

УДК 621.317

26

М. А. УРАКСЕЕВ, К. В. СОЛОВЕЙ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТЕ ФАРАДЕЯ

В статье рассмотрены принципы построения и классификация магнитооптических датчиков магнитного поля на эффекте Фарадея с точки зрения применения в них оптического волокна. Приведены примеры датчиков согласно классификации. *Магнитооптика; датчик; оптоволокно; поляризация; ферромагнетик*

Магнитооптика является разделом физики, изучающим взаимодействие света с намагниченным веществом. Начало развития магнитооптики как науки связывают с открытием английским физиком М. Фарадеем в 1846 г. явления поворота плоскости поляризации света в стекле, помещенном в магнитное поле. Это был первый магнитооптический эффект, который впоследствии получил название эффекта Фарадея. Позднее были открыты и другие магнитооптические эффекты: Керра (1876), Зеемана (1896), Коттона-Мутона (1907) и др.

На сегодняшний день многие достижения прикладной магнитооптики реализованы в элементах и устройствах вычислительной техники и системах управления, а ведущие мировые производители компьютерной и электронно-измерительной техники наращивают объемы производства оптических измерительных элементов и устройств, а также запоминающих устройств, что объясняется их высокими технико-экономическими характеристиками.

Интерес к магнитооптическим эффектам обусловлен также их широким применением в физике и оптике:

- определение эффективной массы носителей заряда или их плотности в полупроводниках;
- амплитудная модуляция лазерного излучения для оптических линий связи и определение времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках;
- изготовление оптических невзаимных элементов;
- визуализация доменов в ферромагнитных пленках;

• магнитооптическая запись и воспроизведение информации как в специальных, так и бытовых целях.

1. МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ

Принцип действия большинства оптических датчиков основаны на продольном магнитооптическом эффекте Фарадея.

Магнитооптический эффект Фарадея заключается во вращении плоскости поляризации линейно-поляризованного излучения при его распространении через вещество, находящееся в магнитном поле, параллельном направлению распространения излучения [1]. Схема, иллюстрирующая фарадеевское вращение в полупроводнике, показана на рис. 1.

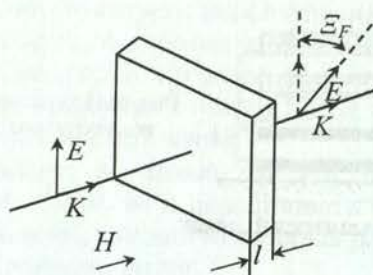


Рис. 1. Схема фарадеевского вращения в полупроводнике. Вращение плоскости поляризации линейно-поляризованного излучения в эффекте Фарадея в слое полупроводника толщиной l (E, K — вектор напряженности электрического поля и волновой вектор электромагнитной волны соответственно, H — вектор напряженности постоянного магнитного поля) [1]

Знак эффекта Фарадея определяется только направлением магнитного поля, т. е. вращение происходит в одну и ту же сторону по отношению к наблюдателю вне зависимости от того, распространяется излучение вдоль магнитного поля или против него. Вращение счи-

тается положительным, если плоскость поляризации поворачивается вправо по отношению к наблюдателю, смотрящему вдоль магнитного поля. На рис. 1 поворот плоскости поляризации в эффекте Фарадея соответствует положительному углу вращения Ξ_F . Величина угла Ξ_F пропорциональна первой степени магнитного поля [1].

Независимость знака вращения плоскости поляризации от направления распространения излучения следует из симметрии магнитного поля (группа ∞/m). Применение операции симметрии-отражения в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля, не приводит к изменению знака Ξ_F . Это отличает магнитное вращение от естественного, происходящего в оптически активных средах, которые являются подгруппами симметрии группы $\infty/2$. В последнем случае поворот вокруг оси второго порядка, перпендикулярной оси более высокого порядка, приводит к изменению направления естественного вращения плоскости поляризации на обратное.

Феноменологическое рассмотрение магнитного вращения плоскости поляризации света основано на представлениях о различных характеристиках среды для двух одинаковым образом поляризованных компонентов излучения.

В методах модуляционной спектроскопии величина измеряемого сигнала также связана с производной диэлектрической проницаемости по частоте излучения или другому параметру [2].

Поворот плоскости поляризации в магнитном поле можно выразить через так называемую постоянную Верде V , которая входит в эмпирический закон [2]

$$\varphi = VHL. \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что чувствительность датчиков, основанных на эффекте Фарадея, зависит от постоянной Верде (зависит от магнитных свойств материала) и от длины пути, пройденного светом. Увеличение длины пути прохождения света можно достичь, используя в качестве чувствительного элемента оптическое волокно. Значение постоянной Верде для различных полупроводниковых материалов колеблется в широких пределах ($V \sim (10^{-3} - 10^{-7})$ рад/Эсм) [2].

В ферромагнитных материалах (железоитриевый гранат) вследствие высокой намагниченности насыщения $4\pi M_S$ эффект Фарадея проявляется сильнее. Тогда в зависимо-

сти от соотношения между напряженностью внешнего магнитного поля и намагниченностью насыщения угол поворота определяется следующим образом:

$$\varphi_F = \frac{\psi_S}{4\pi M_S} HL, \quad H \leq 4\pi M_S; \quad (2)$$

$$\varphi_F = \psi_S L, \quad H \geq 4\pi M_S, \quad (3)$$

где ψ_S — угол поворота, при $H = 4\pi M_S$.

Формула (2) справедлива для ненасыщенного ферромагнетика и (3) — для насыщенного. Здесь учитывается нелинейный характер намагниченности ферромагнетика, являющийся недостатком при разработке датчиков на его основе. Преимущество датчиков на основе ферромагнетиков — малый размер чувствительного элемента (ЧЭ). Пленка железо-итриевого граната толщиной 20...30 мкм позволяет регистрировать поля напряженностью 1...10 Гс.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТЕ ФАРАДЕЯ

Магнитооптические датчики магнитного поля на эффекте Фарадея можно классифицировать с точки зрения применения в них оптического волокна:

- 1) датчики без оптического волокна;
- 2) датчики, в которых оптоволокну используется в качестве чувствительного элемента;
- 3) датчики, в которых оптоволокну используется в качестве линии передачи;
- 4) датчики, в которых оптоволокну используется в качестве и чувствительного элемента и линии передачи.

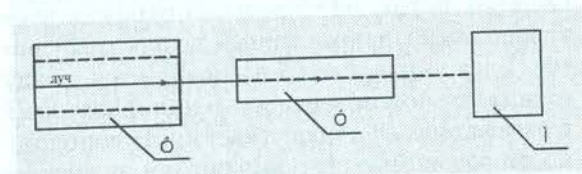


Рис. 2. Магнитооптический датчик магнитного поля без оптического волокна

В конструкцию магнитооптического датчика (МД) на рис. 2 входит концентратор магнитного потока 1 и подложка с магнитооптическим материалом 2, непосредственно соприкасающаяся с ним. Оба элемента конструкции обладают высокой магнитной проницаемостью. Площадь поперечного сечения концентратора магнитного потока гораздо больше площади поперечного сечения подложки. В концентраторе имеется канал, через

который проходит измерительный луч света, а далее через магнитооптический материал он попадает на фотоэлектрический приемник 3. К достоинствам МД магнитного поля относятся простота конструкции, ширина динамического диапазона при малой погрешности измерений (1%) в широком интервале температур (-20... +80° С) [3].

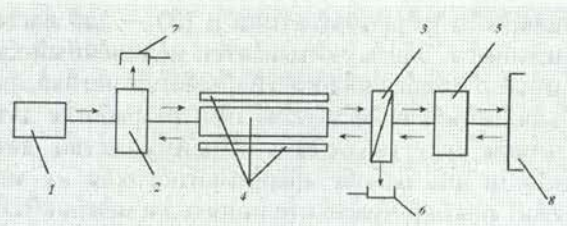


Рис. 3. Магнитооптический датчик отражательного типа

МД на рис. 2 содержит источник света 1, поляризаторы 2 и 3, поворотный элемент Фарадея 4, сенсорный блок 5, оптические детекторы 6 и 7, а также отражатель 8. В поляризаторе 2 входной световой поток линейно поляризуется, одновременно происходит отражение обратного светового потока, который имеет противоположное направление относительно входного. Элемент Фарадея 4 принимает выходной световой поток поляризатора 2 и изменяет направление поляризации этого потока примерно на 45°. Это обусловлено использованием в элементе 4 магнитооптического эффекта Фарадея, который выражается в виде $F = \theta_F h$, где h — путь светового пучка в магнитоупорядоченной среде, а θ_F — величина удельного фарадеевского вращения. Поляризатор 3 пропускает выходной световой поток, одновременно отражая противоположно направленный возвратный поток. Блок управления 5 располагается между отражательной поверхностью поляризатора 3 и отражателем 8 и пропускает противоположно направленные световые потоки, испускаемые поляризатором 3 и отражателем 8. На изменения подлежащей измерению физической величины блок 5 реагирует, изменяя поляризационное состояние оптической траектории луча. Обратный световой поток, проходящий через блок 5, направляется в поляризатор 3. Детектор 6 измеряет интенсивность частично отраженного поляризатором 3 возвратного светового потока, а остальная часть обратного потока через поляризатор 3 и элемент 4 поступает в поляризатор 2. Детектор 7 измеряет интенсивность этой части возвращенного светового потока, отраженного поляриза-

тором 2. Магнитооптический датчик отражательного типа отличается малой инерционностью и универсальностью, так как с его помощью удается измерять значения не одной конкретной, а целого ряда различных физических величин [4].

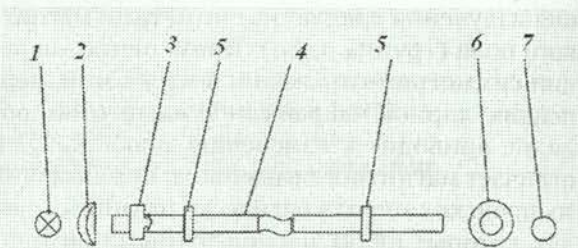


Рис. 4. Волоконно-оптический датчик магнитного поля

На рис. 4 представлена оптическая схема устройства. 1 — источник излучения, 2 — устройство введения излучения в оптическое волокно, 3 — модовый фильтр, 4 — оптическое волокно, 5 — пленки магнитооптического материала, расположенные в промежуточной части оптического волокна, 6 — модовый демультимплексор, 7 — фотоприемное устройство.

Устройство работает следующим образом. Излучение источника 1 устройством введения излучения в оптическое волокно 2 возбуждает оптическое волокно 4. Модовый фильтр 3 оставит в оптическом волокне только осевую моду и погасит остальные. Излучение осевой моды оптического волокна 4 дифрагирует на доменной структуре в пленках магнитооптического материала 5, в результате чего возбуждаются моды более высокого порядка. Каждая из пленок магнитооптического материала имеет свой спектр углов дифракции и, соответственно, возбуждает свой спектр мод высшего порядка. На выходе из оптического волокна каждой пленке магнитооптического материала будет соответствовать свой диапазон углов распространения излучения. Модовый демультимплексор 6 разделит совокупности мод (излучение, продифрагировавшее на различных пленках магнитооптического материала 5) и направит их на соответствующие участки фотоприемного устройства 7. Фотоприемное устройство 7 произведет независимое измерение интенсивностей совокупностей мод [5].

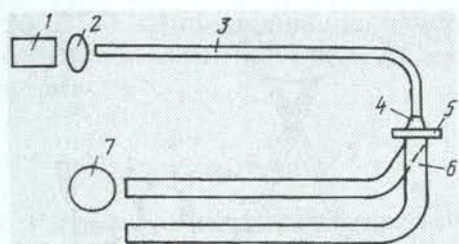


Рис. 5. Датчик магнитного поля с расширителем светового пучка

На рис. 5 представлена оптическая схема устройства. 1 — лазерный источник света, 2 — устройство для ввода излучения в оптическое волокно, 3 — входное одномодовое оптическое волокно, 4 — расширитель светового пучка, 5 — магнитооптический материал, 6 — выходное многомодовое оптическое волокно, 7 — фотоприемник, расположенный последовательно по ходу светового пучка, фотоприемник 7 расположен в торце ответвленной части выходного волокна 6.

Устройство работает следующим образом. Устройство для ввода излучения в оптическое волокно 2 направляет пучок излучения лазера 1 на торец входного одномодового оптического волокна 3. Излучение из оптического волокна 3 расширяется расширителем светового пучка 4, дифрагирует на доменной структуре в магнитооптическом материале 5. Излучение нулевого порядка дифракции возбуждает в выходном многомодовом оптическом волокне 6 осевую моду. Излучение высших порядков дифракции на магнитооптическом материале возбуждает в выходном многомодовом оптическом волокне 6 моды более высоких порядков. Выходное многомодовое оптическое волокно 6 пропускает излучение мод высших порядков через осветленную часть на фотоприемник 7, а излучение осевой моды распространяется через неразветвленную часть.

При помещении магнитооптического материала 5 в исследуемое магнитное поле произойдет перераспределение энергии между порядками дифракции и, соответственно, изменение модового состава многомодового оптического волокна 6. В результате изменится интенсивность светового потока, регистрируемого фотоприемником 7. Производят градуировку датчика в магнитном поле с известной напряженностью, и по полученной зависимости между величиной фотосигнала и напряженностью магнитного поля определяют напряженность исследуемого поля.

Фотоприемник 7 регистрирует не весь продифрагировавший свет, а лишь излуче-

ние высших порядков дифракции на магнитооптическом материале. Отношение полезного оптического сигнала ко всему световому потоку (динамический диапазон) возрастает, что повышает точность измерения напряженности магнитного поля. Кроме того, снятие требования на соотношение между апертурой оптического волокна и периодом доменной структуры $\lambda/d \geq 2NA$, позволяет использовать магнитооптические материалы с более высокой дифракционной эффективностью и дополнительно повысить полезный сигнал, динамический диапазон, точность измерения [6].

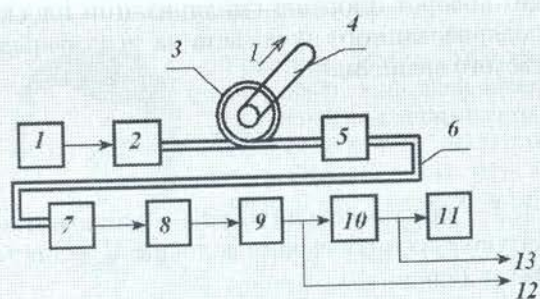


Рис. 6. Волоконно-оптический датчик (ВОД) магнитного поля с поворотом плоскости поляризации света в ОВ

На рис. 6 приведена структурная схема датчика с поворотом плоскости поляризации света в витке оптического волокна, содержащая в качестве источника оптического излучения 1 лазер или лазерный диод. Последовательно с ним соединены поляризатор 2, оптическое волокно, свернутое в катушку 3, обладающую линейным двойным лучепреломлением и круговым двойным лучепреломлением. Внутри катушки 3 проходит проводник 4 с измеряемым током I . Анализатор 5 оптически соединен посредством оптического волокна 6 с фотоприемником оптического излучения 7 в виде фотодиода. Последовательно с фотодиодом 7 соединены усилитель 8, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 9, запоминающий регистр 10 (ЗР) и жидкокристаллический индикатор 11 (ЖКИ). В датчике предусмотрены узлы связи с внешними устройствами в виде аналогового 12 и цифрового 13 выходов.

Датчик работает следующим образом.

При прохождении света, излучаемого лазерным диодом 1, через поляризатор 2, он становится плоскополяризованным. При прохождении электрического тока I по проводнику 4 вокруг него создается магнитное поле, напряженность которого по закону полного тока

определяется как

$$H = \frac{I}{2\pi R}, \quad (4)$$

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

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

Катушка из оптического волокна служит магнитооптическим элементом Фарадея. При воздействии на нее магнитного поля происходит поворот плоскости поляризации плоскополяризованного луча света на угол фарадеевского вращения:

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

где I — электрический ток; N_0 — число витков катушки из оптического волокна; V — постоянная Верде.

При непосредственном воздействии магнитного поля угол фарадеевского вращения находится по формуле (1).

В анализаторе 5 угол поворота плоскости поляризации плоскополяризованного луча ϕ преобразуется в изменение мощности оптического сигнала

$$P = 0,5P_0(1 + \sin \phi) \quad (6)$$

где P_0 — мощность света при отсутствии магнитного поля.

Оптический сигнал (4) с выхода анализатора поступает по оптическому волокну в фотодиод 7, а далее в виде электрического сигнала в усилитель 8, усиленный аналоговый сигнал в АЦП 9, преобразуется в цифровой код, который может храниться в ЗР (10) и представляется на ЖКИ (11) результатом измерения величины электрического тока. Предусмотрены узлы связи с внешними устройствами в виде аналогового 12 и цифрового 13 входов.

Таким образом данный ВОД магнитного поля и электрического тока отличается расширенными функциональными возможностями, заключающимися в возможности сохранения результатов измерения в запоминающем регистре и при необходимости его отображения на индикаторе и возможности сопряжения датчика с внешними устройствами, а также увеличенной точностью [7].

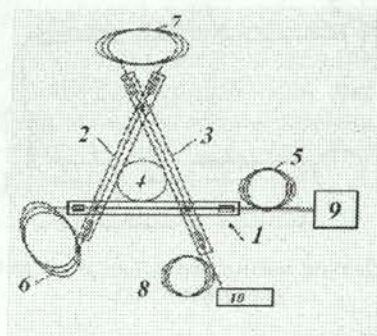


Рис. 7. Оптический датчик магнитного поля на трех локальных полевых датчиках

Основными элементами конструкции оптического датчика (рис. 7), являются три локальных полевых датчика 1, 2 и 3, между которыми находится проводник 4. Принцип действия каждого полевого датчика основан на магнитооптическом эффекте Фарадея. По проводнику протекает электрический ток. Все три датчика соединены между собой последовательно посредством оптических волокон связи 5, 6, 7 и 8. Каждый полевой датчик является отдельным, жестко закрепленным прямолинейным участком оптического волокна, на длине которого и происходит поворот плоскости поляризации света, проходящего по волокну от источника 9 (лазерный диод). Луч света от источника 9 последовательно проходит через волноводы связи 5, 6, 7 и 8, полевые датчики 1, 2 и 3 попадает в фотодиод 10, преобразующий световой сигнал в электрический, который потом направляется в измерительное устройство. Отсутствие поляризаторов в конструкции устройства объясняется использованием поляризационных оптических волокон 5, 6, 7 и 8 марки FS-PZ-4611/200SA с рабочей длиной волны до 850 нм. Для участков 1, 2 и 3 используются оптические волокна марки FS-SM-4611 с рабочей длиной волны до 780 нм [8].

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

По сравнению с другими датчиками, магнитооптические (МО) датчики обладают рядом преимуществ, которые вызывают к ним значительный интерес и уже обеспечивают их практическое применение в области бесконтактной дефектоскопии, медицине, криминалистике и т. д. Все это подтверждается огромным количеством отечественных и зарубежных патентов и статей, посвященных исследованию МО-датчиков. К таким патентам относятся: патенты авторов на полезную модель № 61042 «Волоконно-оптический датчик магнитного поля и электрического то-

ка», № 62713 «Информационно-измерительное устройство магнитного поля и электрического тока».

4. ВЫВОДЫ

1. Рассмотрен магнитооптический эффект Фарадея, приведены основные формулы, из которых видно, что чувствительность датчиков основанных на эффекте Фарадея можно увеличить несколькими способами:

- использованием в качестве чувствительного элемента магнитооптических материалов с высоким значением постоянной Верде (V);

- увеличением длины прохождения света в чувствительном элементе.

2. Для создания более новых и совершенных МО-датчиков, необходимо иметь представление о классификации принципов их построения. Рассмотрены принципы построения МО-датчиков магнитного поля на эффекте Фарадея с точки зрения применения в них оптического волокна. Приведены примеры.

3. Практическое применение подтверждается патентами авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звездин, А. К. Магнитооптика тонких пленок / А. К. Звездин, В. А. Котов. М.: Наука, 1988. 192 с.
2. Сизов, Ф. Ф. Магнитооптические эффекты Фарадея и Фогта в применении к полупроводникам / Ф. Ф. Сизов, Ю. И. Уханов. Киев: Наук. думка, 1979. 180 с.

3. Ленц, Дж. Э. Обзор магнитных датчиков / Дж. Э. Ленц // ТИИЭР. 1990. Т. 78, № 6. С. 87–99.
4. Пат. Японии № 5082889. Оптический датчик отражательного типа // Изобретения стран мира: реферативный журн. 1996. № 13.
5. Пат. № 2259571 (РФ). Кл. G01R33/032. Волоконно-оптический датчик магнитного поля. 2005.
6. Пат. № 2177625 (РФ). Кл. G01R33/032. Датчик магнитного поля. 2001.
7. Пат. № 53021 (РФ). Кл. G01R33/032. Волоконно-оптический датчик магнитного поля. 2006.
8. Пат. 5844710 (США). Кл. G02F 1/09. 1998.

ОБ АВТОРАХ



Ураксеев Марат Абдулович, проф., каф. инф.-измер. техники. Дипл. инж.-электромех. (Ташкентск. политехн. ин-т, 1963). Д-р техн. наук по элем. и уст-вам выч. техники и сист. управления (защ. в МИЭТ, 1982). Иссл. в обл. средств и методов измерения физ. величин.



Соловей Ксения Владимировна, асп., асс. той же каф. Дипл. инж. по инф.-измер. техн. и технол. (УГАТУ, 2005). Готовит дис. в обл. магнитоопт. эффектов и датчиков на их основе.