

# ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВЫЕ КОНВЕРТОРЫ И МОДУЛЯТОРЫ

Н. Слепов

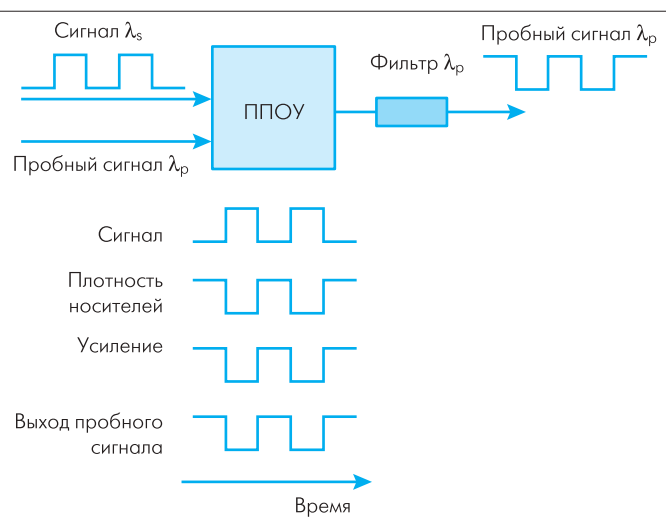
основе эффекта четырехволнового смешения и на основе других нелинейных эффектов [2].

**Оптоэлектронные конвертеры** – наиболее простые, широко используются в системах WDM. Оптоэлектронный конвертер, как правило, состоит из трех блоков: оптического приемника-преобра-

## ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВЫЕ КОНВЕРТОРЫ

Оптические волновые конвертеры, или просто волновые конвертеры (ВК) – это устройства, преобразующие входной оптический сигнал с длиной волны  $\lambda_{\text{вх}}$  в выходной оптический сигнал с длиной волны  $\lambda_{\text{вых}}$ . В частности, их широко используют в мультиплексорах WDM. На рис. 1 показан набор несущих {1310, 1540, 1541 нм}, который для нормального функционирования должен быть согласован с набором мультиплексора {1540, 1542, 1544 нм}. Из этого набора несущая 1310 нм не соответствует рабочей длине волны мультиплексора, а 1541 нм не соответствует шагу сетки по длине волн (2 нм) волнового плана мультиплексора. Для согласования в состав интерфейсных блоков систем WDM включают ВК. Другое важное применение конвертеров – преобразование длин волн при оптической маршрутизации по длине волны внутри одной оптической сети и на стыке сетей.

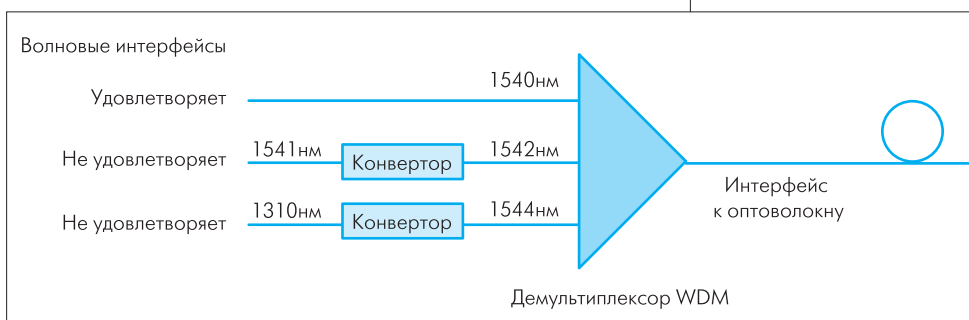
Конвертеры могут использовать фиксированные и настраиваемые наборы длин волн как на входе, так и на выходе. Генерация гармоник нужной длины волны происходит за счет различных нелинейных эффектов. По используемому механизму модуляции или типу нелинейных преобразований конвертеры разделяют на *оптоэлектронные*, конвертеры *на основе оптической кросс-модуляции*, на



**Рис. 2. ВК на основе кросс-модуляции усиления в ППОУ**

зователя, электронного регенератора и оптического передатчика. Приемник несущей осуществляет как усиление, так и оптоэлектронное преобразование сигнала. Регенератор формирует требуемую выходную частоту (длину волны) и подает ее на выходной лазер-передатчик. В зависимости от типа лазера (с фиксированной частотой или перестраиваемого) конвертеры данного типа поддерживают настраиваемый набор длин волн по входу и фиксированный или переменный – по выходу.

Электронный регенератор может быть трех типов. **Регенератор-усилитель** (R или 1R) не производит нелинейных преобразований и потому прозрачен для любых форматов входных сигналов, его недостаток – дополнительный шум усиления и, как следствие, снижение отношения сигнал/шум. **Регенератор-усилитель-формирователь** (R<sup>2</sup> или 2R) заново формирует сигнальную последовательность и поэтому может применяться только для двоичных или импульсных сигналов определенного формата, ввиду чего менее прозрачен для других входных сигналов, однако



**Рис. 1. Применение ВК в интерфейсном блоке системы WDM**



позволяет увеличить отношение сигнал/шум. **Регенератор-усилитель-формирователь с ресинхронизацией** ( $R^3$  или  $3R$ ) не только заново формирует, но и заново синхронизирует последовательность, что позволяет кроме увеличения отношения сигнал/шум существенно уменьшить дрожание фазы. Однако этот тип регенератора наименее прозрачен для входных сигналов.

В конверторах **на базе оптической кросс-модуляции** основная несущая модулирует дополнительную (пробную), проходящую через то же устройство. Модуляция этого типа возможна, если характеристики устройства изменяются в зависимости от интенсивности входного сигнала. Пример такого устройства – полупроводниковый оптический усилитель (ППОУ).

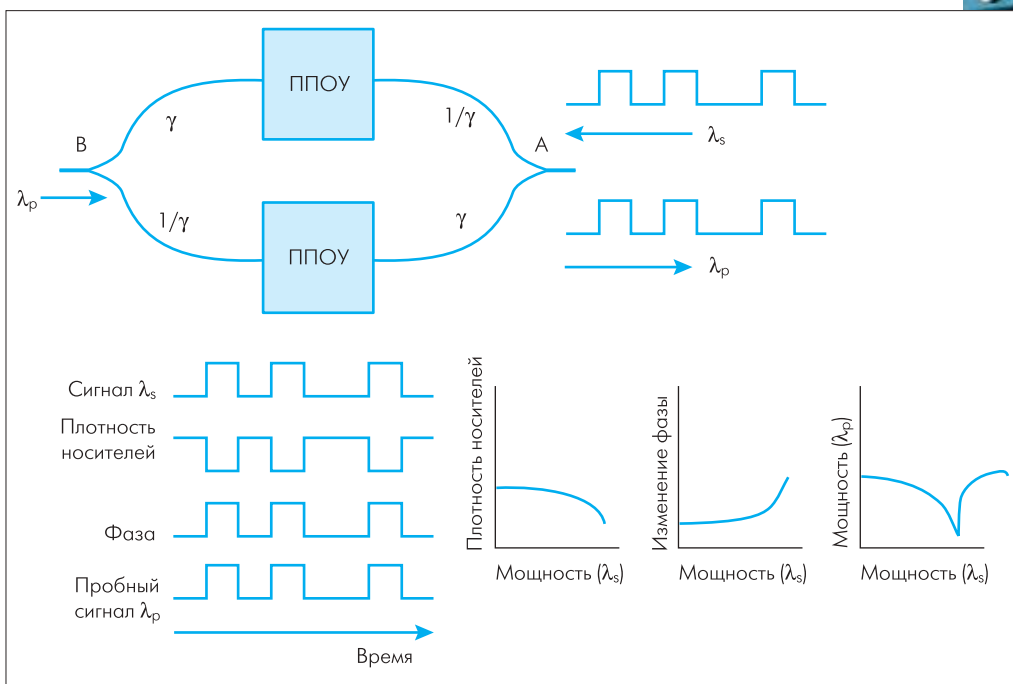
Известно два вида кросс-модуляции: кросс-модуляция усиления – КМУ (Cross-Gain Modulation – CGM) и кросс-модуляция фазы – КМФ (Cross-Phase Modulation – CPM).

При **кросс-модуляции усиления** используется зависимость усиления ППОУ от мощности (интенсивности) входного сигнала. На ППОУ поступает входной сигнал (несущая  $\lambda_s$ ) с изменяющейся интенсивностью (рис. 2). Параллельно с ним на модулируемый вход усилителя подается пробный сигнал с необходимой на выходе частотой (несущая  $\lambda_p$ ). Плотность носителей в области усиления обратно пропорциональна интенсивности входного сигнала. Усиление же пропорционально (в зоне линейности усиления) плотности носителей. Таким образом, пробный сигнал усиливается в ППОУ обратно пропорционально интенсивности основного. Модулированный пробный сигнал на выходе ППОУ проходит через фильтр, настроенный на  $\lambda_p$ . Как видно из рис. 2, основной и пробный сигналы распространяются сонаправленно, тогда как изменение интенсивности этих сигналов оказывается в противофазе (пробный сигнал запаздывает на  $180^\circ$ ).

**Кросс-модуляция фазы** основана на зависимости между плотностью носителей в ППОУ и изменением коэффициента преломления среды ППОУ, которая изменяет фазу пробного сигнала. В свою очередь изменение фазы можно преобразовать в изменение интенсивности пробного сигнала с помощью интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ) (рис 3).

В схеме на рис. 3 два ППОУ включены в плечи ИМЦ. Оба плеча ИМЦ имеют одинаковую длину, но у разветвителей с каждой из сторон (А и В) различные коэффициенты передачи  $\gamma$ . Пробный сигнал подается в интерферометр со стороны В, а основной – со стороны А. В отсутствие основного сигнала пробный сигнал появляется на выходе А в неизменном виде. При наличии же основного сигнала, изменяющего плотность носителей в ППОУ, фазовые изменения в усилителях в каждом из плеч (ввиду асимметрии  $\gamma$ ) будут различны, что приводит к модуляции интенсивности суммарного сигнала на выходе А за счет интерференции двух его составляющих (см. форму сигналов на рис. 3).

Основной и пробный сигналы распространяются в противоположных направлениях, а изменение их интенсивности происходит



**Рис. 3. ВК на основе кросс-модуляции фазы в ППОУ**

синфазно. В отличие от схемы с кросс-модуляцией усиления, при кросс-модуляции фазы требуется меньшая мощность основного сигнала для той же глубины модуляции, однако необходимо вдвое больше ППОУ.

Конверторы **на основе эффекта четырехволнового смешения** (ЧВС) используют тот факт, что в оптическом волокне (ОВ) на основе трех несущих с частотами  $f_1, f_2$  и  $f_3$  возможна генерация четвертой несущей с частотой  $f = f_1 + f_2 - f_3$  (или  $f = 2f_1 - f_3$  при  $f_1 = f_2$ ) [3]. Особенность процесса в том, что генерируемая несущая лежит в полосе близких между собой взаимодействующих частот. Учитывая небольшую амплитуду генерируемой составляющей, обычно используют ППОУ, а также специальное ОВ, в котором эффект ЧВС сильно выражен. Тогда подача на ППОУ основного  $f_s$  и пробного  $f_p$  сигналов приводит к генерации на выходе ВК частоты  $f_{out} = 2f_s - f_p$  при условии, что все несущие лежат в рабочей полосе частот усилителя.

Основное преимущество данного метода конвертации в том, что он прозрачен по отношению к формату преобразуемого сигнала. Его недостатки – необходимость фильтрации генерируемого сигнала на выходе ППОУ и снижение эффективности конвертации с увеличением разности частот основного и пробного сигналов.

Конверторы могут быть построены **и на основе других нелинейных эффектов** взаимодействия двух оптических несущих. Например, в качестве нелинейной оптической среды можно использовать ферроэлектрический кристалл – периодическую полосковую доменную решетку, нанесенную на подложку из ниобата лития  $LiNbO_3$  (рис. 4). Векторы поляризации у соседних полосковых доменов направлены в противоположные стороны. При совместном прохождении основной несущей  $f_s$  и пробного сигнала  $f_p$  (сигнала лазерной накачки) по поперечному волноводу на его выходе генерируется разностная частота  $f_{out} = f_p - f_s$  (длина волны  $\lambda_{out} = \lambda_p / (1 - \lambda_s / \lambda_p)$ ).

На основе ферроэлектрического кристалла построен ВК компании OKI Electric Industry с изменяемой частотой как по входу, так и по выходу [4]. В нем использован перестраиваемый лазер с номинальной мощностью 10 мВт и длиной волны 770 нм. Диапазон перестройки несущей на выходе конвертора – порядка 100 нм, что

покрывает рабочий диапазон существующих систем WDM. Недостаток ВК данного типа (впрочем как и всех ВК, основанных на нелинейных эффектах) – малый уровень генерируемого сигнала. Например, генерируемый сигнал с  $\lambda = 1545$  нм примерно в 2000 раз слабее основной несущей, поэтому требуется дополнительный усилитель.

Как правило, нелинейные эффекты в ОВ, приводящие к генерации новых гармоник, обусловлены нелинейностью показателя преломления. Они могут наблюдаться и при относительно малой интенсивности входного излучения, учитывая очень низкие потери светового пучка частоты  $\omega_0$  в волокне (особенно в области третьего окна прозрачности). При этом (кроме эффекта ЧВС) возникают гармоники вида  $\omega_0 - \omega$  или  $\omega_0 + \omega$ , или же ансамбль второй и суммарной гармоник  $2\omega_0$  и  $(\omega_0 + \omega)$ , что имеет место при взаимодействии двух несущих (например, основного и пробного сигнала) или в процессе параметрического усиления [5].

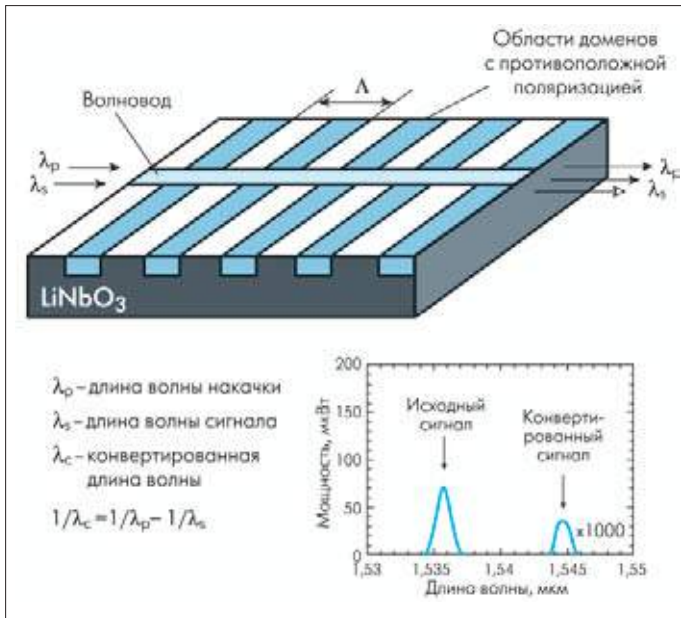


Рис. 4. Схема ВК на ферроэлектрической доменной решетке

Эффективность конкретной реализации той или иной технологии конвертации зависит от многих факторов. Один из наиболее важных – уровень амплитуды генерируемой гармоники. Рассмотренные методы позволяют получать амплитуды порядка 0,1% от амплитуды основного сигнала или сигнала накачки.

**ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ**

Фактическим переносчиком данных в ОВ является оптическая несущая. Она должна быть промодулирована в соответствии с линейными кодами передаваемой информации (рис. 5) [6]. Возможна **непосредственная модуляция оптической несущей** – ее включение/выключение (включение/выключение тока возбуждения или накачки лазерного источника). Однако у этого метода есть ряд существенных недостатков:

- нелинейная зависимость мощности излучения от тока (структурные методы ее линеаризации на основе управляемых источников оптического излучения рассмотрены в работе [7]);
- динамическое влияние отдельных мод резонатора на спектр излучения лазера и амплитуды;
- метод не позволяет в полной мере использовать более прогрессивные способы кодирования, основанные на модуляции амплитуды и фазы;

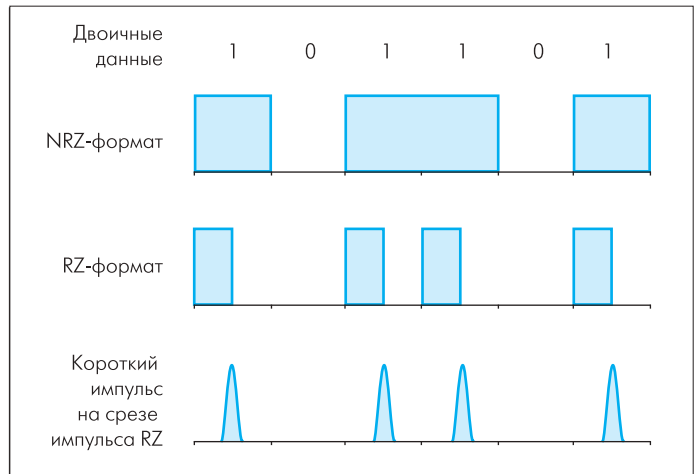


Рис. 5. Пример базовых линейных кодов для оптической передачи

- метод не удобен для систем WDM, где несколько источников модулирующих сигналов мультиплексируются для передачи по одной несущей.

Вместо непосредственной модуляции оптической несущей эффективнее модулировать промежуточную несущую на частотах в диапазоне  $10^7 - 10^{10}$  МГц, используя ее для модуляции оптического сигнала. Основное преимущество данного подхода – в применимости стандартных методов и устройств модуляции – амплитудных, частотных, фазовых и комбинированных, – разработанных для радиочастотного диапазона. При многоканальной модуляции в системах WDM отдельные входные потоки модулируют свои поднесущие, которые затем мультиплексируются в одну поднесущую, модулирующую оптический сигнал. Схема использования промежуточной несущей приведена на рис. 6, в качестве примера показана амплитудная манипуляция тока возбуждения лазера.

Устройства, осуществляющие модуляцию, – модуляторы – в соответствии с используемыми физическими принципами и механиз-

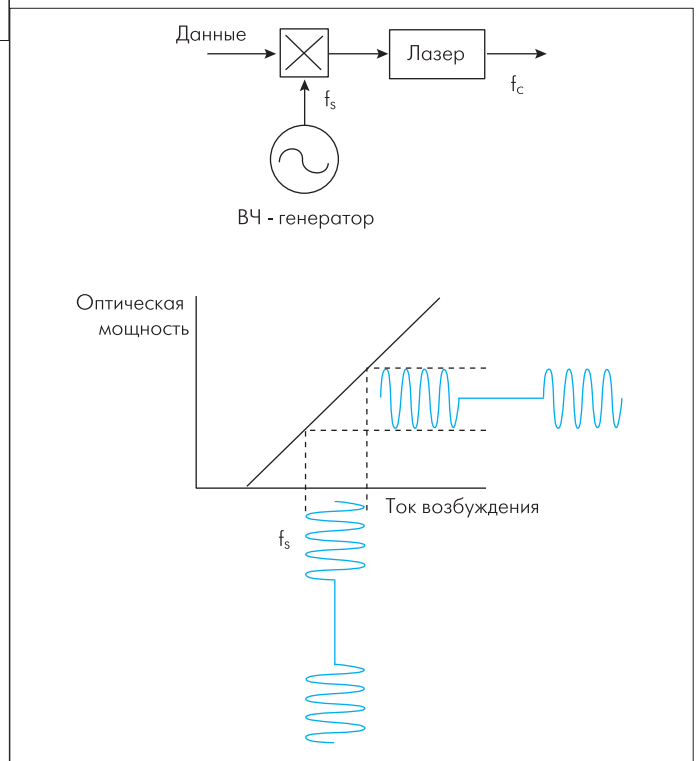


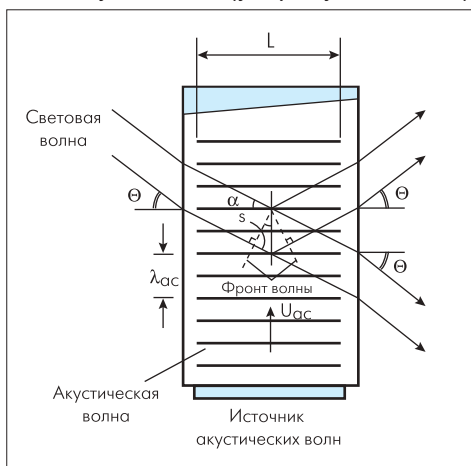
Рис. 6. Модуляция с использованием промежуточной несущей



мами воздействия на оптическую несущую можно разделить на акустооптические и электрооптические.

**Акустооптические модуляторы (АОМ)** используют в своей работе зависимость показателя преломления некоторых оптически прозрачных материалов (например,  $\text{LiNbO}_3$ ) от давления. Это давление может быть создано акустическими (ультразвуковыми – УЗ) волнами, генерируемыми пьезоэлектрическим преобразователем – пьезокристаллом.

Основной элемент акустооптического модулятора – акустооптическая ячейка (АОЯ), сформированная акустооптическим материалом с приклеенным к нему пьезокристаллом (рис. 7).



**Рис. 7. Схема прохождения пучка света в АОМ**

Акустическая волна создает в оптической среде структуру с периодически изменяющимся показателем преломления, играющую роль дифракционной решетки. Области с равными показателями преломления (сплошные горизонтальные линии на рис. 7) повторяются через период, равный длине акустической волны  $\lambda_{ав}$ , – период дифракционной решетки. Входящий пучок в результате дифракции на АОЯ расщепляется на проходящий и отклоненный (дифрагированный). Характер взаимодействия пучка с АОЯ зависит от соотношения диаметра пучка  $d$ , длины световой волны  $\lambda$  и внутреннего угла падения  $\varrho$ .

АОЯ используют в различных типах акустооптических приборов: дефлекторах, сканерах, модуляторах, фильтрах и процессорах – в зависимости от того, каким параметром оптического луча необходимо управлять [8, 9]. В оптических модуляторах происходит модуляция интенсивности оптического луча, что и реализует АОЯ. При этом используются условия возникновения *дифракции Брэгга* (или *дифракции Рамана-Ната*), то есть выполняется соотношение  $2\lambda_{ав} \sin \varrho = m\lambda$  где  $\lambda_{ав}$  играет роль постоянной решетки  $a$ ;  $m$  – порядок отражения;  $\lambda$  – длина световой волны в материале АОЯ.

В качестве выходного обычно используется дифрагированный пучок (полная модуляция проходящего света требует очень большой акустической мощности). Его интенсивность пропорциональна интенсивности звука. Модулируя по амплитуде акустическую волну, получают модулированный выходной световой поток. Быстродействие модулятора определяется временем прохождения звукового сигнала через поперечное сечение светового пучка и составляет около  $10^{-7}$  с.

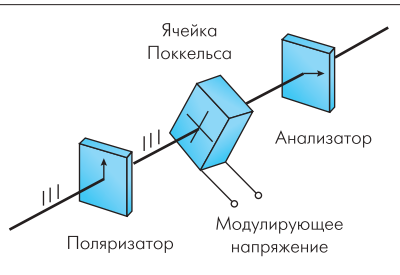
АОМ – достаточно простое и надежное устройство, хотя и имеет определенные недостатки [7, 9]. К ним относятся:

- нелинейность функции преобразования;
- уменьшение глубины модуляции с ростом частоты модуляции, что ограничивает применение АОМ в высокоскоростных схемах синхронной цифровой иерархии (SDH);
- смещение частоты модулированного лазерного излучения на величину акустической модулирующей частоты (эффект Доплера);
- невысокая эффективность дифракции, определяемая отношением интенсивностей дифрагированного и падающего пучков ( $\epsilon_e$

увеличение достигается за счет увеличения мощности акустического сигнала).

**Электрооптические модуляторы** работают, используя зависимость оптических характеристик любой среды, например показателя преломления и поляризации света, от распределения связанных зарядов (электронов и ионов) в среде. Под действием приложенного электрического поля распределение зарядов меняется, что приводит к изменению так называемого эллипсоида показателей преломления и состояния поляризации [10].

**Линейный эффект Поккельса** возникает в средах, не имеющих центральной симметрии. На практике он проявляется во вращении плоскости поляризации входной световой волны при приложении напряжения к кристаллу, по причине изменения в кристалле показателей преломления по направлениям осей  $x$  и  $y$  (т.е. изменения эллипсоида показателей преломления). Для некоторых кристаллов (например, ниобата лития) этот поворот может достигать 90° в зависимости от приложенного напряжения. Если поместить такой кристалл (называемый ячейкой Поккельса – ЯП) между двумя поляризационными фильтрами (линейным поляризатором и анализатором) с углом в 90° между их плоскостями поляризации



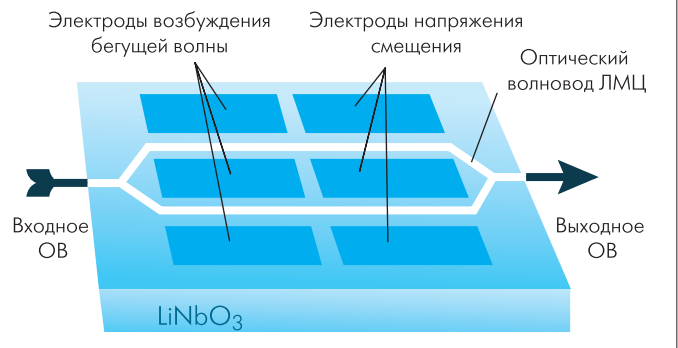
**Рис. 8. Схема электрооптического модулятора на ячейке Поккельса**

(рис. 8), получится модулятор. При отсутствии напряжения на ЯП плоскость поляризации луча дополнительно не вращается и световой луч, плоскополяризованный линейным поляризатором на входе, не проходит через анализатор на выход модулятора. При максимальном напряжении на

ЯП она будет поворачивать плоскость поляризации практически на 90° вправо, плоскости поляризации луча на выходе ячейки и анализатора совпадут, обеспечивая полное прохождение входного луча на выход модулятора.

Таким образом, ЯП позволяет модулировать световую волну по интенсивности путем амплитудной модуляции напряжения, подаваемого на эту ячейку. Частота модуляции может превышать 10 ГГц, глубина модуляции достигает 99,9%. Однако данный тип модуляторов характерен для дискретной оптики, тогда как для интегральных оптических систем более подходят управляемые направленные ответвители [1] и модуляторы, использующие схему интерферометра Маха-Цендера.

**В электрооптических модуляторах на основе интерферометра Маха-Цендера** (рис. 9) входной поток расщепляется на



**Рис. 9. Схема электрооптического модулятора типа интерферометра Маха-Цендера**

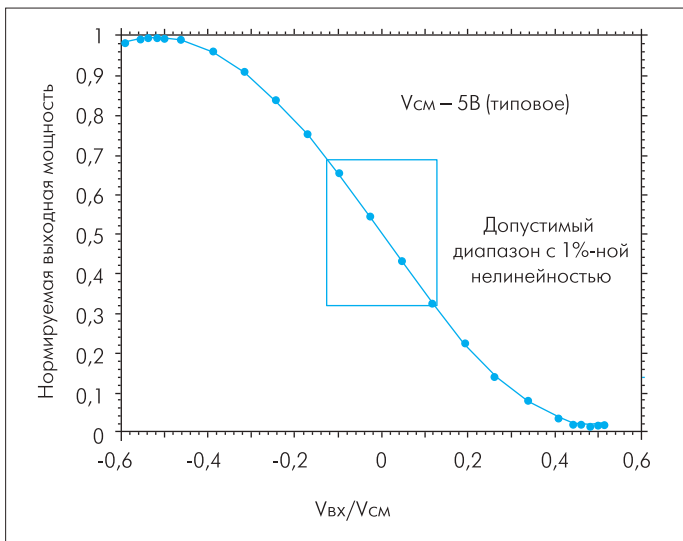


Рис. 10. Передаточная характеристика модулятора типа ИМЦ

две моды, распространяющиеся по двум идентичным плечам – волноводам в кристалле ниобата лития. Эффективный показатель преломления  $n_m^*$  этих мод в кристалле LiNbO<sub>3</sub> зависит от напряженности приложенного электрического поля E. В зависимости от величины приложенного к электродам напряжения V и длины волновода L на выходе ИМЦ возникает сдвиг фаз  $D_j = k_m D n_m^*$ , пропорциональный амплитуде изменения эффективного показателя преломления моды  $D n_m^* \approx k_m^3 r E/2$ , где r – электрооптический коэффициент рабочей оптической среды,  $k_m$  – волновой вектор моды [11]. На выходе ИМЦ происходит интерференция достигших его мод, что приводит к модуляции входного светового потока по интенсивности.

В модуляторах на основе ИМЦ одна группа электродов формирует модулирующее электрическое поле, другая – статическое поле смещения рабочей точки на передаточной функции модулятора. Передаточная функция ИМЦ представляет собой синусоиду, из которой для управления процессом модуляции выбирают одну из половин (рис. 10) [12]. Рабочая точка может находиться как в линейной, так и в квадратичной области передаточной функции [13].

Модулирующее напряжение приложено так, чтобы замедлить движение оптической несущей в одном плече и ускорить его в другом. В результате можно снизить амплитуду управляющего напря-

**Характеристики высокоскоростных модуляторов интенсивности типа ИМЦ компании Laser2000**

Параметры модулятора	500-х-8	500-х-106	500-х-13	500-х-15	
Рабочая длина волны, нм	800	1060	1320	1550	
Ширина полосы (-3 дБ), ГГц	3, 5, 10, 20	3, 5, 10, 20	3, 5, 10, 20	3, 5, 10, 20	
Модулирующее напряжение, В	3, 5, 10 ГГц	2,5	3,0	3,5	4,5
напряжение, В	20 ГГц	3,0	3,75	4,8	5,5
Напряжение смещения, В	< 13	< 16	< 20	< 25	
Оптическая мощность, мВт	5	10	50	75	
Электрические возвратные потери, дБ	< -10	< -10	< -10	< -10	
Вносимые потери, дБ	< 4,5	< 4,5	< 4,5	< 4,5	
Оптический коэффициент ослабления, дБ	> 20	> 20	> 20	> 20	
Оптическое обратное отражение, дБ	< -50	< -50	< -50	< -50	
Входной соединительный шнур, тип ОВ	Panda	3M DWS	Panda	Panda	
Выходной соединительный шнур, тип ОВ	Panda	3M DWS	SMF-28	SMF-28	
Размер блока, мм	77-35-13	77-35-13	77-35-13	77-35-13	

жения до уровня, приемлемого для ИС. Модулирующие электроды делают протяженными для эффективного распределенного взаимодействия полей электрической и оптической волн. Это обеспечивает глубину модуляции порядка 20 дБ.

В результате достижений интегральной оптической технологии этот тип модуляторов стал наиболее часто использоваться, прежде всего – в системах SDN и WDM. Модуляторы на основе ИМЦ производятся многими фирмами, например Ramar (www.ramar.com) и Laser2000 [12] (см. таблицу).

Для модуляции интенсивности используют и **электрооптические модуляторы с ППОУ**. При этом схемы модуляторов практически не отличаются от приведенных на рис. 2 и 3.

Продолжение следует...

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Слепов Н.Н. Оптические кросс-коммутаторы. Принципы реализации и архитектура. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 1999, № 6.
2. Ramaswami, Rajiv and Sivarajan Kumar N. Optical Networks: a Practical Perspective. – Morgan Kaufmann Publishers, Inc. San Francisco, California, 1998.
3. Слепов Н.Н. Оптическое волокно как среда передачи для ВОСП. – В кн.: Волоконная оптическая техника – история, достижения и перспективы. – М., 2000.
4. Wavelength Converter. OKI Electric Industry Co., Ltd., 1996 – <http://www.oki.co.jp/OKI/RDG/English/kikaku/vol.1/okayama/eWC.htm>
5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика/ Пер. с англ. под ред. П.В.Мамышева. – М.: Мир, 1996.- 324 с.
6. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDN. 4-е изд. – М.: Эко-Трендз, 1999.
7. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Изд-во Syrus Systems, 1999.
8. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. – М., 1978.
9. Левин В.М. Акустооптика. – В кн.: Физическая энциклопедия. Т.1. – М.: Сов. энциклопедия, 1988.
10. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М.Прохоров. – М.: Большая Российская энциклопедия. Т1-Т5, 1988-1998.
11. Золотов Е.М. Интегральная оптика. – В кн.: Физическая энциклопедия. Т.2. – М.: Сов. энциклопедия, 1990.
12. High Speed and Intensity Modulators. <http://www.laser2000.co.uk/lithium.html>
13. Optoelectronic Analogue Signal Transfer for LHC Detectors. – CERN/DRDC 93-3RD23/Status Report 13 Aug. 1993.