник;
- 7 – устройство обратной связи; 8 – второй фотоприемник;
- 9 – вход устройства; 10 – выход устройства

При этом на фотоприемник 6 практически ничего не поступает. С увеличением интенсивности падающего на диск 2 излучения поле, создаваемое катушками, будет возрастать и при определенной величине интенсивности, превышающей пороговое значение, поле катушек создаст в диске железиттриевого граната полосовые домены, что приведет к появлению дифракционной картины. Интенсивность излучения, сфокусированного линзой 5 и поступающего на фотоприемник 6, равна суммарной интенсивности дифракционных максимумов более высоких порядков.

Пусть I_0 – интенсивность излучения, падающего на диск и являющегося входным сигналом. Излучение, прошедшее через диск, можно разбить на две части, интенсивности которых обозначим как I_1 и I_2 . I_1 – интенсивность излучения на фотоприемнике 8, образуемого либо нулевым максимумом дифракционной картины, либо в случае однодоменного состояния прошедшим излучением. I_2 обусловлена излучением максимумов более высоких порядков, сфокусированных на чувствительную площадку фотоприемника 6. Нами установлено, что зависи-

мость выходной интенсивности от входной имеет нелинейный характер, как показано на рис. 2.

Кроме того, нами разработано несколько модификаций данной схемы. Они не были реализованы в полной мере. Однако на основании некоторых общих соображений можно сделать вывод о работе этих схем. Все схемы позволяют реализовать необходимые режимы аналогового и цифрового преобразования оптических сигналов.

Анализ графика коэффициента пропускания устройств (рис. 2) (зависимости интенсивности света на выходе от интенсивности на входе) позволяет сделать несколько выводов. Во-первых, при начальном значении интенсивности на входе $I_{вх1}$ интенсивность на выходе мала, так как значение магнитного поля недостаточно для образования доменной структуры. Дальнейшее увеличение интенсивности на входе увеличивает интенсивность на выходе из-за образования ПДС. Во-вторых, при некотором значении магнитного поля интенсивность на выходе начинает уменьшаться. Дальнейшее увеличение интенсивности на входе $I_{вх2}$ вызывает на выходе резкое уменьшение интенсивности, так как разрушается доменная структура, т.е. можно реализовать несколько режимов работы.

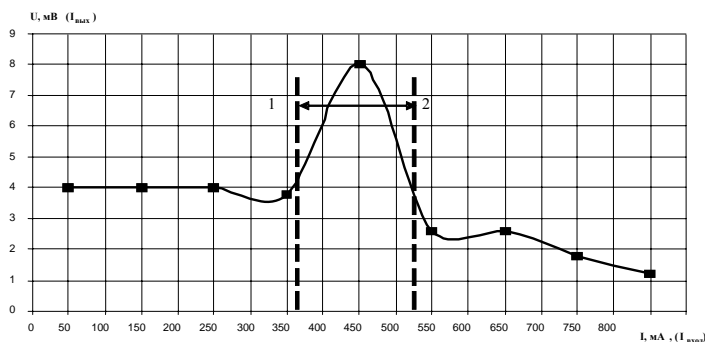


Рис. 2. Экспериментальная зависимость выходной интенсивности от входной:
1-2 – рабочий диапазон

В первую очередь можно реализовать режим преобразования аналоговых сигналов, если схема настроена, так что изменение интен-

сивности входного сигнала лежит в зоне образования ПДС (см. рис. 2, интервал 1–2), то происходит обычная оптическая модуляция сигнала.

Второй режим – режим цифрового преобразования. На основе данных схем можно реализовать основные логические элементы. Для реализации элемента «НЕ» необходимо настроить обратную связь так, чтобы при низком уровне сигнала «0» пропускание было на максимуме, а сигнал высокого уровня «1» уменьшал бы выходной сигнал (рис. 3).

Для реализации элемента «И» необходимо подать первый сигнал так, чтобы его интенсивности было не достаточно для включения этого элемента, второй же сигнал вызывал бы появление сигнала на выходе (рис. 4).

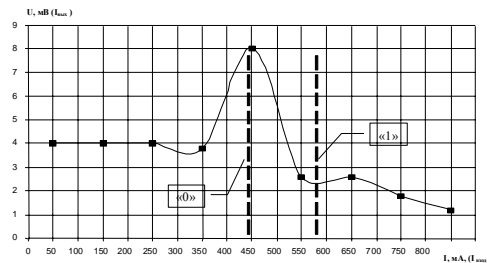


Рис. 3. Реализация элемента «НЕ»

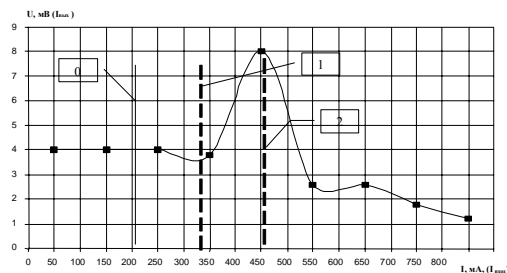


Рис. 4. Реализация элемента «И»:

1 и 2 – суммируемые сигналы; 0 – базовый уровень

Данное устройство может работать как оптический бистабильный элемент. Для доказательства этого необходимо рассчитать его оптическое пропускание. Если известно пропускание устройства как функция некоторого параметра и известна также зависимость этого па-

раметра от интенсивности, то возможно следующее графическое построение. Положим, что:

$$\tau(u) = \frac{I \sin^2 u \sin^2(NaZ)}{I_0 u^2 \sin^2(aZ)},$$

где I – интенсивность на выходе;

I_0 – интенсивность на входе,

$$u = \frac{b}{\lambda} \sin \phi,$$

где, b – размер доменов ориентированных по полю;

λ – длина волны излучения;

ϕ – угол дифракции;

d – период решетки (считаем решетку симметричной $d \approx 2b$).

Кроме того, учтем зависимость ширины домена от величины тока в катушках:

$$b \approx b_0 + k_b I,$$

где, b_0 – ширина ориентированных по полю доменов в момент образования ПДС.

Следовательно: $u = u_0 + kI,$

где $k = \frac{k_b}{\lambda} \sin \phi$ и $\tau(u) = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{I_0 k} (u_0 + u).$

Наклонные прямые (А, В, С) дают связь между пропусканием устройства $\tau(u)$ и дифракционного параметра u при различных интенсивностях I_0 . Они наложены на дифракционную картину, получаемую с помощью ПДС. Другим цветом цветом выделена экспериментальная кривая. Стационарные решения должны удовлетворять обеим зависимостям.

Для бистабильного режима необходимо, чтобы функция $\tau(I)$ (уравнение прямой линии) пересекала график $\tau(u)$ не менее, чем в трех точках (рис. 5).

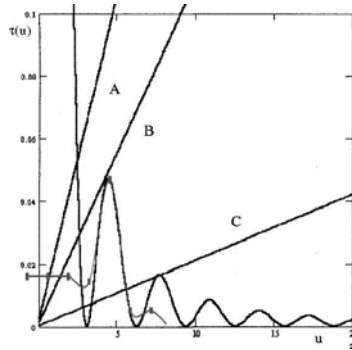


Рис. 5. Зависимость пропускания элемента $\tau(u)$ как функция дифракционного параметра u ;
(другим цветом выделена экспериментальная кривая пропускания)

Как видно из рисунка, для прямых, лежащих между В и С, существует три точки пересечения, что свидетельствует о бистабильном режиме.

Схемы просты в реализации и допускают интегральное исполнение. Предлагаемые схемы имеют самое различное предназначение. Собранные на их основе устройства могут служить: модуляторами оптического сигнала, играть роль дефлекторов как пространственного разделения, так и поляризационного. Кроме того, они могут служить преобразователями цифрового сигнала как амплитудного, т.е. разным уровням цифрового сигнала служат разные уровни интенсивности сигнала, так и поляризационного, когда разным уровням сигнала соответствуют различные состояния поляризации излучения. Последний вариант предпочтительней, так как энергия переключения существенно снижается.

Поляризационная оптическая бистабильность на основе магнитных решеток

Принцип работы оптического поляризационного бистабильного устройства (рис. 6) заключается в следующем: излучение, не претерпевающее дифракцию, частично отражается пластиной и попадает на второй фотоприемник и далее обеспечивает обратную связь, регулирующую уровень срабатывания устройства. Максимумы более высоких порядков обходят пластину и попадают на первый фотоприемник. Туда же попадает часть излучения, прошедшего через пластину. Поляризация излучения на выходе в зависимости от параметров устройства бу-

дет изменяться. Появляется возможность поляризационной бистабильности.

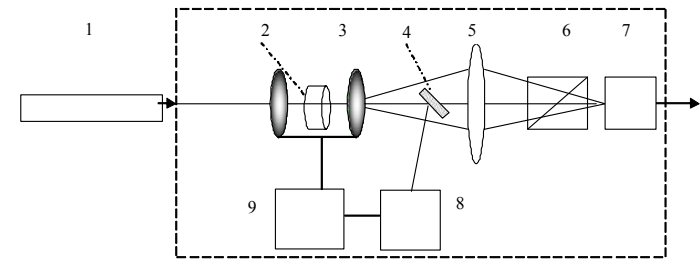


Рис. 6. Схема поляризационного бистабильного устройства на основе светоделительной пластины:

- 1 – лазер; 2 – образец феррита; 3 – катушки Гельмгольца;
- 4 – светоделительная пластина; 5 – собирающая линза; 6 – поляризатор;
- 7 – первый фотоприемник; 8 – второй фотоприемник;
- 9 – устройство обратной связи

Если известно пропускание устройства поляризационного бистабильного элемента как функция некоторого параметра, то оно (отношение состояния поляризации на выходе к состоянию поляризации на входе) может быть найдено по формуле:

$$\Pi = \frac{P_2}{P_1},$$

где P_1 – состояние поляризации входного излучения;

$$P_2 = \frac{I_2 - I_3}{I_2 + I_3}, \quad I_3 = I_0 - \gamma I_1, \quad \gamma = \exp(\alpha \delta);$$

α – показатель поглощения кристалла;

δ – толщина кристалла;

I_2 – интенсивность дифрагировавшего излучения.

Принимая $d = 2b$ и $P_1 = 1$ (для случая лазерного излучения) получаем:

$$\Pi = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 - I_3}{I_2 + I_3} = \frac{\frac{I_2}{I_3} - 1}{\frac{I_2}{I_3} + 1} = \frac{\frac{\sin^2 u}{u^2} \frac{\sin^2(2Nu)}{\sin^2(2u)} - 1}{\frac{\sin^2 u}{u^2} \frac{\sin^2(2Nu)}{\sin^2(2u)} + 1}.$$

Если известна зависимость дифракционного параметра u от интенсивности, то возможно следующее графическое построение. Положим, что пропускание известно как функция обратной связи:

$$b = b_0 + k_b I$$

$$u = u_0 + k I_1,$$

где b_0 – ширина ориентированных по полю доменов в момент образования ПДС;

k_1 – коэффициент, связанный с изменением ширины при повышении магнитного поля;

k_2 – коэффициент усиления обратной связи.

Тогда с учетом зависимости от входного сигнала, стационарные решения должны удовлетворять обеим зависимостям (рис. 7).

Для бистабильного режима необходимо, чтобы функция $\Pi(I)$ (уравнение прямой линии) пересекала график $\Pi(u)$ не менее, чем в трех точках (см. рис. 7). Как видно из рисунка, для прямых, лежащих между В и С, существует три точки пересечения, что свидетельствует о бистабильном режиме.

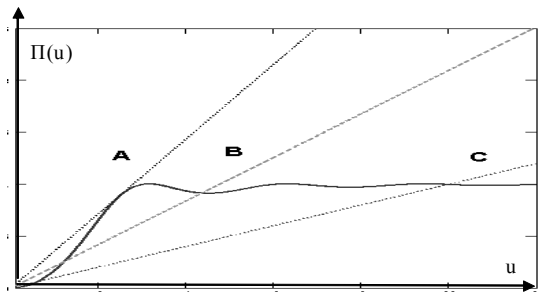


Рис. 7. Зависимость пропускания элемента как функция дифракционного параметра u . Наклонные прямые дают связь между u и $\Pi(u)$ при различной интенсивности I_0

В четвертой главе рассмотрена схема модуляции He-Ne лазера на длине волны $\lambda = 1,15$ мкм, использующего трехзеркальный резонатор, в пассивном плече которого размещается анизотропный по поляризации элемент – магнитная дифракционная решетка (МДР) из железоиттриевого граната (ЖИГ), выполняющая роль модулирующего элемента. Известно несколько вариантов схем для управления оптическим излучением на основе МДР. В нашем случае наиболее оптимальным является управление параметрами несимметричной полосовой доменной структуры с помощью магнитного поля, совпадающего по направлению с нормалью к решетке.

Таким образом, в отсутствие управляющего магнитного поля в лазере устанавливался двухчастотный режим генерации с частотами V_n и V_{n+1} . Как показали измерения, при нулевом фарадеевском вращении излучение лазера является почти линейно-поляризованным (компонента, поляризованная перпендикулярно плоскости падения на брюстеровское окно, не превышала 4%). При наличии управляющего поля, как следует из теории, колебание с частотой ν расщепляется на два ортогональных эллиптически-поляризованных луча, различие по частоте между которыми $\delta\nu = \nu_+ - \nu_-$ измерялось при смешивании их на фотокатоде ФЭУ и выделении на нагрузке сигнала биений с частотой $\delta\nu$. Величина биений наблюдалась на экране осциллографа. Была определена зависимость $\delta\nu$ от величины однопроходного фарадеевского вращения (т.е. от величины постоянного тока в катушке Гельмгольца I). Из графика зависимости $\delta\nu(\theta_F(I))$ (рис. 8) видно, что при малых токах ($\approx 0,12$ А, $\theta_F < \theta_t$) расщепление колебаний не происходит.

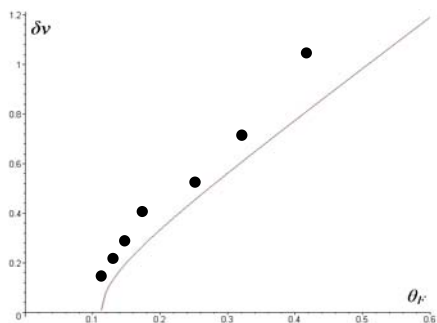


Рис. 8. Зависимость величины частотного расщепления от величины однопроходного фарадеевского вращения (т.е. от величины постоянного тока в катушке Гельмгольца)

Зависимость $\Delta\nu$ от величины намагничивающего тока имеет почти линейный характер. В наших опытах минимальная величина расщепления составляла 80 кГц, а максимальная достигала нескольких мегагерц. Большое несоответствие расчета и экспериментальных данных, вероятно, объясняется выбором модели лазера, которая существенно отличается от экспериментальной установки. В то же время результаты эксперимента качественно подтверждают проведенные расчеты.

В заключении сформулированы основные научные результаты диссертационной работы.

1. Проведен анализ состояния исследования магнитных дифракционных решеток, обзор работ по созданию оптических бистабильных устройств. Установлена наибольшая перспективность использования магнитооптических устройств для управления оптическими сигналами.

2. Проведенные численные эксперименты показали, что математическая модель, основанная на методе разложения по параметру гирации, может быть положена в основу алгоритмов математической интерпретации картин дифракции электромагнитных волн на неоднородностях в феррите. При анализе дифракционных картин можно сделать вывод о характере этих неоднородностей и структуре доменной границы.

3. Установлены условия, при которых в монокристалле феррита возникает полосовая доменная структура. Наиболее существенными из них являются: величина внешнего магнитного поля, которая должна иметь значение в пределах от 3 до 10 кА/м, толщина образца, близкая к оптимальной, фактор качества < 1 и магнитооптическая добротность выше 100.

4. При непосредственном участии автора впервые разработан оптический бистабильный гибридный элемент на основе магнитных решеток. Устройства на основе магнитных решеток являются особыми приборами, которые позволяют одновременно выполнить как амплитудное, так и поляризационное преобразование оптических сигналов.

5. Создан макет оптического бистабильного устройства на основе магнитной дифракционной решетки, возникающей в образце феррит-граната, вырезанного в плоскости $\{110\}$. В экспериментах был использован лазер с длиной волны 1,15 мкм. Исследуемый образец имел толщину 0,4 мм и диаметр 6 мм. При мощности излучения ~ 10 мВт характерное время переключения составляло $\sim 10^{-4}$ – 10^{-5} с, а энергия переключения $\sim 0,1$ мДж.

6. Впервые показано, что при значениях магнитного поля от 3 до 10 кА/м, действующего на образцы феррит-граната, вырезанные в плоскостях $\{110\}$ и $\{111\}$, образуется полосовая доменная структура, служащая фазовой дифракционной решеткой, которая при использовании излучения с длиной волны 1,15 мкм и электронной обратной связи приводит к режиму нелинейного бистабильного оптического пропускания устройств. Полученные экспериментальные данные хорошо соответствуют теории оптической бистабильности.

7. Показана возможность создания на основе оптического бистабильного устройства на магнитной дифракционной решетке основных логических элементов для преобразования оптических сигналов.

8. Результаты исследования показывают, что образцы ферритов более высокого качества и усовершенствование конструкций оптических бистабильных элементов позволят создавать высокоэффективные быстродействующие нелинейные оптические элементы.

9. Предложен и детально исследован способ магнитооптической внутриврезонаторной модуляции трехзеркального He-Ne лазера на основе магнитной дифракционной решетки в железиттриевом гранате. Показано, что при намагничивающих полях, превышающих пороговое значение, наблюдается частотная модуляция с девиацией в несколько мегагерц.

10. Впервые установлено, что при внутриврезонаторной модуляции лазера на основе магнитной дифракционной решетки уменьшается число генерируемых частот с 8 до 2, что приводит к более монохроматическому излучению. Также увеличивается стабильность получаемых частот.

Публикации автора по теме диссертации

1. Шадрин Г. А. Дифракционный модулятор добротности ND:YAG лазера на железиттриевом гранате (тезисы доклада) /

Г. А. Шадрин, В. А. Табарин // Мат-лы науч.-техн. конф. Датчик-99, 23–30 мая 1999 г. – С. 100–102.

2. Шадрин Г. А. Использование оптического бистабильного элемента для контроля содержания железа в воде и ее омагничивания (тезисы доклада) / Г. А. Шадрин, В. А. Табарин // Северный регион: экономика и социокультурная динамика : сб. тез. докл. Всерос. науч. конф. нояб. 2000 г., Ханты-Мансийск – Сургут. – Сургут : Изд-во СурГУ, 2000. – С. 276–277.

3. Шадрин Г. А. Использование оптического бистабильного датчика на основе магнитных решеток для определения содержания железа в воде (статья) / Г. А. Шадрин, В. А. Табарин // Датчики и системы. – 2001. – № 9. – С. 29–31.

4. Шадрин Г. А. Оптическая бистабильность на основе магнитных решеток (статья) / Г. А. Шадрин, В. А. Табарин // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, вып. 12. – С. 75–80.

5. Шадрин Г. А. Анализ фрактальных свойств магнитных дифракционных решеток (тезисы доклада) / Г. А. Шадрин, В. А. Табарин // Наука и инновации ХМАО : сб. тез. докл. III окр. конф. молодых ученых ХМАО, 29–30 нояб. 2002 г. / Сургут. гос. ун-т. – Сургут : Изд-во СурГУ, 2002. – С. 262–264.

6. Шадрин Г. А. Оптические логические элементы на основе магнитных дифракционных решеток (тезисы доклада) / Г. А. Шадрин, В. А. Табарин // Наука и инновации XXI века : мат-лы откр. окр. конф. молодых ученых, 27–28 нояб. 2003 г. : в 2 т. Т. 1. / Сургут. гос. ун-т. – Сургут : Изд-во СурГУ, 2004. – С. 38–39.

7. Шадрин Г. А. Внутриврезонаторная магнитооптическая модуляция (тезисы доклада) / Г. А. Шадрин, В. А. Табарин // Мат-лы Междунар. конф. Сибирский поляризационный семинар. – 2004. – С. 133–136.

8. Шадрин Г. А. Магнитооптическая модуляция излучения трехзеркального лазера (статья) / Г. А. Шадрин, В. А. Табарин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2009. – Т. 76, № 2. – С. 188 – 193.