

ՆՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՆԱՄԱԿԱՐԱՆ

ԴԻԱՆԱ ԱԼԻԿԻ ԱՆՏՈՆՈՍՅԱՆ

**ՈՉ ԴԱՍԱԿԱՆ ԼՈՒՅՄԻ ԳԵՆԵՐԱՑՈՒՄԸ ԳԵՐՑԱՆՅԵՐՈՒՄ ԵՎ ՃՈՏՈՆԱՅԻՆ
ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ**

Ա.04.21 – “Լազերային ֆիզիկա” մասնագիտությամբ ֆիզիկա-մաթեմատիկական
գիտությունների թեկնածուի
գիտական ասպիճանի հայցման արեւախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ - 2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Диана Александровна Антоносян

**ГЕНЕРАЦИЯ НЕКЛАССИЧЕСКОГО СВЕТА В
СВЕРХРЕШЕТКАХ И ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.04.21 – “Лазерная Физика”

ЕРЕВАН - 2013

Արենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:

Գիտական ղեկավար՝

ՆՆ ԳԱԱ թղթակից անդամ,
ֆիզ-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆ.
Գ. Յու. Կրյուչկյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

ֆիզ-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆ.
Յու. Ն. Ավետիսյան
ֆիզ-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆ.
Գ. Գ. Ղեմիրխանյան

Առաջադար կազմակերպություն՝

Նայ-Ռուսական (Սլավոնական)
Նամալսարան

Պաշտպանությունը կկայանա 2013թ. հունիսի 15-ին ժ. 11⁰⁰-ին Երևանի պետական համալսարանում
ֆիզիկայի 049 մասնագիտական խորհրդի նիստում: Նասցեն՝ 0025, Երևան, Ալեք Մանուկյան 1:

Արենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՏ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքվել է 2013թ. մայիսի 14-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,

ֆիզ-մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ

Վ. Պ. Բալանթարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

Научный руководитель:

член-корреспондент НАН РА,
доктор физико-математических наук,
профессор
Г. Ю. Крючкян

Официальные оппоненты:

доктор физ-мат. наук, профессор
Ю. О. Аветисян
доктор физ-мат. наук, профессор
Г. Г. Демирханян

Ведущая организация:

Российско-Армянский (Славянский)
Университет

Защита диссертации состоится 15 июня 2013г. в 11⁰⁰ на заседании специализированного совета по физике 049 Ереванского государственного университета по адресу 0025, г. Ереван, ул. Ал. Манукяна 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 14-го мая 2013г.

Ученый секретарь специализированного совета,

кандидат физ-мат. наук, доцент

В. П. Калантарян

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Тема диссертационной работы выбрана на стыке двух направлений физики, которые в последнее время интенсивно развиваются, как с точки зрения фундаментальной науки, так и для многообразных приложений. Одно из этих направлений связано с исследованием квантово-электродинамических эффектов в оптике и лазерной физике, другое направление связано с развитием новых оптически нелинейных материалов. Область квантовой оптики получила интенсивное развитие в конце двадцатого века, когда были теоретически изучены и далее экспериментально обнаружены, так называемые, неклассические состояния света, в том числе суперпозиционные состояния, сжатые состояния электромагнитного (Э.М.) поля, света с субпуассоновской статистикой фотонов, квантовые перепутанные состояния света или состояния Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР) [1]. К настоящему времени получены интересные приложения неклассических состояний в сверхточных измерениях, метрологии и спектроскопии, а также для проблем квантовых коммуникаций. Было показано, что наиболее эффективным источником фотонов в перепутанных состояниях, реализованным в лабораторных условиях, является процесс спонтанного преобразования вниз фотонов поля накачки в нелинейной среде с восприимчивостью второго порядка $\chi^{(2)}$. Этот и другие многочисленные примеры показывают, что развитие области неклассических состояний света и квантовых технологий, в настоящее время, в основном, связано с развитием области новых нелинейных материалов и реализации нелинейно-оптических преобразований световых пучков.

В диссертации детально развиты новые теоретические подходы и методы исследования структурированных $\chi^{(2)}$ - нелинейных сверхрешеток конечного размера для реализации параметрических фотонных процессов. Также, настоящая диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию нелинейно-оптических параметрических процессов, которые, в частности, приводят к получению много-фотонных перепутанных состояний в микро-структурированных нелинейных материалах второго порядка.

Параметрические процессы основаны на взаимодействии э.м. волн с различными частотами, которые требуют удовлетворения специальных связей между волновыми векторами волн, так называемых условия фазового синхронизма. Такие процессы обычно реализуются в двулучепреломляющих кристаллах, а также в микроструктурированных кристаллах, в которых имеет место квази-фазовый синхронизм (КФС) [2]. К настоящему времени, метод КФС является наиболее универсальным для эффективной реализации различных фотонных процессов: параметрического рассеяния, генерации высоких гармоник, четверо-волнового смещения и др..

Недавние достижения в КФС технологиях, основанных на нелинейных фотонных кристаллах с пространственно-модулированной восприимчивостью ($\chi^{(2)}$), вызвали также большой интерес к исследованию каскадных параметрических процессов. В частности, удалось на эксперименте осуществить расщепление фотона на три других фотона в каскадных процессах преобразования вниз [IV]. Существует точка зрения, что развитие этого направления будет существенным для разработки практических

схем для квантовых коммуникаций [2]. В этом направлении в диссертации приведены результаты по инжинирингованию трех-фотонных состояний с заданными спектральными свойствами в параметрических каскадных процессах. С этой целью используются, так-называемые, сверхрешетки с нелинейными и линейными элементами.

Другая цель диссертации состоит в более детальном, чем раньше, теоретическом описании нелинейных составных материалов и фотонных кристаллов на основе различных слоистых систем с конечными длинами. Таким образом, в диссертации рассмотрены нелинейные фотонные кристаллы с различными конфигурациями структур конечных размеров для реализации одновременного КФС двух и более волновых процессов. В частности, для реализации параметрических процессов преобразования вниз, рассматриваются нерегулярно-структурированные материалы с нелинейными и с линейными доменами, а также периодически-поляризованные нелинейные кристаллы с радиальной симметрией.

Целью диссертационной работы является:

- Развитие новых теоретических подходов и методов исследования структурированных $\chi^{(2)}$ - нелинейных сверхрешеток конечного размера для реализации параметрических фотонных процессов.
- Развитие квантовой теории генерации трех-фотонных и четырех- фотонных состояний в параметрических каскадных процессах, основанных на одномерных структурированных нелинейных материалах, включая периодически-поляризованные кристаллы и фотонные кристаллы.
- Исследование сжатых двух-фотонных состояний и поляризационно-перепутанных трех-фотонных состояний в структурированных $\chi^{(2)}$ нелинейных кристаллах.
- Инженерия трех-фотонных состояний с заданными спектральными свойствами в параметрических каскадных процессах в сверхрешетках с нелинейными и линейными элементами, основанная на компенсации дисперсий электромагнитных световых волн.
- Исследование параметрического преобразования вниз в беспорядочно- структурированных материалах с нелинейными и с линейными элементами.
- Исследование параметрического преобразования вниз в периодически-поляризованных нелинейных кристаллах с радиальной симметрией.

Научная новизна:

- Предложен новый подход для реализации одновременного квази-фазового синхронизма в двух параметрических каскадных процессах с фотонами, основанный на рассмотрении сверхрешеток конечных длин с нелинейными и линейными сегментами в приложении к лазерной физике и фотонике.

- Впервые развита квантовая теория генерации трех-фотонных состояний с контролируруемыми спектральными характеристиками для проблем квантовой оптики и квантовых коммуникаций.
- Впервые показано каким образом можно факторизовать триплет фотонов к одному фотону и дублету коррелированных фотонов, вследствие компенсации дисперсий э.м. волн в сверхрешетке. Этот метод предлагается для экспериментального метода неразрушающих измерений для регистрации фотонных пар в приложении к квантовым коммуникациям.
- Впервые разработаны фазово-инвертированные структуры, как сверхрешетки с конечным числом сегментов с положительными и отрицательными восприимчивостями второго порядка для одновременного квази-фазового синхронизма двух параметрических каскадных процессов с фотонами в приложении к проблемам квантовой оптики.

Практическая ценность:

Результаты, полученные в диссертации в области генерации и инженерии неклассических состояний с тремя и четырьмя фотонами, в том числе поляризационно-перепутанных трех-фотонных состояний, могут быть непосредственно использованы для постановки новых экспериментов в области квантовой оптики и квантовых информационных технологий. Результаты факторизации трех-фотонных состояний могут быть использованы для развития экспериментального метода неразрушающих измерений для регистрации фотонных пар. Новые подходы и методы приведенные в диссертации в области нелинейных материалов могут быть использованы для разработки новых структурированных нелинейных материалов для фотоники, коммуникаций и разработки новых лазерных систем.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Новый подход исследования структурированных нелинейных материалов и фотонных кристаллов, основанный на рассмотрении сверхрешеток конечных длин с нелинейными (второго порядка) и линейными сегментами.
- Квантовая теория генерации трех-фотонных и четырех-фотонных состояний в параметрических каскадных процессах, основанная на одномерных сверхрешетках конечных длин с нелинейными и линейными сегментами.
- Методы инженерии фотонных триплетов с заданными спектральными свойствами, в частности, результаты по редукции триплета коррелированных фотонов к одному фотону и дублету коррелированных фотонов, вследствие компенсации дисперсий э.м. волн распространяющихся в сверхрешетке.
- Результаты вычислений параметрического преобразования вниз в беспорядочно-структурированных материалах, а также в периодически-поляризованных нелинейных кристаллах с радиальной симметрией.

Апробация полученных результатов. Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях «Quantum Physics and Communication-2007», Dubna, Russia, «Mathematical Modeling and Computational Physics-2009», Dubna, Russia, «Modern Problems in Optics and Photonics-2009», Yerevan, Armenia, «Nonlinear Optics-2010», Karlsruhe, Germany, «Laser Physics 2010», Ashtarak, Armenia, «Photonics in Micro- and Nano-Materials-2011», Yerevan, Armenia, «IONS-10-2011», Southampton, UK.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 106 страницах и состоит из введения, четырех глав, содержащих 11 параграфов, и списка литературы, содержащей 160 наименований.

Содержание работы

В введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследования, ее научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

Содержание главы 1. В главе 1 представлены общие понятия о реализации многофотонных процессов в χ^2 нелинейных материалах. В этой главе рассматриваются коллинеарные одномерные структуры.

В параграфе 1.1 представлены много-волновые взаимодействия в нелинейных материалах. Одним из простейших много-фотонных взаимодействий является трех-волновое взаимодействие. Гамильтониан трех-волнового взаимодействия пишется в виде:

$$H(t) = S \sum_{\alpha, \beta, \gamma} \int_0^L dz \chi_{\alpha, \beta, \gamma}^{(2)}(z) E_{L\alpha}^+(z, t) E_{\beta}^-(z, t) E_{\gamma}^-(z, t) + h.c., \quad (1)$$

где, $\chi_{\alpha, \beta, \gamma}^{(2)}(z)$ нелинейная восприимчивость второго порядка одномерной среды с длиной L . Оператор поля $E_{L, \alpha}(z, t)$ - соответствует полю накачки, $E_{j, \alpha}^{(\pm)}(z, t)$ - субгармоники ($j = 1, 2$), соответственно, для операторов электрического поля с положительной и отрицательной частотой, α - поляризационное состояние электромагнитного поля. В этом параграфе приведены выражения для операторов взаимодействующих полей.

В параграфе 1.2 исследовано трех-фотонное состояние во втором приближении теории возмущений в форме Дайсона. Доказано, что отличие в рядах Дайсона и Тейлора во втором приближении представляет из себя лишь вклад вакуумного состояния второго-порядка.

Содержание главы 2. В этой главе представлены результаты исследования параметрических процессов, в частности, процесса спонтанного параметрического преобразования вниз (СППВ) в нелинейных периодически поляризованных одномерных структурах [V].

В параграфе 2.1 рассматривается трех-волновое взаимодействие в структурированных сложных средах. Рассматриваемая система состоит из среды со слоями с различными коэффициентами нелинейности и индексами преломления (см. Рис. 1) и

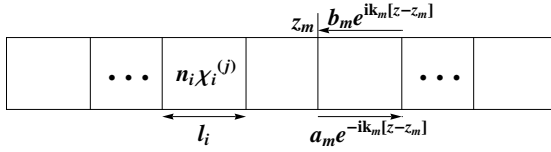


Рис. 1: Схема структурированной среды, $\chi_i^{(j)}$ коэффициент нелинейности j -порядка ($j = 1, 2$) в i -ом слое, l_i длина, а n_i индекс преломления в i -ом слое.

трех взаимодействующих полей, которые нормальны к каждой поверхности разделения слоев. Поле в каждом слое может быть представлено, как суперпозиция плоских волн, распространяющихся вперед и назад. В таком случае Гамильтониан взаимодействия может быть представлен, как сумма взаимодействий в каждом слое в исчислении электромагнитных волн в n -ом слое, $E_{pn}(z, t)$, $E_{in}^{(-)}(z, t)$

$$H^-(t) = \sum_n \int_{z_n}^{z_{n+1}} dz \chi^{(2)}(z) E_{pn}^*(z, t) E_{1n}^{(-)}(z, t) E_{2n}^{(-)}(z, t). \quad (2)$$

Здесь предполагается, что поле накачки E_{pn} имеет классический вид, а два поля субгармоник квантованы. В рамках теории возмущений двух-фотонная амплитуда излучения субгармоник с частотами ω_1 и ω_2 вычитается в виде:

$$\Phi(\omega_1, \omega_2) = \frac{-2\pi i}{\hbar} E_0(\omega_1 + \omega_2) \alpha_{11} \alpha_{21} \xi(\Delta k), \quad (3)$$

где $E_0(\omega_1 + \omega_2)$ -амплитуда поля накачки, α_{jn} -описывает электрическое поле, распространяющееся вперед в n -ом слое, а функция эффективной нелинейности:

$$\xi(\Delta k) = \sum_m l_m \chi_m e^{-i(\varphi_m + \frac{\Delta k_m l_m}{2})} \text{sinc}\left(\frac{\Delta k_m l_m}{2}\right),$$

$$\varphi_m = \sum_n^{m-1} l_n \Delta k_n, \quad \varphi_1 = 0, \quad (4)$$

χ_m коэффициент нелинейности второго порядка в m -ом слое, l_m длина, а Δk_m - функция фазового синхронизма в m -ом слое.

В конце главы в этом параграфе рассмотрена схема трех-фотонного взаимодействия для конфигурации, в которой поле распространяется под углом по отношению к координате z , а взаимодействия в поляризационных базисах ТЕ и ТМ. Были получены соотношения между амплитудами соседствующих пластинок. Через эти соотношения были получены соотношения между соседствующими амплитудами одинаковых слоев.

В параграфе 2.2 детально исследован процесс преобразование-вниз в нелинейных периодически поляризованных структурах с линейными сегментами (см. Рис. 2). Так как система состоит из материалов двух типов, предполагается, что распространение и взаимодействие волн описывается двумя функциями фазового синхронизма:

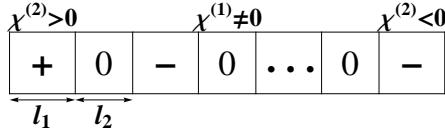


Рис. 2: Сверхрешетка, состоящая из $\frac{N}{2}$ сегментов, длиной l_1 с положительными χ и отрицательными $-\chi$ восприимчивостями нелинейности, которые разделяются $\frac{N}{2}$ линейно оптическими сегментами с длиной l_2 .

Δk и $\Delta \kappa$, соответственно, для нелинейных $n = 1, 3, 5, \dots$ и линейных $n = 2, 4, \dots$ слоев. В этом случае функция эффективного нелинейного взаимодействия вычисляется из выражения (4) в следующей форме

$$\xi(\Delta k, \Delta \kappa) = l_1 \chi e^{-i\phi} \operatorname{sinc}\left(\frac{l_1}{2}\Delta k\right) \frac{\sin\left(\frac{N(l_1+l_2)\Delta K}{4}\right)}{\sin\left(\frac{(l_1+l_2)\Delta K}{4}\right)}. \quad (5)$$

где $\Delta K = \bar{l}_1\Delta k + \bar{l}_2\Delta \kappa - q$, ΔK - функция фазового-синхронизма всей системы, $\phi = \frac{1}{2}l_1\Delta k + \frac{1}{2}\Delta K(l_1+l_2)(\frac{N}{2}+1)$. $L = \frac{N}{2}(l_1+l_2)$ - полная длина среды, $\bar{l}_i = \frac{l_i}{l_1+l_2}$, ($i = 1, 2$), $\bar{l}_1 + \bar{l}_2 = 1$ и $q = \frac{2\pi}{d}$ - постоянная обратной решетки волнового вектора, $d = 2(l_1+l_2)$.

Для исследования фазового-синхронизма всего ансамбля, $\Delta K = 0$, функции фазовых-синхронизмов нелинейных Δk и линейных $\Delta \kappa$ слоев представлены, как разложения Тейлора до второго порядка вокруг центральных частот $\omega_1 = \omega_2 = \frac{\omega_0}{2}$, $\Delta k = \Delta k^{(0)} + \delta k$, $\Delta \kappa = \Delta \kappa^{(0)} + \delta \kappa$, в предположении, что $\chi^{(2)}$ слои выстроены таким образом, что постоянный член разложения фазового синхронизма в нелинейных сегментах обращается в ноль $\Delta k^{(0)} = 0$. Таким образом, функция синхронизма всего ансамбля переписывается в виде: $\Delta K = \bar{l}_1\delta k + \bar{l}_2(\Delta \kappa^{(0)} + \delta \kappa) - q$. Условиями идеального фазового-синхронизма являются $\bar{l}_1\delta k = -\bar{l}_2\delta \kappa$ и $\bar{l}_2\Delta \kappa^{(0)} = q$, которые легко достижимы при выборе длин нелинейных и линейных слоев и рефрактивных индексов в линейных кристаллах.

В главе 2.2 вычислена двух-фотонная амплитуда СППВ из (3), для описанного выше фотонного кристалла, в Гауссовской форме [IX] $\Phi(\omega_1, \omega_2) = \sqrt{\frac{2N_{ph}}{\pi\Omega\sigma}} \exp\left\{-\frac{(\omega_1+\omega_2-\omega_0)^2}{2\sigma^2} - \frac{(\omega_1-\omega_2)^2}{2\Omega^2}\right\}$, где параметры Ω и σ определяют ширину двух-фотонного света и спектральные корреляции между фотонами в паре, соответственно, N_{ph} является средним числом фотонных пар. Показано, что присутствие линейных слоев может быть использовано для управления параметрами Ω и σ и, в частности, для достижения ситуации, в которой, в процессе преобразования вниз, два фотона спектрально независимы.

Содержание главы 3. В этой главе, исследованы квантовые свойства фотонных триплетов и четырех-фотонных состояний, полученных в каскадных процессах в $\chi^{(2)}$ структурах. Представлены два типа $\chi^{(2)}(z)$ нелинейных периодически поляризованных сверхрешеток: так называемые, фазово-инвертированные и двух-сегментные

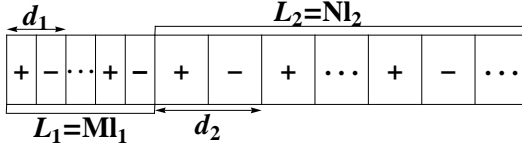


Рис. 3: Схема двух-сегментного кристалла. Первый сегмент с полной длиной L_1 состоит из доменов, длиной l_1 с коэффициентами нелинейной восприимчивости $\chi_+ > 0$ и $\chi_- < 0$ (период d_1 соответствует функции фазового-синхронизма Δk_1). Второй сегмент с полной длиной L_2 также состоит из доменов с $\chi_+ > 0$ и $\chi_- < 0$, но с длиной l_2 (период d_2 соответствует функции фазового-синхронизма Δk_2).

кристаллы, в которых можно одновременно эффективно синхронизовать два параметрических процесса. Конец главы посвящен исследованиям каскадного ОПО.

В параграфе 3.1 рассматривается генерация фотонов через каскадные процессы. В этом подходе Гамильтониан для трех-фотонного процесса состоит из элементарных $\chi^{(2)}$ взаимодействий, соответствующих процессам: $\omega_0 \rightarrow \omega_1 + \omega_2$ и $\omega_2 \rightarrow \omega'_1 + \omega''_1$, а трех-фотонное преобразование-вниз (ПВ) - $\omega_0 \rightarrow \omega_1 + \omega'_1 + \omega''_1$ (см.[3]). В случае вырожденного трех-фотонного преобразования-вниз $\omega_1 \simeq \omega'_1 \simeq \omega''_1 \simeq \frac{\omega_0}{3}$ максимум трех-фотонной амплитуды осуществляется в области резонанса $\omega_2 = \omega'_1 + \omega''_1 = \frac{2\omega_0}{3}$ и представляется в следующем виде:

$$\Phi(\omega_1, \omega'_1, \omega''_1) = E_L(\omega) \zeta(\omega, \omega_1, \omega'_1 + \omega''_1) \xi(\omega'_1, \omega''_1, \omega'_1 + \omega''_1). \quad (6)$$

Здесь, ζ и ξ эффективные константы связи нелинейности, которые являются Фурье образами $\chi^{(2)}(z)$:

$$\zeta(\omega_0, \omega_1, \omega_2) = \int_0^L dz \chi^{(2)}(z) e^{i\Delta k_1(z)z}, \quad (7)$$

$$\xi(\omega'_1, \omega''_1, \omega_2) = \int_0^L dz \chi^{(2)}(z) e^{i\Delta k_2(z)z}, \quad (8)$$

векторы фазового синхронизма определяются следующими выражениями: $k_1(z) = k_L(\omega_0, z) - k_1(\omega_1, z) - k_2(\omega_2, z)$, $k_2(z) = k_2(\omega_2, z) - k_1(\omega'_1, z) - k_1(\omega''_1, z)$, L - полная длина среды и N_2 -нормализованный множитель.

В параграфе 3.2 развита теория каскадной генерации фотонных триплетов, в частности, экспериментально полученных в [3]. Также рассматривается их применение для получения трех-фотонных перепутанных состояний.

Для получения таких состояний предложено использовать, так называемые, двух-сегментные сверхрешетки (см. Рис.(3)). Рассматривается процесс в котором, первый сегмент кристалла становится первичным источником процесса преобразования вниз, в котором под действием лазерных импульсов создаются фотонные пары. Один из этих фотонов приводит к вторичному процессу преобразования вниз во втором сегменте и генерируется новая фотонная пара. В результате двух процессов, генерируется

фотонный триплет. В этом параграфе были получены выражения для эффективных констант связи нелинейности ζ и ξ , согласно формуле (6) [IV].

В подразделе **3.2.2** главы 3 обсуждена генерация фотонных триплетов некоррелированных по частоте, по аналогии с схемой реализованной в эксперименте [3].

Заметим, что в типичных СППВ экспериментах частоты сигнальной и холостых мод коррелированы. Для частотно-некоррелированного подхода можно пренебречь зависимостями от частот в функциях фазовых-синхронизмов (7), (8), рассматривая их на фиксированных центральных частотах ω, ω_1 и ω_2 с незначительными расстройками $\Delta\omega \ll \omega, \Delta\omega_i \ll \omega_i, \Delta\omega_i \ll \omega_i$. В этом случае, эффективный Гамильтониан описывается в стандартном приближении через дискретные операторы рождения и уничтожения фотонов ω_1 и ω_2 : a^+, b^+ и a, b , которые подчиняются следующим коммутационным соотношениям: $[a, a^+] = 1, [b, b^+] = 1$, соответственно.

$$H = i\hbar(\zeta' E_0 b^+ a_1^+ - \zeta'^* E_0^* b a_1) + i\hbar(\xi' a_2^+ a_3^+ b - \xi'^* a_2 a_3 b^+). \quad (9)$$

Здесь, нижние индексы отмечают пространственные моды фотонов на частотах ω_1 , E_0 описывает амплитуду лазерного поля, ζ' и ξ' - нелинейные константы связи, которые, соответственно, совпадают с ζ и ξ для фиксированных частот $\omega, \omega_1, \omega_2$, с точностью до множителей нормировки.

В подглаве **3.2.3** приведены результаты приготовления поляризационно-перепутанных состояний. С этой целью модифицированы результаты, полученные для трех-волнового взаимодействия на случай, когда фотоны поляризованы. Включая в рассмотрение поляризационные состояния фотонов, предполагается, что процесс ПВ типа-II $\omega_0 \rightarrow \omega_1 + \omega_2$ создает пару фотонов с вертикальной V и горизонтальной H поляризациями. Если поле накачки ориентировано на 45° по отношению к горизонту, то два процесса $\omega_0 \rightarrow \omega_1(V) + \omega_2(H)$ и $\omega_0 \rightarrow \omega_1(H) + \omega_2(V)$ имеют место в первом сегменте двух-сегментного кристалла (см., Рис.(3)) с эффективной постоянной связи χ . Второй сегмент типа-I расположен таким образом, что следующие процессы $\omega_2(V) \rightarrow \omega_1(V) + \omega_2(V)$ и $\omega_2(H) \rightarrow \omega_1(H) + \omega_2(H)$ реализуются (постоянная связи k). Эффективный Гамильтониан имеет следующий вид:

$$H = i\hbar\chi E_0(a_1^+ b_2^+ + a_2^+ b_1^+) + i\hbar k(b_1(a_1^+)^2 + b_2(a_2^+)^2) + h.c.. \quad (10)$$

Здесь, a_1 и b_1 - операторы уничтожения фотонов с вертикальными поляризациями, а операторы a_2 и b_2 соответствуют горизонтально поляризованным фотонам, с частотами ω_1 и ω_2 , соответственно. Показано, что такой процесс приводит к получению поляризационно-перепутанных состояний трех фотонов на частоте $\omega_1 = \frac{\omega_0}{3}$.

В параграфе 3.3 исследована модифицированная многослойная структура из нелинейных второго порядка и линейных материалов: двух-сегментный нелинейный кристалл с линейными элементами (смотри, Рис. 4). Эти структуры представлены для разработки спектрально-контролируемых фотонных состояний. Предполагается, что эффективный процесс $\omega_0 \rightarrow \omega_1 + \omega_2$ протекает в первом сегменте, следовательно, условием КФС является $\Delta k_1 = q$ ($q = \frac{2\pi}{d_1}$). В результате ζ вычисляется в виде:

$$\zeta = l_1 \chi e^{-i\frac{L_1 \Delta k_1}{2}} \text{sinc}\left(\frac{l_1}{2} \Delta k_1\right) \frac{\sin\frac{M L_1}{2}(\Delta k_1 - q_1)}{\sin\frac{l_1}{2}(\Delta k_1 - q_1)}, \quad (11)$$

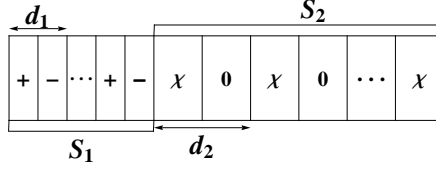


Рис. 4: Схема двух-сегментного кристалла с линейными вкладками. S_1 первый сегмент с полной длиной L_1 , который состоит из M нелинейных слоев, длиной l_1 , с чередующимися положительными и отрицательными коэффициентами нелинейности (соответствующая функция синхронизма обозначается через Δk_1 и период d_1). Вторым сегмент S_2 имеет полную длину L_2 , и включает в себя $\frac{N}{2}$ нелинейные слои, длиной l_2 и коэффициентом нелинейности χ , разделенные $\frac{N}{2}$ линейными дисперсионными оптическими вкладками, длиной l_3 (период d_2 , так как, во втором сегменте два типа слоев, то каждому типу соответствует своя функция фазового синхронизма Δk_2 и $\Delta \kappa$ для нелинейных и линейных слоев, соответственно).

Процесс $\omega_2 \rightarrow \omega_1 + \omega_1$ протекает во втором сегменте с следующими функциями фазового-синхронизма: $\Delta k_2 = k_2(\omega_2) - k_1(\omega'_1) - k_1(\omega''_1)$, $\Delta \kappa_2 = \kappa_2(\omega_2) - \kappa_1(\omega'_1) - \kappa_1(\omega''_1)$, $\Delta K = \bar{l}_2 \Delta k_2 + \bar{l}_3 \Delta \kappa_2$, где $\bar{l}_i = \frac{l_i}{l_2 + l_3}$, ($i = 2, 3$), $\bar{l}_2 + \bar{l}_3 = 1$. Учитывая условие идеального КФС, $\Delta K = 0$, постоянная нелинейной связи второго процесса записывается в виде:

$$\xi = l_2 \chi e^{-i\phi_2} \operatorname{sinc} \left(\frac{l_2}{2} \Delta k_2 \right) \frac{\sin \left(\frac{N(l_2 + l_3) \Delta K}{4} \right)}{\sin \left(\frac{(l_2 + l_3) \Delta K}{4} \right)}, \quad (12)$$

где $\phi_2 = \frac{1}{2} l_2 \Delta k_2 + \Delta K (l_2 + l_3) (\frac{N-1}{2})$ и $L_2 = \frac{N}{2} (l_2 + l_3)$ - полная длина второго сегмента.

В параграфе **3.3.1** детально анализируется возможность приготовления комбинации одиночного фотона и пары фотонов из триплета фотонов, полученных в каскадном процессе преобразования вниз: $\omega_0 \rightarrow \omega_2 + \omega_1$, $\omega_2 \rightarrow \omega'_1 + \omega''_1$ (см., Рис. 4). Теоретически эта задача упрощается к получению условий для спектральной факторизации трех-фотонной амплитуды $\Phi_{\alpha, \beta, \gamma}(\omega_1, \omega'_1, \omega''_1)$, с учетом поляризационных состояний ($\alpha, \beta, \gamma = o, e$). Для наглядности здесь рассматривается определенный процесс взаимодействия e, o, o и пишутся условия для спектральной факторизации. $|\Phi_{e, o, o}(\nu_1, \nu_2, \nu_3)|^2 = |\Phi_e^{(1)}(\nu_1)|^2 |\Phi_{o, o}^{(2)}(\nu_2, \nu_3)|^2$ (см., Рис. 5), где отдельный множитель $|\Phi_e^{(1)}(\nu_1)|^2 = |f_e(\nu_1)|^2$ описывает вероятность одного фотона и $|\Phi_{o, o}^{(2)}(\nu_2, \nu_3)|^2 = |f_o(\nu_2) \Phi_{o, o}(\nu_2, \nu_3) f_o(\nu_3)|^2$ описывает вероятность генерации двух фотонов. Здесь $\nu_0 = \omega_0$, $\nu_1 = \omega_1 - \frac{\omega_0}{3}$, $\nu_2 = \omega'_1 - \frac{\omega_0}{3}$, $\nu_3 = \omega''_1 - \frac{\omega_0}{3}$, $\nu = \omega_2 - \frac{\omega_0}{3}$. Получены условия для генерации сигнального фотона и соответствующей перепутанной пары, которые могут быть удовлетворены, если $u_{2, o}^{-1} < u_{L, \beta}^{-1} < u_{1, e}^{-1}$ или $u_{1, e}^{-1} < u_{L, \beta}^{-1} < u_{2, o}^{-1}$, где $u_{j, \alpha}^{-1}$ - групповые скорости фотонных волновых пакетов в нелинейных доменах ($\alpha = o, e$, $j = 1, 2$).

В параграфе **3.4** рассматривается фазово-инвертированный кристалл для генерации трех-фотонных и четырех-фотонных состояний в фазово-синхронизированных каскадных процессах (см. Рис. 6). Получено выражение для эффективной констан-

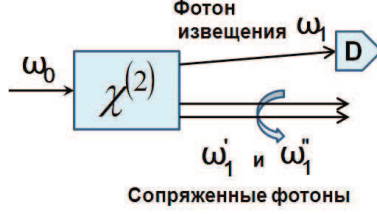


Рис. 5: Схема получения фотона извещения и фотонной пары для неразрушающих измерений двух-фотонных состояний.

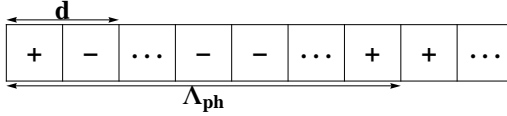


Рис. 6: Схема периодически поляризованного кристалла, который состоит из нелинейных слоев, длиной l с нелинейностями $\chi_+ > 0$ и $\chi_- < 0$ в фазово-инвертированной решетке (с периодом Λ_{ph}) на основе простой КФС решетки (с периодом d).

ты связи $\xi(\Delta k)$ для схемы, описанной на Рис. 6 в следующей форме: $\xi(\Delta k) = L\chi_0 e^{-i\alpha(\Delta k)} Y_{M,N}(\Delta k)$ [III].

Представленная здесь КФС функция $Y_{M,N}(\Delta k)$ является произведением стандартной спектральной функции фазового синхронизма для одного слоя, то есть, $\text{sinc}(\frac{l\Delta k}{2})$ и функции ансамбля:

$$Y_{M,N}(\Delta k) = \text{sinc}\left(\frac{l\Delta k}{2}\right) \frac{1}{MN} \frac{\sin\left[\frac{Nl}{2}(\Delta k - G)\right] \sin\left[\frac{Ml}{2}(\Delta k - F)\right]}{\sin\left[\frac{l}{2}(\Delta k - G)\right] \sin\left[\frac{l}{2}(\Delta k - F)\right]}. \quad (13)$$

Здесь, N -число доменов в каждом блоке, M - число блоков, $\alpha(\Delta k) = \frac{Nl}{2}[(\Delta k - G) + (M - 1)(\Delta k - F)]$, l - длина каждого домена, $G = 2\pi/d$, $F = 2\pi/\Lambda_{ph}$, $d = 2l$, $\Lambda_{ph} = 2Nl$, $L = MNl$.

Полученная в этом параграфе КФС функция $Y_{M,N}(\Delta k)$ позволяет одновременно фазово-синхронизировать два параметрических процесса. Эта ситуация достигается, благодаря двум векторам решетки. В параграфе приведен детальный анализ $Y_{M,N}(x)$ функции, в зависимости от параметра $x = \frac{l\Delta k}{2}$ в графической форме (см. Рис. 7). Теоретические утверждения о возможности одновременно синхронизировать два процесса было сопоставлено с экспериментальными данными каскадного трех-фотонного преобразования вниз [6]. Типичная длина волны накачки $\lambda_L = 0.53\mu\text{m}$, а также параметры расстройек волновых векторов для LiTaO_3 кристалла по экспериментальным данным равны $\Delta k_1 = 0.32\mu\text{m}^{-1}$ и $\Delta k_2 = 0.87\mu\text{m}^{-1}$ [6]. Было проверено, что одновременный фазовый-синхронизм двух процессов реализуется по формуле (13) для параметров $l = 10.25\mu\text{m}$, $N = 22$, $M = 9$ (см. Рис. 7).

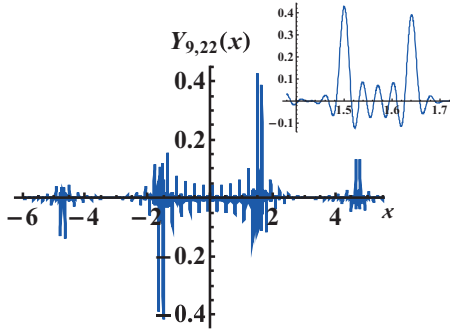


Рис. 7: График функции $Y_{M,N}(x)$ для четных значений количества доменов в блоке $N = 22$ и нечетного числа блоков $M = 9$. Вкладка показывает два узких пика одной локальной группы экстремумов с одинаковыми амплитудами.

Продемонстрировано, также, совпадение экспериментальных и теоретических результатов для четырех-фотонного преобразования вниз: $\varpi_0 \rightarrow \varpi_2 + \varpi_2$ и $\varpi_2 \rightarrow \varpi_1 + \varpi_1$ ($\varpi_2 = \omega_0/2$, $\varpi_1 = \omega_0/4$). Для реализации КФС использовано типичное значение для поля накачки четырех-фотонного процесса $\lambda_p = 0,39\mu\text{m}$. В фазово-инвертированном кристалле LiTaO_3 векторы фазового-синхронизма равны $\Delta k_1 = 1,56\mu\text{m}^{-1}$, $\Delta k_1 = -1,312\mu\text{m}^{-1}$. Эти параметры взяты из экспериментальных данных для генерации четырех-фотонного преобразования-вниз [7]. Найдены параметры фазово-инвертированного кристалла, для эффективного четырех-фотонного преобразования вниз. КФС обсуждаемого процесса реализуется и прекрасно совпадает с экспериментальными данными для параметров $l = 2,2\mu\text{m}$, $M = 13$ и $N = 32$.

В параграфе 3.5 представлены результаты по каскадным процессам трех-фотонного и четырех-фотонного преобразования вниз в присутствии оптического параметрического резонатора. Эти результаты получены на базе представленных выше фазово-инвертированных и двух-сегментных КФС конфигураций. Рассматриваются корреляции числа фотонов на основе нормализованных корреляционных функций третьего и четвертого порядков в двух-сегментных и фазово-инвертированных кристаллах, соответственно.

Содержание главы 4. В этой главе исследованы нелинейные композиционные кристаллы двух типов: структуры с случайным периодом и кристаллы со сферической симметрией для генерации фазово-согласованных фотонов.

В параграфе 4.1 детально исследован КФС в нерегулярных нелинейных сверхрешетках и в нерегулярных нелинейных сверхрешетках с линейными сегментами [II]. В этом параграфе вычислена спектральная интенсивность излучения пары фотонов преобразования вниз в беспорядочных нелинейных сверхрешетках: $P(\omega_s, \omega_i) = c^2(\omega_s, \omega_i) \langle |\Phi(\omega_s, \omega_i)|^2 \rangle$. Здесь, символ $\langle \cdot \rangle$ означает усреднение по ансамблю случайных реализаций нелинейных длин доменов l по $w(l)$, где $c(\omega_s, \omega_i)$ - нормировочный множитель, $\Phi(\omega_s, \omega_i) = E(\omega_0)\xi(\Delta k)$ - спектральная амплитуда генерации двух фотонов.



Рис. 8: Структура с нерегулярностями, которая состоит из нелинейных доменов, со средней длиной l_1 , с коэффициентами нелинейности $\chi_+ > 0$ и $\chi_- < 0$, а также включает в себя линейные домены, со средней длиной l_0 . На схеме изображены сдвиги границ слоев по отношению к средней длине каждого n -ого домена.

Показано, что вследствие усреднения, интенсивность этого процесса линейно зависит от числа доменов в кристалле.

Рассматривается, также, многослойная структура с беспорядочно расположенными границами с линейными доменами для процесса спонтанного излучения двух фотонов (см. Рис.8).

Спектральная интенсивность излучения пары фотонов для случая Гауссовского распределения вычисляется в следующей форме:

$$P(\omega_s, \omega_i) = \frac{c^2(\omega_s, \omega_i)|E_L(\omega_0)|^2}{\Delta k^2} \chi^2 \frac{1 - |W(\Delta k)|^2 |Q(\Delta \kappa)|^2}{1 + |W(\Delta k)|^2 |Q(\Delta \kappa)|^2 + 2Re(W(\Delta k)Q(\Delta \kappa))}, \quad (14)$$

где

$$W(\Delta k) = \exp\left(il_1 \Delta k - \frac{\sigma_1^2 \Delta k^2}{2}\right), \quad Q(\Delta \kappa) = \exp\left(i l_0 \Delta \kappa - \frac{\sigma_0^2 \Delta \kappa^2}{2}\right). \quad (15)$$

Здесь: σ_1^2 и σ_0^2 есть средне-квадратичные отклонения от средних длин l_1 и l_0 нелинейных и линейных доменов, соответственно, $\Delta k = \kappa_L(\omega_0, z) - \kappa_s(\omega_s, z) - \kappa_i(\omega_i, z)$ и $\Delta \kappa = \kappa_L(\omega_0, z) - \kappa_s(\omega_s, z) - \kappa_i(\omega_i, z)$ - функции фазового синхронизма трех-фотонных процессов в нелинейных и линейных доменах.

Показано, что возможно контролировать ширину и расположения максимумов распределения эффективной постоянной связи $\xi(\Delta k, \Delta \kappa)$, а, следовательно, и спектральную интенсивность измерения пары фотонов, варьируя длинами нелинейных и линейных доменов, а также их средне-квадратичными отклонениями от средних длин.

В конце параграфа получены условия для эффективного КФС процесса СППВ в нерегулярных, периодически поляризованных нелинейных кристаллах с линейными сегментами.

В параграфе 4.2 детально исследован процесс СППВ в двухмерных фотонных кристаллах, основанных на кольцевых (круговых) доменах [1],[8].

Рассмотрены различные типы нелинейных круговых, периодически поляризованных, кристаллов и показано, что возможность генерации процесса преобразования вниз осуществляется только в положительных нелинейных кристаллах ($n_e(2\omega) \geq n_o(\omega)$) для *оee* процессов. В параграфе были найдены условия эффективного КФС для определенного поляризованного процесса СППВ, реализуемого в круговых, периодически поляризованных, нелинейных кристаллах.

В конце параграфа была получена двух-фотонная амплитуда процесса преобразования вниз, реализованного в конечном круговом кристалле.

Основные результаты работы:

- Вычислены функции квази-фазового синхронизма трех-волнового взаимодействия в одномерных сверхрешетках, с учетом поляризационных состояний и дисперсий взаимодействующих волн.
- Вычислены функции квази-фазового синхронизма каскадных трех-волновых взаимодействий в сверхрешетках с двумя периодами, позволяющие одновременно эффективно синхронизировать два параметрических процесса, в частности, в двух-сегментных кристаллах и в фазово-инвертированных структурах.
- Показано, что неклассические трех-фотонные состояния с заданными спектральными свойствами можно эффективно получить в параметрических каскадных процессах: $\omega_0 \rightarrow \omega_1 + \omega_2$, $\omega_2 \rightarrow \omega_1 + \omega_1$ в сверхрешетках. Анализ эффективности процесса и обсуждения его экспериментальной реализации приведены для двух случаев: двух-сегментной и фазово-инвертированной структур.
- Показано, что добавление линейных сегментов с соответствующими показателями преломления в структурированный кристалл позволит эффективно управлять квази-фазовым синхронизмом, благодаря чему, в частности, становится возможным приготовление чистого состояния фотона и дуплета коррелированных фотонов из триплета коррелированных фотонов, вследствие компенсации дисперсий э.м. волн, распространяющихся в сверхрешетке.
- Показано, что вероятность процесса параметрического преобразования вниз в поляризованных нерегулярных кристаллах, в которых длины доменов являются случайными величинами, растет только лишь линейно, в зависимости от числа слоев, в отличие от квадратичной зависимости для аналогичного процесса в периодически- поляризованных кристаллах. Однако, эффект компенсации дисперсий приводит к другой возможности эффективной генерации фотонных пар. Продемонстрирована возможность управления СППВ и достижения эффективного КФС, при помощи использования линейных сегментов со случайными длинами.
- Показано, что реализация процесса параметрического преобразования вниз в периодически-поляризованных нелинейных кристаллах с радиальной симметрией не тривиальна. В частности, было показано, что генерация процесса преобразования вниз реализуется только в положительных нелинейных кристаллах ($n_e(2\omega) \geq n_o(\omega)$) для оео процессов.

Список литературы

- [1] В.П. Шлайх “Квантовая оптика в фазовом пространстве”, Москва Физматлит (2005)..
- [2] S.M. Saltiel, A.A. Sukhorukov, Y.S. Kivshar, E. Wolf, *Progress in Optics*, **47**, Elsevier B.V., 1-73 (2005).
- [3] H. Hübel, D.R. Hamel, A. Fedrizzi, S. Ramelow, K.J. Resch, and T. Jennewein, *Nature Photonics Lett.* **466**, 601-603 (2010).
- [4] A.B. U'Ren, C. Silberhorn, K. Banaszek, I.A. Walmsley, R.K. Erdmann, W.P. Grice, and M.G. Raymer, *Laser Phys.,Quant.Opt.* **15**, 146-161 (2005).
- [5] P.G. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A.V. Sergienko and Y. Shih, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 4337-4341 (1995).
- [6] D. Kolker, A.K. Dmitriyev, P.V. Gorelik, F.N.C. Wong, and J.J. Zondy, *Laser Phys.* **18(6)** 794799 (2008).
- [7] A.A. Sukhorukov, T.J. Alexander, Yu.S. Kivshar, S.M. Saltiel, *Phys. Lett.* **A 281**, 34-38 (2001).
- [8] Saltiel S. M., Neshev D. N., Fischer R., Krolikowski W., Arie A., and Kivshar Yu.S., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 103902,1-4 (2008).

Опубликованные работы:

- I D. A. Antonosyan “Down-conversion in the nonlinear annular periodically poled media”, [Photonics and Micro- and Nano-structured Materials 2011, Belington, Washington], SPIE 8414, 84140R-1- 84140R-6 (2012).
- II D. A. Antonosyan, Majid Nemati and Gagik Yu. Kryuchkyan “Quasi-phase-matching in randomly poled nonlinear superlattice”, [Photonics and Micro- and Nano-structured Materials 2011, Belington, Washington] SPIE 8414, 84140T-1-. 8414 84140T-8 (2012)..
- III D.A. Antonosyan and G.Yu. Kryuchkyan, “Phase-reversed structures in superlattice of nonlinear materials”, *Opt. Com.*, 285, 5, 795-799 (2012).
- IV D. A. Antonosyan, T. V. Gevorgyan and G. Yu. Kryuchkyan, “Three-photon states in nonlinear crystal superlattices”, *Phys. Rev. A* 83, 043807 (2011).
- V D.A. Antonosyan and G.Yu. Kryuchkyan, “Multiple optical interactions for quantum gates”, *Phys. of Particle and Nuclear Lett.* 8, 5(168), 790-794, (2011).
- VI D.A. Antonosyan and G.Yu. Kryuchkyan, “Multiple Interactions In Multilayered Structures Of Nonlinear Materials”, (Modern Optics and Photonics: Atoms and Structured Media, World Scientific Publishing Co., 2010).
- VII D. A. Antonosyan, T. V. Gevorgyan, and G. Y. Kryuchkyan, “Phase Matching and Phase Locking in Cascaded Optical Parametric Oscillator”, *Nonlinear Photonics, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010)*, paper NTuC40. <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=NP-2010-NTuC40>.
- VIII D.A. Antonosyan, T.V. Gevorgyan, G.Yu. Kryuchkyan “Controllable quantum states through cascaded parametric processes in superlattices”, *SPIE* 7998, 799816 (2010).
- IX D.A. Antonosyan and G.Yu. Kryuchkyan, “Multi-Mode Squeezing In Micro-Structured Nonlinear Media”, *Phys. of Particle and Nuclear Lett.* 6, 7, 581-584, (2009).

ԱՄՓՈՓՈՒՄ

ԴԻԱՆԱ ԱԼԻԿԻ ԱՆՏՈՆՈՍՅԱՆ

ՈՉ ԴԱՍԿԱՆ ԼՈՒՅՄԻ ԳԵՆԵՐԱՑՈՒՄԸ ԳԵՐՅԱՆՅԵՐՈՒՄ

ԵՎ ՖՈՏՈՆԱՅԻՆ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ

Արենախոսության թեման ըստով է ֆիզիկայի երկու ուղղությունների հարման վրա, որոնք ներկայումս ակտիվորեն զարգանում են ինչպես հիմնարար գիտության տեսանկյունից, այնպես էլ բազմազան կիրառությունների համար: Այդ ուղղություններից մեկը կապված է քվանտ-էլեկտրոդինամիկ էֆեկտների հեղափոխության հետ օպտիկայում և լազերային ֆիզիկայում, մյուս ուղղությունը կապված է նոր ոչ գծային նյութերի նախագծման հետ:

Յույց է տրված, որ ոչ դասական վիճակների ամենաէֆեկտիվ աղբյուրը, իրականացվող լաբորատոր պայմաններում, հանդիսանում է մոդո դաշտի ֆոտոնների սպոնտան պարամետրիկ ներքև ձևափոխություն պրոցեսը իրականացված $\chi^{(2)}$ ոչ գծային նյութերում: Այդ պարաճառով լույսի ոչ դասական վիճակների և քվանտային տեխնոլոգիաների ուղղությունների զարգացումը, ժամանակակից ֆիզիկայում, սերտորեն կապված է նոր նյութերի զարգացման հետ՝ լույսի ոչ գծային օպտիկական ձևափոխությունների իրականացման համար: Արենախոսությունում մանրամասնորեն զարգացված են, ֆոտոնային պրոցեսների իրականացման համար, կառուցվածքային $\chi^{(2)}$ ոչ գծային վերջավոր չափերով գերցանցերի, հեղափոխությունների նոր տեսական մոտեցումներ: Ներկայացված արենախոսությունը նվիրված է ոչ գծային օպտիկական պարամետրական պրոցեսների տեսական հեղափոխություններին, որոնք մասնավորապես բերում են բազմաֆոտոն խճճված վիճակների սրացմանը: Այդ պրոցեսները հիմնականում իրականանում են երկբեկող բյուրեղներում, ինչպես նաև միկրոկառուցվածքային բյուրեղներում, որոնցում իրականանում է քվազի-փուլային սինքրոնացումը (ՋՓՄ): Այսօր ՋՓՄ մեթոդը ամենաունիվերսալն է ֆոտոնային պրոցեսների էֆեկտիվ իրականացման համար՝ պարամետրական ցրում, բարձր հարմոնիկների գեներացիա, չորս ալիքների պոխագրեցություն և այլն:

Քվազի-փուլային սինքրոնացման տեխնոլոգիաների վերջին ձեռքբերումները, հիմնված սողուլացված ոչ գծայնության ունակությամբ ոչ գծային ֆոտոնային բյուրեղների վրա, առաջացրեցին մեծ հեղափոխություն բազմաֆոտոն օպտիկական պարամետրիկ պրոցեսների ֆիզիկայի կիրառությունների նկատմամբ: Արենախոսությունում ներկայացված են արդյունքներ պարամետրական կասկադային պրոցեսներում, որոշակի սպեկտրալ բնութագրերով, եռաֆոտոն վիճակների ճարտարագիտության վերաբերյալ: Մասնավորապես բերված են պայմաններ, երբ օգտարոժելով գեներացված ֆոտոնների փրիպլեփի ըստ բևերացման խճճվածության հարկությունը, մեկ ազդարարային ֆոտոնի և ֆոտոնային զույգի սրեղծման համար՝ երկֆոտոն չվնասվող չափումների իրականացման համար:

Արենախոսության նպատակներից մեկն է ոչ գծային կառուցվածքային նյութերի և ֆոտոնային բյուրեղների ավելի մանրամասն, քան դա արված էր մինչ օրս, տեսական

նկարագրությունը՝ հիմնված փարբեր վերջավոր չափերով շերտավոր համակարգերի վրա: Այդ պարճառով արբենախոսությունում մանրամասնորեն հերագոարված են վերջավոր չափերով կառուցվածքային ոչ գծային ֆոփոնային բյուրեղները՝ փարբեր պարբերականություններով և բազմազան կոնֆիգուրացիաներով: Մասնավորապես, դիարարկված են գծային և ոչ գծային դոմեններից կազմված ոչ ռեգուլյար կառուցվածքային նյութեր, ինչպես նաև ոչ գծային, շրջանային սիմբորիայով պարբերականորեն բերացված բաղադրյալ բյուրեղներ ներքև-ձևափոխություն պրոցեսի իրականացման համար:

Արբենախոսությունում սրագվել են հերևյալ արդյունքները.

- Դիարարկվել է երեք ալիքի փոխազդեցությունը և սրագվել են արդյունքներ քվազի-փուլային-սինքրոնացումը նշված պրոցեսի համար, հաշվի առնելով փոխազդող ալիքների բերեացման վիճակները և դիսպերսիան:

- Զննարկված են գերցանցեր, որոնք ունեն երկու պարբերություն, մասնավորապես երկ-սեզմենար և փուլային-շրջված ոչ գծային բյուրեղներ: Այս բյուրեղները միաժամանակորեն փուլային սինքրոնացում են երկու պրոցես: Նաշվարկված են արդյունքներ փուլային սինքրոնացման համար նշված բյուրեղներում:

- Յույց է րրված, որ հնարավոր է էֆեկտիվորեն գեներացնել եռա-ֆոփոն վիճակներ՝ $\omega_0 \rightarrow \omega_1 + \omega_2$, $\omega_2 \rightarrow \omega_1 + \omega_1$ դեկավարվող սպեկտրալ բնութագրերով գերցանցերում: Պրոցեսի էֆեկտիվության և դրա էքսպերիմենտալ իրականացման հերագոարումները բերված են երկու դեպքի համար՝ երկ-սեզմենար և փուլային-շրջված կառուցվածքների համար:

- Յուցադրված է, որ որոշակի բեկման ցուցիչներով գծային էլեմենտների ներդրումը, հնարավորություն է րալիս դեկավարել փուլային սինքրոնացման պայմանները: Մասնավորապես, ցուցադրված էր, որ հնարավոր է սրեղծել ազդարարային ֆոփոն և կորելացված ֆոփոնների գույ՜ կորրելացված ֆոփոնների րրիպերից: Այդ վիճակները սրագվում են գերցանցերում րարաշվող էլեկտրոնագնիսական ալիքների դիսպերսիաների կոմպենսացման մեթոդով:

- Դիարարկված է պարամետրական ձևափոխություն ներքև պրոցեսը ոչ ռեգուլյար պարբերականորեն բերացված բյուրեղներում: Յուցադրված է, որ պրոցեսի հավանականությունը գծայնորեն է աճում կախված դոմենների թվից, ի րարբերություն քառակուսային կախվածության հասարակ պարբերականորեն բերացված բյուրեղներում: Յուցադրված է ՄՊՁՆ պրոցեսի և ԶՓՄ պայմանի դեկավարման հնարավորությունները՝ ներմուծելով կամայական երկարություններով գծային էլեմենտներ ոչ ռեգուլյար պարբերականորեն բերացված բյուրեղների մեջ:

- Ներագոարված է պարամետրիկ ձևափոխություն ներքև պրոցեսը պարբերականորեն բերեացված բյուրեղներում, որոնք ունեն շրջանաձև սիմբորիա և ցուցադրված է այդ պրոցեսի իրականացման ոչ րրիվիալությունը այդ բյուրեղներում: Մասնավորապես, ցույց է րրված, որ ներքև ձևափոխություն պրոցեսի գեներացիան իրականանում է միայն դրական ոչ գծային բյուրեղներում ($n_e(2\omega) \geq n_o(\omega)$) և միայն *oee* պրոցեսի համար:

SUMMARY

DIANA ANTONOSYAN

GENERATION OF NONCLASSICAL LIGHT IN SUPERLATTICES AND PHOTONIC CRYSTALS

The theme of the dissertation is on the junction of two directions in physics, which actively develop now both for the fundamental science and for various applications. One direction is devoted to the investigation of the quantum-electrodynamic processes in the optics and laser physics, while the second direction is connected with elaboration of new optical nonlinear materials.

It has been shown that the most effective source of non-classical states realized in the laboratories is the process of spontaneous parametric down-conversion of pump field photons in $\chi^{(2)}$ nonlinear media. Thus, in the contemporary physics development of non-classical states of light and quantum technologies is strongly linked with the elaboration of new materials.

In the dissertation there are detailed developed new theoretical methods for description of $\chi^{(2)}$ nonlinear finite structures for realization of photonic processes. Presented dissertation is devoted to the investigations of the nonlinear optical parametric processes, which lead to the receipt of multi-photon entangled states. Such processes are realized in the bi-refractive crystals as well as in micro-structured crystals, where the quasi-phase matching (QPM) occurs. Nowadays, QPM is the most universal method for effective generation of photonic processes: parametric scattering, generation of high harmonics, for wave interaction and etc..

The last achievements of the QPM technologies, based on the modulated nonlinear susceptibilities of nonlinear photonic crystals, create great interest to the investigation of physics and applications of the multi-photon optical processes. There are presented the results on engineering of three-photon states, generated through the parametric cascaded processes, with controllable spectral parameters. Particularly, there are presented conditions for generation of the heralded photon and conjugate photon pair for nondestructive measurements, using the feature of polarization-entanglement of the generated photon triplet.

One of the goals of the dissertation is the more detailed, than it was done before, theoretical description of nonlinear structured materials and photonic crystals on the base of different layered structures with finite lengths. Thus, there are presented investigations of finite nonlinear photonic crystals with various configurations.

Particularly, at the end of the dissertation there are discussed random structures consisting of nonlinear and linear domains as well as the nonlinear periodically poled annular crystals for realization of parametric down-conversion process.

The following results were obtained in the dissertation:

- It has been calculated the quasi-phase-matching function of the three-wave interaction in one-dimensional superlattices with a glance polarizing states and dispersion of the interacting waves.

- It has been discussed superlattices with two periods, particularly dual-grid and phase-reversed nonlinear crystals, which allow simultaneously phase-match two nonlinear processes. There are found results on quasi-phase-matching for such superlattices.

- It has been exhibited that it is possible to generate three-photon states with controllable spectral properties in processes $\omega_0 \rightarrow \omega_1 + \omega_2$, $\omega_2 \rightarrow \omega_1 + \omega_1$ in superlattices. The analysis of the efficiency of the process and its experimental realization is presented for two cases: dual-segment and phase-reversed structures.

- It has been shown that inserting linear elements with corresponding refracting indexes in the structured materials allow manipulate the condition of quasi-phase-matching. Particularly, thanks to it, it become possible to engineer heralded photon and the couple of conjugative correlated photon pair from the correlated photon triplet, owing to the compensation of the dispersion of the electromagnetic waves expanding in the superlattices.

- It has been investigated process of parametric down-conversion in the random periodically poled nonlinear crystals, in which the lengths of domains are random. It has been shown that the probability of the process increasing linearly depending on the number of domains, in opposite to the quadratic case in the standard periodically poled structures. It has been exhibited the possibility to control the SPDC and the condition of QPM, inserting linear domains with random lengths in the random crystal.

- It has been investigated process of parametric down conversion in the periodically poled annular crystals and shown that the realization of the process is not trivial. Particularly, it has been deduced that SPDC is realized in positive nonlinear crystals ($n_e(2\omega) \geq n_o(\omega)$) and only for *oeo* process.