

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра квантовой электроники

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В РЕЗОНАНСНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

Курсовая работа
студена 214 группы
Кудряшова А. Д.

Научный руководитель:
н.с., к.ф.-м.н.
Зубюк(Комарова) В. В.

Оглавление

Введение	2
Глава I	
Обзор литературы	3
1. Общие понятия линейной и нелинейной оптики. Нелинейная поляризация	3
1.1. Материальное уравнение линейной среды.	3
1.2. Материальное уравнение нелинейной среды.	3
1.3. Нелинейная поляризация.	4
2. Оптический резонанс полупроводниковых наноструктур.	5
3. Основные процессы и эффекты нелинейной оптики	5
4. Эффекты, связанные с поляризацией второго порядка	5
4.1. Возбуждение второй гармоники с использованием нарушенной симметрии III - V полупроводниковых метаповерхностей Фано	5
5. Эффекты, связанные с поляризацией третьего порядка	5
5.1. Усиленная генерация третьей гармоники в наночастицах кремния, обусловленная магнитным откликом	5
6. Использование диэлектрических метаповерхностей как широкополосный оптический частотный смеситель	5
Глава II	
Оригинальная часть	6
1. Возбуждение квазиволновой моды периодической нанотрутуры из германия.	6
Заключение	7

Введение

В настоящее время нелинейная оптика является динамично развивающейся областью физики, которая помимо чисто теоретической системы знаний приобрела также существенную практическую составляющую, что позволило решить ряд важных прикладных и инженерных задач. Исследования нелинейных оптических процессов дали много приложений в физике и математике, способствовали развитию лазерной техники, спектроскопии, оптоволоконных линий связи, фотоники и оптоинформатики, а также нашли многочисленные применения в таких отраслях, как экология и медицина.

Методы нелинейной оптики проникают во все традиционные разделы оптики и лежат в основе ряда её новых направлений (нелинейное вращение плоскости поляризации, нелинейная дифракция, нелинейная магнитооптика, и т.п.). С ростом интенсивности светового поля обнаруживаются всё новые и новые нелинейные процессы.

Надо отметить, что сам термин «нелинейная оптика» впервые был предложен советским физиком С.И. Вавиловым еще в 20-х гг. XX в. Представления о том, что законы линейной оптики носят приближенный характер и применимы лишь для не слишком сильных световых полей, существовали и до появления лазеров. Однако лишь с развитием квантовой электроники обнаруженные в эксперименте новые закономерности совместно с их теоретической интерпретацией дали ученым инструмент для полноценного исследования нелинейных процессов в оптическом диапазоне частот.

Нелинейная оптика - это раздел физики, который изучает явления взаимодействия света, и вещества, которые протекают по-разному в зависимости от интенсивности света. В этом разделе физики рассматриваются вещества, у которых имеется нелинейная зависимость вектора поляризации от вектора напряженности электрического поля световой волны. Для большинства веществ такая нелинейность может наблюдаться лишь при очень высоких интенсивностях света. Такие интенсивности достигаются при помощи лазеров. Взаимодействие или процесс называются линейными, если их вероятность пропорциональна первой степени интенсивности излучения. Если же эта, степень больше единицы, они называются нелинейными.

В данной работе будут изложены основные понятия нелинейной оптики, нелинейные эффекты в резонансных полупроводниковых структурах. Будут описаны последние открытия в этой области, такие как: возбуждение различных гармоник с использованием нарушенной симметрии III-V полупроводниковых метаповерхностей Фано, генерация гармоник с использованием кремниевых нанодисков, использование диэлектрических метаповерхностей в качестве широкополосного оптического частотного смесителя и другие явления. Так-же, будут приведены результаты моделирования эксперимента, по линейному отклику периодической наноструктуры из Германия.

Глава I

Обзор литературы

1. Общие понятия линейной и нелинейной оптики. Нелинейная поляризация

1.1. Материальное уравнение линейной среды.

В основе взаимодействия света со средой лежит элементарный процесс возбуждения атома или молекулы вещества световым полем и последующего переизлучения света возбужденной частицей. Характер этого взаимодействия зависит от соотношения между величиной напряженности поля световой волны E и характерной напряженностью внутриатомного поля E_{atom} , определяющего силы связи оптических электронов (т.е. внешних, наиболее слабо связанных электронов) с ядром атома вещества.

Для атома водорода это поле составляет $E_{atom} = e/(4\pi\epsilon_0 r_h^2) = 5 \cdot 10^{11}$ В/м, для более тяжелых атомов $E_{atom} = 10^{10} \dots 10^{11}$ В/м. Оценка поля E световой волны в случае нелазерных источников свет дает величину $E \leq 10^3$ В/м, т.е. $E \ll E_{atom}$. При этом условии отклик атомного осциллятора на внешнее воздействие будет иметь линейный характер, а зависимость поляризованности $P = P(E)$ в случае изотропной среды может быть представлена в виде:

$$P(E) = \chi^{(1)} E \quad (1)$$

где $\chi^{(1)}$ – линейная восприимчивость среды, являющаяся безразмерной величиной и зависящая только от свойств среды. Материальное уравнение (1) является одним из соотношений, на которых базируется линейная оптика. Оно справедливо только при условии $E \ll E_{atom}$, а при невыполнении этого условия является лишь некоторым приближением. В мощных лазерных пучках можно получить напряженности уже сравнимые с E_{atom} . В случае когда поле E , оставаясь меньше E_{atom} , приближается к нему по величине, поляризованность среды $P = P(E)$ перестает быть линейной функцией поля E , и в этом случае материальное уравнение (1) должно быть заменено на другое.

1.2. Материальное уравнение нелинейной среды.

Теория нелинейно-оптических явлений строится на основе материальных уравнений и уравнений Максвелла. Уравнения Максвелла для диэлектрической нейтральной немагнитной среды имеют вид

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \text{rot} \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{div} \vec{H} = 0 \quad (2)$$

где $\vec{D} = \vec{E} + 4\pi \vec{P}$. Из уравнений Максвелла вытекает волновое уравнение

$$\text{rot}(\text{rot} \vec{E}) + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} \quad (3)$$

которе в случае изотропной среды принимает вид

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} \quad (4)$$

где \vec{E} - напряженность электрического поля, а \vec{P} - поляризация среды. Поляризация среды возникает под действием падающей световой волны и описывается материальным уравнением $\vec{P} = \vec{P}(\vec{E})$. В анизотропном случае $\vec{P}(\vec{E})$ является тензорной величиной и может быть представлена в виде:

$$P(E) = \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 \chi^{(3)} E^3 \dots \quad (5)$$

Коэффициенты χ^m , $m \geq 2$ при членах разложения называются нелинейными восприимчивостями m -го порядка и являются уже размерными величинами. При этом соответствующая величина χ^m пропорциональна концентрации атомов (молекул) в веществе и m -ой степени параметра. Это означает, что отклик среды на действие внешнего светового поля перестает быть линейным. С математической точки зрения именно это обстоятельство (нелинейность материального уравнения) является причиной нарушения принципа суперпозиции для световых волн в нелинейной среде. Из уравнений (3), (4) и (5) непосредственно вытекает возможность генерации оптических гармоник и других нелинейно-оптических эффектов.

1.3. Нелинейная поляризация.

Часть поляризации среды, нелинейно зависящая от напряженности светового поля, называется нелинейной поляризацией. Выделяя в поляризации среды линейную и нелинейную компоненты, можно записать:

$$\vec{P} = \vec{P}_{linear} + \vec{P}_{nonlinear} \quad (6)$$

подставив уравнение (6) в (3) получим волновое уравнение для анизотропной среды и нелинейной изотропной среды:

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{P}_{linear}}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{P}_{nonlinear}}{\partial t^2} \quad (7)$$

Нелинейная поляризация среды является источником новых спектральных компонент поля (оптических гармоник, комбинационных частот и т. п.). Материальное уравнение вида (4), описывает изотропную нелинейную среду с безынерционным локальным откликом на световое поле. Аналогичное уравнение для анизотропной нелинейной диспергирующей среды имеет уже интегральный вид, причем коэффициенты восприимчивости, входящие в данное уравнение, уже зависят от времени и координаты следующим образом:

$$\chi_{\alpha\beta} = \chi_{\alpha\beta}(\tau; \vec{r}), \quad \chi_{\alpha\beta\gamma}^{(2)} = \chi_{\alpha\beta\gamma}(\tau_1, \tau_2; \vec{r}_1, \vec{r}_2), \quad \chi_{\alpha\beta\gamma\delta}^{(3)} = \chi_{\alpha\beta\gamma\delta}(\tau_1, \tau_2, \tau_3; \vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3) \dots \quad (8)$$

Здесь индексы $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ пробегают значения, нумерующие декартовы оси координат. Учет нелокальности важен в тех случаях, когда элементарные осцилляторы среды, расположенные в различных точках пространства, связаны и взаимодействуют между собой. Среда, обладающая таким свойством, называют средами с пространственной дисперсией. К их числу относятся некоторые типы кристаллов, а также плазма.

2. Оптический резонанс полупроводниковых наноструктур**3. Основные процессы и эффекты нелинейной оптики****4. Эффекты, связанные с поляризацией второго порядка**

4.1. Возбуждение второй гармоники с использованием нарушенной симметрии III - V полупроводниковых метаповерхностей Фано

5. Эффекты, связанные с поляризацией третьего порядка

5.1. Усиленная генерация третьей гармоники в наночастицах кремния, обусловленная магнитным откликом

6. Использование диэлектрических метаповерхностей как широкополосный оптический частотный смеситель

Глава II

Оригинальная часть

1. Возбуждение квазиволновой моды периодической наноструктуры из германия

Заклучение