

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧ и КР)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТРОПНОЙ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА  
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ В КРИСТАЛЛЕ  
НИОБАТА ЛИТИЯ**

Методические указания к лабораторной работе  
Направление подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и  
системы связи». Магистерская программа «Оптические системы связи и  
обработки информации»

»

Томск 2018

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧ и КР)

Утверждаю

Зав. каф. СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ С.Н. Шарангович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТРОПНОЙ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА  
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ В КРИСТАЛЛЕ  
НИОБАТА ЛИТИЯ**

Методические указания к лабораторной работе

Направление подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и  
системы связи». Магистерская программа «Оптические системы связи и  
обработки информации»

Разработчики:

проф. каф. СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ А.Е. Мандель

Магистрант каф. СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ А.Ю.Яковлева

Магистрант каф. СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ И.К.Казак

Томск 2018

## Содержание

1 Цель работы .....	4
2 Теоритическая часть.....	5
2.1 Доменная структура в сегнетоэлектриках.....	5
2.2 Дифракция света на периодических доменных структурах в ниобате лития.....	6
3 Расчетная часть.....	9
3.1 Расчет углов отклонения дифрагированных световых пучков при изотропной брэгговской дифракции света на периодической доменной структуре в кристалле ниобата лития.....	9
4 Экспериментальная часть .....	11
4.1 Описание экспериментальной установки и методики эксперимента.....	11
5 Порядок выполнения работы .....	13
6 Содержание отчета .....	15
7 Контрольные вопросы.....	15
Список литературы.....	15

## 1 Цель работы

Целью лабораторной работы является:

- изучение дифракции когерентных световых пучков на периодических доменных структурах в электрооптических кристаллах;
- расчет углов отклонения дифрагированных световых пучков при изотропной дифракции когерентного света на периодической доменной структуре (ПДС) в кристалле ниобата лития
- экспериментальное исследование изотропной дифракции света на периодической доменной структуре (ПДС) в кристалле ниобата лития.

## 2 Теоритическая часть

### 2.1 Доменная структура в сегнетоэлектриках

Сегнетоэлектрики – это кристаллические диэлектрики, обладающие в определенном температурном интервале самопроизвольной или спонтанной, то есть возникающей без внешних воздействий, поляризацией. Спонтанно поляризованное состояние реализуется в сегнетоэлектриках в виде доменной структуры. Доменом называется макроскопическая область в кристалле, в пределах которой все элементарные ячейки в сегнетоэлектрике поляризованы одинаково. Отдельные домены отделены друг от друга доменными границами или доменными стенками. Совокупность доменов различной ориентации называют доменной структурой [1].

Сегнетоэлектрики обладают большим количеством свойств, которые между собой непосредственно взаимосвязаны, именно поэтому, нелинейные свойства, и целиком процессы переключения этих материалов, и другие их свойства определяются доменной структурой. Одним из факторов, определяющим характеристики доменов, является энергетический фактор. Энергия, которую необходимо минимизировать, представляет в случае чистых сегнетоэлектриков сумму энергии деполяризующего поля связанных зарядов спонтанной поляризации на поверхности сегнетоэлектрика и энергии доменных границ [1].

В сегнетоэлектрике конечных размеров вектор спонтанной поляризации обязательно выходит на поверхность материала, а это означает образование здесь связанных зарядов и в результате увеличение энергии образца. В сегнетоэлектрике – полупроводнике указанные связанные заряды могут быть компенсированы за счет конечной проводимости материала. В классических диэлектриках, к которым относится большинство сегнетоэлектриков, такой возможности нет. Но в последних всегда остается возможность уменьшения энергии этого поля за счет разбиения кристалла на домены (рисунок 2.1). и чем меньше оказывается средняя ширина домена, тем меньше энергия рассматриваемого деполяризующего поля [1].

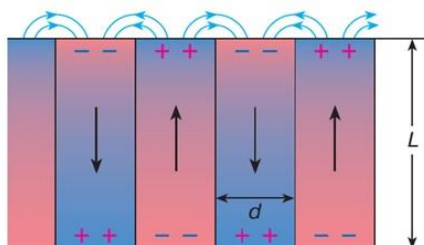


Рисунок 2.1 – Уменьшение энергии деполяризующего поля сегнетоэлектрического образца конечных размеров при разбиении его на домены.  $L$ – размер кристалла вдоль полярной оси,  $d$  – средняя ширина домена

С точки зрения только деполяризующего поля наиболее выгодным является разбиение на более и более мелкие домены. У такого разбиения есть противоборствующий фактор – энергия доменных стенок. Они представляют собой переходный слой между соседними доменами, в пределах которого вектор спонтанной поляризации меняется от его значения в одном домене до значения в другом. В сегнетоэлектриках образование такого слоя связано с возрастанием энергии системы, то есть невыгодно. Таким образом, уменьшение среднего размера доменов приводит к увеличению их числа, и значит, к росту энергии доменных стенок. Другими словами, зависимость энергии деполяризующего поля и доменных стенок от среднего размера домена противоположная и в равновесии устанавливается баланс между указанными вкладами в энергию, определяющий конкретное значение [1].

## 2.2 Дифракция света на периодических доменных структурах в кристаллах ниобата лития

В данной работе рассмотрены два вида дифракции: дифракция Рамана – Ната и дифракция Брэгга.

Как правило, вид дифракции зависит от величины безразмерного параметра  $Q$ , который определяется формулой (2.1):

$$Q = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad (2.1)$$

где  $d$  – длина звукового столба.

При  $Q < 1$  имеет место дифракция Рамана – Ната, при  $Q > 1$  – дифракция Брэгга; значение  $Q = 1$  соответствует переходной области. Это условие является основополагающим для определения вида дифракции. На практике дифракция Брэгга наблюдается при  $Q > 1$ , это означает, что падающий под углом Брэгга световой пучок пересекает не менее двух соседних плоскостей с максимальной (минимальной) плотностью [2].

Дифракция Рамана – Ната наблюдается на низких звуковых частотах и при небольшой длине взаимодействия. При падении света параллельно волновому фронту звуковой волны дифракционный спектр Рамана-Ната представляет собой расположенные симметрично по обе стороны от прошедшего пучка равноотстоящие друг от друга дифракционные максимумы (рисунок 2.5) [2].

В случае дифракции Рамана – Ната световая волна проходит сквозь звуковой пучок не отражаясь, а периодическое изменение показателя преломления  $n$  под действием ультразвука приводит к модуляции фазы прошедшей волны. Такая волна эквивалентна значительному числу плоских волн, распространяющихся под малыми углами к проходящему световому пучку [3].

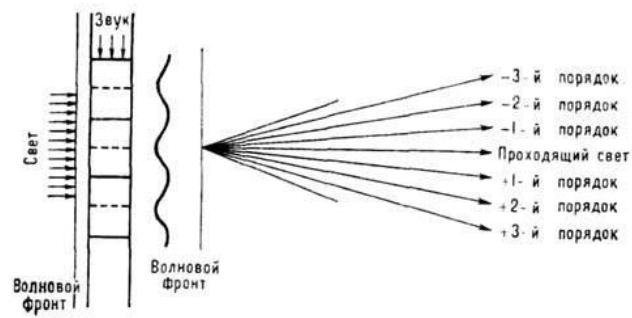


Рисунок 2.5 – Схема дифракции Рамана – Ната [3]

При увеличении длины взаимодействия возникшую периодическую структуру нельзя считать только фазовой решеткой, и происходит постепенный переход от дифракции на фазовой решетке (дифракция Рамана-Ната) к рассеянию на объемной периодической структуре (дифракция Брэгга) [2].

Дифракция Брэгга представляет собой частичное отражение от звуковой решетки (рисунок 2.6).

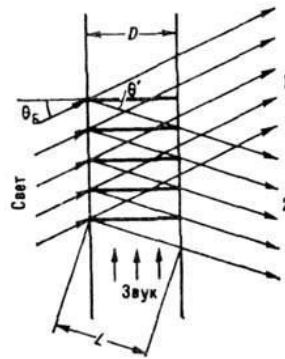


Рисунок 2.6 – Схема дифракции Брэгга в изотропной среде [3]

Эффективная дифракция имеет место, если волны, отраженные от соседних максимумов показателя преломления, имеют оптическую разность хода, равную  $\lambda$ . Это происходит, если свет падает под определенным углом, так называемым углом Брэгга (формула (2.2)) [3]:

$$(2.2)$$

где  $\theta_c$  – угол Брэгга.

При дифракции Брэгга дифракционный спектр состоит из двух максимумов, соответствующих значениям  $m = 0$  и  $m = 1$ . Дифракционные максимумы порядков  $-1$  и выше отсутствуют. Интенсивность первого максимума будет наибольшей, если свет падает под углом к волновому фронту акустической волны, удовлетворяющим условию Брэгга (формула (2.2)) [2].

Векторная диаграмма служит наглядной иллюстрацией угловых соотношений при дифракции Брэгга, в том числе и в анизотропных средах. Рассмотрим векторную диаграмму при дифракции Брэгга в изотропных средах (рисунок 2.7) [2].

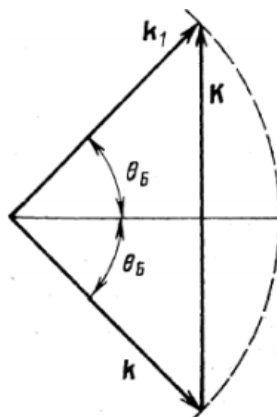


Рисунок 2.7 – Векторная диаграмма взаимодействия плоских монохроматической световой и акустической волн при изотропной дифракции [2]

Акустическая волна описывается аналогично световой, если длина акустической волны много меньше поперечных размеров звукового столба. Наиболее простым является случай взаимодействия плоских монохроматических световой и акустической волн. В этом случае плоскую акустическую волну по аналогии с плоской световой будем характеризовать волновым вектором  $K$  (определяется как:  $K = 2\pi/\Lambda$ ) и частотой  $\Omega$  [2].

Процесс дифракции света на ультразвуковой волне можно представить как трехчастичное фотон–фононное рассеяние, сопровождающееся рождением (поглощением) фонона. К процессу рассеяния применимы законы сохранения энергии и импульса. Закон сохранения энергии определяет соотношение между частотами рассеянного фотона  $\omega_1$ , падающего фотона  $\omega$  и фонона  $\Omega$ :  $\omega_1 = \omega \pm \Omega$ , Знак плюс (минус) соответствует поглощению (рождению) фонона. Закон сохранения импульса для этих двух процессов соответственно запишется в виде (формула (2.3)) [2]:

(2.3)

где  $k$  и  $k_1$  – волновые векторы, соответственно, падающего и рассеянного в среде фотонов.

В изотропной среде угол Брэгга определяется лишь длинами волн света и звука. Угол Брэгга в изотропной среде определяется по формуле (2.4):

(2.4)

Угол рассеяния , под которым выходит дифрагированный свет, равен .



### 3. Расчетная часть

#### 3.1 Расчет углов отклонения дифрагированных световых пучков при изотропной дифракции света на ПДС в кристалле ниобата лития

Если в процессе оптического взаимодействия не меняется тип оптической моды, то  $n_i = n_d$  (рассеяние вида  $o \rightarrow o$ ) или  $n_i \approx n_d$  (рассеяние вида  $e \rightarrow e$ ). Этот вариант оптического взаимодействия известен как изотропная дифракция [2]. Рассмотрим расчет углов отклонения дифрагированных световых пучков при изотропной дифракции.

На рисунке 3.1 представлена векторная диаграмма взаимодействия падающей и дифрагированной световых волн при изотропной дифракции света.

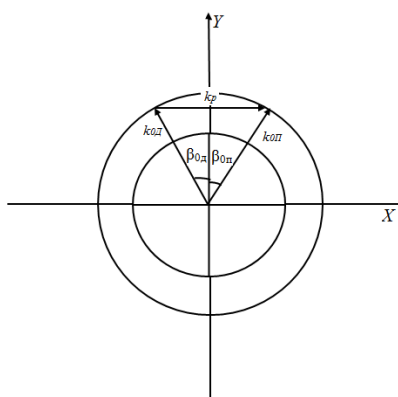


Рисунок 3.1 – Векторная диаграмма взаимодействия падающей и дифрагированной световых волн при изотропной дифракции света

Здесь  $k_p$  – волновые векторы обыкновенной падающей волны, обыкновенной дифрагированной волны и волновой вектор дифракционной решетки.

Волновой вектор обыкновенной падающей волны определяется выражением (3.1):

$$k_p = n_o k_0 \quad (3.1)$$

где  $n_o$  – показатель преломления обыкновенной падающей волны.

Волновой вектор обыкновенной дифрагированной волны определяется выражением (3.2):

$$k_{оп} = n_o k_0 \quad (3.2)$$

Волновой вектор дифракционной решетки волны определяется выражением (3.3):

$$k_p = \frac{2\pi}{\Lambda} m \quad (3.3)$$

где  $m$  – порядок дифракционной решетки;  $\Lambda$  – период решетки.

Запишем в виде выражения (3.4) проекцию вектора  $k_p$  и проекцию вектора  $k_{оп}$  на оси  $X$  и  $Y$  соответственно. Получим:

(3.4)

где  $\alpha$  – угол, под которым распространяется основной пучок света внутри кристалла;  
 $\beta$  – угол, под которым распространяется дифрагированный световой луч внутри кристалла.

Далее после алгебраических преобразований, получим выражение (3.5):

(3.5)

Сократив оба выражения на  $\sin \alpha$ , получим выражение (3.6):

(3.6)

Тогда, из выражения (3.6) выразим угол  $\beta$ . Получим:

(3.7)

Соответственно угол  $\beta$  будет равен:

(3.8)

Приведенные в формулах (3.7) и (3.8) углы  $\alpha$  и  $\beta$  рассматриваются внутри самого кристалла, на практике такие измерения произвести не предоставляется возможности. На практике возможно измерить разность углов между основным и дифрагированным лучами, выходящими из кристалла. Так как  $\alpha$  и  $\beta$  малы, то рассчитываются данные углы по закону Снеллиуса из следующего выражения (3.9):

(3.9)

где  $n_0$  – показатель преломления воздуха ( $n_0 = 1$ );

$\alpha$  – угол, под которым распространяется основной пучок света на выходе из кристалла (который возможно пронаблюдать и измерить);

Угол  $\beta$  будет равен:

(3.10)

где  $\alpha$  – угол, рассчитываемый по формуле (3.7).

Соответственно угол  $\beta$  будет равен:

(3.11)

## 4. Экспериментальная часть

### 4.1 Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

В экспериментах по исследованию изотропной дифракции на периодической доменной структуре используется образец периодической доменной структуры, изготовленный в монокристаллической пластине  $\text{LiNbO}_3$ , легированной оксидом магния ( $\text{LiNbO}_3: 5\% \text{MgO}$ ), фирмой ООО ЛАБФЕР в городе Екатеринбург. Периодическая доменная структура в монокристаллической пластине  $\text{LiNbO}_3$  сформирована методом переполяризации во внешнем электрическом поле с периодом  $\Lambda = 8,79$  мкм и доменными стенками, перпендикулярными оси X кристалла и параллельными плоскости YZ. Кристалл ниобата лития имел размеры: по оси X – 40 мм, по оси Y – 2 мм и по оси Z – 1 мм. Доменная структура полностью занимает пространство между гранями образца перпендикулярно оси Y ( $d = 2$  мм) и оси X ( $L = 40$  мм). Расположение осей кристалла  $\text{LiNbO}_3$  представлено на рисунке 4.1.

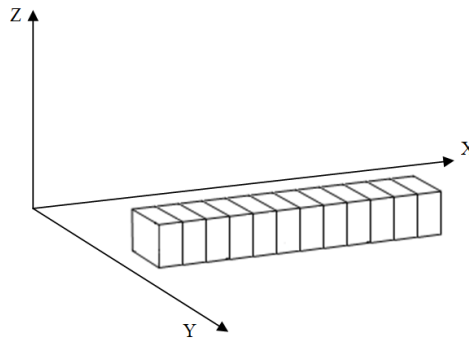


Рисунок 4.1 – Расположение осей кристалла  $\text{LiNbO}_3$

Экспериментальные исследования изотропной дифракции света на периодической доменной структуре в кристалле ниобата лития проводятся на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 4.2.

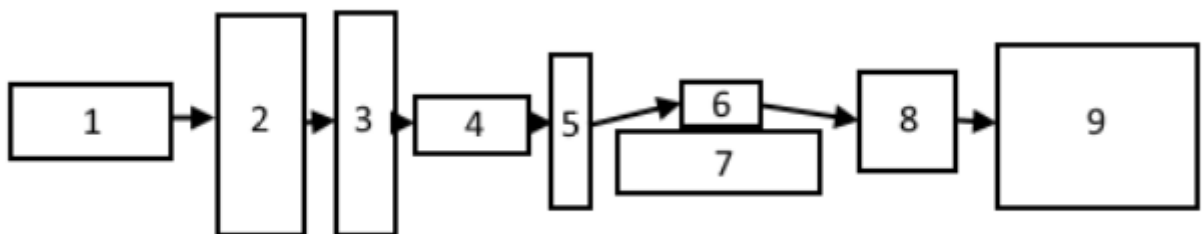


Рисунок 4.2 – Схема экспериментальной установки для исследования изотропной дифракции света: 1 – полупроводниковый лазер ( $\lambda_{\text{изл}} = 655$  нм), 2 – коллиматор, 3 – поляризационная призма, 4 – диафрагма, 5 – цилиндрическая линза, 6 – кристалл  $\text{LiNbO}_3$ , 7 – юстировочный стол, 8 – кремниевый фотодиод, 9 – микроамперметр

В качестве падающего светового пучка используется световой пучок от полупроводникового лазера 1 с длиной волны излучения  $\lambda = 655$  нм и выходной мощностью 25 мВт. Коллиматором 2 формируется коллимированный пучок света размером 4 мм. Выходная поляризация данного светового пучка вдоль оси X или оси Z задается поляризационной призмой 3. Диафрагма 4 позволяет получить пучок с апертурой, равной 2 мм. Цилиндрическая линза 5 формирует световой пучок размером порядка 30 мкм в плоскости XY. Полученный пучок света направляется вдоль оси Y кристалла 6. Для позиционирования образца относительно падающего пучка и настройки на брэгговские дифракционные максимумы, кристалл с периодической доменной структурой устанавливается на юстировочный столик 7 с соответствующими прецизионными механическими узлами. Измерения интенсивности света в дифрагированных максимумах осуществляется с помощью кремниевого фотодиода 8, подключенного к микроамперметру 9. Поляризация дифрагированного света определяется с помощью дополнительного анализатора, скрещенного с входным поляризатором и устанавливаемым после образца кристалла ниобата лития.

Для согласования ширины лазерного пучка с рабочей апертурой кристалла, зная фокусное расстояние линзы  $F$  и ширину лазерного пучка  $D$ , рассчитывается диаметр перетяжки  $d$ , используя условия расходимости гауссового пучка:

$$\text{_____} \quad (4.1)$$

где — диаметр лазерного пучка;  
 — диаметр перетяжки гауссового пучка;  
 — длина волны излучения ( $\lambda = 655$  нм).

В данной лабораторной работе рекомендуется самостоятельно рассчитать диаметр перетяжки  $d$ . Перед этим необходимо определить фокусное расстояние линзы  $F$  и диаметр лазерного пучка  $D$ .

## 5. Порядок выполнения работы

1. Выполнить расчет разности углов между основным и дифрагированным световыми пучками на выходе из кристалла при изотропной дифракции света, используя формулу (3.10) и формулу (3.11). Принять ; ; .  
Полученные результаты занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 - Результаты расчета разности углов между основным и дифрагированным световыми пучками на выходе из кристалла при изотропной дифракции света

2. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки и методикой эксперимента.

3. Экспериментально произвести измерение углов отклонения дифрагированных световых пучков при изотропной брэгговской дифракции света на периодической доменной структуре в кристалле ниобата лития. Измерения проводятся следующим образом: На кристалл подается коллимированный пучок света, размер светового пятна после цилиндрической линзы определяется на основании расчетов в пункте 5данной лабораторной работы. Излучение лазера направляется вдоль оси  $Y$  кристалла. Настройка на брэгговские дифракционные максимумы проводится с помощью использования прецизионного юстировочного столика, на который помещен кристалл. После кристалла на расстоянии устанавливается экран, на котором фиксируется положение основного и дифрагированного световых пучков, затем измеряется расстояние данных пучков до экрана, и рассчитывался угол между ними. Данные измерения проводятся для каждого порядка дифрагированного светового луча, наблюдаемого в ходе эксперимента. Необходимо рассмотреть случай поляризации падающего светового луча на кристалл горизонтально (по оси  $X$  кристалла). Полученные данные занести в таблицу 5.2 и сравнить с расчетными значениями.

Таблица 5.1 – Результаты экспериментальных и расчетных измерений разности углов между основным и дифрагированным световыми пучками на выходе из кристалла при изотропной дифракции света

Дифракционный максимум	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8
Экспериментальный угол, град								
Расчетный угол ( , град								

4. Экспериментально произвести измерение угловой селективности дифракционных максимумов при изотропной дифракции света на периодической доменной структуре в кристалле ниобата лития. Измерение проводится следующим образом: На кристалл падает коллимированный пучок света, размер светового пятна после

цилиндрической линзы определяется на основании расчетов в 5 пункте данной лабораторной работы. Излучение лазера направляется вдоль оси  $Y$  кристалла. Настройка на брэгговские дифракционные максимумы проводится с помощью использования прецизионного юстировочного столика, на который помещен кристалл. Затем, с помощью этого же прецизионного юстировочного столика выполняется поворот кристалла на некоторый угол, значение которого фиксируется на специальной измерительной ленте, позволяющей производить измерение угла поворота кристалла в угловых минутах. Далее при каждом повороте кристалла на некоторый угол, фиксируется значение интенсивности дифрагированного светового луча с помощью кремниевого фотодиода, подключенного к цифровому микроамперметру. Такие измерения проводятся для дифракционных максимумов +1 и +2 порядков при изотропной дифракции. Результаты экспериментальных измерений зависимости интенсивности дифрагированного светового луча от угла поворота записать в таблицу 5.3 для +1 порядка и в таблицу 5.4 для +2 порядка.

Таблица 5.2 – Результаты экспериментальных измерений зависимости интенсивности дифрагированного светового луча от угла поворота при изотропной дифракции света для +1 дифракционного максимума

Угол поворота , мин											
Нормированное значение $I/I_{\max}$											

Таблица 5.3 – Результаты экспериментальных измерений зависимости интенсивности дифрагированного светового луча от угла поворота при изотропной дифракции света для +2 дифракционного максимума

Угол поворота , мин											
Нормированное значение $I/I_{\max}$											

По данным таблицы 5.2 и таблицы 5.3 построить график зависимости \_\_\_\_\_ для +1 и +2 дифракционных максимумов при изотропной дифракции света.

## 6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы и схему экспериментальной установки.
2. Результаты расчетов.
3. Результаты экспериментальных измерений, сведенные в таблицы и представленные в виде графикой, где это требуется.
4. Анализ и сопоставление экспериментальных и расчетных данных.
5. Выводы по результатам работы

## 7. Контрольные вопросы

1. Объясните различие между дифракцией Рамана – Ната и дифракцией Брэгга?
2. Объясните различие между изотропной и анизотропной дифракции
3. Объясните, что собой представляет периодическая доменная структура в электрооптических кристаллах?
4. Какие методы формирования периодических доменных структур вы знаете.
5. Нарисуйте векторную диаграмму взаимодействия падающей и дифрагированной световых волн при изотропной дифракции света на периодической структуре

## Список литературы

1. С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах [Электронный ресурс] : учеб. пособие. – Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 244 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/1553>
2. Магдич, Л.Н. Акустооптические устройства и их применение / Л.Н. Магдич // М.: Сов. Радио – 1978. – 112 с.
3. Дифракция света на ультразвуке. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://femto.com.ua/articles/part\\_1/1076.html](http://femto.com.ua/articles/part_1/1076.html) .