

заявитель Уфимский государственный авиационный технический университет; пат. повременный Ефремова В.П. № 2005133667; заявл. 31.10.05; опубл. 20.04.06.

⁵ Пирометр: пат. 2215269 Рос. Федерация МПК7 G01J5/00 / Семёнов А.Н., Тюрин В.Н., Орлов И.Я., Афанасьев А.В., Хрулев А.Е., Черемных Г.С., Блинов А.М.; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежала»; заявл. 06.05.2002; опубл. 27.10.2003.

⁶ Информационно-измерительное устройство температурной диагностики контролируемых объектов: решение о выдаче патента на полезную модель от 17.10.2006 по заявке № 2006134227/22: МПК8 G01J15/10 / Ураксеев М.А., Фаррахов Р.Г.; заявитель Уфимский государственный авиационный технический университет.

УДК 681.518

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ФАРАДЕЯ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

М.А. Ураксеев, Т.М. Левина

Проведено исследование магнитооптики и волоконной оптики для создания современных информационно-измерительных систем (ИИС) контроля магнитного поля и электрического тока с элементом Фарадея в виде оптического волокна. Представлены преимущества волоконно-оптических кабелей в качестве физической среды. Определены способы разделения световых волн в соответствии с их поляризацией и разработки в ИИС контроля магнитного поля и электрического тока с применением магнитооптического элемента Фарадея

Для принятия правильных и быстрых решений необходимо иметь полную и достоверную информацию о контролируемых объектах и процессах. Поэтому современный уровень науки и производства выдвигает перед измерительной техникой ряд новых сложных задач, решение которых связано с созданием новых средств измерений, качественно отличающихся от тех, которые использовались ранее.

Важным отличием новых средств измерений является их интеллектуальность, т.е. способность измерительных приборов и систем выполнять операции преобразования, обработки, анализа и управления информацией, которые ранее были доступны только человеку. К таким средствам относятся ИИС, т.е. комплекс измерительных устройств, обеспечивающих одновременное получение необходимой измерительной информации о состоянии объекта. Технические средства, входящие в ИИС, должны обладать определенными свойствами:

- легко сопрягаться между собой без дополнительных устройств;
- не оказывать заметного взаимного влияния;
- иметь одинаковые условия эксплуатации.

Следовательно, эта система должна обладать различными видами совместимости: энергетической, метрологической, конструктивной, эксплуатационной и информационной¹.

Уникальные открытия в области магнитооптики и волоконной оптики в последние десятилетия привлекают к этой области физики всеобщее внимание. Это связано с повышением требований к ИИС и объемам измерительной информации, ее качеству (достоверности), способам получения, анализа, хранения и передачи, что приводит к постоянным изменениям взглядов на обеспечение необходимыми средствами специалистов, занимающихся измерениями и управлением полученными данными. Вместе с тем повышаются требования

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

к метрологическим, эксплуатационным и экологически безопасным характеристикам информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС), их габаритам и массе, защищенности от воздействия окружающей среды².

Анализируя исследования в этой области, можно сказать, что, хотя традиционные измерения, контроль и испытания необходимы и лежат в основе оценке состояния оборудования, они не всегда позволяют обнаружить дефекты на ранней стадии и своевременно дать информацию о развитии процессов, приводящих к снижению надежности и работоспособности оборудования. Поэтому использование дополнительно контролируемых параметров объективно оправдано и развивается как в нашей стране, так и за рубежом.

Сегодня новейшие технологии позволяют создавать тонкие, прочные и гибкие стеклянные нити (оптические волокна), что сделало возможным создание современных ИИУС с этими волокнами для контроля широкого круга физических величин (табл.)

Таблица

Спрос-предложение волоконно-оптических преобразователей физических величин

№	Физическая величина	Спрос-предложение		
		Спрос, %	Предложение, %	
			За рубежом	Отечественное
1	Перемещение	100	40	10
2	Температура	100	40	15
3	Уровень	90	30	18
4	Давление	90	21	11
5	Частота вращения	78	35	29
6	Ускорение	67	32	9
7	Газовый состав	40	21	7
8	Наличие пламени	30	10	10
9	Сила	29	10	3
10	Напряженность магнитного поля	20	19	1
11	Скорость	19	5	2
12	Унос ТЗП	19	3	3
13	Расход	10	5	1
14	Деформация	9	5	2
15	Координаты	9	5	2
16	Крутящий момент	7	5	1

Как видно из таблицы, хотя в России и ведутся работы по совершенствованию и созданию различных волоконно-оптических преобразователей, ИИС, их компонентов и технологии изготовления самих оптических волокон, но достаточно отработаны и широко используются только волоконно-оптические телекоммуникационные системы.

Необходимо вести интенсивные разработки в области создания внутриобъектовых волоконно-оптических информационно-измерительных систем (ВОИИС), обеспечивающих более эффективную передачу информации о состоянии объекта в сравнении с традиционными системами сбора и преобразования информации в условиях воздействия сильных электромагнитных помех и повышенной взрывоопасности³.

ВОИИС отличаются использованием в качестве физической среды волоконно-оптических кабелей (ВОК), чем достигаются:

- 1) отсутствие влияния на результат измерения электромагнитных полей;
- 2) отсутствие побочных электромагнитных излучений;
- 3) отсутствие перекрестных помех каналов;
- 4) отсутствие проблем, связанных с контурами заземления и с напряжениями смещения в местах соединения разнородных проводников;
- 5) существенно меньшая электрическая опасность и отсутствие проблемы дугообразования и искрения;
- 6) высокая стойкость к вредным воздействиям среды;
- 7) более тонкий, более легкий (в 2 раза) и более прочный, чем электрический, многожильный кабель;
- 8) простота мультиплексирования сигналов;
- 9) высокая скорость передачи данных.

Создание и внедрение на отечественных объектах ВОИИС предполагают разработку определенной компонентной базы, в первую очередь – волоконно-оптических преобразователей магнитного поля. К наиболее характерным проявлениям магнитного поля относятся явление электромагнитной индукции, силовое действие на ферромагнитные материалы и контуры с токами, изменение траектории движения заряженных частиц, оптических свойств среды, размеров материала, магнитных свойств материала, а также избирательное поглощение или излучение электромагнитных волн вещества⁴.

Наиболее перспективные элементы ИИУС для контроля магнитного поля по точности составляют магнитооптические преобразователи (МОП).

Принцип работы МОП основан на использовании магнитооптических эффектов в специфических доменных структурах, перестраиваемых под воздействием внешних полей (тепловых, магнитных и т.д.).

Возможность создания преобразователей этого класса стала реальной в результате появления лазерной техники, так как лазер является генератором электромагнитного излучения оптического диапазона длин волн, в который входят инфракрасные, видимые и ультрафиолетовые волны. Это излучение качественно отличается от излучения других источников, например нагретых тел. Лазерное излучение характеризуется высокой степенью временной и пространственной когерентности, монохроматичностью, малой расходимостью (острой направленностью) луча, большой плотностью энергии. Лазерный луч можно перемещать непрерывно или дискретно в пространстве, модулировать, включать и выключать.

МОП используют также способы, которыми можно разделить или отфильтровать световые волны в соответствии с их поляризацией.

Поляризация с помощью стеклянной пластинки. Поляризацию света можно получить с помощью оптической поверхности. Когда неполяризованный пучок пересекает оптическую поверхность раздела двух сред под косым углом, происходит частичная поляризация отраженной и преломленной волн. Эти волны становятся поляризованными перпендикулярно плоскости падения и параллельно ей соответственно. Степень возникновения поляризации зависит от угла падения. Отраженная волна полностью поляризуется при угле падения, равном углу Брюстера. Этот эффект используется в лазерах.

Поляризация за счет двулучепреломления. Одним из физических явлений, имеющих место в оптически активных веществах, является то, что скорость распространения волны зависит от ее поляризации, т.е. вещество имеет различные показатели преломления для различных ориентаций поляризации. Это свойство и будет двулучепреломлением. Как известно, неполяризованный луч содержит все возможные ориентации поляризации в равной мере. Поэтому можно разложить электромагнитные поля пучка по двум ортогональным направлениям в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. Если эти оси соответствующим образом наклонены к оптическим осям кристалла, то две части пучка будут преломляться по-разному и, таким образом, будут разделены.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Поляризация за счет селективного поглощения. Поляризацию можно также получить с помощью дихроичных веществ, т.е. селективного поглощения одной из ортогональных поляризаций неполяризованной световой волны. Это явление, открытое Био в 1815 г., наблюдается в некоторых минералах, наиболее известным из которых является турмалин, а также в некоторых органических веществах.

Свет, распространяющийся по оптическому волокну, может претерпевать изменение поляризации вследствие различных внешних воздействий, что используется при создании сенсоров.

Магнитооптические эффекты, которые используются в основе создания МОП, применяемых в промышленности, имеют свои достоинства и недостатки, определяющие области их применения.

На объектах больших и сверхбольших значений электрического тока и создаваемого им магнитного поля по техническим параметрам являются системы с МОП, выполненные с применением эффекта Фарадея.

Эффект Фарадея (1845 г.). Этот эффект заключается в том, что под воздействием магнитного поля, вектор напряженности которого совпадает с направлением света, наблюдается поворот плоскости поляризации света, проходящего через вещество. Угол фарадеевского вращения Φ_F при напряженности магнитного поля H , длине светового пути в веществе L выражается как

$$\Phi_F = V_r HL \quad (1)$$

Здесь величина V_r , называемая постоянной Верде, характеризует активность эффекта Фарадея для данного вещества.

На рис. 1 приведена структурная схема магнитооптического эффекта Фарадея, используемого в ИИС контроля магнитного поля. Световые лучи передаются от источника света (обычно светодиода) в светочувствительную часть датчика с помощью многомодового оптического волокна.

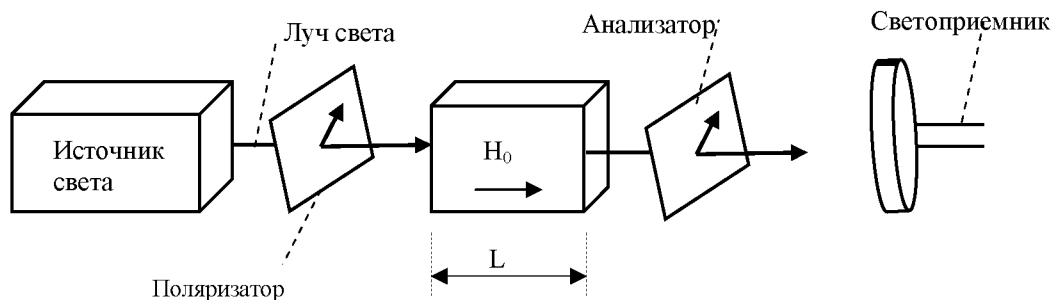


Рис. 1. Структурная схема магнитооптического эффекта Фарадея

В чувствительной части световая волна с линейной поляризацией попадает через поляризатор в элемент Фарадея, где под воздействием магнитного поля происходит поворот плоскости поляризации. Значение угла поворота Φ_F преобразуется анализатором в значение интенсивности света, и далее свет передается оптическим волокном в светоприемное устройство. При этом, если установить угол между поляризатором и анализатором 45° , то световая мощность на поверхности детектора (обычно *pin*-фотодиода)

$$P = P_0 (1 + \sin \varphi_F) \quad (2)$$

где P_0 – мощность света при отсутствии магнитного поля.

Как видно из формулы (2), магнитное поле можно измерять по электрическому сигналу фотодетектора.

В основе построения бесконтактного волоконно-оптического преобразователя магнитного поля (ОПМП) используется оптическое волокно, которое может служить также элементом Фарадея. Например, волокно из кварца.

Если изготовить кольцо из множества витков оптического волокна и намотать на это кольцо провод, то, пропустив электрический ток, можно получить преобразователь магнитного поля, обладающий высокой чувствительностью. При этом угол вращения плоскости поляризации

$$\varphi = VN_f N_i I, \quad (3)$$

где I – электрический ток; N_f – число витков кольца из оптического волокна; N_i – число пересечений электрического тока с витками волокна.

Обычным одномодовым волокнам свойственно двойное лучепреломление, обусловленное некоторой эллиптичностью поперечного сечения. Это заметно снижает линейность зависимости угла вращения плоскости поляризации при эффекте Фарадея, в связи с чем предлагается скручивание оптического волокна. Благодаря скручиванию ослабляется двойное лучепреломление. В сущности, это уменьшение связи между волнами с левой и правой круговой поляризацией при имеющейся разности фазовых постоянных для них.

Угол вращения Фарадея

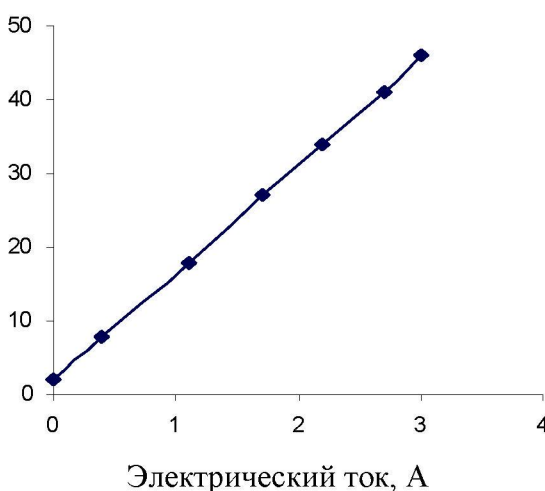


Рис. 2. Характеристика эффекта Фарадея в оптическом одномодовом волокне, улучшенная с помощью его скручивания. $V = 0,015 \dots$ "/А

В результате можно добиться хорошей линейности характеристики эффекта Фарадея (рис. 2). Здесь оптическое волокно подвергалось скручиванию 124 рад/м; диаметр кольца 8 см; $N_f = 55$, $N_i = 1250$. Угол вращения плоскости поляризации определялся по интенсивности света, пропускаемого поляризатором⁵.

На рис. 3 приведена структурная схема информационно-измерительного устройства контроля магнитного поля и электрического тока с применением магнитооптического элемента Фарадея⁶.

Устройство содержит источник оптического излучения 1 в виде лазера или лазерного диода. Последовательно с ним оптически соединяют поляризатор 2, оптическое волокно 3, обладающее линейным двойным лучепреломлением и свернутое в катушку. Внутри катушки 3 расположен проводник 4 с измеряемым током I . Анализатор 5 оптически связан с фотоприемником 6 в виде фотодиода. Последний электрически соединен с усилителем 7, выход которого подключен к микроконтроллеру 8, содержащему блок обработки информации.

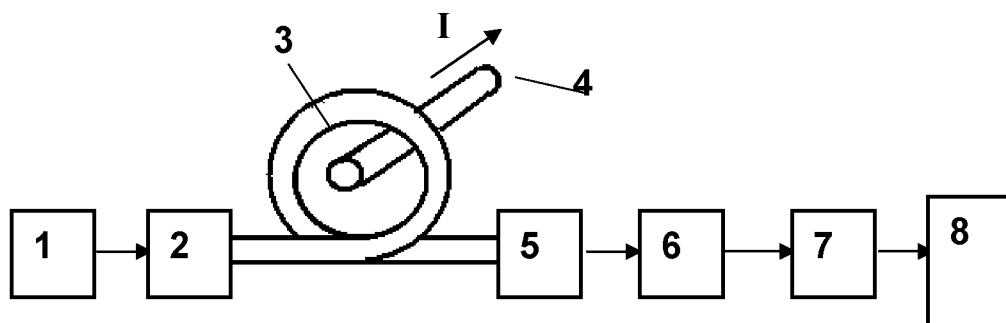


Рис. 3. Информационно-измерительное устройство контроля электрического тока и магнитного поля

Устройство работает следующим образом.

При прохождении электрического тока I по проводнику 4 вокруг него создается магнитное поле, напряженность которого по закону полного тока определяется как

$$H = I/2\pi R, \quad (4)$$

где R – расстояние от проводника с током до рассматриваемой точки.

В случае измерения магнитного поля оно непосредственно воздействует на чувствительный элемент устройства в виде катушки 3 из оптического волокна.

Эта же катушка служит магнитооптическим элементом Фарадея. При воздействии на нее магнитного поля происходит поворот плоскости поляризации плоскополяризованного луча света на угол фарадеевского вращения:

$$\varphi = VN_0I, \quad (5)$$

где N_0 – число витков катушки из оптического волокна; V – постоянная Верде.

При непосредственном воздействии магнитного поля угол фарадеевского вращения находится по формуле

$$\varphi = VHL, \quad (6)$$

где L – длина пути света в катушке из оптического волокна.

В анализаторе 5 угол поворота плоскости поляризации плоскополяризованного луча φ преобразуется в изменение мощности оптического сигнала по формуле (2). Оптический сигнал с выхода анализатора воздействует на фотодиод 6, электрический сигнал с выхода которого усиливается усилителем 7 и поступает на микроконтроллер 8, в котором обрабатывается блоком обработки.

Наличие блока обработки позволяет повысить точность измерения. Это происходит за счет коррекции погрешностей, возникающих от влияния на постоянную Верде материала оптического волокна колебаний температуры окружающей среды и длины волны оптического излучения.

Таким образом, в статье рассмотрено современное состояние ИИУС с волоконно-оптическими преобразователями. Выявлены наиболее конкурентоспособные элементы систем контроля магнитного поля. Описан и показан принцип построения современных ИИУС контроля магнитного поля с магнитооптическим элементом Фарадея.

¹ *Котур В.И., Скомская М.А, Храмова Н.Н.* Электрические измерения и электроизмерительные приборы. М.: Энергоатомиздат, 1986.

² *Богданов Е.А.* Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. М.: Высшая школа, 2006; Басурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчет и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990; Бутусов М.М. Волоконно-оптические датчики в приборостроении. Л.: Машиностроение, 1989; Виглеб Г. Датчики: Пер. с нем. М.: Мир, 1989.

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:
управление и высокие технологии № 2 (2) 2008

³ *Гармаш В.Г., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н., Неугодинов А.П., Поспелов В.И.* Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-экспресс. 2005. № 6.

⁴ *Мазур И.И. Молдаванов О.И.* Курс инженерной экологии. М.: Высшая школа, 2001.

⁵ *Окоси Т., Окамото К., Оцу М.* и др. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990; Сви М. П. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергия, 1993.

⁶ Пат. России № 53021, кл. G01R33/032. Информационно-измерительное устройство контроля электрического тока и магнитного поля.