

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

**Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники
(ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)

Волоконно-оптические устройства и системы технологического
назначения и управления

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО
МОДУЛЯТОРА – ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА
ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

Методические указания к лабораторной работе для студентов
специальности 210401 - Физика и техника оптической связи

2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

**Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники
(ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. каф. СВЧиКР

_____ С.Н.Шарангович
“ ____ “ _____ 2011 г.

Волоконно-оптические устройства и системы технологического
назначения и управления

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО
МОДУЛЯТОРА – ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА
ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

Методические указания к лабораторной работе для студентов
специальности 210401 - Физика и техника оптической связи

Разработчики:
Ст. преп. Кафедры СВЧиКР
_____ П.А. Карпушин
профессор кафедры СВЧиКР
_____ В.М.Шандаров

2011

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Элементы теории электрооптического эффекта	3
3. Описание экспериментальной установки	8
4. Порядок выполнения работы	8
5. Содержание отчета	9
6. Контрольные вопросы	9
7. Домашнее задание	9
8. Рекомендуемая литература	10

1. ВВЕДЕНИЕ

Цель работы: Исследование эффекта электрооптической фазовой модуляции света в схеме с поперечным электрическим полем, и преобразования фазовой модуляции в модуляцию интенсивности с помощью интерферометра Маха – Цендера.

Продолжительность лабораторного занятия – 4 часа, домашняя подготовка – 4 часа.

2. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

При распространении световых волн в среде, на которую воздействуют какие – либо возмущения (или физические поля), возможно изменение характеристик оптического излучения. В таких случаях говорят о взаимодействии света с различными физическими полями в среде.

Электрооптический (ЭО) эффект – это изменение показателя преломления среды под действием приложенного постоянного или переменного электрического поля. В некоторых кристаллах, не имеющих центра симметрии, величина изменения показателя преломления Δn пропорциональна напряженности электрического поля \bar{E} : ($\Delta n \sim \bar{E}$). Это линейный ЭО эффект или эффект Поккельса, который впервые был обнаружен в 1893г. Известен также квадратичный ЭО эффект, или эффект Керра, который может наблюдаться в любой среде, включая жидкости и газы. Величина Δn в этом случае пропорциональна квадрату напряженности поля ($\Delta n \sim E^2$). Этот эффект обнаружен и исследован Керром впервые в 1875г.

Качественно механизм электрооптического эффекта может быть объяснен следующим образом. Под действием электрического поля световой волны “центры тяжести” положительного и отрицательного зарядов в нейтральных атомах смещаются, превращая эти атомы в электрические диполи, осциллирующие с частотой поля. Величина наведенной в среде поляризации определяется дипольным моментом единицы объема, и, в конечном итоге, характеризует величину диэлектрической проницаемости (или показателя преломления) среды. В свою очередь, дипольный момент атома определяется величиной малого смещения \bar{r} электрона относительно состояния устойчивого равновесия. Данное смещение \bar{r} может быть найдено из уравнения:

$$\frac{d^2\bar{r}}{dt^2} + \gamma \cdot \frac{d\bar{r}}{dt} + \omega_0^2 \cdot \bar{r} = -\frac{e}{m} \bar{E} ,$$

где ω_0 – собственная частота осциллятора; γ - коэффициент, учитывающий возможную диссипацию энергии, т.е. наличие сил “трения”; e и m - заряд и масса электрона; \bar{E} – напряженность внешнего электрического поля. Под

полем \bar{E} понимается высокочастотное поле световой волны. В случае воздействия на среду внешнего низкочастотного (или постоянного) дополнительного поля \bar{E}_0 это уравнение принимает вид:

$$\frac{d^2\bar{r}}{dt^2} + \gamma \cdot \frac{d\bar{r}}{dt} + \omega_0^2 \cdot \bar{r} = -\frac{e}{m}(\bar{E} + \bar{E}_0)$$

Очевидно, что при одном и том же поле \bar{E} , величина наведенной поляризации на оптической частоте будет различной в случаях наличия и отсутствия низкочастотного поля. С другой стороны, наличие “начальной” поляризации среды, наведенной под действием низкочастотного электрического поля, может интерпретироваться и как изменение собственной частоты осциллятора ω_0 . А это приводит к изменению величины диэлектрической проницаемости среды на заданной частоте светового поля.

В принципе, для описания электрооптических явлений может использоваться строгий квантовый подход. Расчеты электрооптических свойств некоторых неорганических кристаллов показали их допустимое согласие с экспериментальными результатами. Однако на практике для описания электрооптического эффекта используется феноменологический подход, использующий понятие ЭО тензора.

Феноменологическое описание электрооптического эффекта

Как известно, диэлектрическая проницаемость среды является тензором второго ранга. Т.е. связь между векторами \bar{E} и \bar{D} имеет вид:

$$\begin{cases} D_x = \epsilon_{xx} \cdot E_x + \epsilon_{xy} \cdot E_y + \epsilon_{xz} \cdot E_z \\ D_y = \epsilon_{yx} \cdot E_x + \epsilon_{yy} \cdot E_y + \epsilon_{yz} \cdot E_z \\ D_z = \epsilon_{zx} \cdot E_x + \epsilon_{zy} \cdot E_y + \epsilon_{zz} \cdot E_z \end{cases} \quad (2.1).$$

Эти соотношения принято записывать в сокращенной форме:

$$D_i = \epsilon_{ij} \cdot E_j \quad (2.2),$$

где индекс i принимает поочередно все возможные значения (x, y, z в приведенных соотношениях), а по повторяющемуся индексу j проводится суммирование.

Для представления оптических свойств или показателя преломления анизотропного кристалла, используется понятие оптической индикатрисы, которой в общем случае соответствует поверхность второго порядка. Уравнение индикатрисы можно представить в виде:

$$B_{ij} \cdot x_i \cdot x_j = 1 \quad (2.3),$$

где B_{ij} – компоненты тензора относительной диэлектрической непроницаемости среды. Они определяются соотношением:

$$B_{ij} = \epsilon_0 \cdot \left(\frac{\partial E_i}{\partial D_j} \right) \quad (2.4).$$

Главные значения тензора диэлектрической непроницаемости выражаются через главные показатели преломления, если тензор B_{ij} приведен к главным осям (т.е. только диагональные его компоненты B_{ii} отличны от нуля, а $B_{12} = B_{13} = B_{23} = 0$). Тогда:

$$B_{11} = \frac{1}{n_x^2}; \quad B_{22} = \frac{1}{n_y^2}; \quad B_{33} = \frac{1}{n_z^2}.$$

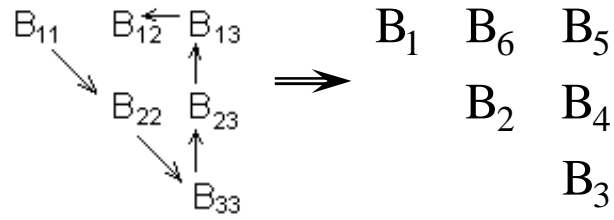
При таком подходе небольшое изменение показателя преломления под действием электрического поля (либо других возмущений) соответствует изменению формы, размера и ориентации оптической индикатрисы. Эти изменения наиболее удобно описывать через малые изменения ΔB_{ij} коэффициентов B_{ij} :

$$\Delta B_{ij} = r_{ijk} \cdot E_k + S_{ijkl} \cdot E_k \cdot E_l \quad (2.5).$$

Здесь первое слагаемое в правой части соответствует линейному ЭО эффекту, а второе – квадратичному, т.е. эффекту Керра. Соответственно, r_{ijk} – тензор коэффициентов линейного ЭО эффекта. ЭО коэффициент определяет изменение диэлектрической непроницаемости среды в зависимости от приложенного электрического поля. Он связывает тензор 2-го ранга с вектором (или тензором 1-го ранга), поэтому также является тензором, но уже третьего ранга.

В общем случае тензор 3-го ранга имеет 27 независимых компонент. Однако тензор B_{ij} симметричен (как и ϵ_{ij}) и имеет только 6 независимых компонент, поэтому тензор r_{ijk} имеет только 18 независимых элементов. Кроме того, симметрия среды накладывает требования инвариантности (ее физических свойств) тензора r_{ijk} относительно операций симметрии, преобразующих кристалл в самого себя. В итоге многие из коэффициентов r_{ijk} оказываются нулевыми. В частности, в centrosymmetric среде эффект должен быть одинаков как для поля E , так и для поля $-E$. А это возможно лишь при нулевом тензоре r_{ijk} . Т.е. в среде с центром симметрии линейный электрооптический эффект должен отсутствовать.

Симметрия тензора ϵ_{ij} (и, соответственно, B_{ij}) и наличие только 18 независимых компонент у тензора r_{ijk} позволяет упростить запись соотношений типа (5). Это достигается уменьшением числа индексов в записи соответствующих тензоров. Так, для B_{ij} проводят замену индексов по схеме: (11) \Rightarrow (1); (22) \Rightarrow (2); (33) \Rightarrow (3); (23) \Rightarrow (4); (13) \Rightarrow (5); (12) \Rightarrow (6). Алгоритм замены пары индексов на единственный поясняется следующей диаграммой.



По такой же схеме проводят замену первых двух индексов у r_{ijk} . В итоге связь между E и ΔV запишется в форме: $\Delta V_i = r_{ij} \cdot E_j$. Здесь i пробегает значения от 1 до 6; j – от 1 до 3. Таким образом, компоненты тензора r_{ij} могут быть представлены в виде матрицы из 3-х столбцов с 6 строками.

Изменение главных показателей преломления найдем из соотношения: $\Delta V = \Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)$. Представляя его в виде:

$$\Delta V = \frac{dV}{dn} \cdot \Delta n,$$

получим:

$$\Delta V = -2 \cdot \frac{1}{n^3} \cdot \Delta n.$$

Таким образом:

$$\Delta n_i = -\frac{1}{2} n^3 \cdot \Delta V_i = -\frac{1}{2} n^3 \cdot r_{ij} \cdot E_j$$

Пример 1. Тензор r_{ijk} для кристалла ниобата лития (LiNbO_3):

$$\begin{bmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

В случае внешнего электрического поля, имеющего составляющую лишь вдоль оптической оси кристалла : $E = E_3$; $\Delta V_i = r_{i3} \cdot E_3$. Видим, что для ниобата лития из r_{i3} отличны от нуля лишь $r_{13} = r_{23} = r_{33}$; $r_{33} = r_{33}$, а $r_{43} = r_{53} = r_{63} = 0$. Соответственно, при обыкновенной поляризации света (вектор \vec{E}

перпендикулярен оси z) $\Delta n_1 = \Delta n_2 = -\frac{1}{2}n_0^3 \cdot r_{13} \cdot E_3$; а при необыкновенной

– $\Delta n_3 = -\frac{1}{2}n_e^3 \cdot r_{33} \cdot E_3$.

Величины коэффициентов r_{13} и r_{33} для ниобата лития существенно различаются. Так, $r_{13} = 9,6 \cdot 10^{-10}$ см/В; $r_{33} = 30,9 \cdot 10^{-10}$ см/В. Очевидно, что для получения эффекта одинаковой величины, использование компоненты r_{33} требует примерно в три раза меньших электрических полей.

*Электрооптическая модуляция света.
Схема с поперечным электрическим полем.*

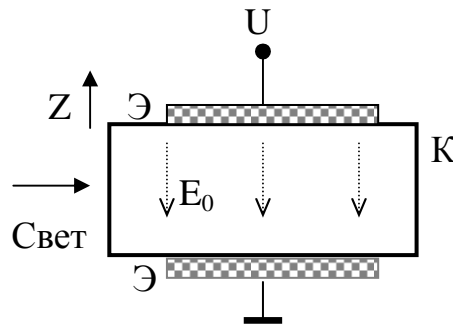


Рис.1. Схема электрооптического модулятора с поперечным электрическим полем.

Простейшие элементы электрооптической модуляции света представляют собой модуляторы фазы световой волны с продольным и поперечным электрическим полем. В первом из них направления распространения света и внешнего электрического поля совпадают, во втором они ортогональны. Элемент с продольным полем требует прозрачных электродов на оптических гранях кристалла, отчасти поэтому геометрия с поперечным электрическим полем используется наиболее часто.

Конструкция модулятора фазы световой волны с поперечным полем поясняется рисунком 1. Здесь к электрооптическому кристаллу (например, к кристаллическому образцу из ниобата лития) прикладывается внешнее электрическое поле, перпендикулярное к направлению распространения света. Э – электроды, К – кристалл. Дополнительная фазовая задержка линейно поляризованной световой волны с необыкновенной поляризацией определяется в этом случае соотношением:

$$\Delta\Phi_e = k_0 \cdot \Delta n \cdot z = -\frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} E_0 \cdot z = -\frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{U}{d} \cdot L \quad (2.6),$$

где k_0 – волновое число света в вакууме; $E_0 = (U/d)$; L – длина электродов в направлении распространения света. Соответственно, для обыкновенно поляризованной волны величина фазовой задержки равна:

$$\Delta\Phi_o = -\frac{\pi}{\lambda} n_o^3 r_{13} \frac{U}{d} \cdot L \quad (2.7).$$

Достоинством электрооптических модуляторов с поперечным полем является возможность увеличения электрически индуцированного фазового сдвига за счет увеличения отношения длины электродов к толщине кристалла L/d . Эффективность электрооптических модуляторов разной конфигурации характеризуется величиной полуволнового напряжения, которое определяется как напряжение, необходимое для достижения фазового сдвига в π . В данном случае для необыкновенной волны оно определяется соотношением:

$$\frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{L}{d} \cdot U_{\lambda/2} = \pi \quad \text{или} \quad U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_e^3 r_{33}} \frac{d}{L} \quad (2.8).$$

Для обыкновенной волны получим:

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_o^3 r_{13}} \frac{d}{L} \quad (2.9).$$

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Здесь фазовый электрооптический модулятор с поперечным электрическим полем введен в одно из плеч оптического интерферометра Маха – Цендера. Это позволяет преобразовать фазовую модуляцию световой волны в модуляцию ее интенсивности, что существенно упрощает экспериментальные методики. Модулятор представляет собой образец из ниобата лития с полированными до оптического качества гранями. На противоположные стороны, ортогональные оси Z кристалла, нанесены электроды в виде полосок из индия (In). К электродам подводится модулирующее напряжение. Свет распространяется вдоль оси X кристалла. Источником излучения является He – Ne лазер. Интерферометр образован с помощью двух светоделительных кубиков и двух призм, размещенных на отдельных столиках, позволяющих осуществить юстировку световых пучков для точного совмещения их путей после интерферометра. Изменение поляризации светового излучения в измерительном плече с обыкновенной на необыкновенную и обратно осуществляется с помощью двух полуволновых фазовых пластинок (ФП), размещаемых в измерительном плече до и после электрооптического кристалла. Световые пучки, прошедшие через опорное и измерительное

плечи интерферометра, попадают на фотодиод, сигнал с которого подается на измерительный прибор.

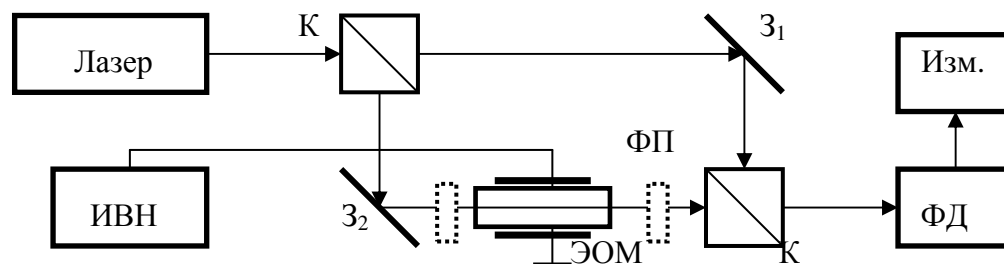


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. К – светоделительные кубики, Z_1 и Z_2 – глухие зеркала, ФП – полуволновая пластинка; ФД – фотодиод, Изм. – измеритель тока фотодиода; ИВН – источник напряжения.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с теоретической частью, элементами экспериментальной установки, ответить на контрольные вопросы и, если требуется, представить преподавателю расчетные зависимости. К работе можно приступить только после получения допуска от преподавателя!

4.2. В работе необходимо исследовать фазовую электрооптическую модуляцию для световых волн с обыкновенной и необыкновенной поляризацией. Для этого:

4.2.1. Включите лазер, источник высоковольтного напряжения и измерительный прибор. Дайте лазеру прогреться в течение не менее 30 мин.

4.2.2. Убедитесь в правильности юстировки оптических элементов интерферометра Маха – Цендера, о чем должно свидетельствовать точное совмещение оптических путей световых пучков на выходе интерферометра. При необходимости проведите подстройку оптических элементов до максимально возможного их совмещения.

4.2.3. Изменяя напряжение на электродах ЭО модулятора в диапазоне от 0 до $2 \div 3$ кВ, наблюдайте визуально характер изменения интенсивности выходного светового пучка.

4.2.4. Убедитесь в том, что поляризация света соответствует обыкновенной волне кристалла. Проведите измерения зависимости интенсивности света на выходе интерферометра от напряжения на ЭО модуляторе. Занесите данные измерений в таблицу.

4.2.5. С помощью полуволновых фазовых пластинок, помещая одну из них перед ЭО модулятором, а вторую после него, или путем изменения

положения ЭО модулятора, измените поляризацию света на необыкновенную, затем повторите эксперимент по п. 3.2.4. Результаты измерений занесите в таблицу.

4.2.6. Оформите результаты измерения в виде кривых и таблиц данных.

4.2.7. Оформите отчет о проведенных исследованиях.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

5.1. Цель работы и схема установки.

5.2. Расчетная зависимость интенсивности на выходе интерферометра от напряжения на модуляторе для света с обыкновенной или необыкновенной поляризацией (по указанию преподавателя).

5.3. Экспериментальные зависимости интенсивности света на выходе интерферометра от напряжения на модуляторе для обыкновенной и необыкновенной волн.

5.4. Выводы по результатам работы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. В чем суть электрооптического эффекта?

6.2. В чем заключается разница между линейным и квадратичным электрооптическими эффектами?

6.3. Запишите выражение для изменения показателя преломления среды при линейном электрооптическом эффекте.

6.4. Запишите выражение для фазового сдвига, приобретаемого световой волной в электрооптическом модуляторе с поперечным электрическим полем.

7. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

7.1. Рассчитать зависимость интенсивности на выходе интерферометра от напряжения на модуляторе для света с обыкновенной или необыкновенной поляризацией (по указанию преподавателя).

8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

8.1. А.Ярив, П.Юх. Оптические волны в кристаллах.- М.: Мир, 1987.- 616 с.

8.2. Ф.Цернике, Дж.Мидвинтер. Прикладная нелинейная оптика.- М.: Мир, 1976.- 262 с.