

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧиКР)

**“Интегральная оптика (по выбору)”**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКРЕТНОЙ ДИФРАКЦИИ СВЕТА В  
ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУРАХ В  $\text{LiNbO}_3$**

Методические указания к лабораторной работе для студентов  
направления подготовки бакалавров **200600**  
**ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА**

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.

**“Интегральная оптика (по выбору)”**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКРЕТНОЙ ДИФРАКЦИИ СВЕТА В  
ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУРАХ В  $\text{LiNbO}_3$**

Методические указания к лабораторной работе для студентов  
направления подготовки бакалавров **200600**  
**ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА**

Разработчики:

асп. кафедры СВЧиКР

\_\_\_\_\_ П.А. Тренихин

профессор кафедры СВЧиКР

\_\_\_\_\_ В.М.Шандаров

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Элементы теории .....	4
2. Схема экспериментальной установки .....	5
3. Контрольные вопросы .....	6
4. Задание на работу .....	6
5. Рекомендуемая литература .....	7

**Цель работы:** Экспериментальное исследование особенностей дифракции когерентных световых пучков в среде с периодической модуляцией показателя преломления, представляющей собой одномерную систему связанных планарных оптических волноводов.

## 1. Элементы теории

Дифракционные эффекты приводят к изменению амплитудного профиля светового поля, а для гауссова пучка – к его уширению при распространении в оптически однородной среде. Для основной моды гауссова пучка дифракционная расходимость характеризуется отношением  $\lambda/d$ , где  $\lambda$  – длина волны света, а  $d$  – ширина пучка в области перетяжки.

Проявление дифракционных эффектов может существенно изменяться, если световой пучок распространяется в оптически неоднородной среде. В этом случае наличие оптической неоднородности может привести к усилению либо наоборот, к ослаблению влияния дифракционных эффектов на пространственные характеристики светового пучка. При определенных условиях подобная неоднородность может играть роль оптического волновода, захватывающего световое поле, тогда свет распространяется в волноводе без изменения поперечного профиля, т.е. дифракция практически компенсируется наличием оптической неоднородности. Особый интерес представляет случай неоднородной среды с периодической модуляцией ее оптических свойств, например – показателя преломления. В определенных ситуациях такая среда может рассматриваться как система связанных оптических волноводов. Связь отдельных волноводных элементов обусловлена наличием экспоненциально затухающего поля за границами волновода (существование таких экспоненциально спадающих полей обсуждается, как правило, при рассмотрении явления полного внутреннего отражения света от границы раздела диэлектрических сред [1]). Пространственная эволюция светового поля в одномерной периодической структуре связанных нелинейных оптических волноводов в приближении слабой связи между соседними элементами описывается уравнением [2 - 4]:

$$i \frac{dE_n}{dz} + \beta E_n + C(E_{n+1} + E_{n-1}) + \lambda |E_n|^2 E_n = 0 \quad (1),$$

где  $E_n$  - амплитуда поля в  $n$  – том элементе;  $\beta$  - постоянная распространения волноводной моды в изолированном элементе;  $C$  – коэффициент связи; слагаемое  $\lambda |E_n|^2 E_n$  учитывает эффект нелинейно-оптического самовоздействия светового поля (в данном случае форма его записи соответствует керровской нелинейности среды).

Величина коэффициента связи  $C$  зависит от пространственного периода структуры, длины волны света и разницы показателей преломления в области максимума и минимума. В определенных условиях связь между волноводными элементами может быть пренебрежимо малой и структура представляет собой систему практически изолированных волноводных элементов. Для среды с одномерной модуляцией показателя преломления это система планарных

оптических волноводов. Тогда при возбуждении светового пучка в отдельном волноводном элементе дифракционные эффекты проявляются только в плоскости планарного волновода, а в направлении нормали к его плоскости дифракция отсутствует [5].

При конечной величине связи между волноводами наблюдается эффект туннелирования энергии в соседние волноводные элементы, что приводит к сложному пространственному распределению интенсивности света в поперечном сечении периодической волноводной структуры. Для периодической структуры с бесконечным числом идентичных волноводных элементов и, следовательно, одинаковой связью между соседними волноводами, при возбуждении света на входе структуры только в одном волноводе, распределение амплитуды поля по элементам структуры определяется соотношением [2, 3]:

$$E_n(z) = E_0(i)^n \exp(i\beta z) J_n(2Cz) ,$$

где  $n$  – номер волновода (считая, что свет возбуждается в элементе с  $n=0$ );  $z$  – расстояние от входа структуры в направлении распространения света;  $i$  – мнимая единица;  $\beta$  – продольная постоянная распространения световой волны в структуре;  $J_n$  – функция Бесселя;  $C$  – величина коэффициента связи между каналами.

## 2. Схема экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В реальных экспериментах периодическая структура связанных планарных оптических волноводов сформирована путем фоторефрактивной записи одномерной голографической решетки в кристалле ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), легированном ионами железа [6]. Вектор решетки ориентирован вдоль оптической оси кристалла (ось  $Z$ ), свет распространяется вдоль осей  $X$  или  $Y$ , в зависимости от используемого кристаллического образца. Период структуры в разных образцах составляет от 12 до 18 мкм, толщина волноводного слоя при этом равна примерно половине пространственного периода ( $6 \div 9$  мкм), а апертура такой периодической волноводной структуры в поперечных направлениях около 3 мм. Кристалл расположен на поворотном столике с микрометрической подвижкой, что позволяет варьировать направление распространения света и смещать структуру в поперечном направлении относительно светового пучка с достаточно высокой точностью. Луч  $\text{He} - \text{Ne}$  лазера ЛГН – 207-А с поляризацией, соответствующей необыкновенной волне в кристалле, фокусируется на входную плоскость волноводной структуры с помощью сферической линзы с фокусным расстоянием от 25 до 50 мм. Изображение входной или выходной граней проецируется с помощью изображающей линзы на ПЗС матрицу видеокамеры, сигнал которой вводится в персональный компьютер. Изображения распределения интенсивности света на экране монитора изучаются визуально и при необходимости сохраняются в устройствах памяти в виде файлов с расширением bmp.

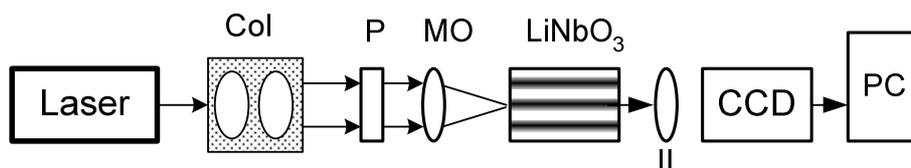


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: Col – коллиматор; P – поляризатор; MO – фокусирующая линза; LiNbO<sub>3</sub> – кристалл ниобата лития с периодической волноводной структурой; IL – изображающая линза; CCD – видеокамера; PC – персональный компьютер.

### 3. Контрольные вопросы

3.1. Какими параметрами определяется величина дифракционной расходимости гауссова светового пучка?

3.2. За счет чего возможен эффект туннельной связи волноводных элементов в периодической структуре?

3.3. Из каких условий должно выбираться фокусное расстояние линзы MO в экспериментальной установке?

3.4. Какой вид должно иметь распределение интенсивности на выходной плоскости кристалла с периодической структурой, если узкий световой пучок падает на входную плоскость кристалла в области, где периодическая модуляция показателя преломления материала отсутствует?

3.5. Какой вид должно иметь распределение интенсивности на выходной плоскости кристалла с периодической структурой, если узкий световой пучок вводится в один волноводный элемент, а коэффициент туннельной связи между отдельными элементами пренебрежимо мал?

3.6. Какой вид должно иметь распределение интенсивности на выходной плоскости кристалла с периодической структурой, если узкий световой пучок вводится в один волноводный элемент, а коэффициент туннельной связи между отдельными элементами велик?

### 4. Задание на работу

4.1. Для нефокусированного светового пучка получить изображение распределения его интенсивности на входной плоскости исследуемого кристаллического образца вне периодической структуры.

4.2. Ввести в схему фокусирующую линзу и определить ее положение, соответствующее минимальному размеру светового пятна сфокусированного пучка на входной плоскости кристалла в однородной области. С помощью видеокамеры зафиксировать изображение распределения интенсивности. Изменением положения изображающей линзы получить на мониторе изображение выходной плоскости кристалла и поля светового пучка на ней. Зафиксировать изображение.

4.3. Сместить образец в поперечном направлении с помощью микрометрической подвижки, пронаблюдать за изменением картины светового

поля на выходной плоскости кристалла при возбуждении света в волноводных элементах структуры. Объяснить наблюдаемые результаты.

4.4. Получить симметричную картину распределения интенсивности на выходной плоскости в направлении вектора решетки, используя микрометрический винт поворотного механизма и линейную микрометрическую подвижку столика. Зафиксировать картину с помощью видеокамеры.

4.5. Используя bmp файлы с изображениями, получить с помощью Mathcad распределения интенсивности светового пучка на входной и выходной плоскостях в однородной области. Определить угол дифракционной расходимости пучка, используя полученные распределения. Сравнить результат с теоретической оценкой.

4.6. Построить распределение интенсивности света на выходной плоскости в области волноводной структуры. С помощью приведенного соотношения для  $E_n(z)$  попытаться оценить величину коэффициента связи между каналами, исходя из размеров образца и полученной картины поля на выходной плоскости структуры.

4.7. Оформить отчет по работе.

## 5. Рекомендуемая литература

1. В.М. Шандаров. Основы физической и квантовой оптики. – Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2005. – 258 с.
2. D. N. Christodoulides and R. I. Joseph, "Discrete Self-Focusing in Nonlinear Arrays of Optical Waveguides", Opt. Lett. **13**, 794-796 (1988).
3. Ю.С. Кившарь, Г.П. Агравал "Оптические солитоны - от волоконной оптики до фотонных кристаллов", М.: Физматлит, 2005. - 648 с.
4. А. Ярив, П. Юх. Оптические волны в кристаллах. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
5. С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах. – Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 230 с. **(30)**
6. М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. - СПб.: Наука. С. - Петерб. отд., 1992. – 320 с.