

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Факультет электронной техники (ФЭТ)
Кафедра электронных приборов (ЭП)

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Учебно-методическое пособие для проведения лабораторных работ
студентов по направлению **12.03.03**

по дисциплине

Введение в фотонику и оптоинформатику

Шандаров С.М., Миссаль В.В., Акрестина А.С.

Генерация второй гармоники лазерного излучения: Учебно-методическое пособие для проведения лабораторных работ студентов по направлению **12.03.03** по дисциплине: Введение в фотонику и оптоинформатику / С.М. Шандаров, В.В. Миссаль, А.С. Акрестина. – Томск : ТУСУР. – 2018. – 12 с.

Цель работы: изучение генерации второй гармоники в кристалле LiNbO_3 при накачке с длиной волны 1064 нм с помощью твердотельного импульсного лазера LCS-DTL-324QT и измерение зависимости мощности второй гармоники от углового положения кристалла относительно направления распространения пучка накачки.

В ходе выполнения работ у студентов формируются:

- способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики (ОПК-1);
- способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий (ОПК-2).

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по курсу «Введение в фотонику».

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Факультет электронной техники (ФЭТ)
Кафедра электронных приборов (ЭП)

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
«___» _____ 2018 г.

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Учебно-методическое пособие для проведения лабораторных работ

студентов по направлению **12.03.03**

по дисциплине

Введение в фотонику и оптоинформатику

РАЗРАБОТЧИКИ:

проф. каф. ЭП, д.ф.-м.н.,

_____ С.М. Шандаров

к.ф.-м.н.,

_____ В.В. Миссаль

ст.преп. каф. ЭП, к.ф.-м.н.,

_____ А.С. Акрестина

Содержание

1	Введение.....	5
2	Теоретическая часть.....	5
2.1	Генерация оптических гармоник в нелинейных кристаллах.....	5
2.2	Нелинейная поляризация.....	6
2.3	Условие фазового синхронизма.....	7
2.4	Генерация второй оптической гармоники (ГВГ).....	8
2.5	Нелинейные материалы и экспериментальная установка.....	9
2.6	Контрольные вопросы.....	9
3	Экспериментальная часть.....	9
3.1	Включение лазера и изменение параметров излучения накачки.....	9
3.2	Задание на работу.....	10
3.3	Методические указания по выполнению работы.....	10
3.4	Содержание отчета.....	10
	Список рекомендуемой литературы.....	11

1 Введение

Цели и задачи - Изучение генерации второй гармоники в кристалле LiNbO_3 при накачке с длиной волны 1064 нм с помощью твердотельного импульсного лазера LCS-DTL-324QT.

2 Теоретическая часть

2.1 Генерация оптических гармоник в нелинейных кристаллах

Создание в начале 60-х годов XX века мощных источников когерентного оптического излучения (лазеров или оптических квантовых генераторов (ОКГ)) открыло огромное количество научных и технических возможностей. Среди них особое место занимает целая область физики – *нелинейная оптика*.

В «долазерный» период своего развития оптика имела дело с такими явлениями, как поглощение света веществом, отражение его от границ раздела сред, рассеяние излучения на различных неоднородностях, интерференционные и дифракционные эффекты и т.д. Главными факторами, определяющими характеристики этих процессов, являлись частота и поляризация световой волны. Такой ее параметр как амплитуда в подавляющем большинстве оптических эффектов не влиял на характер явления. Количественные, а тем более качественные результаты экспериментов, проводимых с нелазерными источниками света, не зависели от интенсивности излучения, какие бы максимально мощные излучатели не использовались.

Здесь и далее под интенсивностью, или плотностью потока, будем понимать величину

$$I = P / S \quad (2.11)$$

где P – мощность излучения, а S – площадь поперечного сечения луча.

Лазеры способны обеспечить интенсивности света до $10^8 - 10^{11}$ Вт/см², что в $10^9 - 10^{10}$ раз выше, чем интенсивностей достигаемых обычными источниками. Эксперименты с такими плотностями потока световых волн привели к открытию новых черт у уже известных оптических явлений, например в рассеянии света на внутримолекулярных колебаниях (комбинационное рассеяние), и в рассеянии света на акустических волнах (рассеяние Мандельштама-Бриллюэна). Однако самое главное, эти эксперименты обнаружили целый ряд совершенно новых оптических явлений не известных ранее в «долазерной» оптике – это генерация суммарных и разностных частот в оптическом диапазоне

(синонимы: параметрическое преобразование частоты вверх или вниз, ап- или даун-конверсия), самофокусировка и самодифракция света, просветление или затемнение оптической среды и др.

Оптические эффекты, характер которых зависит от интенсивности излучения, называются *нелинейными*, а область оптики, изучающую такие явления, - оптику мощных световых потоков, называют *нелинейной оптикой*. Оптику же слабых световых потоков, в которой уровень интенсивностей несущественен, называют *линейной оптикой*.

Практическим результатом исследований генерации суммарных частот явилось создание высокоэффективных (с КПД более 50%) удвоителей частоты лазерного излучения и каскадных умножителей на третью, четвертую, пятую и более высокие гармоники, которые находят широкое применение в самых разных областях науки и техники.

Целью данной лабораторной работы является ознакомление с физическими основами этих процессов.

2.2 Нелинейная поляризация

Эффект генерации суммарных частот заключается в том, что при поступлении в среду излучений на частотах ω_1 и ω_2 на выходе возникает электромагнитная волна с частотой ω_3 .

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 \quad (2.2)$$

Если $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, т.е. в среду поступает волны одной частоты, то излучение на суммарной частоте является их второй гармоникой

$$\omega + \omega = 2\omega \quad (2.3)$$

Рассмотрим причину появления этого эффекта. Взаимодействие световой волны с веществом на классическом языке описывается вектором поляризации \mathbf{P} . Эта поляризация, вообще говоря, является некоторой функцией $\mathbf{P} = f(\mathbf{E})$ напряженности электрического поля \mathbf{E} световой волны. В приближении соответствующем области линейной оптики поляризация связана с напряженностью поля \mathbf{E} линейно

$$\mathbf{P} = \kappa \mathbf{E} \quad (2.4)$$

Такое приближение достаточно хорошо работает для не очень высоких значений \mathbf{E} , т.е. для интенсивностей обеспечиваемых обычными, не лазерными источниками света даже самыми мощными. При воздействии на среду лазерного излучения с достаточно высокой плотностью потока соотношение (4) может уже не выполняться. Если отличие связи поляризации \mathbf{P} и поля \mathbf{E} от линейной не слишком велико (а именно так обстоит дело даже в сильных лазерных полях), то функцию $\mathbf{P} = f(\mathbf{E})$ можно представить в виде ряда

$$\mathbf{P} = \kappa \mathbf{E} + \chi \mathbf{E}\mathbf{E} + \vartheta \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \quad (2.5)$$

Первый член его является линейной, а остальные - нелинейной составляющей поляризации. Отношение каждого последующего члена ряда к предыдущему $\sim 1/E_{\text{ампл}}$, т.е. последующие члены ряда быстро

уменьшаются. Переход от линейной связи $P = \kappa E$ к нелинейной заставляет пересмотреть все основные аспекты взаимодействия светового излучения с веществом. Величину χ и ϑ называют эффективной нелинейной поляризуемостью среды.

Появление второй гармоники связано с квадратичным членом $\chi E E$ в разложении (5) поляризации \mathbf{P} по степеням электрического поля световой волны. Если в среду входит гармоническая световая волна вида $E = A \cos(\omega t - kz)$, то в силу (5) переизлученное поле в среде будет содержать не только частоту ω , но и ее гармоники на частотах 2ω , 3ω и т.д.. Действительно, второй член ряда (5) можно представить в виде

$$\chi E^2 = 0,5\chi A^2 + 0,5\chi A^2 \cos 2(\omega t - kz) \quad (2.6)$$

Второй член в выражении (6) описывает переизлученное электроном поле на частоте 2ω второй гармоники падающей волны. Величину χ называют квадратичной нелинейной поляризуемостью вещества. Необходимым условием генерации второй гармоники (ГВГ) является отличие χ от нуля.

2.3 Условие фазового синхронизма

Генерация излучения на суммарной (или разностной) частоте происходит наиболее эффективно, если волна с частотой ω_3 , приходящая к данному элементу объема от предшествующих элементов, находится в нужной фазе с излучением на этой же частоте, которое порождается в этом элементе объема. Интенсивность генерации в таком случае возрастает на несколько порядков, поскольку ее накопление происходит по всей длине нелинейной среды. Такое благоприятное соотношение фаз реализуется, если для волновых векторов выполняется равенство

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 \quad (2.7)$$

Выражение (7) называют *условием фазового (волнового, пространственного) синхронизма*.

Легко заметить, что для взаимодействующих квантов уравнения (2.1) и (2.7) означают выполнение законов сохранения энергии $E = \hbar\omega$ и импульса $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$.

Условие фазового синхронизма может выполняться для волн с различными поляризациями при определенных направлениях распространения их в анизотропных кристаллах. Возникновение его удобно иллюстрировать при помощи поверхностей волновых векторов в отрицательном одноосном кристалле (практически наиболее важный случай).

В случае генерации гармоник обычно применяют этот вид синхронизма, причем в некоторых кристаллах возможно при определенных условиях реализовать синхронизм в направлении $\theta_1 = 90^\circ$,

который в этой геометрии уже будет являться касательным и поэтому менее зависящим от угловых расстройек кристалла, расходимости лазерных пучков и т.д.

Кроме генерации гармоник параметрическое преобразование частот $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ применяется для детектирования инфракрасного ИК излучения. Например, в нелинейном кристалле ИК сигнал с частотой ω_2 можно смешать со вспомогательным излучением видимого диапазона ω_1 , которое обычно называют *накачкой*, при этом волна на суммарной частоте ω_3 также принадлежит видимой области спектра. Она может быть отфильтрована от накачки и сигнала и зарегистрирована обычными приемниками и анализаторами видимого диапазона, которые имеют значительные преимущества перед их аналогами в ИК области. При наложении некоторых, не очень жестких, ограничений на качество излучения накачки (расходимость, монохроматичность), излучение на суммарной частоте сохраняет информацию заложенную в пространственно-угловой, спектральной и временной структуре сигнала, т.е. возможно создание ИК визиров, спектрометров и фотохронографов с предельными параметрами лучших приборов видимой области спектра.

2.4 Генерация второй оптической гармоники (ГВГ)

Как уже упоминалось, ГВГ есть частный случай для взаимодействия вида (2) когда $\omega_1 = \omega_2 = \omega$.

Условие критичного коллинеарного синхронизма можно записать так

$$k_{\omega} + k_{\omega} = k_{2\omega}, \quad (2.8)$$

где $k_{\omega, 2\omega}$ – есть модули векторов $k_{\omega, 2\omega}$. Величина k называется волновым числом. Если волна распространяется в среде с показателем преломления n , то $k = 2\pi n / \lambda$. Учитывая это из (8) получим $n_{\omega} + n_{\omega} = 2n_{2\omega}$, т.е. для выполнения синхронизма при ГВГ необходимо чтобы в нелинейной среде

$$n_{\omega} = n_{2\omega} \quad (2.9)$$

В некоторых оптически анизотропных кристаллах можно выбрать такое направление распространения, для которого показатель преломления, например для обыкновенного луча основной частоты, равен показателю преломления необыкновенного луча второй гармоники.

Интенсивность излучения второй гармоники при точной настройке на синхронизм пропорциональна квадрату интенсивности основной частоты и квадрату длины нелинейного кристалла

$$I_{2\omega} = k (I_{\omega})^2 l^2 \quad (2.10)$$

Коэффициент $k = k(\chi, \omega_i, n_i)$ характеризует «качество» нелинейного оптического кристалла. Он зависит от эффективной нелинейной поляризуемости среды χ (см. разложение (5)), от частот взаимодействующих волн ω_i , от показателей преломления среды n_i и т.д.

2.5 Нелинейные материалы и экспериментальная установка

В лабораторной работе применяется нелинейный оптический кристалл – ниобат лития LiNbO_3 , одноосный, отрицательный кристалл. Класс симметрии $3m$. Диапазон прозрачности 0,4–5 мкм. Этот кристалл выращивают методом вытягивания из расплава, он стоек к влаге. Ниобат лития обладает высокой лучевой прочностью.

В качестве генератора основного излучения в работе используется импульсный твердотельный лазер на кристалле иттрий-алюминиевого граната легированного неодимом ($\text{YAG} : \text{Nd}^{3+}$). Источником лазерного излучения являются ионы неодима. Длина волны 1,064 мкм – это ближний инфракрасный (ИК) диапазон спектра, длительность импульса генерации 10 нс. Излучение имеет линейную поляризацию в горизонтальной плоскости. Гранатовый лазер может работать с частотой повторения импульсов до 200 Гц.

ВНИМАНИЕ. Прямое и зеркально отраженное излучение лазера и его гармоник представляет опасность для зрения! Включать лазер разрешается только в присутствии и по указанию преподавателя!

2.6 Контрольные вопросы

1. Объясните эффект генерации второй гармоники.
2. Как зависит интенсивность второй гармоники от расстояния?
3. Что такое угол синхронизма?

3 Экспериментальная часть

3.1 Включение лазера и изменение параметров излучения накачки

1. Для того чтобы включить лазер, поверните ключ на передней панели блока питания в положение «ON». Светодиодный индикатор мощности «OUTPUT ENERGY, μJ » должен сразу засветиться. После того, как температура лазерных диодов стабилизируется, загорится индикатор «READY». При первом запуске или после долгого перерыва для более стабильной работы блока питания рекомендуется подождать ~10 минут после того, как загорелся индикатор «READY».

2. После этого нажмите кнопку включения накачки. Светодиодный индикатор «PUMPING ON/OFF» над кнопкой начнет мигать. После 5-10 секунд индикатор засветится непрерывно, показывая, что ток накачки лазерных диодов вышел на режим.

3. Теперь лазер готов и энергия импульса излучения показана на цифровом индикаторе «OUTPUT ENERGY, μJ » на передней панели. Далее необходимо дождаться пока стабилизируется выходная мощность (значения на дисплее не должны меняться, может занять порядка 10 минут).

Кнопками на лицевой панели «Display mode selector switch» можно выбирать параметр, который будет отображаться на дисплее: средняя выходная мощность «mW», энергию в импульсе « μJ », частота повторения лазерных импульсов «kHz».

Используя кнопки «Increase/Decrease parameter value regulator» можно устанавливать параметры лазерного излучения, которые в данный момент индицируются - мощность, энергия или частота.

Диапазон частот, который следует использовать для лабораторной работы, составляет: 0.35 кГц - 10 кГц.

3.2 Задание на работу

1. Изучить генерацию второй гармоники в кристалле LiNbO_3 при накачке с длиной волны 1064 нм с помощью твердотельного импульсного лазера LCS-DTL-324QT.

2. Измерить зависимости мощности второй гармоники от углового положения кристалла относительно направления распространения пучка накачки.

3.3 Методические указания по выполнению работы

1. Включите осциллограф и подключите к нему фотодиод. Выставьте на блоке управления лазером частоту излучения, равную 0,35 кГц. Вращая кристалл, добейтесь максимальной генерации второй гармоники по данным фотодиода (грубая настройка). Зафиксируйте вертикальный угол. За начало отсчета в горизонтальной плоскости принять угол равный 182 градусам на столике, т.к. при этом положении входная грань кристалла перпендикулярна излучению лазера. Не забывайте прерываться после каждого опыта на 1-2 минуты и закрывать кристалл от излучения, для того чтобы кристалл не нагревался.

2. Измерьте зависимость мощности второй гармоники от горизонтального угла поворота кристалла. Построить эту зависимость. Повторите снятие зависимости для пяти частот излучения (0,35; 1; 3; 6 и 10 кГц).

3. По завершению работы выключение лазера должно производиться следующим образом. Нажмите кнопку выключения накачки «PUMPING ON/OFF». Дождитесь пока светодиодный индикатор над кнопкой погаснет. Только затем поверните ключ в положение «OFF».

3.4 Содержание отчета

3.4.1. При составлении отчета необходимо руководствоваться общими требованиями и правилами оформления отчета о лабораторной работе

3.4.2. В соответствующих разделах отчета необходимо представить:

- 1) задание;
- 2) таблицы экспериментальных данных;
- 5) результаты расчетов, предусмотренных заданием;
- 6) выводы.

Список рекомендуемой литературы

1. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики: Пер. с англ./Под ред. С.А. Ахманова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., - 1989.-560 с.
2. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика. 2 изд., . - М.: Физматлит, 2004, 512 с.
3. Гурздян Г.Г., Дмитриев В.Г., Никогосян Д.Н. Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике: Справочник. -М.: Радио и связь, 1991.— 160 с.

Учебное пособие

Шандаров С.М., Миссаль В.В., Акрестина А.С.

Генерация второй гармоники лазерного излучения

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Введение в фотонику и оптоинформатику»

Усл. печ. л. _____ Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40