ВОЛОКОННО - ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ

И.Л. Ловчий[1], С.А. Вицинский[1], М.К. Ярмаркин[2]
[1]ФГУП «НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем»
г. Сосновый Бор, Ленинградская область (e-mail: stary@lov.sbor.net)
[2]Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

В докладе сообщается о разработке волоконно - оптического измерительного преобразователя переменного электрического напряжения промышленной частоты класса $110/\sqrt{3}$ кВ, основанного на электрооптическом продольном эффекте Поккельса в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$ (BTO).

Внедрение цифровых информационных технологий в процесс производства, преобразования и распределения электроэнергии требует создания новых средств ее регистрации. Традиционные электромагнитные измерительные трансформаторы напряжения плохо совместимы с современными микропроцессорными устройствами (большие габариты, избыточный сигнал, низкая помехозащищенность и т.д.). Они подвержены нежелательным феррорезонансным явлениям, обусловленным насыщением магнитопровода. Их серьезной проблемой остаются повышенные взрыво- и пожароопасность.

В волоконно - оптических преобразователях реализован метод измерения напряжения, основанный на регистрации изменения состояния поляризации света при прохождении через находящийся в измеряемом электрическом поле электрооптический кристалл. Такая технология в значительной степени упрощает проблему высоковольтной изоляции, одновременно обеспечивая высокую устойчивость систем измерения и защиты к электромагнитным помехам (для передачи световых сигналов между датчиком и электронным модулем используются оптоволоконные линии). Отсутствие масляной изоляции, эффектов насыщения в чувствительном элементе, практически мгновенная реакция на изменение величины поля, малые габариты и вес – очевидные преимущества оптических датчиков.

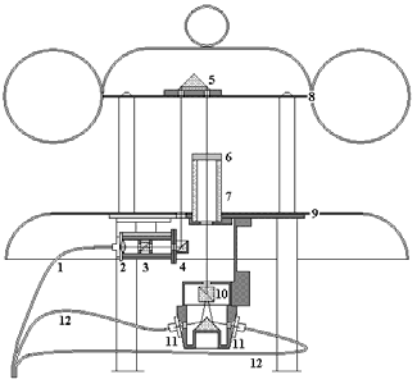
Кубические гиротропные кристаллы со структурой силленита (BSO, BGO, BTO) благодаря достаточно сильному и температурно-стабильнному электрооптическому (ЭО) эффекту удобны для использования в качестве чувствительных элементов ЭО датчиков электрического напряжения. Наиболее перспективным, по-видимому, является кристалл титаносилленита ($Bi_{12}TiO_{20}$), имеющий среди других наибольшую величину электрооптического коэффициента и наименьшее значение оптической активности (соответственно, $r_{41} = 5{,}75\times10^{-12}$ м/В и $\alpha = 6{,}49$ °/мм при $\lambda = 0{,}63$ мкм [1]). Это обуславливает более высокую чувствительность датчика с BTO по сравнению с использованием других кристаллов.

В НИИКИ ОЭП разработан макетный образец волоконно - оптического измерительного преобразователя переменного электрического напряжения промышленной частоты класса $110/\sqrt{3}$ кВ на основе продольного эффекта Поккельса в кристалле BTO.

СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА

На рис. 1 представлена структурная схема (а) и общий вид (б) измерительного блока преобразователя. Излучение лазерного диода попадает в измерительный блок по сохраняющему поляризацию стекловолокну 1 (*HiBi*-fiber). Свет с выхода волокна коллимируется линзой 2, последовательно проходит поляризационный кубик 3, 45-градусное отражающее зеркало 4 и фазосдвигающую, обратно отражающую призму 5. Положение

и ориентация призмы относительно падающего пучка таковы, что сдвиг фаз при двойном внутреннем отражении от граней призмы равен 90°, поэтому на кристалл 6 толщиной 4 мм, установленный на втулке 7 из плавленого кварца в пространстве между высоковольтными электродами 8 и 9, попадает излучение с круговой поляризацией. В результате ЭО эффекта состояние поляризации зондирующего излучения изменяется, что приводит к модуляции интенсивностей I_1 и I_2 ортогонально поляризованных пучков на выходе анализатора 10 (призмы Волластона). Эти пучки фокусируются линзами 11 в многомодовые оптические кабели 12, по которым излучение попадает в блок регистрации на чувствительные площадки фотодиодов, работающих в фотодиодном режиме. Напряжения на нагрузочных сопротивлениях фотодиодов оцифровываются с помощью 16-разрядного АЦП.



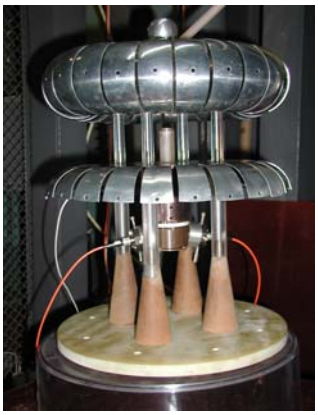


Рис. 1. Структурная схема (а) и общий вид (б) измерительного блока волоконно-оптического преобразователя напряжения.

Длина оптических кабелей составляет 9 м, что обеспечивает эффективную изоляционную развязку между измерительным блоком и блоком регистрации. Для управления сбором данных, их обработки и последующего вывода конечной информации на экран компьютера используется среда графического программирования LabVIEW.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Излучатель – лазерный диод ML1016R (мощность до 30 мВт, λ_0 = 660 нм) с питанием от стабилизированного источника постоянного тока. В обычных условиях при отсутствии стабилизации температуры корпуса диода генерация в каждый момент времени осуществляется на одной продольной моде внутреннего резонатора, однако номер моды может меняться (в пределах нескольких мод). Особенно заметна межмодовая конкуренция при образовании обратной связи, например, при отражении части излучения от поверхности близко расположенного оптического элемента. В этом случае шумовая составляющая интенсивности излучения лазерного диода может доходить до нескольких процентов, что отрицательно сказывается на предельной чувствительности ЭО измерения напряжения. Другая ситуация реализуется в режиме работы диодного лазера с составным резонатором, когда роль внешнего зеркала резонатора играет дальний нормальный торец достаточно длинного одномодового волокна (ввод излучения в волокно осуществляется через торец со скосом). Очень малые межмодовые расстояния внешнего резонатора приводят, по-видимому, к выравниванию условий генерации для нескольких внутренних продольных мод. Визуальное рассмотрение в автоколлимационной схеме спектра излучения диодного лазера с составным резонатором длиной 9 м с использованием дифракционной решетки 600 шт/мм показало, что генерация происхо-

дит (возможно, одновременно) на 10 ÷ 15 последовательных модах с шагом ~ 0,08 нм. При этом шумовая составляющая интенсивности излучения варьируется в пределах 0,02 ÷ 0,3 %.

Обратно отражающая, фазосдвигающая призма изготовлена из стекла БК10 (n = 1,56618 при λ = 647,1 нм). Основное преимущество призмы по сравнению с кварцевой четвертьволновой пластиной – существенно меньшие температурная и дисперсионная зависимости величины фазового сдвига [2]. Расчет показывает, что изменения температуры призмы на несколько десятков градусов, либо спектральный сдвиг центра генерации лазерного диода на несколько нанометров приводят к абсолютному изменению суммарного сдвига фаз при двойном внутреннем отражении излучения от граней призмы не более чем на 0,1°. Это примерно на порядок меньше изменения фазовой задержки при использовании в аналогичных условиях кварцевой четвертьволновой пластины нулевого порядка [3].

Форма высоковольтных электродов и расстояние между ними рассчитывались из условия обеспечения надежной изоляции системы «электрод – кристалл – электрод». Расстояние между электродами в самой узкой части составляло 60 мм при радиусе профилированных закруглений 40 мм. Большая величина относительной диэлектрической проницаемости кристалла ВТО (ε = 46) обуславливает сильное вытеснение электрического поля из твёрдого тела в газовый промежуток, поэтому расчетная напряженность поля по оси кристалла не превышала 25 В/мм при межэлектродной разности потенциалов 100 кВ. При этом максимальная напряженность поля в воздушном промежутке по оси электродной системы составляла 1,5 кВ/мм.

Ориентация призмы-анализатора осуществлялась исходя из условия достижения максимальной чувствительности преобразователя. Для нормировки сигналов с фотодиодов использовался поправочный коэффициент. Его величина определялась отношением переменных составляющих сигналов, обусловленных переменным ЭО эффектом.

В качестве источника измеряемого оптическим преобразователем высоковольтного напряжения использовался промышленный маслонаполненный трансформатор ТВО-140-50, применяемый в схемах питания рентгеновских аппаратов. Номинальное переменное напряжение на первичной (вторичной) обмотке – 190 В (140 кВ), частота 50 Гц. Регулируемое напряжение на входе трансформатора регистрировалось с помощью высокоточного омического делителя. Опорный контроль высоковольтного напряжения осуществлялся исходя из напряжения на первичной обмотке и коэффициента трансформации, практически постоянного в диапазоне допустимых входных напряжений трансформатора при работе его в режиме холостого хода. Электростатический киловольтметр С100, подключенный параллельно оптическому преобразователю, использовался для визуального контроля высокого напряжения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Нормированные интенсивности сигналов I_1 и I_2 использовались для определения коэффициента пропорциональности отклика преобразователя к измеряемому переменному напряжению по алгоритму:

$$k = \frac{\left(\arccos\left[(I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)\right]\right)_{rms}}{U_{rms}}, \qquad (1)$$

где U – напряжение на вторичной обмотке высоковольтного источника, символ rms означает среднеквадратичное значение. Величина минимально регистрируемого преобразователем межэлектродного переменного напряжения составляла 0,3 кВ. На рис. 2 представлены экспериментальные результаты относительного изменения отклика преобразователя при варьировании высоковольтного напряжения.

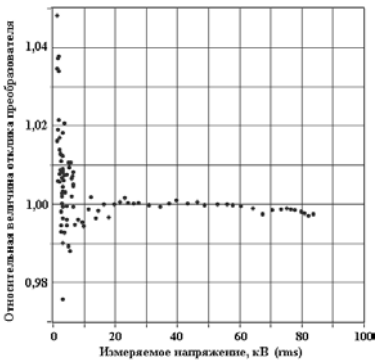


Рис. 2. Относительные изменения отклика преобразователя при варьировании высоковольтного напряжения.

В диапазоне среднеквадратичного значения переменного напряжения 7 ÷ 85 кВ относительные изменения коэффициента пропорциональности не превышали ± 0,5 %.

На рис. 3 представлены колебания отклика преобразователя при регистрации в течении 1 часа переменного напряжения величиной 60 кВ (3600 результатов измерений).

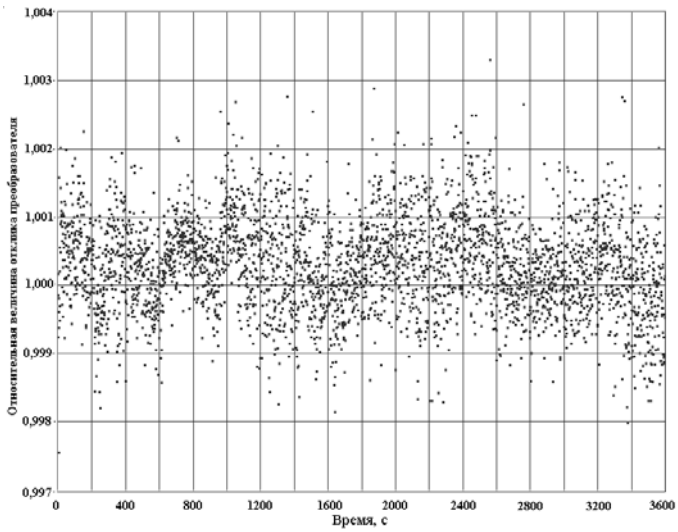


Рис. 3. Временная запись отклика преобразователя.

Для кристалла BTO толщиной 4 мм расчетный диапазон прикладываемых к торцам кристалла переменных напряжений, для которого варьирование коэффициента k, определяемого аналогично (1), не превышает 0,2 %, составляет 0 ÷ 600 В. Конструкция преобразователя рассчитана на номинальное межэлектродное напряжение $110/\sqrt{3}$ кВ (~ 63,5 кВ). Даже при максимальной величине реализуемого в эксперименте высоковольтного напряжения U_{max} = 85 кВ напряжение на торцах кристалла по его оси не превышало 85 В. Это говорит о неполном использовании потенциальных возможностей ЭО измерения высокого напряжения в преобразователе с естественной воздушной изоляцией.

Расчетные оценки изменения чувствительности преобразователя при варьировании длины кристалла BTO (при равном по абсолютной величине изменении межэлектродного расстояния) показали, что она может быть увеличена примерно вдвое при использовании кристалла длиной ~ 14 мм. Это позволит снизить нижнюю границу рабочего диапазона измеряемых преобразователем напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wilde J.P., Hesselink L., McCahon S.W. et al. Measurement of electro-optic and electro-gyratory effects in $Bi_{12}TiO_{20}$. *J. Appl. Phys.*, vol. 67, № 5 (1990), 2245-2252.
2. Filippov V.N., Starodumov A.N., Barmenkov Y.O., Makarov V.V. Fiber-optic voltage sensor based on a $Bi_{12}TiO_{20}$ crystal. *Appl. Opt.*, vol. 39, № 9 (2000), 1389-1393.
3. Hale P.D., Day G.W. Stability of birefringent linear retarders (waveplates). *Appl. Opt.*, vol. 27, № 24 (1988), 5146-5153.