

## РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

М. М. Хасанов, О. У. Бахтиёров, ТашГТУ

В статье рассмотрены принципы реализации твердотельных оптических модуляторов, используемых для построения волоконно-оптических датчиков. Описан электрооптический эффект, используемый многими оптическими модуляторами. Подробно представлены объемные модуляторы, основанные на электрооптическом и акустооптическом эффектах. Представлены интегрально-оптические модуляторы с фазовой и интерферометрической модуляцией интенсивности, а также чисто волоконные оптические модуляторы с фазовой модуляцией. Приведены модели модуляторов в виде эквивалентных схем с сосредоточенными параметрами и методы получения частотных характеристик оптических модуляторов.

*Maqolada tolali-optik datchiklar uchun qattiq jinsli optik modulatorlarni qurish tamoyillari ko'rib chiqildi. Ko'pgina optik modulatorlarda qo'llaniladigan elektrooptik effekt keltirilgan. Elektrooptik va akustooptik effektlarga asoslangan hajmli modulatorlar batafsil keltirilgan. Fazali va intensiv interferometrik modulatsiyali integral-optik modulatorlar hamda faza modulatsiyali sof tolali optik modulatorlar tariflari bilan keltirilgan. Jamlangan parametrli ekvivalent sxema ko'rinishida modulatorlar modellari va optik modulatorlarning chastota xarakteristikalarini olish usullari berilgan.*

*The principles of realization of solid-state optical modulators for building fiber-optic sensors are considered in the article. The electro-optical effect used by many optical modulators is described. Detailed volume modulators based on electro-optical and acousto-optic effects are presented. Integral-optical modulators with phase and interferometric intensity modulation, as well as pure-fiber optical modulators with phase modulation are described with description. Modulator models in the form of equivalent circuits with lumped parameters and methods for obtaining the frequency characteristics of optical modulators.*

**Ключевые слова:** оптический модулятор, волоконно-оптический датчик, электрооптический эффект, акустооптический эффект, фазовая модуляция, интерферометрическая модуляция, эквивалентная схема, частотная характеристика.

Оптические модуляторы являются ключевыми составляющими элементами волоконно-оптических систем, выполняющими различные функции, в том числе модуляцию амплитуды, фазы, частоты и поляризации. В большинстве случаев применяются твердотельные устройства, в которых свет модулируется путем изменения оптических свойств материала устройства при воздействии управляющего электрического сигнала. Механизм связи управляющего сигнала со свойствами материала может быть электрооптическим, акустооптическим или магнитооптическим (рис. 1).

Существует три вида твердотельных оптических модуляторов. Это объемные, интегрально-оптические и чистоволоконные устройства.

Многие оптические модуляторы основаны на использовании электрооптического эффекта [1], который заключается в том, что показатели преломления кристаллов зависят от приложенного электрического поля. Для описания этого эффекта, в рамках

распространения оптического пучка через кристалл, используется математическая модель эллипсоида показателей преломления

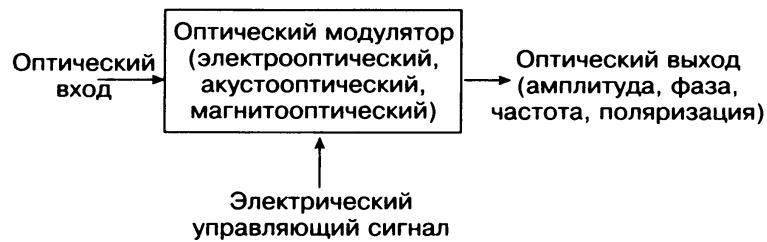


Рис. 1. Схема процесса модулирования оптического сигнала в твердотельном оптическом модуляторе с электрическим управлением

$$\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 x^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_2 y^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_3 z^2 + 2 \left(\frac{1}{n^2}\right)_4 yz + 2 \left(\frac{1}{n^2}\right)_5 xz + 2 \left(\frac{1}{n^2}\right)_6 xy = 1,$$

где  $x$ ,  $y$  и  $z$  - направления осей кристалла (рис. 2). При произвольном направлении распространения  $s$ , при прохождении через кристалл оптические пучки сохраняют постоянной линейную поляризацию только тех направлений поляризации, которые позволяет симметрия кристалла. Это определяется плоскостью, проходящей через начало координат эллипсоида и перпендикулярной к направлению распространения. В общем случае, пересечение этой плоскости с эллипсоидом показателей преломления образует эллипс, и свет, который поляризован в направлении, параллельном или главной, или малой оси, распространяется без изменения поляризации. Показатели преломления для этих двух разрешенных волн являются длинами соответствующих осей. Пучок может быть разложен на суперпозицию этих двух разрешенных состояний линейной поляризации, и при любом различии показателей преломления двух волн происходит непрерывное изменение поляризации по мере распространения пучка через кристалл. Если пересечение плоскости с эллипсоидом показателей преломления образует окружность, то разрешено любое направление линейной поляризации.

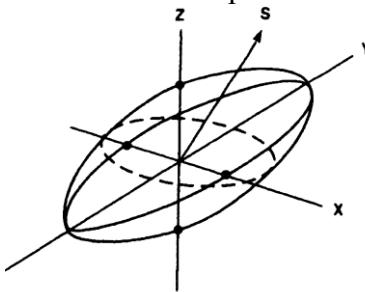


Рис. 2. Схема распространения пучка света через кристалл для разрешенных состояний линейной поляризации, соответствующих этому направлению распространения  $s$ , параллельно осям эллипса, образованного пересечением эллипсоида с плоскостью, перпендикулярной  $S$

Объемные модуляторы широко применяются в оптических системах, в том числе в волоконно-оптических датчиках. Эти устройства широко доступны, и их характеристики вполне сформировались.

В объемном электрооптическом фазовом модуляторе оптическая модуляция фазы  $\phi(t)$  является результатом изменения показателя преломления кристалла на  $\Delta n(t)$ . Это изменение приводит к изменению оптической длины пути, что можно описать в виде

$$\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} L \Delta n(t),$$

где  $L$  - длина устройства. Поскольку оптическая длина волны  $\lambda$  намного меньше  $L$ , незначительные изменения показателя преломления влекут за собой возникновение заметной фазовой модуляции. В устройствах, имеющих длину  $L = 5$  мм, работающих на длине волны  $\lambda = 1,3$  мкм, сдвиг фазы на  $\pi$  радиан происходит при изменении показателя преломления всего лишь на  $\Delta n = 1,3 \times 10^{-4}$ .

В электрооптических модуляторах изменение показателя преломления достигается приложением электрического поля поперек кристалла. Электрооптическое изменение показателя преломления кристалла прямо пропорционально приложенному электрическому полю  $E$  и может быть определено по формуле

$$\Delta n(t) = \frac{n^3 r}{2} E,$$

где  $r$  - электрооптический коэффициент. Напряжение  $V(t)$ , с помощью электродов, приложенных поперек кристалла, создает однородное поле  $V(t)/d$ , где  $d$  - толщина кристалла, и, таким образом,  $\phi(t)$  можно записать в виде

$$\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n^3 r}{2} \frac{L}{d} V(t),$$

откуда следует, что фазовая модуляция прямо пропорциональна напряжению, электрооптической добротности  $n^3/r$  и геометрическому фактору  $L/d$ .

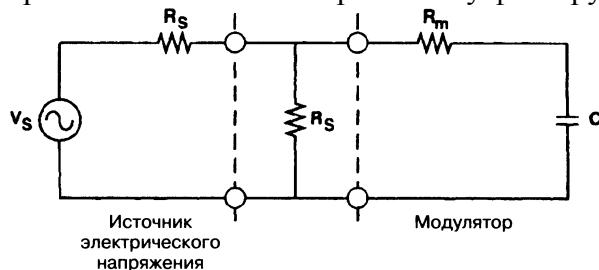


Рис. 3. Модель электрооптического модулятора в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами

Поведение электрооптических модуляторов в составе электрической сети обычно можно проанализировать, используя простую эквивалентную схему. В схеме с сосредоточенными параметрами, показанной на рис. 3, моделью модулятора служит конденсатор с параллельными электродами с емкостью  $C$ , определяемой по формуле

$$C = \frac{\epsilon L W}{d},$$

где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость кристалла модулятора.

Типичный модулятор включает в себя небольшое последовательное сопротивление  $R_m$ . Кроме того, эта модель содержит сопротивление источника питания и согласующее сопротивление, каждое из которых равно  $R_s$ . Напряжение на конденсаторе соответствует напряжению на модуляторе и предполагается однородным между электродами. Эффекты конечности времени переноса электрического заряда не учитываются.

Модель с сосредоточенными параметрами, показанная на рис. 3, обеспечивает ширину полосы частот модуляции, начиная с постоянного тока и до ширины полосы на уровне 3 дБ  $f_{3\text{dB}}$ ,

$$f_{3\text{dB}} = \frac{1}{2\pi R_s C} = \frac{1}{2\pi \epsilon R_s} \frac{1}{(L/d)W},$$

где

при условии  $R_m \ll R_s$ .  $V_\pi$  и  $f_{3\text{dB}}$  обратно пропорциональны отношению  $L/d$ , что при разработке приводит к необходимости компромисса между широкой полосой пропускания и низким значением  $V_\pi$ . Рассматриваемый в качестве примера типичный модулятор на основе  $\text{LiNbO}_3$  с характеристиками  $\epsilon = 32\epsilon_0$ ,  $R_s = 50 \text{ Ом}$ ,  $n^3/r = 3 \times 10^{-10} \text{ м/В}$ ,  $L = 2 \text{ см}$ ,  $W = d = 2 \text{ мм}$  и  $\lambda = 1,3 \text{ мкм}$  будет иметь емкость  $C$  порядка 6 пФ при полосе пропускания  $f_{3\text{dB}}$ , равной 500 МГц, и добротности  $V_\pi$ , равной 425 В.

Объемный электрооптический модулятор интенсивности может быть легко реализован, если воспользоваться преимуществами зависимости фазового модулятора от поляризации. Простой вариант модулятора интенсивности на основе  $\text{LiNbO}_3$  включает в себя зависящий от поляризации фазовый модулятор, размещенный между скрещенными поляризаторами (рис. 4). При изменении напряжения  $V(t)$  на фазовом модуляторе изменяется поляризация пучка, падающего на выходной поляризатор, что в свою очередь приводит к изменению интенсивности. При такой структуре оптический пучок разлагается на обычную и необыкновенную волны, линейно поляризованные вдоль осей  $x$  и  $z$  кристалла  $\text{LiNbO}_3$  соответственно. Входной поляризатор ориентирован под углом  $45^\circ$  по отношению к этим осям, поэтому поле, распространяющееся вдоль оси  $y$ , можно записать в виде

$$\bar{E}(y) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \{ \exp [i\phi_x(y)] \bar{x} + \exp [i\phi_z(y)] \bar{z} \}.$$

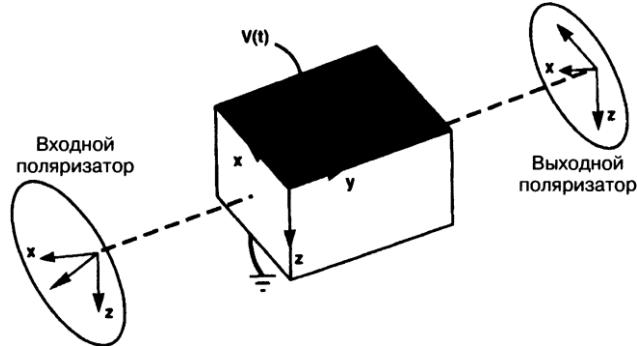


Рис. 4. Схема модуляции на основе объемного электрооптического модулятора интенсивности, включающего в себя входной поляризатор, ориентированный под углом  $45^\circ$  по отношению к осям модулятора, зависящий от поляризации электрооптического фазового модулятора и выходного поляризатора, ориентированного под углом  $90^\circ$  по отношению к входному поляризатору

В интегрально-оптических устройствах оптические волноводы изготавливаются на поверхности соответствующей подложки [2]. На эти приборы не распространяются ограничения, связанные с дифракцией, и, следовательно, у них отсутствуют недостатки, свойственные объемным устройствам. Появляется возможность реализовать модуляторы с низкими требованиями к управляющему напряжению, широкой полосой пропускания небольшого размера, к тому же совместимые с оптическими волокнами [3]. В системах волоконно-оптических датчиков особенно часто используются такие интегрально-оптические устройства, как фазовые модуляторы, модуляторы интенсивности и оптические преобразователи частоты. К тому же многочисленные компоненты могут быть собраны на одной подложке, что упрощает компоновку. Достаточно сложные схемы канальных волноводов могут быть реализованы как единое целое, и, следовательно, такие приборы более разнообразны, чем объемные. В качестве примера на рис. 5 приведена схема многофункционального интегрально-оптического кристалла для волоконных гироскопов. Кристалл содержит

Y-образный разветвитель мощности, фазовый модулятор и оптический преобразователь частоты.

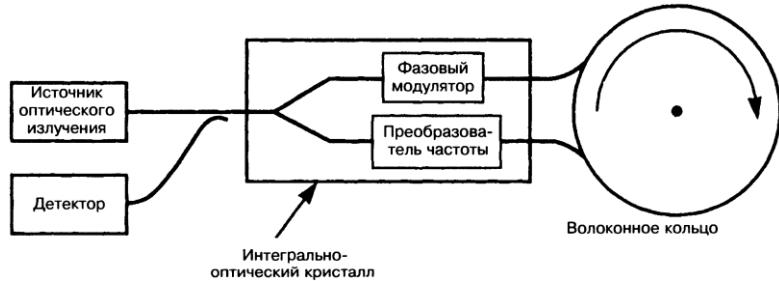


Рис. 5. Схема применения многофункционального интегрально-оптического кристалла в волоконных гироскопах

Реализация чисто волоконных приборов - это достаточно сложная задача, поскольку такой наиболее распространенный волоконный материал, как стекло, является некристаллическим, что делает непосредственное воздействие приложенного электрического поля на показатель преломления невозможным. Таким образом, для изменения показателя преломления приходится использовать такое механическое воздействие, как сдавливание. Эффективность чисто волоконных модуляторов на сегодняшний день относительно невысока, и их применение ограничено по сравнению с устройствами дискретного действия, но такие модуляторы представляют значительный интерес и результаты разработок в этой области быстро прогрессируют.

Наиболее широко применяются чисто волоконные фазовые модуляторы, состоящие из оптического волокна, обычно изготовленного из поляризованного цирконатитаната свинца, намотанного на пьезоэлектрическое кольцо [1]. Напряжение, приложенное к кольцу, изменяет длину окружности кольца и длину волокна. Чувствительность модулятора зависит от схемы расположения электродов, частоты модуляции и диаметра кольца. Чувствительность  $\sim 50$  мрад/В виток обычно достигается для модуляции на длине волны 0,63 мкм при диаметре кольца 2 см.

Ключевая особенность частотной характеристики модулятора - это акустический резонанс, который определяется геометрией кольца и режимом работы. В так называемом кольцевом режиме, когда устройство функционирует за счет изменений длины окружности кольца (рис. 6), резонансная частота изменяется обратно пропорционально диаметру кольца. Типичное значение постоянной частоты равно 100 кГц • см, так что кольцо толщиной 2 см имеет резонансную частоту  $\sim 50$  кГц. При резонансе чувствительность модулятора существенно возрастает.



Рис. 6. Схема подключения волоконно-оптического фазового модулятора, состоящего из волокна, намотанного на пьезоэлектрическое кольцо

Примечание: Приложенное напряжение изменяет диаметр кольца и длину волокна

С другой стороны, в приложениях, в которых требуется плоская частотная характеристика, такая как пилообразный сдвиг частоты, указанный выше эффект может быть нежелательным, поскольку резонанс ограничивает ширину полосы частот модуляции до десятков килогерц. К тому же увеличение резонансной частоты путем уменьшения диаметра кольца может привести к недопустимым потерям из-за изгибов волокна.

Чистоволоконные преобразователи частоты основаны на использовании бегущей волны. В этом случае используется волокно, которое поддерживает две канализированные моды, постоянные распространения которых отличаются на  $\Delta\beta$  [2]. Акустическая волна с частотой  $\omega_a$ , запущенная в волокно, возмущает профиль показателя преломления, что приводит к взаимодействию мод, которое вызывает смещение частоты  $\pm\omega_a$ . Условие синхронного взаимодействия, необходимого для эффективного переноса мощности, можно получить из соотношения

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda_a},$$

где  $\Lambda_a$  - акустическая длина волны. Метод был продемонстрирован с волокном, поддерживающим две объемные волны, а также с волокном с высокими характеристиками двулучепреломления, которое поддерживает распространение мод с двумя поляризациями.

Для получения лучших частотных характеристик разрабатываются и некоторые другие схемы, основанные на пьезоэлектрических эффектах, такие как покрытие волокна полимером и сжимание его приложенным электрическим полем [1]. В этом случае изменяются как показатель преломления, так и длина волокна. Одно из конструкторских решений предполагает осаждение одного из металлических электродов непосредственно на волокно, покрытие волокна поливинилиденфторидом ( $\text{PVF}_2$ ) и осаждение внешнего электрода. Полимерное покрытие становится пьезоэлектрическим после поляризации приложенным полем. Чувствительность образца длиной 18 см, работающего на длине волны 0,63 мкм, составляет  $\sim 30$  мрад/В•м для частот до 10 кГц, когда присутствуют и продольная, и радиальная деформации, и  $\sim 10$  мрад/В•м для частот от 10 кГц до 2,5 МГц, когда присутствует только радиальная деформация. Чтобы получить размах фазовой модуляции  $\pi$  радиан при частоте 1 МГц, к модулятору длиной 10 м требуется приложить управляющий сигнал размахом 30 В. Можно предположить, что более высокая чувствительность будет достигнута при использовании других полимеров и более эффективной регулировкой полярности.

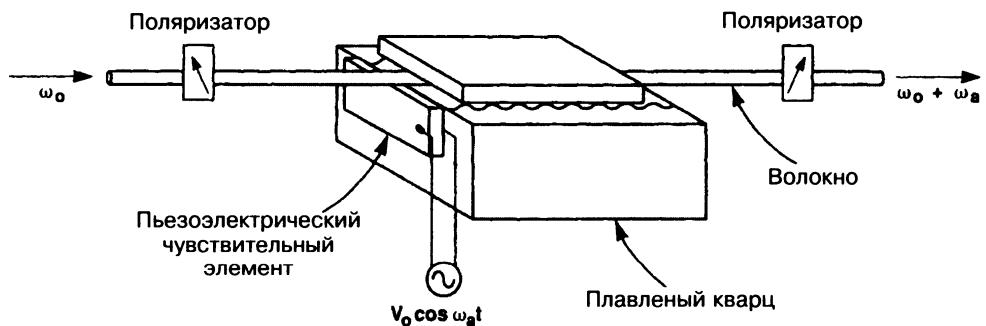


Рис. 7. Схема волоконно-оптического преобразователя частоты, в котором акустическая волна с чувствительного элемента возмущает две канализированные моды в волокне с высокими характеристиками двулучепреломления, вызывая взаимодействие мод

В заключение следует отметить, что в последней реализации, показанной на рис. 7, электроакустический преобразователь преобразует входную электрическую мощность в релеевскую волну, которая проходит через блок плавленого кварца, и генерирует бегущую волну искажения показателя преломления, в результате чего в волокне с высокими характеристиками двулучепреломления, прижатом к блоку, происходит взаимодействие мод с различной поляризацией. По результатам проведенных анализов, для взаимодействия мод необходимо, чтобы напряжение, вызванное волной, не было направлено вдоль главной оси волокна; а для удовлетворения условия фазового синхронизма нужно, чтобы угол между волокном и акустической волной составлял  $27^\circ$ . Экспериментальный прибор такого типа, разработанный с несущей частотой 4,5 МГц и диапазоном настройки 290 кГц, имел волоконную длину биений  $2\pi / \Delta\beta$ , равную 1,7 мм на длине волны 0,63 мкм, и его эффективность преобразования достигала 95% в импульсном режиме при максимальной входной электрической мощности 25 Вт. Подавление боковых полос составляло 40 дБ и подавление несущей – 25 дБ.

### Литература

1. Волоконно-оптические датчики Под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. С. 111-146.
2. Hunsperger R. G., Integrated Optics: Theory and Technology, 2nd ed., Springer- Verlag, New York, 1984. Р. 224-334
3. Alferness R. C., IEEE Trans. Microwave Theory Technol MTT-30, 1121 (1982). Р. 356-385
4. Буймистрюк Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий. Control Engineering, 2015. №3 С.128-133.