

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА
НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА
МАХА – ЦЕНДЕРА**

Практикум



Пермь 2020

УДК 537.86:530.145:537.312

Составители: канд. физ.-мат. наук, доц. **И.Л. Вольхин**,
канд. физ.-мат. наук, доц. **А.С. Ажеганов**

Исследование интегрального электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха – Цендера: практикум / сост. И.Л. Вольхин, А.С. Ажеганов; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2020. – 23 с.: ил.

Рассмотрены конструкция и принцип работы интегрального электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха – Цендера. Даны описание экспериментальной установки, методика выполнения лабораторной работы и обработки полученных результатов.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлениям «Радиофизика» и «Нанотехнологии и микросистемная техника», по специальности «Информационная безопасность автоматизированных систем», а также смежных специальностей.

*Печатается по постановлению методической комиссии
физического факультета Пермского государственного
национального исследовательского университета*

© Вольхин И.Л., Ажеганов А.С.,
составление, 2020
© ПГНИУ, 2020
© ОАО ПНППК, 2020

1. Введение

Для преобразования электрического сигнала в оптический сигнал, передаваемый по волоконному световоду, используются электрооптические модуляторы. Цифровому сигналу, представляющему последовательность импульсов напряжения или тока, ставится в соответствие последовательность импульсов интенсивности света.

При частотах импульсного сигнала до 5 ГГц обычно применяют модуляцию тока накачки лазера. Длительность фронтов импульсов определяется переходными процессами в оптическом резонаторе лазера – временами нарастания и затухания колебаний.

При частотах 20 ГГц, 40 ГГц и выше используют электрооптические модуляторы, принцип действия которых основан на использовании эффекта Поккельса. Источник излучения – лазер – работает в непрерывном режиме. Модуляторы фазы световой волны, модулятор интенсивности, группы электродов и система волноводов, образующих интерферометр Маха – Цендера, объединены (интегрированы) на поверхности оптически анизотропного кристалла ниобата лития.

Интегральные электрооптические модуляторы имеют ряд достоинств, определяющих их практическое применение. Среди них – совместимость с оптоволоконными линиями, малая нелинейность, высокий динамический диапазон и широкий диапазон модулирующих частот.

На основе компонентов интегральной и волоконной оптики возможно также создание сенсоров для контроля таких физических величин, как напряженности электрического и магнитного полей, температура, давление, газовый состав.

Фотонные интегральные схемы электрооптических модуляторов амплитуды используются в волоконно-оптических гироскопах.

2. Интегральный электрооптический модулятор на основе интерферометра Маха – Цендера

Интегральный электрооптический модулятор Маха – Цендера (electro-optical modulators of the Mach – Zehnder) изготавливают на поверхности пластины, вырезанной из монокристалла ниобата лития. В основе его работы лежит *линейный электрооптический эффект* (эффект Поккельса).

2.1. Электрооптические свойства кристалла ниобата лития

Ниобат лития (LiNbO_3) – смешанный оксид ниобия и лития, бесцветный кристалл тригональной (или ромбоэдрической) кристаллографической системы. Его кристаллическая решетка имеет одну ось симметрии третьего порядка ($L3$).

Направление (ось Z), совпадающее с кристаллографической осью $L3$, называется *оптической осью кристалла*. Главным сечением кристалла называется плоскость, в которой лежат оптическая ось кристалла и волновой вектор \vec{k} проходящего через кристалл светового луча (рис.1).

Одноосные кристаллы являются *оптически анизотропны-*

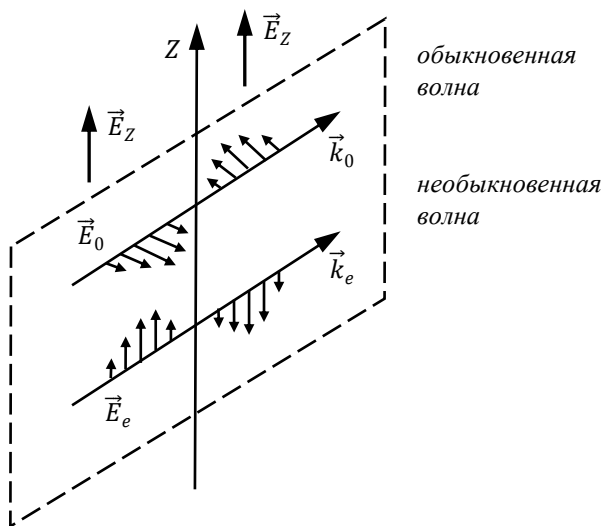


Рис.1. Главное сечение кристалла и направления поляризации обыкновенной и необыкновенной волн

ми, т. е. показатель преломления и фазовая скорость световой волны зависят от направления ее распространения и от ориентации плоскости поляризации. Диэлектрическая проницаемость ϵ и показатель преломления ($n = \sqrt{\epsilon}$) в направлении оптической оси и в направлениях, перпендикулярных к ней, имеют различные значения. Следовательно, электромагнитным волнам с различными направлениями колебания вектора напряженности электрического поля \vec{E} соответствуют разные значения фазовой скорости $v = c/n$ и показателя преломления. Это явление носит название *двойное лучепреломление*.

Колебания вектора напряженности электрического поля \vec{E}_0 в «обыкновенной» волне совершаются в направлении, перпендикулярном главному сечению кристалла для этой волны (рис.1). В «необыкновенной» волне колебания вектора напряженности \vec{E}_e совершаются в плоскости, совпадающей с главным сечением для данной волны (рис.1). Для С-диапазона длин волн ($\lambda = 1530 \div 1565$ нм), преимущественно используемого в волоконно-оптических системах, «обыкновенный» n_o и «необыкновенный» n_e показатели преломления имеют величины $n_o = 2,225$ и $n_e = 2,135$.

Электрооптический эффект в ниобате лития состоит в изменении показателя преломления кристалла под действием электрического поля. В случае, когда световая волна, поляризованная вдоль оси Z («необыкновенная» волна \vec{k}_e , см. рис. 1), распространяется в направлении, перпендикулярном оси Z , показатель преломления линейно зависит от напряженности электрического поля:

$$n_{e1} = n_e - \frac{n_e^3}{2} r_{33} E_z, \quad (1)$$

где n_e – показатель преломления для «необыкновенной» волны в отсутствии электрического поля, E_z – величина напряженности внешнего электрического поля, приложенного вдоль кристаллографической оси Z ; $r_{33} = 30,9 \cdot 10^{-12}$ м/В – *электрооптический коэффициент* ниобата лития.

Электрооптический эффект практически безынерционен (быстродействие порядка $10^{-10} \div 10^{-11}$ с), благодаря чему верхний предел частоты колебаний напряженности электрического поля

в принципе может достигать 100 ГГц. На практике у современных модуляторов ширина полосы по уровню -3дБ составляет $40\div 50$ ГГц.

Ниобат лития прозрачен для длин волн от 0,4 до 5 мкм, что делает его почти идеальным материалом для применения в оптоволоконных системах и интегрально-оптических устройствах.

2.2. Конструкция интегрального электрооптического модулятора Маха – Цендера

Интегральный электрооптический модулятор представляет собой интерферометр Маха – Цендера, изготовленный на X -срезе монокристалла ниобата лития. X -срезом называют тонкую пластину, вырезанную из монокристалла таким образом, что кристаллографическая ось X перпендикулярна, а кристаллографические оси Z и Y параллельны поверхности среза (рис.2).

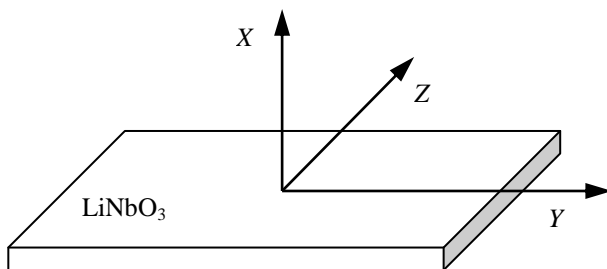


Рис.2. X -срез кристалла ниобата лития

Интерферометр состоит из двух Y -разветвителей, соединенных прямолинейными участками канальных волноводов. Волноводы направлены вдоль кристаллографической оси Y и перпендикулярно оси Z . Рядом с волноводами напылены металлические электроды (рис.3).

При изготовлении модулятора на поверхность пластины методом фотолитографии наносят защитные маски, через которые производят формирование волноводов и напыление электродов.

Канальные световоды толщиной до 1 мкм создаются методом протонного обмена в расплаве бензойной кислоты $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ при $T \approx 200^\circ\text{C}$. В ходе реакции ионы лития в по-

верхностном слое частично замещаются на ионы водорода: $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$, $x = (0,4 \div 0,6)$. Показатель преломления канального

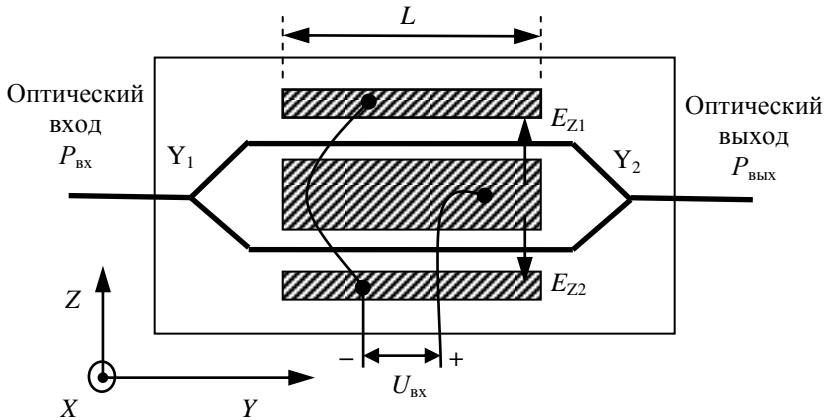


Рис.3. Структурная схема интегрального электрооптического модулятора Маха – Цендера

световода оказывается больше, чем показатель преломления в объеме кристалла. Разность показателей преломления волновода и подложки, или контрастность волновода, составляет около 0,1.

Оптическое лазерное излучение $P_{\text{вх}}$ подается на вход интерферометра Маха – Цендера по оптоволокну типа «Panda», сохраняющему поляризацию излучения.

В Y_1 -разветвителе излучение разделяется на два равных по мощности ($50 \pm 2\%$) потока и поступает в два плеча интерферометра. Оптическое излучение в волноводах должно быть поляризовано в направлении оси Z кристалла. Вдоль оси Z направлен и вектор напряженности электрического поля \vec{E} между электродами (рис.3).

X -срез является главным сечением кристалла для волн, распространяющихся по волноводам. Волна, распространяющаяся по волноводу в направлении Y и поляризованная вдоль оси Z , является необыкновенной волной в кристалле (см. рис.1).

Возле волноводов на поверхности пластины напылены металлические электроды. При подаче на них напряжения $U_{\text{вх}}$ в

поверхностном слое кристалла, по которому проходят волноводы, возникают электрические поля

$$E_{z1} \approx E_{z2} \approx \frac{U_{\text{ВХ}}}{\varepsilon_e d},$$

где d – расстояние между электродами. Электрические поля в плечах интерферометра направлены в противоположные стороны (рис.4), что вызывает равные и противоположные по знаку изменения показателя преломления (1) в волноводах за счет электрооптического эффекта.

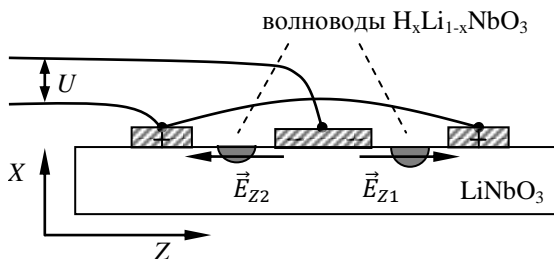


Рис.4. Поперечное сечение модулятора Маха – Цендера

При распространении волн вдоль плеч интерферометра между ними возникает разность фаз, величина которой зависит от оптических длин волноводов. Оптическая длина определяется как физической длиной волновода, так и его показателем преломления, который изменяется под действием электрического поля.

Интенсивность света $P_{\text{ВЫХ}}$ на выходе интерферометра определяется разностью фаз волн, интерферирующих в Y_2 -разветвителе, которая, в свою очередь, определяется величиной напряжения $U_{\text{ВХ}}$, приложенного к электродам.

2.3. Принцип действия интегрального электрооптического модулятора Маха – Цендера

После первого Y_1 -разветвителя входящая световая волна e_0 разделяется на две волны с равными амплитудами $e_0/2$ в верхнем e_1 и нижнем e_2 плечах интерферометра Маха – Цендера:

$$e_1 = \frac{e_0}{2} \cos \left(2\pi vt - \frac{2\pi}{\lambda_1} y \right), \quad (2)$$

$$e_2 = \frac{e_0}{2} \cos\left(2\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda_2} y\right), \quad (3)$$

здесь λ_1 и λ_2 длины волн оптического излучения с частотой ν в волноводах верхнего и нижнего плеч интерферометра:

$$\lambda_1 = \lambda_0/n_{e1}, \quad \lambda_2 = \lambda_0/n_{e2},$$

где λ_0 – длина волны в вакууме.

В электрических полях E_{z1} и E_{z2} , создаваемых электродами и направленными вдоль или против оси Z , показатели преломления для «необыкновенной» волны в верхнем n_{e1} и нижнем n_{e2} волноводах вследствие электрооптического эффекта будут различны (1):

$$n_{e1} = n_e - \frac{n_e^3}{2} r_{33} E_{z1}, \quad (4)$$

$$n_{e2} = n_e + \frac{n_e^3}{2} r_{33} E_{z2}. \quad (5)$$

Разность фаз световых волн e_1 и e_2 после прохождения области электрооптического взаимодействия длиной L (рис.3):

$$2\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} n_{e2} L - \frac{2\pi}{\lambda_0} n_{e1} L\right). \quad (6)$$

Подставив (4) и (5) в формулу (6), получим, что наличие поля $E_z = E_{z1} = E_{z2}$ приводит к возникновению разности фаз в плечах интерферометра:

$$2\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_e^3 r_{33} E_z L. \quad (7)$$

В результате интерференции волн e_1 и e_2 на выходе Y_2 -разветвителя (объединителя) образуется световая волна

$$e_{\text{вых}} = \frac{e_0}{2} \cos(2\pi\nu t - \Delta\varphi) + \frac{e_0}{2} \cos(2\pi\nu t + \Delta\varphi),$$

$$e_{\text{вых}} = [e_0 \cos(\Delta\varphi)] \cos(2\pi\nu t). \quad (8)$$

Выражение в квадратных скобках – амплитуда волны. Интенсивность (мощность) света на выходе интерферометра

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \cos^2(\Delta\varphi) = \frac{1}{2} P_{\text{вх}} [1 + \cos(2\Delta\varphi)], \quad (9)$$

где $P_{\text{вх}}$ – мощность оптического излучения на входе.

Для количественной характеристики чувствительности интерферометра используют величину E_π – величину Z -компоненты напряженности внешнего электрического поля, не-

обходимую для изменения разности фаз (7) в плечах интерферометра на угол $2\Delta\varphi = \pi$:

$$\pi = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_e^3 r_{33} E_\pi L ,$$

$$E_\pi = \frac{\lambda_0}{2n_e^3 r_{33} L} . \quad (10)$$

При таком поле световые волны гасят друг друга, и интенсивность света на выходе интерферометра равна нулю. С использованием этого параметра (10) уравнение (9) принимает вид

$$\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \frac{E_z}{E_\pi} \right) \right] , \quad (11)$$

или

$$\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_\pi} \right) \right] , \quad (12)$$

где $U_{\text{ВХ}}$ – напряжение, подаваемое на электроды модулятора, U_π – величина «полуволнового» напряжения.

Передаточной характеристикой электрооптического модулятора называется зависимость относительной интенсивности света $P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$ на выходе модулятора от нормированной величины модулирующего напряжения $U_{\text{ВХ}}/U_\pi$ (рис.5).

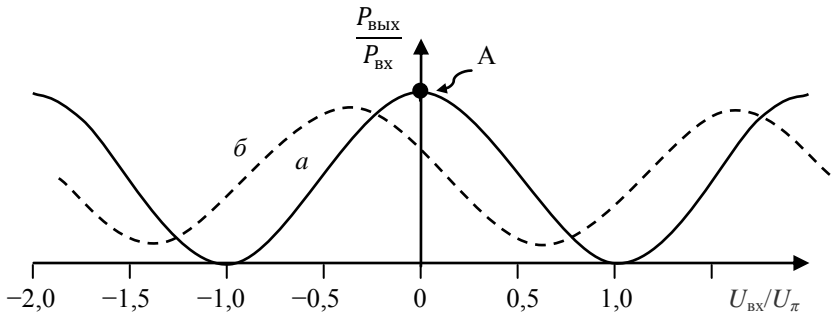


Рис.5. Передаточные характеристики: *a* – идеального модулятора с симметричной топологией волноводов, *б* – реального модулятора

2.4. Выбор рабочей точки модулятора

Рабочей точкой (РТ) модулятора называется точка на передаточной характеристике, которая соответствует имеющейся в интерферометре постоянной разности фаз. При равной оптиче-

ской длине плеч интерферометра и соответственно нулевой разности фаз рабочая точка А (точка покоя) находится в максимуме передаточной характеристики (характеристика «а» на рис.5). Такое положение РТ соответствует участку с максимальной кривизной передаточной характеристики, что приводит к искажению передаваемого сигнала.

Для того чтобы модулятор работал на линейном участке передаточной характеристики, необходимо обеспечить начальный сдвиг фаз в каналах интерферометра $\varphi_0 = \pi/2$:

$$\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \frac{U_{\text{СИГН}}}{U_{\pi}} + \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (13)$$

При этом точка покоя В будет находиться в середине линейного участка передаточной характеристики модулятора (рис.6). Этого можно достичь, если приложить постоянное электрическое $E_{\text{КВ}}$ поле путем подачи на электроды модулятора постоянного напряжения $U_{\text{КВ}}$:

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{КВ}} + U_{\text{СИГН}}. \quad (14)$$

Это смещение РТ называется *смещением в квадратуру*. Как видно из графика на рис.6, при смещении РТ в квадратуру средняя выходная интенсивность излучения равна половине входной

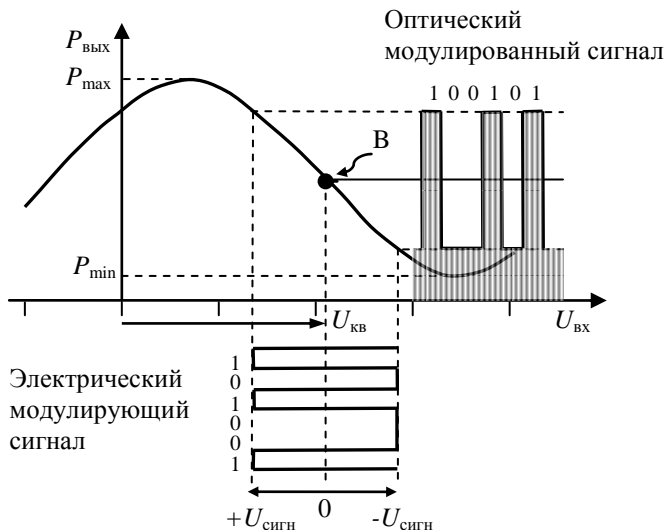


Рис.6. Положение рабочей точки интерферометра в амплитудном модуляторе

интенсивности, что соответствует оптическим потерям в 3 дБ. Часть энергии излучения, не прошедшая в волноводный канал, рассеивается в окружающее пространство. Глубина модуляции оптического сигнала (максимальное значение):

$$M[\text{дБ}] = P_{\max}[\text{дБм}] - P_{\min}[\text{дБм}] . \quad (15)$$

Сделав преобразование тригонометрической функции косинуса в формуле (13), получим

$$\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{1}{2} \left[1 - \sin \left(\pi \frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\pi}} \right) \right] . \quad (16)$$

На линейном участке передаточной характеристики (вблизи рабочей точки, $U_{\text{сигн}} \ll U_{\pi}$):

$$\sin \left(\pi \frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\pi}} \right) \approx \pi \frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\pi}} , \quad (17)$$

$$\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{1}{2} \left[1 - \pi \frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\pi}} \right] . \quad (18)$$

При подаче на модулятор переменного (СВЧ) напряжения $U_{\text{сигн}}(t)$ интенсивность светового сигнала на выходе интерферометра будет изменяться с той же частотой.

3. Порядок выполнения работы

Цель работы: исследование работы интегрального электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха – Цендера и определение его основных характеристик.

Приборы и принадлежности: фотонная интегральная схема – электрооптический модулятор Маха – Цендера, блок питания лабораторный GW Instek GPS-72303, источник оптического излучения – усилитель спонтанной эмиссии (УСЭМ), измеритель коэффициента поляризационной экстинкции Santec PEM-330, измеритель уровня обратного отражения FOD-1206. Фотографии экспериментального оборудования приводятся в приложении.

3.1. Структурная схема экспериментальной установки

Структурная схема установки для исследования интегрального электрооптического модулятора Маха – Цендера приведена на рис.7.

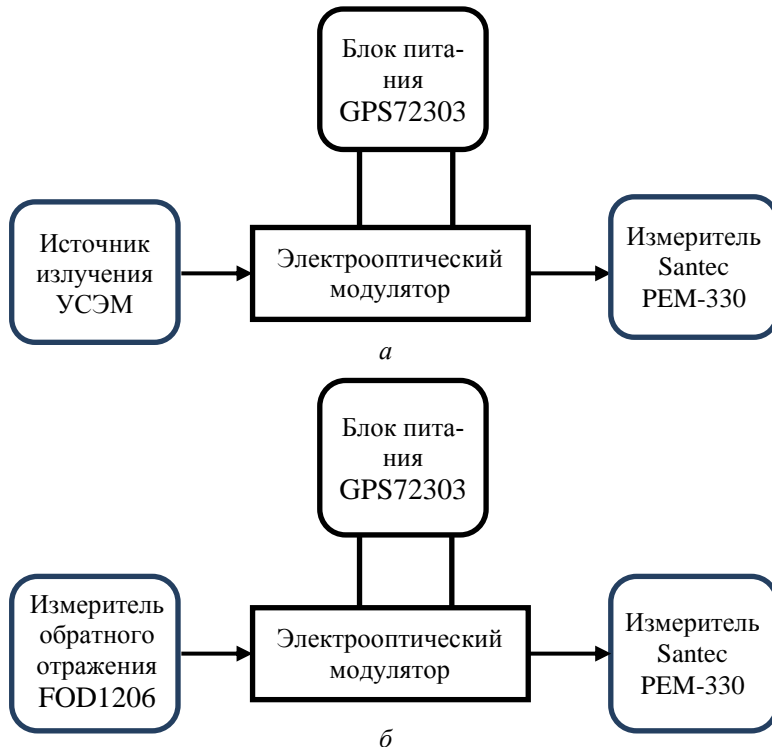


Рис.7. Структурная схема экспериментальной установки для исследования электрооптического модулятора:

a – передаточной характеристики; *б* – коэффициента отражения

Схема состоит из двух частей:

1. Оптической – источника оптического излучения – усилителя УСЭМ (рис.7,*a*) или измерителя FOD-1206 (рис.7,*б*), фотонной интегральной схемы, включающей поляризатор и электрооптический модулятор Маха – Цендера, измерителя оптической мощности – поляризационного экстинометра Santec PEM-330.

2. Электрической – блока питания лабораторного GPS72303.

3.2. Порядок проведения эксперимента

3.2.1. Исследование передаточной характеристики электрооптического модулятора Маха – Цендера:

1. Под руководством инженера подключите оптический выход источника поляризованного излучения УСЭМ ко входу измерителя Santec PEM-330. Включите Santec PEM-330 в режиме измерителя мощности излучения; измерьте уровень оптической мощности на выходе УСЭМ. Установите уровень мощности $P_{\text{вх}}$ на выходе УСЭМ в пределах от 0 до -10 дБм. Величину $P_{\text{вх}}$ запишите в тетрадь.

2. Соберите экспериментальную установку по схеме (рис.7,а), для этого:

- подключите волоконные выводы модулятора: входной к источнику излучения УСЭМ; выходной к измерителю коэффициента поляризации экстинкции Santec PEM-330;

- поляризатор установлен таким образом, что плоскость поляризации излучения на входе модулятора совпадает с плоскостью поверхности кристалла интерферометра;

- электроды модулятора разварены при помощи золотой проволоки на переходную плату. Провода от переходной платы следует подключить к блоку питания.

Важно! Не подавать на электроды модулятора напряжение более 9 В.

Важно! Необходимо соблюдать правила соединения волоконных коннекторов друг с другом, а также использовать для подключения к измерительным приборам только те коннекторы, которые указаны в документации к прибору.

3. Включите Santec PEM-330 в режиме измерителя мощности излучения.

4. Установите ручки регулировки напряжения источника питания в нулевое положение.

5. Включите источник питания. Изменяя напряжение от 0 до 9 вольт, измерьте передаточную характеристику интерферометра $P_{\text{вых}}(U_{\text{сигн}})$. Данные занесите в таблицу. Выключите источник питания.

6. Поменяйте полярность подключения контактов интерферометра к блоку питания. Установите ручки регулировки напряжения источника питания в нулевое положение. Включите источник питания. Изменяя напряжение от 0 до -1 В, измерьте передаточную характеристику интерферометра $P_{\text{вых}}(U_{\text{сигн}})$. Дополните таблицу $P_{\text{вых}}(U_{\text{сигн}})$. Выключите источник питания.

7. Постройте график передаточной характеристики (см. рис.5). Вычислите основные параметры модулятора – максимальную глубину модуляции M (15), полуволновое напряжение U_{π} (см. рис.5), напряжение квадратуры $U_{\text{кв}}$ (см. рис.6).

8. Сделайте вывод о разнице оптических длин плеч интерферометра Маха – Цендера по положению рабочей точки при напряжении смещения $U_{\text{вх}} = 0$.

9. Установите точку покоя интерферометра на середину линейного участка передаточной характеристики, установив напряжение смещения равным напряжению квадратуры $U_{\text{кв}}$. При необходимости поменяйте полярность подключения контактов интерферометра к блоку питания.

10. Измерьте оптическую мощность на выходе модулятора поляризационным экстинетром Santec PEM-330. Рассчитайте величину оптических потерь в модуляторе $K = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$ (при $U_{\text{вх}} = U_{\text{кв}}$).

11. Измерьте коэффициент поляризационной экстинкции на выходе модулятора при $U_{\text{вх}} = U_{\text{кв}}$ (см. приложение).

3.2.2. Исследование коэффициента отражения электрооптического модулятора Маха – Цендера:

1. Под руководством инженера подключите оптический выход измерителя уровня обратного отражения FOD-1206 ко входу измерителя Santec PEM-330. Измерьте уровень оптической мощности на выходе FOD-1206. Установите уровень мощности $P_{\text{вх}}$ на выходе FOD-1206 в пределах от 0 до -10 дБм. Величину $P_{\text{вх}}$ запишите в тетрадь.

2. Соберите экспериментальную установку по схеме (рис.7,б), для этого подключите волоконные выводы модулятора: входной к FOD-1206; выходной к измерителю коэффициента поляризационной экстинкции Santec PEM-330.

3. Измерьте уровень обратных отражений на входе модулятора (при $U_{\text{вх}}=U_{\text{кв}}$). Результаты запишите в тетрадь.

4. Контрольные вопросы

1. Расскажите об основных характеристиках монокристалла ниобата лития.

2. Объясните конструкцию и принцип действия интегрального электрооптического модулятора Маха – Цендера.

3. Почему электрооптический модулятор Маха – Цендера изготавливают на X-срезе монокристалла ниобата лития?

4. Поясните, что собой представляет передаточная характеристика электрооптического модулятора и для чего она нужна.

5. Как производится выбор рабочей точки на передаточной характеристике?

6. Поясните, из каких соображений выбирается постоянное напряжение смещения, подаваемое на электроды электрооптического модулятора Маха – Цендера?

7. При какой топологии оптических канальных волноводов обеспечивается положение рабочей точки на максимуме передаточной характеристики?

8. Сформулируйте определение для полуволнового напряжения модулятора.

9. Поясните отличие в реализации прямой и внешней модуляции оптического сигнала.

10. В чем преимущества внешней модуляции по сравнению с прямой модуляцией?

11. В чем преимущества прямой модуляции по сравнению с внешней модуляцией?

12. Какая модуляция прямая или внешняя позволяет обеспечивать более высокую скорость передачи информации?

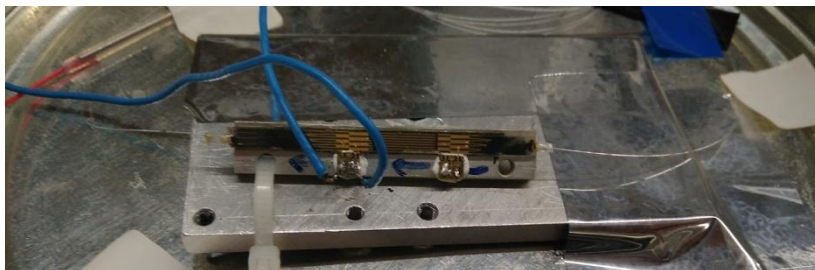
13. Поясните структурную схему экспериментальной установки для определения передаточной характеристики электрооптического модулятора Маха – Цендера.

14. Объясните результаты, полученные при испытании модулятора.

5. Список литературы

1. *Азанова И. С., Шевцов Д. И.* Физические свойства и структура волоконно-оптических систем: учеб.-метод. пособие. Пермь: Перм. гос. ун-т, 2007. С. 42.
2. *Азанова И.С., Волынцев А.Б., Тайсин И.Ф., Шевцов Д.И.* Метастабильные фазы в протонообменных волноводах на х-срезе ниобата лития // Физика твердого тела. 2006. Т. 48, № 6. С. 1059–1063.
3. *Афанасьев В.М.* Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха – Цендера // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3, № 4. С. 341–369.
4. *Азанова И.С., Жундриков А.В., Кичигин В.И., Петухов И.В., Шевцов Д.И.* Эффект старения протонообменных оптических волноводов на основе кристаллов ниобата лития // Физика твердого тела. 2009. Т. 51, № 7. С. 1451–1453.
5. *Щербаков В. В., Солодков А. Ф., Задерновский А. А.* Передача сигналов модуляции интенсивности света в аналоговых волоконно-оптических линиях связи // Радиоэлектроника, наносистемы, информационные технологии. 2016. Т. 8, № 1. С. 9–24.
6. *Кузьминов Ю.С.* Электрооптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987. 264 с.
7. *Ruske J.P., Tünnermann A.* New applications for integrated optical devices // Photonic international. 2007. №1. P. 122–125.
8. *Андропова И.А., Малыкин Г.Б.* Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка // УФН. 2002. Т. 172, вып.8. С. 849–873.

Приложение



Фотография фотонной интегральной схемы электрооптического модулятора Маха – Цендера



Измеритель уровня обратного отражения FOD1206

Измеритель уровня обратного отражения (Back reflection power meter) **FOD-1206A** предназначен для измерения уровня обратного отражения от одномодовых волоконно-оптических соединителей и других компонентов ВОСП. FOD-1206A может быть использован как источник излучения или как измеритель мощности оптического излучения в одномодовом волокне.

РЕЖИМ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

- Длина волны излучения 1310 ± 20 нм (FOD1206A) или 1550 ± 20 нм (FOD1206B).
- Уровень оптической мощности на выходе не менее -5 дБм.

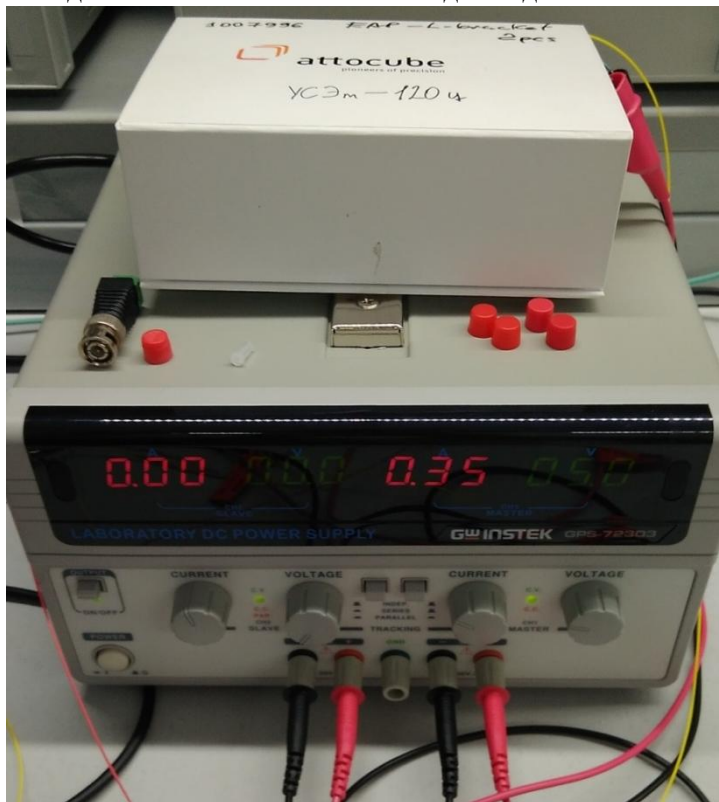
РЕЖИМ ИЗМЕРИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

- Диапазон измерения уровня средней оптической мощности от -60 до $+3$ дБм.

- Относительная погрешность измерений не более $1,0$ дБ.

РЕЖИМ ИЗМЕРИТЕЛЯ ОБРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ

- Диапазон измерения обратного отражения от 0 до -65 дБ.
- Длина волны калибровки 1310 нм.
- Соединитель FC/APC. Волокно одномодовое $9/125$ мкм.



Блок питания лабораторный и УСЭМ



Измеритель поляризационной экстинкции SentecPEM-330

Измеритель коэффициента экстинкции (polarization extinction ratio meter) **Santec PEM-330** обеспечивает измерение коэффициента экстинкции, оптической мощности и угла поляризации в полосе 1260–1630 нм. Динамический диапазон 40 дБ.

Коэффициент экстинкции

В одномодовых волоконных световодах могут распространяться две линейно-поляризованные моды с взаимно ортогональными плоскостями поляризации.

Реальные световоды всегда имеют неоднородности, на которых происходит рассеяние света. При этом часть излучения одной моды рассеивается во вторую, и наоборот.

Если на входе волокна возбуждена только одна поляризационная мода, то на выходе будет и излучение другой моды. Количественно проникновение оптической мощности из одной моды в другую характеризуют *коэффициентом экстинкции* (*коэффициентом затухания поляризации, polarization extinction ratio, PER*)

$$\eta = \frac{E_x^2}{E_y^2}, \quad \text{при } E_{y0}^2 = 0;$$

$$\eta = \frac{E_y^2}{E_x^2}, \quad \text{при } E_{x0}^2 = 0;$$

где E_x, E_y – амплитуды поляризационных мод на выходе, а E_{x0}, E_{y0} – на входе световода.

С увеличением длины L световода коэффициент экстинкции уменьшается:

$$\eta \approx \frac{1}{hL},$$

здесь h – коэффициент связи перекрестных мод, так называемый h -параметр.

Оглавление

1. Введение	3
2. Интегральный электрооптический модулятор на основе интерферометра Маха – Цендера	4
2.1. Электрооптические свойства кристалла ниобата лития	4
2.2. Конструкция интегрального электрооптического модулятора Маха – Цендера	6
2.3. Принцип действия интегрального электрооптического модулятора Маха – Цендера	8
2.4. Выбор рабочей точки модулятора	10
3. Порядок выполнения работы	12
3.1. Структурная схема экспериментальной установки	13
3.2. Порядок проведения эксперимента	14
4. Контрольные вопросы	16
5. Список литературы	17
Приложение	18

Учебное издание

*Составители: Вольхин Игорь Львович,
Ажеганов Александр Сергеевич*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА
НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА
МАХА – ЦЕНДЕРА**

Практикум

Редактор *М. А. Шемякина*
Корректор *Н. А. Антонова*
Компьютерная верстка: *И. Л. Вольхин*

Подписано в печать 28.01.2020. Формат 60х84/16.
Усл. печ. л. 1,39. Тираж 100 экз.

Издательский центр
Пермского государственного национального
исследовательского университета
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15