

УДК 681.5

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ
И НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

М.А. Ураксеев, О.А. Михина

Приведен краткий обзор современных электрооптических датчиков электрического напряжения и напряженности электрического поля. Рассмотрены основные принципы построения датчиков.

В связи с развитием автоматизированных систем контроля и управления и введением в производство новых технологий возрастает потребность в датчиках, обладающих высокой механической прочностью и устойчивостью к воздействию агрессивных сред, малой массой и габаритами, взрыво- и пожаробезопасностью, высоким быстродействием и точностью измерений, высокой надежностью. Этим требованиям отвечают волоконно-оптические датчики. Они активно используются для измерений неэлектрических и электрических величин. В частности, для измерения электрического напряжения и напряженности электрического поля целесообразно применять электрооптические датчики в связи с их точностью и наличием полной электрической развязки между измеряемой цепью и измерительной. Из-за этого они могут использоваться для измерения высокого напряжения (порядка киловольт) и сильных электрических полей. Такие датчики значительно опережают традиционные средства измерения электрического напряжения и напряженности электрического поля по таким параметрам, как безопасность, чувствительность, быстродействие, стабильность характеристик во времени¹.

Электрооптический эффект состоит в том, что некоторые изотропные тела при введении в постоянное электрическое поле становятся оптически анизотропными. Они начинают вести себя подобно одноосным двупреломляющим кристаллам, оптическая ось которых параллельна приложенному электрическому полю.

Электрооптический эффект бывает двух видов:

1) линейный (эффект Поккельса) – изменения показателя преломления линейно зависят от внешнего электрического поля:

$$\Delta n = qE_0,$$

где коэффициент q зависит от рода вещества и его состояния, а также от длины световой волны λ . Имеет место только в кристаллах, не обладающих центром симметрии. Кристалл, обладающий линейным электрооптическим эффектом, помещенный между поляризатором и анализатором, называют ячейкой Поккельса. Наиболее ярко эффект Поккельса проявляется в сегнетоэлектрических и родственных кристаллах²;

2) квадратичный (эффект Керра) – изменения показателя преломления пропорциональны квадрату поля:

$$\Delta n = qE_0^2$$

В чистом виде эффект Керра характерен для centrosymmetricheskikh веществ. Из-за линейности и низкого рабочего напряжения в технике чаще используют эффект Поккельса³.

В электрооптических датчиках, предназначенных для измерения электрического напряжения и напряженности электрического поля, применяют ячейку Поккельса.

Принципы построения электрооптических датчиков

В нашей стране с 70-х гг. активно разрабатывались электрооптические измерители напряженности электрического поля и напряжения, в том числе высокого напряжения, и электрооптические трансформаторы напряжения, предназначенные для использования при измерении переменных и импульсных высоких напряжений. В подобных трансформаторах

КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

использовались обычно в качестве электрооптической системы ячейки с жидким диэлектриком. Для измерения напряжения позже стали широко использоваться кристаллы. Материалами ячейки брали PbMoO_4 или, как правило, LiNbO_3 и LiTaO_3 из-за их высоких электрооптических показателей и легкости изготовления кристалла требуемой формы. При выборе электрооптических материалов в качестве критериев качества применяются в основном «полуволновое» напряжение $U_{\lambda/2}$ (напряжение, необходимое для создания разности хода $\lambda/2$) и данные об электрооптических постоянных, показателях преломления, диэлектрических характеристиках.

Помимо перечисленных выше основных требований к оптическим свойствам, материал должен удовлетворять также целому ряду дополнительных требований. Это специфические требования, связанные с конкретным назначением прибора или устройства, в котором используются материал, условиями его эксплуатации. Они включают, в частности, такие общие для всех кристаллов требования:

- возможность выращивания монокристаллов оптического качества и достаточно крупных размеров с использованием промышленных методов синтеза;
- высокая химическая стойкость кристаллов по отношению к действию окружающей атмосферы; нерастворимость их в воде и других растворителях;
- высокая оптическая однородность, особенно в рабочем диапазоне частот;
- достаточно высокая твердость, обеспечивающая хорошую обрабатываемость поверхностей рабочих элементов и лучшую сохраняемость;
- минимальная анизотропия теплового расширения, обеспечивающая высокую стабильность электрооптических коэффициентов, температурная зависимость которых должна быть малой по величине и линейной по характеру;
- хорошие диэлектрические характеристики, в том числе в сильных полях, в широких частотном и температурном диапазонах;
- устойчивость к действию мощного лазерного излучения.

Сейчас активно изучаются свойства кристаллов ниобата бария – натрия, ниобата бария – стронция. Они обладают лучшими электрооптическими характеристиками, но трудны в изготовлении. Однако в последние годы совершенствуется технология роста кристалла⁴ $\text{Sr}_{0,75}\text{Ba}_{0,25}\text{Nb}_2\text{O}_6$.

Генерация оптического излучения от источника света зависит от типа используемого излучателя. В качестве источника излучения все чаще применяются лазерные диоды. Они обладают хорошими энергетическими и спектральными характеристиками при малых габаритах и небольшом напряжении питания.

Волоконно-оптический измеритель напряженности⁵ электрического поля и напряжения представлен на рис. 1. Измеритель содержит двухволновый источник излучения 1 и фотоприемник 25, оптически связанные посредством волоконных световодов 2 с датчиком 3, включающим в себя модулирующий элемент 14 из электрооптического монокристалла, в котором сформирована регулярная доменная структура с осями доменов, перпендикулярными плоскостям электродов 15, нанесенных на две противоположные грани этого элемента, диафрагмы, микрообъектив 4, на оптической оси которого размещено интерференционное устройство разделения каналов с разными длинами волн на два идентичных измерительных плеча, сформированное в стеклянном блоке, на одну грань которого, расположенную под углом 45° к оптической оси объектива, нанесен многослойный интерференционный светофильтр 5, а на другой грани, срезанной под углом 135° к оптической оси микрообъектива 4, выполнено зеркало 22. Измерительное плечо составляют оптически связанные четыре градиентные стержневые линзы 6–9, модулирующий элемент и треугольная призма 20, первое и второе измерительное плечо оптически связаны с фотоприемником 25 через объединитель и приемный волоконный световод. Датчик измерителя выполнен полностью из диэлектрических материалов, имеет малые массогабаритные характеристики, допускает интегральное исполнение.

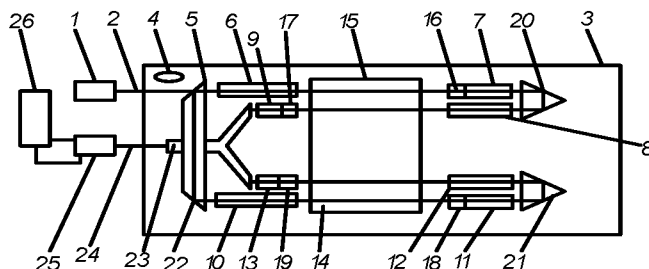


Рис. 1. Волоконно-оптический измеритель напряженности электрического поля и напряжения

Очень широко электрооптические датчики разрабатываются в Японии. Разработки ведутся особенно активно с 1980-х гг., и приборы выпускаются в промышленность.

В 1999 г. компания Toyo Commu Equip разработала легковесный и малого размера датчик напряжения и электрического поля (рис. 2)⁶. Датчик содержит лазерный диод 1, световод 2, передающий свет с лазерного диода 1, самофокусирующуюся линзу 3, преобразующую свет со световода 2 в коллимированный свет, поляризатор 4, $\lambda/8$ пластину 5, на которую свет проходит через поляризатор 4, электрооптический элемент 6, на который падает свет с $\lambda/8$ пластины, зеркало 7, которое отражает свет, прошедший через электрооптический элемент 6, и заставляет свет падать на электрооптический элемент 6 снова. Фотодиод 8 установлен на поверхности поляризатора 4, электрооптический элемент 6 снабжен электродами (рис. 2).

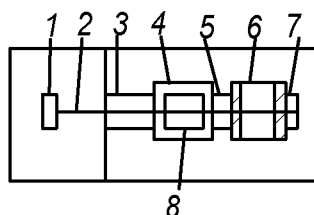


Рис. 2. Электрооптический датчик для измерения электрического напряжения и электрического поля

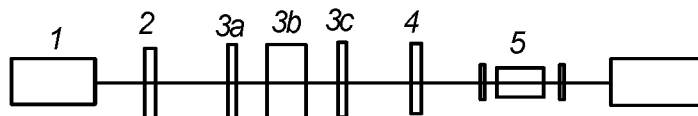


Рис. 3. Датчик электрического поля и напряжения с оптическим резонатором

Для того, чтобы учитывать при измерении напряжения уровень шумов и соотношение шумов и полезного сигнала, компания RICON (Япония) в 1995 г. разработала датчик электрического поля и напряжения с оптическим резонатором высокой чувствительности (рис. 3). Датчик обладает высоким отношением сигнал – шум в большом диапазоне измерений⁷. Электрооптический кристалл 3b расположен между двумя противостоящими электродами 3a и 3b (или полупрозрачными зеркалами), составляя оптический резонатор. Световой поток от источника 1 проходит через поляризатор 2, падает на полупрозрачное зеркало. Отраженный световой поток от резонатора 3 и падающий на него свет интерферируют друг с другом. Таким образом определяется частота колебаний сигнала, соответствующая разнице частот вибрации светового потока. Так измеряется пространственное электрическое поле (или потенциальная разница между измерительными электродами). Второй электрооптиче-

КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

ский кристалл 5, который удерживается между измерительными электродами, дополнительно включен в оптический резонатор датчика. Напряжение прикладывается между измерительными электродами второго электрооптического кристалла 5 для смещения частоты колебаний сигнала.

Результаты, полученные в результате измерений с помощью электрооптического датчика, нуждаются в дополнительной обработке, поэтому для расширения функциональных возможностей было предложено волоконно-оптическое информационно-измерительное устройство (рис. 4)⁸.

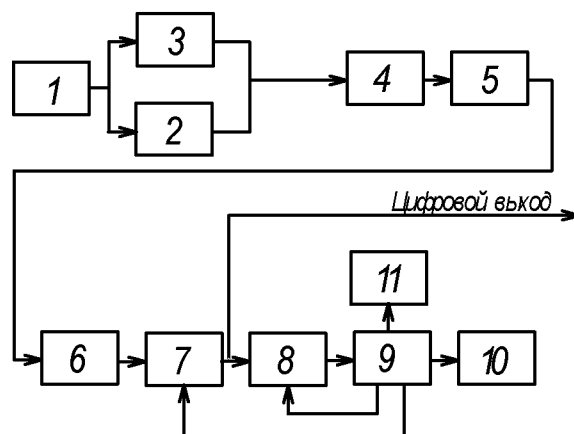


Рис. 4. Волоконно-оптическое информационно-измерительное устройство

Устройство содержит источник излучения 1, первую оптическую систему с микрообъективом 2, электрооптическую ячейку Поккельса 3, вторую оптическую систему с линзами 4, фотоприемник 5, усилитель 6, аналого-цифровой преобразователь 7, регистр памяти 8 и контроллер 9, выходы которого связаны с жидкокристаллическим индикатором 10, печатающим устройством 11, аналого-цифровым преобразователем 7 и регистром памяти 8.

Устройство работает следующим образом. Генерируемый излучателем 1 свет с двумя различными длинами волн λ_1 и λ_2 по волоконному световоду достигает первой оптической системы с микрообъективом 2. Микрообъектив формирует параллельный пучок, падающий на интерференционный светофильтр системы. Излучение с длиной волны λ_1 поступает на первое измерительное плечо, а излучение с длиной волны λ_2 поступает на второе измерительное плечо, идентичное первому. Затем оба пучка проходят через электрооптическую ячейку Поккельса 3. Так как оси соседних доменов направлены навстречу одна другой, то изменения показателя преломления в соседних доменах имеют разные знаки. В результате модулирующий элемент представляет для проходящего через него света дифракционную решетку с периодом, равным периоду доменной структуры, и амплитудой изменения показателя преломления соседних доменов $2\Delta n$. Диффрагма пропускает только ту часть излучения, которая попадает в первый дифракционный максимум. Линза формирует световой поток, возвращаемый призмой через градиентную стержневую линзу, формирующую параллельный пучок на модулирующий элемент, где происходит повторная дифракция, первый максимум которой пропускается диффрагмой и вводится градиентной стержневой линзой в объединитель, который объединяет световые потоки с длинами волн λ_1 и λ_2 , прошедшие по двум идентичным плечам измерителя, и вводит их в фотоприемник 5. Сигналы с фотоприемника поступают последовательно на усилитель 6, аналого-цифровой преобразователь 7, запоминающее устройство 8 и микроконтроллер 9, управляющий запоминающим устройством 8, жидкокристаллическим индикатором 10 и печатающим устройством 11.

⁸ Волоконно-оптические датчики: Пер. с япон. / Под ред. Т. Окоси. Л.: Энергоатомиздат, 1990.

² *Байборodin Ю.В.* Электрооптический эффект в кристаллах и его применение в приборостроении. М.: Машиностроение, 1967.

³ *Гонда С. И.* др. Оптоэлектроника в вопросах и ответах: Пер. с яп. Л.: Энергоатомиздат, 1989.

⁴ *Киселева Н.Н., Подбельский В.В.* и др. База данных «Кристалл» по веществам с особыми акустооптическими, электрооптическими и нелинейно-оптическими свойствами.

⁵ Пат. РФ 2032181 G01R13/40 // <http://www.fips.ru>

⁶ Пат. Японии 11-183528 G 01 R 15/24 // <http://www.ipdl.ncipi.go.jp>

⁷ Пат. Японии 07-113825 G 01 R 15/24 // <http://www.ipdl.ncipi.go.jp>

⁸ Пат. РФ 67723 G01R15\24 // <http://www.fips.ru>