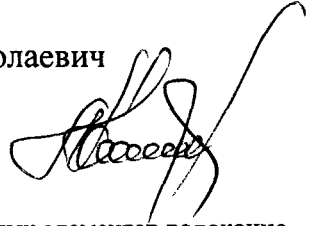


На правах рукописи

Котов Александр Николаевич



Метод расчета многопроходных чувствительных элементов волоконно-
оптических датчиков электрического тока и магнитного поля для
контроля параметров ракетно-космической техники

Специальность 05.07.07 - «Контроль и испытание летательных
аппаратов и их систем», технические науки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2003

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте космических систем (НИИКС) Федерального государственного унитарного предприятия «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» (ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заслуженный машиностроитель Российской Федерации **Гориш Анатолий Васильевич.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Мурашкина Татьяна Ивановна;**

доктор технических наук, профессор **Вокин Григорий Григорьевич.**

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение измерительной техники» (г. Королев, Московской области).

Защита состоится 18 декабря 2003 года в 15 часов на заседании диссертационного совета ДС 403.003.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» по адресу: г.Юбилейный, Московской области, ул. Тихонравова, дом 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИКС ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева».

Автореферат разослан 04 ноября 2003 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета, д.т.н., профессор

В.С. Чаплинский



2003-А
18387

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

На всех этапах создания и развития ракетно-космической и авиационной техники для различных задач оборонного, гражданского, социального и других направлений необходимо иметь системы диагностики, контроля и измерения различных физических параметров.

Четкая организация обслуживания, обеспечения готовности ракетно-космической техники (РКТ) к выполнению целевых задач требуют постоянного поиска, создания и внедрения новых информационно-измерительных средств, а также требуют создания более совершенных первичных преобразователей и методов измерения и контроля физических параметров на изделиях РКТ.

В последние годы в РКТ развивается и формируется новая область информационно-измерительного приборостроения – волоконная оптика (ВО), для создания волоконно-оптических датчиков (ВОД), а на их базе контрольно-измерительной аппаратуры нового поколения.

Эти датчики характеризуются преимуществами по сравнению с традиционными датчиками для измерения различных физических параметров.

Специалисты считают, что приход ВО и волоконно-оптических средств измерения на смену электрическим имеет такое же значение для науки и техники, как и переход от транзисторных принципов построения на микроэлектронную и твердотельную технологию построения чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков и преобразователей.

Это достигается совокупностью основных технических и эксплуатационных характеристик ВОД по сравнению с традиционными электрическими датчиками, а именно: они не чувствительны к внешним электромагнитным полям, имеют высокую механическую прочность и компактность, малые габаритные размеры, простую конструкцию, являются химически инертными, оказывают малое влияние

или вообще не оказывают
РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.Петербург
09 1003 акт 436

влияния на измеряемый объект, могут применяться во взрывоопасной среде ввиду отсутствия искро- и взрывоопасности, изготавливаются из диэлектрических материалов, чем обеспечивается отсутствие путей прохождения через них электрического тока (полная гальваническая развязка), устойчивы к повышенным температурам, механическим ударам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды, позволяют производить бесконтактные и дистанционные измерения, потребляют малое количество энергии, экологически безопасны.

ВОД представляется возможным применять в РКТ как на этапе создания новых образцов, так и в процессе эксплуатации различных типов ракет-носителей и космических аппаратов для измерения электрического тока, магнитного поля, напряжения, быстрого измерения температуры небольших поверхностей, имеющих малую теплопроводность и перемешанную отражающую способность и другие параметры.

Требования к уменьшению массы и габаритных размеров систем измерения, диагностики и контроля для автономных систем управления (АСУ), применяемых на космических аппаратах (КА), в авиационной, морской и машиностроительной технике, и требования к уменьшению громоздких кабельных сетей настоятельно требуют внедрения унифицированных волоконно-оптических сетей сбора данных (ВОССД), потенциально имеющих более высокие технические характеристики в сравнении с традиционными сетями, обеспечивающих более надежную и объективную передачу телеметрической информации в условиях воздействия сильных электромагнитных помех и повышенной искро- и взрывоопасности и предполагающих замену электрических датчиков, построенных на традиционных принципах преобразования, на ВОД.

Основное преимущество ВОД, применяемых в АСУ РКТ, обусловлено, прежде всего, их естественным сопряжением с волоконно-оптическими средствами передачи информации и лучшими возможностями объединения их в ВОССД. Но, к сожалению, в настоящее время, когда техника передачи

оптических сигналов (ОС) по волоконно-оптическим каналам отработана достаточно хорошо, работы по созданию отечественных ВОД только выходят за рамки лабораторных исследований, серийно изготавливаемые ВОД практически отсутствуют. Отдельные ВОД разрозненных разработок имеют разные входные и выходные параметры, что не позволит их использовать в АСУ. Отсутствие широкой номенклатуры ВОД и недостаточные темпы в области их разработок в ближайшие годы станут сдерживающим фактором в создании и внедрении ВОССД в АСУ. Поэтому существует настоятельная потребность в создании ВОД различных типов как для РКТ, так и для промышленного применения в различных отраслях социальной значимости.

В настоящее время в РКТ ведутся отдельные разработки в области создания ВОССД, обеспечивающих более эффективное получение телеметрической информации о состоянии систем РКТ в сравнении с традиционными информационно-измерительными системами (ИИС), фиксирующих воздействие электромагнитных помех и повышенной искро-взрывоопасности.

В настоящее время серийно изготавливаемые ВОД для различных изделий РКТ практически отсутствуют. Существующие отдельные лабораторные образцы ВОД не имеют единой методологии построения, чаще всего рассчитаны на работу в лабораторных условиях и неработоспособны при возведении жестких внешних влияющих факторов, имеющих место в РКТ. Отсутствие достаточной номенклатуры ВОД и низкие темпы их разработок являются сдерживающим фактором в создании и внедрении ВОССД, поэтому создание отечественных ВОД, как основных компонентов ВОССД, с метрологическими и эксплуатационными характеристиками, отвечающими условиям и требованиям РКТ, является актуальной задачей.

В этой связи, создание ВОД является новым и перспективным самостоятельным научно-техническим и технологическим направлением, содержанием которого должна являться разработка на единой научно-технической, технологической и методологической основе

унифицированных базовых элементов, методов и конструкций для создания ВОД.

Основные теоретические и технологические предпосылки к решению этой проблемы созданы трудами отечественных ученых: В.Д. Буркова, В.И. Бусурина, М.М. Бутусова, А.В. Горища, В.М. Гречишников, И.И. Гроднева, Е.А. Зака, В.Г. Жилина, Б.А. Красюка, Н.Е. Копохова, Т.И. Мурашкиной, Я.В. Малкова, О.Р. Носова, А.Л. Патлаха, В.Т. Потапова, Д.К. Саттарова и др.

Мировая тенденция развития практически всех областей науки, техники и технологии в настоящее время заключается в автоматизации процессов измерения, управления, контроля и диагностирования приборов, систем, оборудования, технологических установок, а также различных инженерно-технических объектов (ИТО). Это обуславливает постоянный рост потребностей в датчиках, которые являются основными элементами в системах измерения, управления, контроля и диагностирования. По данным компании ВСС (Business Communication Co. Inc.), объединяющим сведения основных фирм производителей датчиков, мировой рынок датчиков физических величин возрастает ежегодно более чем на 9%, объем инвестиций в этой области в 2002 г. превысил 6 миллиардов долларов.

Высокие, а в большинстве случаев и специфические требования к датчикам понуждают ученых, конструкторов и технологов обращаться к новейшим достижениям в различных областях науки, техники и технологии. В настоящее время РКТ проявляет повышенный интерес к разработкам ВОД, основанных на достижениях оптоэлектроники и волоконной оптики.

Кроме РКТ, внедрение ВОД осуществляется в настоящее время в энергетике, поскольку там высокие требования к электромагнитной совместимости, к качеству измерений, пассивности и дистанционности измерений. Определенные успехи достигнуты в работах по созданию ВОД магнитного поля и электрического тока. Так в работе [16] описан ВОД для измерения и контроля токов питания в бортовых системах космических

аппаратов, самолетов и кораблей, где необходимы прочные, легкие, надежные датчики для измерения переменного электрического тока до 1000А на частотах от 50 Гц до 20 кГц, работающие в сложных условиях при наличии вибраций, ускорений, электромагнитных помех и перепадах температур от -80°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Работы [17-20] посвящены разработкам и применению ВОД электрического тока в энергетике для измерения токов на электроподстанциях, трансформаторах, ЛЭП. Применение ВОД магнитного поля и электрического тока в научных исследованиях в ядерной физике, импульсной технике, ускорителях, предопределено отсутствием других средств, обеспечивающих решение поставленных задач [21-22].

Одним из наиболее перспективных ВОД для измерения средних и сильных магнитных полей (от 1 до 10^6 А/м) и соответствующих электрических токов являются датчики, в которых в качестве ЧЭ применяются кристаллы со структурой силленита.

По сравнению с другими магнитооптическими материалами, эти кристаллы имеют высокое значение константы Верде и слабую зависимость ее от температуры, в них отсутствует естественное линейное двулучепреломление (ЛДП), что снимает жесткие ограничения на апертуру световых пучков и обеспечивает малые потери света при согласовании ЧЭ с волокном. Для этих кристаллов характерна стабильность оптических свойств, доступность и технологичность при получении и обработке. Кристаллы $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ имеют более высокое значение константы Верде, по сравнению с $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, что позволяет реализовать ЧЭ с меньшими габаритными размерами при одинаковых характеристиках.

Особенностью $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, также как и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, является наличие в них собственного кругового двулучепреломления (КДП) или оптической активности, которая оказывает влияние на модуляцию света в кристалле магнитным полем [23]. Одной из основных задач при разработке ВОД магнитного поля и электрического тока является повышение его чувствительности при сохранении других положительных качеств:

термостабильности, малых габаритных размеров и надежности. Одним из способов повышения коэффициента преобразования (КП) и чувствительности ВОД на основе кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ является применение многопроходных ЧЭ. Это обеспечивает увеличение чувствительности ВОД за счет увеличения длины оптического пути света в кристалле при взаимодействии с магнитным полем. Однако очевидно, что должны существовать пределы возможного увеличения длины оптического пути в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, которые могут быть обусловлены рядом причин, в частности, наличием несовершенств кристаллов, приводящих к появлению остаточного ЛДП.

В работе [24] показано, что в однопроходных ЧЭ на основе $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ с длиной оптического пути $\cong 2$ см и меньше, влияние остаточного ЛДП на характеристики ВОД можно не учитывать и, что при определенных условиях, можно методом выбора параметров кристалла, его геометрических размеров и взаимной ориентации осей поляризатора и анализатора реализовать ЧЭ, обладающие высокой температурной стабильностью при несущественном снижении КП. Однако до сих пор остается открытым вопрос о степени влияния ЛДН на КП многопроходных ЧЭ, изготовленных из $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, общая длина оптического пути в которых, необходимая для значительного повышения КП, достигает 20-30 см. Не установлено также по какому закону будет изменяться КП с ростом длины оптического пути в различных магнитных полях.

Исходя из вышеизложенного, представленная работа посвящена вопросам разработки и совершенствования методов расчета КП многопроходных ЧЭ ВОД и вопросам создания ВОД магнитного поля и электрического тока для РКТ, в авиационной, машиностроительной и других отраслей техники.

Цель и задачи работы.

Целью работы является обеспечение измерения и контроля электрического тока и магнитного поля в изделиях ракетно-космической техники (РКТ) в условиях воздействия мощных электромагнитных помех естественного и искусственного происхождения с повышенной искро- и взрывоопасностью путем решения комплексной научной задачи разработки математической модели, методов расчета и технологических принципов для конструирования различных вариантов многопроходных чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков электрического тока и магнитного поля на принципе эффекта Фарадея с применением кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.

Основными источниками мощных помех естественного и искусственного происхождения являются: грозовые разряды; мощные радиопередающие средства; радиолокационные, радиотелеметрические и траекторные станции; высоковольтные линии электропередачи; стартовые комплексы РКТ; технологические инженерные объекты РКТ и т.д.

Исследования и разработки по поставленной научной задаче решались по следующим направлениям:

- разработка математической модели и создание программы для численного расчета КП на ПЭВМ, с целью оптимального конструкционного исполнения многопроходных ЧЭ ВОД на основе кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$;
- выполнение теоретических и экспериментальных исследований КП с различными конструкционными исполнениями ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока на основе кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$;
- установление степени влияния остаточного ЛДП на КП и чувствительность ВОД с многопроходным ЧЭ в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, обусловленного несовершенствами структуры кристаллов;
- разработка и изготовление действующих макетных и опытных образцов ВОД магнитного поля и электрического тока с различными конструкционными исполнениями ЧЭ;

- исследование действующих макетных образцов и проведение сравнительного анализа основных технических характеристик различных конструкционных исполнений ЧЭ;
- изготовление и испытания опытного образца ВОД температуры;
- разработка комплекта конструкторской документации на опытный образец ИИС. Ведется работа по изготовлению опытного образца системы.

Методы исследования.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований, при разработке математической модели для численного расчета и создания экспериментальных и макетных образцов ВОД для измерения магнитного потока и электрического тока применялись основные положения волновой, геометрической и волоконной оптики, методы математической физики, теории упругости, прикладной механики и теория электродинамики.

При решении теоретических задач по анализу распространения света в кристаллах и при создании математических программ использовались методы численного анализа, исчисления матриц, положения теории погрешностей, имитационного и статистического моделирования на ПЭВМ.

При проведении экспериментальных исследований реализовывались положения теории измерений, планирования эксперимента и математической обработки результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Основные теоретические положения и результаты расчетов подтверждены экспериментальными исследованиями, а также созданием действующих макетных образцов ВОД и проведением испытаний их в реальных условиях.

Научная новизна работы

1. Впервые разработана математическая модель, позволяющая на основе матриц Джонса рассчитывать и конструировать различные оптимальные варианты многопроходных ЧЭ ВОД электрического тока и магнитного поля на основе эффекта Фарадея для гиротропных кристаллов типа

$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ с учетом основных технических требований на разрабатываемый датчик.

2. Теоретически и экспериментально доказано влияние собственного кругового и остаточного ЛДП на чувствительность ВОД и с помощью математической модели представляется возможным оптимально определять геометрические размеры кристалла типа $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ЧЭ ВОД с учетом технических требований на разрабатываемый датчик.

3. Теоретически и экспериментально доказано, что:

- с увеличением длины оптического пути света (за счет многократного прохождения его в кристалле) КП и чувствительность ВОД зависят от длины кристалла и магнитного поля;
- за счет наличия остаточного ЛДП в кристалле типа $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ зависимость КП и чувствительность ВОД становятся существенно нелинейными.

4. Экспериментально показано, что повышение чувствительности при конструировании ВОД магнитного поля и электрического тока на принципе эффекта Фарадея на основе кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ обеспечивается за счет реализации многопроходных ЧЭ.

Практическая ценность работы:

1. Разработан и реализован метод расчета КП многопроходных ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока на основе гиротропных кристаллов, который позволяет рассчитывать и оптимально определять конструктивное исполнение ВОД этого типа на основе кристаллов, изготовленных из материалов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$.
2. Представлены расчетные данные зависимости температурного дрейфа КП от длины ЧЭ на основе кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, позволяющие определять области длин многопроходных ЧЭ, при которых значительно повышается КП и сохраняется его высокая температурная стабильность.

3. Результаты экспериментальных исследований показали принципиальную возможность создания многопроходных ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока с повышенным значением КП.

4. Создан макетный действующий образец ВОД магнитного поля и электрического тока с многопроходным ЧЭ. Проведены экспериментальные исследования и доказано, что чувствительность его не менее, чем в 8 раз превышает чувствительность ВОД по сравнению с однопроходным ЧЭ.

В гражданских отраслях промышленности представляется возможным создавать новые типы ВОД и применять их при измерении различных температур в высоковольтных электрических аппаратах, таких, как генераторы переменного тока и трансформаторы; при измерении тока и напряжения в высоковольтных линиях электропередач; при измерении давлений, магнитных потоков и других физических параметров.

В настоящее время изготавливается опытный образец информационно-измерительной системы на базе волоконно-оптических датчиков для измерения температур в зонах действия сильных электромагнитных полей, в пожароопасных условиях и в агрессивных средах с диапазоном измерения от -60 до $+300^{\circ}\text{C}$, обеспечивающих, по сравнению с аналогами, повышение точности и быстродействие измерительных процессов в 3 – 5 раз, многократное снижение массы, габаритных размеров и энергопотребление, а также дистанционность измерения с возможностью объединения в единую сеть десяти и более измерительных каналов.

Результаты теоретических, технологических и экспериментальных исследований, изложенные в диссертационной работе, в настоящее время применяются и реализованы в Институте радиотехники и электроники РАН, НПО измерительная техника, при разработке ВОД для измерения физических параметров в РКТ, авиационной, машиностроительной и других отраслях промышленности.

В Московском государственном университете леса (МГУЛ) результаты работы применяются на занятиях студентов по проектированию устройств волоконно-оптической техники.

Апробация работы.

Основные научные и практические результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на НТС Росавиакосмоса, на Международных конференциях «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе» «IT-SE 2001», Ялта – Гурзуф, 20-29 мая 2001г., «IT-SE 2002», Ялта – Гурзуф 2002г. На VIII Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика – 2002» РИ –2002, Санкт-Петербург, 26-28 ноября 2002 года.

На защиту выносятся следующие основные научные результаты:

1. Математическая модель, расчетные методики и прикладные программы для численного расчета на персональном компьютере КП многопроходных ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока на основе эффекта Фарадея для гиротропных кристаллов типа $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.
2. Результаты численного моделирования расчетов КП и результаты экспериментальных исследований в многопроходных ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока на основе эффекта Фарадея в оптически активных кристаллах типа $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, подтверждающие необходимость учета влияния остаточного ЛДП при расчете характеристик многопроходных ЧЭ ВОД.
3. Принципы оптимизации конструкций ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока и технологические принципы сборки этих датчиков.
4. Действующий макетный образец магнитного поля и электрического тока с многопроходным ЧЭ ВОД на основе кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.

Содержание работы.

Диссертация состоит из 4 глав, введения и заключения.

В первой главе дан обзор литературы, посвященной ВОД магнитного поля и электрического тока на основе эффекта Фарадея. Приведены

основные характеристики и основные преимущества этих датчиков, отмечена тенденция роста разработок таких датчиков и измерительных систем на их основе для практических измерений в разных отраслях науки и техники.

В обзоре рассмотрены методы преобразования измеряемого магнитного поля и электрического тока в выходной сигнал фотоприемного устройства. На основе анализа работ, посвященных ВОД магнитных полей и токов на основе эффекта Фарадея, показано, что для измерения средних значений магнитных полей и токов наиболее подходящими являются датчики с ЧЭ из кристаллов типа $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. В этом случае могут быть использованы стандартные многомодовые оптические волокна и другие элементы, что снижает стоимость датчиков, а сами ЧЭ потенциально могут обеспечить высокие метрологические характеристики и высокую надежность ВОД.

Описаны различные конструкции и оптические схемы ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока. Отмечается, что повышение чувствительности и метрологических характеристик ВОД этого типа связано с созданием многопроходных ЧЭ, обладающих минимальными температурными дрейфами КП, и что это является в настоящее время актуальной задачей.

В главе II проведен теоретический анализ характеристик ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока на основе кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. При помощи формализма матриц Джонса получены выражения для КП и глубины модуляции для трех типов ЧЭ: отражательного, проходного и многопроходного. Расчет проводился с учетом влияния остаточного ЛДП, приводящего к сложной нелинейной зависимости КП от длины оптического пути луча света в кристалле. Показано, что для однопроходных и двухпроходных ЧЭ, общая длина оптического пути света в которых не превышает величины в несколько сантиметров, влияние остаточного ЛДП для кристаллов типа $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ при расчетах можно не учитывать.

Одним из способов повышения чувствительности КП ВОД к магнитному полю и электрическому току является увеличение угла Фарадея за счет увеличения длины оптического пути света L в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. При этом, с целью уменьшения основных геометрических размеров ВОД, целесообразно оптический путь в кристалле увеличивать за счет многократного прохождения света. Однако увеличение длины оптического пути L в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ может привести к проявлению влияния ряда нелинейных эффектов, в том числе и остаточного ЛДП β в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ на магнитооптическую модуляцию света и КП ВОД. Остаточное двулучепреломление всегда присутствует в кристаллах со структурой силленита вследствие неидеальности их структуры.

Приводятся результаты анализа характеристик многопроходных ЧЭ при различных длинах оптического пути и числе проходов луча в кристалле. Показано, что при достаточно большом количестве проходов луча по кристаллу условия $\beta L \ll \frac{\pi}{2}$ и $\varphi \ll \frac{\pi}{2}$ (φ - угол Фарадея) могут не выполняться, при этом выражения для интенсивности световой волны I на выходе кристалла и КП ЧЭ становятся сложными функциями параметров кристалла и магнитного поля. Согласно справочным данным различных авторов величина остаточного β для $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ лежит в пределах $2,3 \div 7,1$ рад/м, поэтому условие $\beta L \ll \frac{\pi}{2}$ может нарушаться при L , равном нескольким сантиметрам. В этом случае для исследования характеристик многопроходных ЧЭ целесообразно применение численного моделирования, поскольку получение аналитических выражений для интенсивности излучения на выходе ЧЭ и КП не представляется возможным.

Для проведения расчётов по моделированию многопроходного чувствительного элемента (МЧЭ) ВОД магнитного поля и электрического тока были разработаны библиотеки процедур и функций на языке Borland Pascal, годные к применению как в среде программирования Borland Pascal

3.0 и выше, так и в среде визуального программирования Borland Delphi любой версии.

На рис. 1 приведены зависимости КП S от оптического пути L_n МЧЭ для четырёх значений ЛДП $\beta=0$; $\beta=2,3$ рад/м; $\beta=4,7$ рад/м; $\beta=7,3$ рад/м. Из рисунка видно, что по мере увеличения β зависимость S от L начинает значительно отличаться от линейной ($\beta=0$).

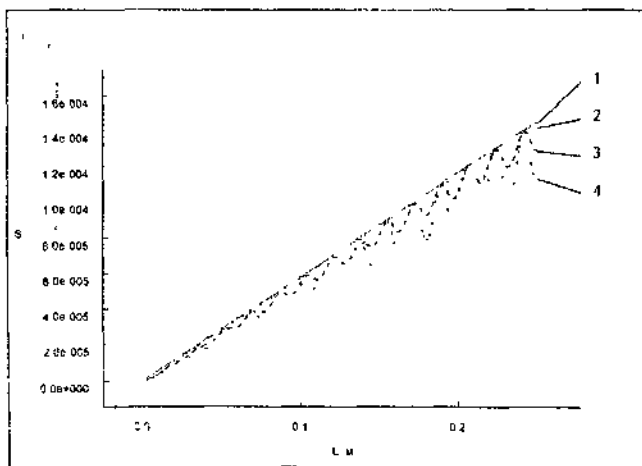


Рис. 1. Зависимость коэффициента преобразования S от длины прохода луча L в многопроходном ЧЭ для различных значений линейного двулучепреломления.

- а) $\beta=0$ - прямая линия 1;
- б) $\beta=2,3$ рад/м - кривые 2;
- в) $\beta=4,7$ рад/м - кривая 3;
- г) $\beta=7,1$ рад/м - кривая 4.

На рис. 2 приведены расчетные зависимости глубины модуляции $1/I_0$ от полной длины оптического пути L в ЧЭ при единичной длине пробега $L_n=8,7$ мм в случае $\beta=0$ (кривая 1) и $\beta=4,7$ рад/м (кривая 2) для величины магнитного поля $H=8 \cdot 10^3$ А/м. Из этого рисунка видно, что уже при двух проходах коэффициенты модуляции начинают различаться и увеличение полной длины оптического пути L за счет увеличения числа проходов луча в кристалле при наличии ЛДП не даст увеличения глубины модуляции, а

наоборот может привести к ее уменьшению. В общем случае при измерении сильных магнитных полей глубина модуляции при учете ЛДП имеет периодическую зависимость от длины пути L . Однако это имеет место не для всех длин единичных проходов L_n . Как показали расчеты, существует интервал таких значений L_n , при которых влияния ЛДП не наблюдается до значений L равных нескольким метрам.

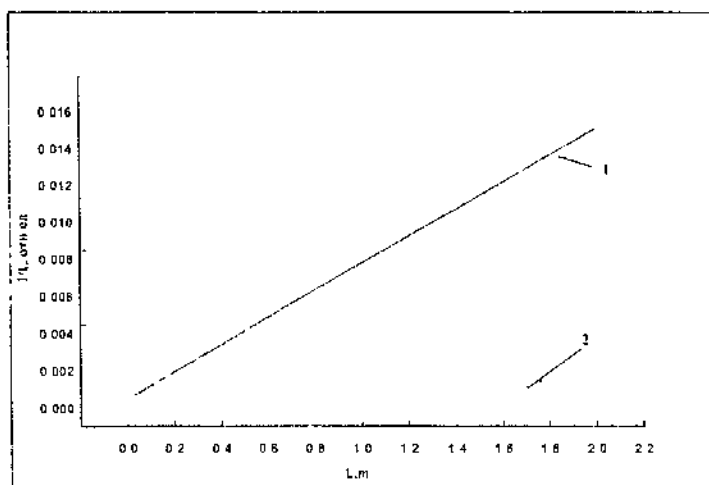


Рис. 2 Зависимость глубины модуляции m многопроходной схемы с четным числом проходов ЧЗ ВОД от полной длины оптического пути L для длины единичного прохода $L_n \approx 0,0087$ м и $H=8 \cdot 10^4$ А/м при

- а) $\beta=0$ рад/м – кривая 1;
- б) $\beta=4,7$ рад/м – кривая 2

Таким образом, видно, что наличие остаточного ЛДП приводит к сложной нелинейной зависимости КП от длины оптического пути. Физически это объясняется тем, что в среде, обладающей круговым и ЛДП, собственные волны являются не линейно, а эллиптически поляризованными, то есть возникает дополнительный сдвиг фаз между ортогонально поляризованными волнами, который зависит от L .

Однако можно подобрать такие длины кристалла L_n , при которых влияние ЛДП (по крайней мере в пределах $\beta < 7,1$ рад/м) на коэффициент

преобразования и глубину модуляции практически не сказывается. Следовательно, при конструировании МЧЭ ВОД магнитного поля на основе кристаллов $\text{Vt}_{12}\text{GeO}_{20}$ существенным является выбор длины единичного пробега света в кристалле.

Глава III содержит описание экспериментальной установки и методики измерений, позволяющих проводить измерения КП ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока и их температурных дрейфов в диапазоне температур $(+20 - +120)^\circ\text{C}$. Результаты оценок значений коэффициента преобразования и глубины модуляции по формулам (2.8; 2.16-2.18 гл. II) показывают, что их значения лежат в пределах $10^{-3} - 10^{-6}$ и, что для количественной проверки теоретических расчетов, необходимо измерять величины КП и глубины модуляции ЧЭ ВОД с относительной погрешностью не хуже чем 10^{-4} . Очевидно, что даже в лабораторных условиях удовлетворить этим требованиям чрезвычайно трудно и, кроме этого, дорого. Поэтому нами была разработана методика эксперимента и установка, позволяющие получать необходимые точности измерений путем одновременной регистрации всех сигналов и соответствующей обработке.

На *рисунке 3* представлена зависимость нормированного КП от температуры для ЧЭ с кристаллом длиной 13 мм, угол между разрешенными направлениями поляризаторов выбран так, что $\theta_L + \alpha = 45^\circ$. Как видно из рисунка, экспериментальные точки хорошо интерполируются кривой второго порядка, а не прямой как для случая более коротких кристаллов. Это объясняется тем, что для этой длины кристалла становится существенным влияние члена пропорционального t^2 в выражении для коэффициента преобразования. Расчетное значение температурного дрейфа в данном случае составляет $\cong 0,7\%$, на 100°C экспериментальное значение совпадает с расчетным.

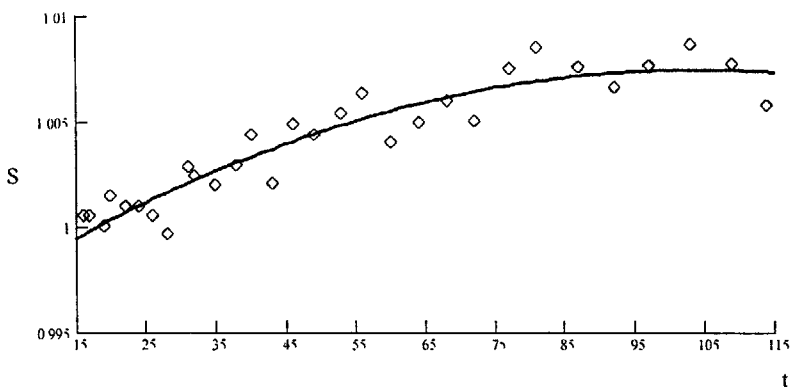


Рис. 3 Зависимость нормированного КП от температуры для ЧЭ с кристаллом длиной 13 мм, и углом между разрешенными направлениями поляризаторов, выбранными так, что $\theta L + \alpha = 45^\circ$.

В главе IV описаны конструкции ВОД с ЧЭ двух типов: однопроходным и многопроходным. Описаны их оптические схемы, характеристики приемо-передающих блоков, элементы технологии их сборки и настройки. Приведены оценки отношения величины сигнал/шум при заданных уровнях оптической мощности и чувствительности фотоприемного устройства, а также влияния качества поляризаторов на чувствительность ВОД. Разработан и исследован макет ВОД для измерения токов промышленной частоты с однопроходным ЧЭ, обладающим относительным температурным дрейфом коэффициента преобразования менее 0,7% на 100°C и пороговой чувствительностью к току $\approx 0,3\text{A}$.

Приводятся результаты исследования макета ВОД с МЧЭ, которые показали, что применение МЧЭ позволило в 8 раз повысить коэффициент преобразования ВОД и снизить его пороговую чувствительность до 40 мА. При этом температурный дрейф КП ВОД составил не более 1,5% на 100°C .

На рис.4 приведены зависимости сигнала с фотоприемника от электрического тока в проводнике, полученные с многопроходным и однопроходным ЧЭ, помещенным в разрез ферритового кольца, охватывающего проводник с током.

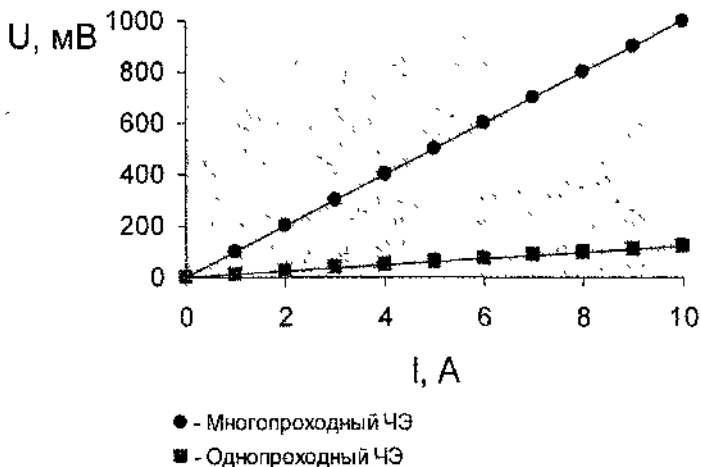


Рис 4 Зависимость выходного сигнала ВОД от тока в проводнике.

Заключение.

В диссертационной работе получено решение комплексной научной задачи разработки математической модели, методов расчета и технологических принципов для конструирования различных вариантов многопроходных чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков электрического тока и магнитного поля на принципе эффекта Фарадея с применением кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, имеющей существенное значение для обеспечения измерения и контроля электрического тока и магнитного поля в изделиях РКТ.

При этом получены следующие основные научные результаты.

1. Математическая модель и математическая программа для численного расчета КП и глубины модуляции многопроходных ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока на основе эффекта Фарадея в оптически активных кристаллах типа $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.

1.1. На основе формализма матриц Джонса получены выражения для расчета КП и глубины модуляции многопроходных ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока на основе эффекта Фарадея в гиротропных

кристаллах типа $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ с учетом остаточного ЛДП, обусловленного несовершенством кристаллов.

2. Результаты численного моделирования распространения света в многопроходных ЧЭ на основе эффекта Фарадея в оптически активных кристаллах показали, что при проектировании ВОД магнитного поля и электрического тока необходимо учитывать влияние остаточного ЛДП в кристаллах типа $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ при расчетах характеристик ЧЭ.

2.1. Теоретически доказано, что линейное двулучепреломление в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ приводит к сложной нелинейной зависимости КП от длины оптического пути луча света в кристалле (физически это объясняется тем, что в среде, обладающей круговым и ЛДП, собственные волны являются эллиптически поляризованными, то есть между ортогонально-поляризованными волнами возникает дополнительный фазовый сдвиг, который зависит от длины оптического пути), длинах кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, влияние ЛДП на КП и глубину модуляции достаточно мало. Поэтому при конструировании многопроходных ЧЭ ВОД следует учитывать этот физический процесс и оптимально определять длину кристалла для ЧЭ ВОД.

3. Результаты экспериментальных исследований позволили:

- создать автоматизированную экспериментальную установку, позволяющую проводить измерения дрейфов КП ЧЭ ВОД с точностью 0,1%, в диапазоне температур 15...115° С;
- установить, что кристаллы со структурой силленита, такие как $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, являются одним из наиболее перспективных материалов для ЧЭ ВОД магнитного поля и электрического тока на диапазоны измерений средних и сильных значений полей и токов вследствие достаточно большой величины константы Верде, стабильности свойств, технологичности и достаточно низкой стоимости;
- разработать интерфейс сопряжения экспериментальной установки с персональным компьютером;

- установить и оценить возможность создания ЧЭ;
- создать ВОД переменного магнитного поля и электрического тока, обладающего коэффициентом температурной нестабильности $\cong 0,3 \%$ на 100°C . Теоретические исследования и расчетные данные подтверждены экспериментальными результатами.

4. Разработаны и изготовлены макетные образцы ВОД магнитного поля и электрического тока с однопроходным и многопроходным ЧЭ. Проведены испытания при измерениях токов промышленной частоты ВОД с однопроходным ЧЭ и получены следующие результаты:

- коэффициент преобразования ВОД по току $\cong 12 \text{ мВ/А}$;
- пороговая чувствительность по току $\cong 0,3 \text{ А}$;
- температурный дрейф коэффициента преобразования $\cong 0,7 \%$ на 100°C .

На данный тип ВОД разработана эскизная конструкторская документация. Проведены испытания при измерениях токов промышленной частоты ВОД с многопроходным ЧЭ, которые показали, что ВОД этого типа позволяет в 8 раз повысить коэффициент преобразования ВОД и снизить пороговую чувствительность до 40 мА. При этом температурный дрейф КП ВОД составляет $1,5 \%$ на 100°C .

Многопроходный ЧЭ ВОД позволяет измерять как переменные, так и постоянные электрические токи.

Основные публикации по теме:

1. Потапов В.Т., Удалов М.Е., Котов А.Н. «Анализ характеристик многопроходного чувствительного элемента волоконно-оптического датчика магнитного поля и электрического тока». «Экология, мониторинг и рациональное природопреобразование», научные труды, вып. 307(II), стр. 197-204, МГУЛ, Москва 2000 г.
2. Котов А.Н., Потапов В.Т., Потапов Т.В., Удалов М.Е.»Влияние линейного двулучепреломления на характеристики волоконно-оптического датчика магнитного поля». Труды Международной конференции

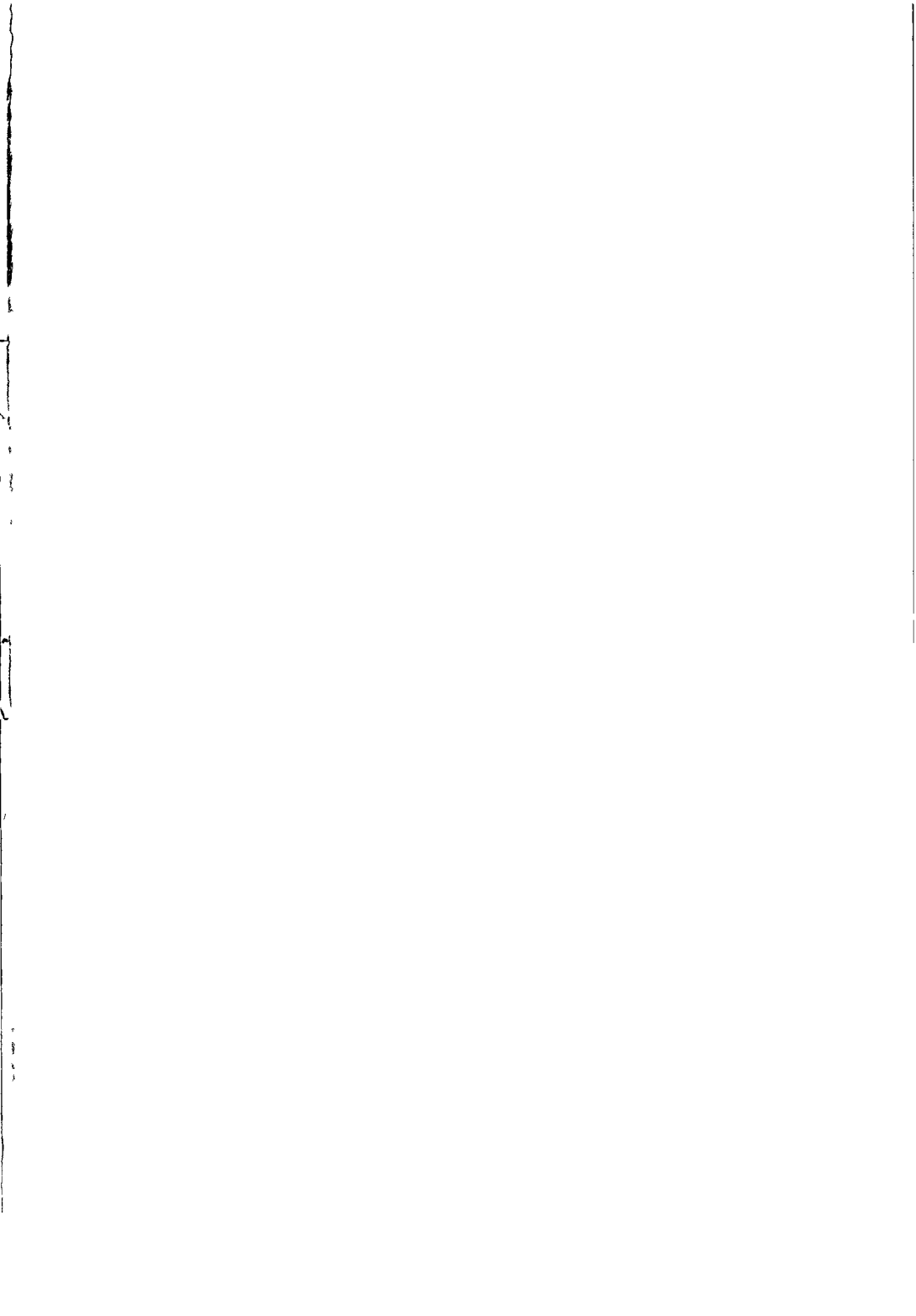
- «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе» IT'SE, 2001, стр. 289-290, Ялта-Гурзуф, 20-29 мая 2001.
3. Гориш А.В., Котов А.Н., Потапов В.Т., Потапов Т.В., Удалов М.Е. «Анализ влияния остаточного линейного двулучепреломления $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ на характеристики волоконно-оптических датчиков магнитного поля». «Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг», научные труды, 2001/1, стр. 589-594, Росавиакосмос, Москва.
 4. Абнер Д.Э., Котов А.Н., Юрков Н.К. «Рекуррентный алгоритм параметрического синтеза математической модели системы управления процессом технологического проектирования». «Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг», научные труды, 2001/1, стр. 358-367, Росавиакосмос, Москва.
 5. Котов А.Н. «Реализация конверсионных НИОКР, инновационных и инвестиционных проектов». «Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг», научные труды, 2001/1, стр. 577-585, Росавиакосмос, Москва.
 6. Баженов А.А., Бульканов М.М., Гориш А.В., Котов А.Н., Яровиков В.И. «Создание датчиков акустической Эмиссии с требуемыми характеристиками». «Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг», научные труды, 2001/1, стр. 290-295, Росавиакосмос, Москва.
 7. Бурков В.Д., Котов А.Н., Удалов М.Е., Микитан Ю.В. «Н4. Математическое моделирование чувствительного элемента волоконно-оптического датчика магнитного поля и электрического тока». «XXIX международная конференция и дискуссионный научный клуб». Труды «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе», 2002, стр.174-176, МГУЛ, Московская обл.
 8. Абраменко Т.В., Гориш А.В., Кириллов А.Б., Котов А.Н. «Общие принципы конструирования датчиковой аппаратуры для измерения различных физических параметров». Международный симпозиум

- «Надежность и качество», труды международного симпозиума, 27 мая – 2 июня 2002, стр. 202-204, Пензенский государственный университет, Пенза, 2002.
9. Котов А.Н. «Тенденция современного развития ВОД». VIII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика – 2002 (РИ – 2002)», материалы конференции, часть 2, стр. 17, 26-28 ноября 2002, Санкт-Петербург.
10. Бадеева Е.А., Бурков В.Д., Гориш А.В., Котов А.Н., Потапов Т.В. «Волоконно-оптические датчики магнитного поля и электрического тока на основе кристаллов $Bi_{12}GeO_{20}$ ». «Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг», Научные труды, выпуск 6 (2003), стр. 188-205, Росавиакосмос, Москва.
11. Котов А.Н. «Требования к элементной базе информационно-измерительного волоконно-оптического канала бортового базирования». «Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг», научные труды, выпуск 6 (2003), стр. 275-281, Росавиакосмос, Москва.
12. Бадеева Е.А., Котов А.Н., Потапов В.Т., Потапов Т.В., Удалов М.Е. «Влияние линейного двулучепреломления на характеристики волоконно-оптического датчика магнитного поля». «Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг», научные труды, выпуск 6 (2003), стр. 282-285, Росавиакосмос, Москва.
13. «Микрорезонаторный волоконно-оптический датчик магнитных полей» RU № 2157512, опубл. 10.10.2000, бюл. № 28.
14. Котов А.Н., Гориш А.В. и др. «Волоконно-оптический автогенератор» RU № 21673354, опубл. 20.02.2001, бюл. № 5.
15. Котов А.Н., Гориш А.В. и др. «Микрорезонаторный волоконно-оптический датчик электрического тока» RU № 2170439, опубл. 10.07.2001, бюл. № 19.

Цитированная в автореферате литература:

16. R.L. Patterson, A.N. Rose, D. Tang and G.W. Day "A Fiber-Optic Current Sensor for Aerospace Applications, IEEE AES System Magazine, December 1990.
17. A.J. Rogers "Optical measurement of current and voltage on power systems", IEEE Journ. Electr. Power. Appl., vol.2, pp.120-126, 1979.
18. A.M. Smith "Optical fibre current measurement device at a generating station" ECOSA (Utrecht), Proc. SPIE, vol. 236 (Bellingham: SPIE), pp.352-357, 1979.
19. Y. Yamagata, T. Oshi, H. Katsukawa S. Kato, Y. Sakurai "Development of Optical Current Transformer and Application to Fault Location Systems for Substations", IEEE Trans. of Power Del., vol.8, № 3, July 1993.
20. A. Papp and H. Harms, "Magneto-optical current transformer", Appl. Optics, vol.19 (I: Principles), p.3729; (II: Components), p.3735; (III: Measurements), pp.37-41, 1980.
21. H. Takada, S. Miymoto, T. Mitsui and T. Tomimasu "Application on fibre-optic magnetic-field sensor to Kicker magnet". Phys.E.Sci Instrum., v.21, pp.371-374, 1988.
22. Горчаков В.К., Куцаенко В.В., Кулаков Л.А., Кован И.А., Потапов В.Т., Чернобай А.Г., Яковенко В.И. "Исследование распределения магнитного поля в камере ТОКАМАК с помощью световодного датчика", Вопросы атомной науки и техники, № 4, стр. 75-78, 1990.
23. V.K. Gorchakov, V.V. Kutzaenko and V.T. Potapov "Electro-optical and magneto-optical effects in bismuth silicate crystals and polarization sensors using such crystals". Jnt. Journ., "Optoelectronics, vol.5, №3, pp. 235-250, 1990.
24. Т. В. Потапов. «Температурная стабилизация магнитооптической модуляции в кристаллах силиката висмута». Радиотехника № 4, стр. 29-33, 1988.
25. Р. Аззам, Н. Башара «Эллипсометрия и поляризованный свет», пер. с английского. «Мир», Москва, 1981.

Подписано в печать 30.10.2003 г.
Типография ЦНТИ “Новек”
Тираж 100 экз.



2003-A

18387

#18387