

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

**НЕЛИНЕЙНОЕ ЧАСТОТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МЕТАМАТЕРИАЛАХ И В
ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ СРЕДНЕГО ИК
ДИАПАЗОНА.**

Специальность: 2211.01 – Физика твердого тела

Отрасль науки: Физика

Соискатель: Шамилова Шахла Асаф кызы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии

Баку – 2021

Диссертационная работа выполнена на кафедрах Оптики и молекулярной физики и Физической электроники.

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор

Касумова Рена Джумшуд кызы,

доктор наук по физике, доцент

Мамедов Гусейн Микаил оглы

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор

Фигарова Софья Рустам кызы

доктор физико-математических наук, доцент

Гусейнов Джахангир Ислам оглы

доктор физико-математических наук, профессор

Бабаева Рена Фикрет кызы



Диссертационный совет ED 2.19 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующий на базе Бакинского Государственного Университета

Председатель диссертационного совета:

Член-корреспондент НАНА
доктор физико-математических наук,
профессор

Кязим-заде Айдын Гасан оглы

Ученый секретарь

диссертационного совета: кандидат физико-математических наук, доцент

Пашаев Бахтияр Гюльмалы оглы

Председатель научного семинара: доктор наук по физике,
доцент

Рагимов Садияр Солтан оглы



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и степень изученности темы.

Современное развитие фотоники связано с технологией разработки метаматериалов. Достигнутые успехи в создании этих сред с отрицательным показателем преломления в сверхвысокочастотном и оптическом диапазонах спектра возродили интерес к процессам параметрического взаимодействия встречных волн.

В оптических системах обработки информации в качестве носителя информации используются фотоны. Однако здесь встает проблема управления носителем информации. Открытие метаматериалов способствовало появлению возможности регулирования световым излучением за счет изменения оптических свойств подобных искусственных структур методами нелинейной оптики. Как известно, метаматериал - это композитный материал, образующий диэлектрическую матрицу, с включениями, обеспечивающими резонансные свойства материала. Аналогичный подход был применен при разработке твердотельных лазеров, когда в матрицу, например, кристалла внедряли ионы активатора, которые, в конечном счете, определяли физические свойства лазерной среды. В результате в подобной неоднородной среде метаматериала наблюдаются скачкообразные изменения материальных параметров среды (диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей) и отрицательное значение показателя преломления в определенном частотном диапазоне. И, как следствие, в такой среде электромагнитная волна на частоте отрицательного преломления распространяется с разнонаправленными фазовой и групповой скоростями. Отрицательное значение фазовой скорости обозначает, что при распространении, фазовый набег волны происходит в направлении от приемника к источнику, перенос же энергии, в свою очередь, происходит от источника к приемнику. При такой геометрии для сигнальной волны, как следует, сигнальная волна является обратной волной. Отсюда в метаматериале падающая электромагнитная волна претерпевает

необычные изменения, что приводит к новым нетрадиционным эффектам.

В последнее время важнейшими направлениями в развитии лазерной технологии являются разработка и исследование перестраиваемых источников излучения в сочетании с эффектами смешивания частот, имеющих предельно короткую длительность импульсов, что позволяет значительно расширить диапазон перестраиваемых длин волн лазерного излучения. Такие источники средней инфракрасной (ИК) области спектра являются незаменимым средством исследования полупроводниковых элементов в системах оптической связи, основными элементами современных лидаров, в частности для исследования Земли и атмосферы, приборов научного и медицинского назначения, успешно используются для задач спектроскопии. Однако для осуществления данных задач необходимы источники когерентного излучения с необходимыми энергетическими параметрами и коэффициентом полезного действия.

Так кристаллы, используемые для этих целей, обладают рядом недостатков например, кристаллы CdGeAs_2 работающие при низких температурах обладают высокими потерями на длинах волн второй гармоники, кристаллы же ZnGeP_2 и Te имеют потери на длинах волн основного излучения углекислотного лазера. Кристаллы Tl_3AsSe_3 и AgGaSe_2 обладают плохими тепловыми, а кристалл GaSe - низкими механическими свойствами. Отсюда, в частности, вытекают проблемы создания эффективных и надежных генераторов гармоник CO_2 -лазеров.

По этой причине до сих пор продолжается поиск перспективных материалов для осуществления задач современной нелинейной оптики.

Для решения упомянутых задач в средней и дальней области ИК диапазона, благодаря своим уникальным свойствам, огромный интерес приобрели оптические нелинейные ИК кристаллы, такие как ZnGeP_2 , AgGaSe_2 , AgGaS_2 , GaSe ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ и $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$, $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}$ и $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$). Как известно, перечисленные ИК кристаллы имеют большую

эффективную оптическую нелинейность, чем и привлекли пристальное внимание исследователей.

Нынешняя тенденция к миниатюризации устройств сопровождается технологической разработкой наноразмерных структур. Это способствовало использованию тонких диэлектрических и полупроводниковых пленок вместо объемных материалов. Исследование полупроводников и диэлектриков методом генерации гармоник дает информацию о морфологии и структуре этих соединений.

Процесс же генерации высших гармоник является привлекательным для решения ряда прикладных задач в ультрафиолетовом и экстремально-ультрафиолетовом диапазонах спектра, получения фотонов высокой энергии. Основное преимущество генерации третьей гармоники (ГТГ) состоит в том, что из-за высоких частот он обнаруживает чисто когерентную электронную нелинейность и не чувствителен к тепловому отклику.

Ввиду всего вышесказанного изучение нелинейно – оптических процессов и выявление причин, препятствующих росту эффективности преобразования частоты в связи с практической значимостью можно рассматривать как актуальную проблему.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются твердые растворы $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}$, $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ и $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ кристаллов, метаматериал и нанокompозитные пленки ZnO/PMMA . В качестве предмета исследования были изучены фазовые эффекты, возникающие в исследуемых халькогенидных кристаллах, метаматериале и нанокompозитной пленке.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является теоретическое исследование нелинейно - оптического преобразования лазерного излучения в метаматериалах, халькогенидных кристаллах ИК диапазона и нанокompозитных пленках ZnO/PMMA , а также поиск путей повышения эффективности преобразования для получения оптимальных значений параметров задачи (длины нелинейной

среды, фазовой расстройки, интенсивностей волны накачки и холостой волны при параметрическом преобразовании).

Для достижения настоящей цели были поставлены следующие задачи, развитые в приближении заданной интенсивности (ПЗИ):

1. Проанализировать изменения фаз взаимодействующих волн при генерации второй гармоники (ГВГ) и ГТГ в нанокompозитной пленке ZnO/PMMA. Провести теоретический анализ влияния размера и концентрации наночастиц ZnO на квадратичную и кубичную нелинейности пленок нанокompозита ZnO/PMMA. Провести сравнение теоретических и экспериментальных результатов для пленок ZnO/PMMA с различными концентрациями наночастиц ZnO.

2. Теоретически исследовать эффекты трехволнового взаимодействия при ГТГ в метаматериале. Исследовать эффект самовоздействия световой волны в метаматериале и сравнить результаты с аналогичным эффектом, происходящим в однородной кубичной среде.

3. Изучить встречное параметрическое взаимодействие оптических волн в метаматериале при низкочастотной (НЧ) и высокочастотной (ВЧ) накачках в ПЗИ.

4. Теоретически исследовать оптические параметрические эффекты в халькогенидных кристаллах $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$ и GaS_xSe_{1-x} с квадратичными нелинейностями с учетом фазовых изменений всех взаимодействующих волн. Дать сравнение полученных результатов по эффективности преобразования с экспериментально измеренными значениями. Представить рекомендации по повышению эффективности частотного преобразования.

5. Теоретически исследовать вторую гармонику излучения лазера в халькогенидных кристаллах $AgGa_{0.6}In_{0.4}Se_2$ и $AgGa(Se_{1-x}S_x)_2$ ИК диапазона в условиях существующих экспериментов. Показать пути повышения эффективности преобразования.

Методы исследования. В качестве теоретического метода исследования в диссертационной работе было использовано приближение постоянной интенсивности. В этом приближении

нелинейные процессы можно рассматривать более точно, учитывая фазовые изменения всех взаимодействующих волн.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Для выбранной интенсивности накачки лазерного излучения, можно теоретически рассчитать когерентную длину ZnO/PMMA. При высоких концентрациях наночастиц ZnO пленки генерируют более сильный сигнал второй и третьей гармоник из-за большей длины взаимодействия нелинейной среды, но с другой стороны уменьшаются эффективные квадратичная и кубичная нелинейные восприимчивости.

2. При ГТГ в метаматериале учет фазовых изменений взаимодействующих волн ведет к уменьшению эффективности преобразования в третью гармонику в три раза от 0.91 до 0.3 и к изменению параметров кривой синхронизма от интенсивности накачки.

3. Распространение волн в метаматериале с кубичной нелинейностью сопровождается эффектом самовоздействия. При увеличении фазовой расстройки абсолютное изменение фазы основного излучения в случае метаматериала выше, чем в обычной квадратичной среде.

4. Параметрическое взаимодействие волн в метаматериале при НЧ и ВЧ накачках наиболее эффективно протекает при оптимальных условиях взаимодействия. При этом реализуется компенсация потерь обратной сигнальной волны потерями прямых волн.

5. Выбором оптимальных значений длины нелинейной среды 0.3 см, интенсивности накачки 4 МВт/см^2 , фазовой отстройки 0.06 см^{-1} и с учетом влияния линейных потерь в среде, можно повысить эффективность преобразования во вторую гармонику до 0.5 в кристалле $\text{AgGa}(\text{Se}_{0.8}\text{S}_{0.2})_2$ и подобрать условия для выполнения или повышения степени нечувствительности кристаллов к условию углового фазового синхронизма.

6. В кристаллах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ и $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ с ростом интенсивности накачки, уменьшением фазовой отстройки и потерь имеет место параметрическое усиление холостой волны

и возможно подобрать условия для повышения степени некритичного углового фазового синхронизма.

7. Методом электрохимического осаждения возможно получение нанокompозитных тонких пленок ZnO/PMMA.

Научная новизна исследования.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней получил дальнейшее развитие аналитический метод – ПЗИ и в этом приближении впервые:

1. В ПЗИ аналитически показано, что эффективная кубичная нелинейность в нанокompозитах ZnO/PMMA уменьшается с ростом концентрации наночастиц ZnO, тогда как с другой стороны из-за большой длины нелинейного взаимодействия нанокристалл генерирует сильную волну третьей гармоники. (Данный результат был включен в “Ежегодный научный доклад НАН Азербайджана о важных научных результатах за 2015 год”, 2016 год, третий выпуск). Аналогичное можно сказать о квадратичной восприимчивости в нанокompозитах ZnO/PMMA и о возникновении сильной волны второй гармоники.

2. Развита теория ГТГ и эффекта самовоздействия световой волны в метаматериалах с учетом изменения фаз всех взаимодействующих волн.

3. Теоретически исследованы интенсивность волны третьей гармоники в метаматериалах при различных параметрах рассматриваемой задачи (приведенная длина метаматериала, фазовая расстройка при больших и малых значениях, интенсивность волны накачки, полная длина метаматериала).

4. Изучены фазовые эффекты при трехволновом параметрическом взаимодействии при НЧ и ВЧ накачках в метаматериалах в случае отрицательной рефракции на частоте сигнальной волны.

5. Рассмотрено параметрическое взаимодействие оптических волн накачки, сигнальной и холостой с учетом изменения их фаз в халькогенидных кристаллах среднего ИК диапазона спектра. Определены условия для изготовления эффективных параметрических генераторов света на основе Hg₁.

$x\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ и $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ кристаллов, где Nd: YAG лазеры могут быть использованы в качестве источника накачки.

6. Проанализирован процесс ГВГ при нелинейном взаимодействии волн в халькогенидных кристаллах твердого раствора среднего ИК диапазона спектра. Примененный аналитический метод позволяет рассчитать оптимальные параметры, как кристалл-преобразователя, так и источника излучения для реализации некритического фазового синхронизма в конкретном эксперименте.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Практическая ценность работы состоит:

- Для разработки эффективных параметрических преобразователей частоты, удвоителей и утроителей частоты, даны конкретные параметры преобразования (интенсивность волны накачки, фазовая расстройка, длина кристалла преобразователя, полная длина метаматериала и интенсивность холостой волны в случае параметрического преобразователя), полученные в ПЗИ.

- Развита «Метод генерации второй и третьей гармоник» в ПЗИ для исследования нанокompозитных пленок ZnO/PMMA .

- Детально исследованы кристаллы среднего ИК диапазона $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$, $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$, $\text{AgGa}_{x-1}\text{In}_x\text{Se}$ и $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ для определения условий режима некритичного к углу фазового синхронизма.

- Разработан и освоен метод электрохимического осаждения тонких пленок на примере ZnO с целью дальнейшего исследования нелинейно оптических свойств полученных экспериментальных образцов.

Развитый метод ПЗИ кроме задач нелинейной оптики может быть применён в радиофизике, нелинейной акустике, интерферометрии и физике плазмы.

Результаты развитого подхода, анализа нелинейных волновых взаимодействий световых волн позволяют оптимизировать процесс преобразования. Знание эффективности частотного преобразования нелинейного

процесса позволяет выяснить наиболее благоприятные рабочие параметры и условия работы оптической системы, тем самым улучшить параметры данной системы.

Апробация и применение. Результаты исследования, включенные в диссертационную работу, обсуждались и опубликованы на следующих международных и республиканских конференциях: Materials digest of the X International Scientific and Practical Conference “Trends of modern science 2014”, Sheffield, May30-7June, 2014; Workshop, Tbilisi, 1-2 June 2015; Materials of 8th International Scientific Conference “Science and Society”, London, November, 2015; "Fizikanın aktual problemləri" VIII Respublika elmi konfransı, Bakı, 17 dekabr, 2015; Materials of the XI International Scientific and practical Conference “Conduct of modern science-2015” England,7 December, 2015; Materials digest of the IX International Conference "Science, Technology and Higher Education", Canada, December 23-24, 2015; “Opto, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası” Beynəlxalq konfrans, Bakı, 25-26 dekabr, 2015; Eastern-European Scientific Journal, Dusseldorf, Ausgabe 5 2016; "Fizikanın aktual problemləri" IX Respublika elmi konfransı, Bakı, 22 dekabr, 2016; “XƏZƏRNEFTQAZYATAQ”-2016 elmi-təcrübi konfrans, Bakı, 24-25 dekabr 2016; “Modern Trends in Physics” İnternational Conference, Bakı, 20-22 April 2017; "Fizika və asrtonomiya problemləri” beynəlxalq elmi konfransı. Bakı, 24-25 may, 2018.

Опубликованные научные работы: По материалам диссертации опубликовано 22 научные работы, среди них 11 статей и 11 тезисов в местных и зарубежных журналах. Из них 3 статьи и 1 материал конференции были опубликованы в журналах, включенных в базу данных Clarivate Analytics (Web of Science), 3 в базе данных Scopus.

Название организации, в которой выполняется диссертационная работа. Диссертационная работа выполнялась на кафедрах «Оптика и молекулярная физика» и «Физическая электроника» Бакинского государственного университета.

Объем, структура и основное содержание диссертации.

Диссертационная работа изложена на 192 страницах машинописного текста, содержит введение, четыре главы, заключение, практические рекомендации, иллюстрирована 64 рисунками и 10 таблицами, литература включает 38 работ на русском, 140 работ на английском и 3 работы на азербайджанском языках. Введение состоит из 23212, 1 глава из 40843, 2 глава из 38596, 3 глава из 29281, 4 глава из 76844 знаков, заключение из 2043 знаков. Общий объем работы состоит из 210819 знаков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении, обосновывается актуальность темы, указывается цель работы, научная новизна, основные научные положения, представленные на защиту, приводится практическая значимость, отдельно дается краткое содержание глав диссертации.

В первой главе диссертационной работы в первую очередь дано подробное описание отечественной и зарубежной научной литературы, посвященной современным проблемам, с которыми встречаются исследователи при изучении нелинейно оптических эффектов в метаматериалах, а также в нелинейных халькогенидных кристаллах. Проанализированы результаты работ ведущих мировых научно исследовательских центров в этой области.

Вторая глава посвящается исследованию ГТГ в нанокompозитах и метаматериалах в ПЗИ. В рамках используемого приближения приводятся результаты теоретического исследования, с помощью которого удастся более точно описать физические особенности нелинейного процесса по сравнению с широко применяемым приближением заданного поля (ПЗП).

В исследуемом случае отрицательных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей на частоте накачки ω_1 и положительных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей на частоте гармоники ω_3

стандартную систему укороченных уравнений рассматриваем при следующих граничных условиях:

$$A_1(z = \ell) = A_{1\ell} \exp(i\varphi_{1\ell}), \quad A_3(z = 0) = 0, \quad (1)$$

где $A_{1,3}$ - комплексные амплитуды волны накачки и третьей гармоники на частотах $\omega_{1,3}$ соответственно. Считаем, что волны распространяются вдоль z оси. Здесь $z = \ell$ соответствует входу в метаматериал с правой стороны для волны накачки (в отрицательном направлении оси z), $\varphi_{1\ell}$ - начальная фаза волны накачки на входе в нелинейную среду.

Для комплексной амплитуды волны гармоники в ПЗИ на выходе нелинейной среды получаем

$$A_3(z) = i\gamma_3 A_{1\ell}^3 \frac{\sin \lambda' z}{\lambda' \cos \lambda' \ell - \frac{i\Delta}{2} \sin \lambda' \ell} e^{-\frac{i\Delta}{2}(z+\ell) + i3\varphi_{1\ell}} \quad (2)$$

$$\lambda'^2 = \frac{\Delta^2}{4} - 3\Gamma^2, \quad \Gamma^2 = \gamma_1 \gamma_3 I_{1\ell}^2,$$

где $\gamma_{1,3}$ - коэффициенты нелинейной связи, $\Delta = k_3 - 3k_1$ - фазовая расстройка между взаимодействующими волнами, $k_{1,3}$ ($k_{1,3} > 0$) - модули волновых векторов направленных вдоль положительной оси z .

Полученное аналитическое выражение, для частотного преобразования в метаматериале (2), рассчитанное в рамках граничного условия (1), напрямую зависит от полной длины метаматериала, чем и отличается от аналогичного аналитического выражения для преобразования частоты в обычных материалах.

Согласно выражению, полученному для амплитуды волны гармоники (2) видно, что амплитуда зависит от фактора, учитывающего обратное воздействие возбуждаемой волны гармоники на волну накачки. В отличие от ПЗП фаза волны гармоники зависит от интенсивности волны накачки. Анализ показал, что метаматериал играет роль зеркала, а именно возбуждаемое излучение гармоники направлено навстречу

возбуждающей волне накачки. Из сравнения кривых, рис.1 интенсивностей волны накачки и третьей гармоники в ПЗП и ПЗИ, выявлено, что учет обратной реакции возбуждаемой волны гармоники на волну основного излучения приводит к уменьшению приведенных интенсивностей волны накачки в 2, а волны третьей гармоники в 3 раза.

В данной главе также изучен эффект самовоздействия световой волны в метаматериале и проведено сравнение с аналогичным эффектом, имеющим место в обычной кубичной среде (см. рисунок 2).

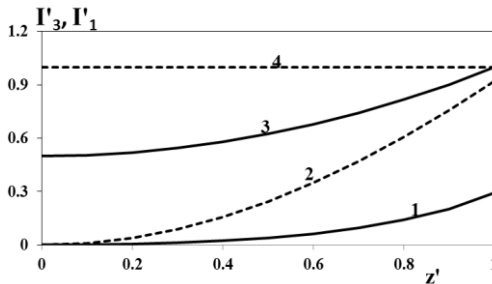


Рисунок 1. Зависимости приведенных интенсивностей волны накачки (кривые 3 и 4) и третьей гармоники (кривые 1 и 2) от приведенной длины метаматериала, рассчитанные в ПЗИ (кривые 1 и 3) и ПЗП (пунктирные 2 4).

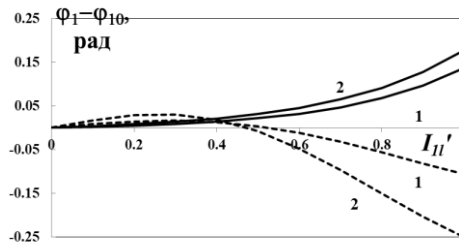


Рисунок 2. Зависимости изменения фазы волны накачки от интенсивности основного излучения в метаматериале (сплошные кривые 1 и 2) и в обычной среде (пунктирные кривые 1 и 2) при $\Gamma \ell = 1$ для двух значений приведенной фазовой расстройки $\Delta = 0.5$ (сплошные и пунктирные кривые 1) и 1 (сплошные и пунктирные кривые 2).

Далее был рассмотрен процесс ГТГ в нанокompозитной пленке ZnO/PMMA. Так как ГТГ происходит в любых материалах, был проведен аналитический счет для каждого слоя пленки и подложки. Проводились последовательные расчеты нелинейного взаимодействия в ПЗИ от слоя к слою в структуре, аналогично проведенному в ПЗП в работе¹. Получены два выражения для комплексной амплитуды третьей гармоники в слоях пленка и пленка + подложка.

Из полученных выражений для эффективности частотного преобразования в волну третьей гармоники ($\eta_3(\ell_2) = I_3(\ell_2)/I_{10}$) на выходе структуры нанокompозита имеем

$$\eta_3(\ell_2) = (t_{sa}^{3\omega})^2 (t_{fs}^{3\omega})^2 \eta_3(\ell_1) \left[\left(\cos \lambda_2 \ell_2 + c_1 \frac{\sin \lambda_2 \ell_2}{\lambda_2} \right)^2 + b^2 \frac{\sin^2 \lambda_2 \ell_2}{\lambda_2^2} \right] \exp(-2\delta_3 \ell_2), \quad (3),$$

где
$$c_1 = \frac{\gamma_3^{sut}}{\gamma_3^f} \lambda_1 \operatorname{ctg} \lambda_1 \ell_1, \quad b = \left(\frac{\gamma_3^{sut}}{\gamma_3^f} \Delta_f - \Delta_{sub} \right) / 2, \quad \gamma_j^f -$$

коэффициенты нелинейной связи волн, а δ_j^f - коэффициенты поглощения среды для пленки ZnO/PMMA, на соответствующих частотах ($j=1,3$), $t_{fs,sa}^{3\omega}$ - коэффициенты пропускания по формуле Френеля на границе пленка-подложка и подложка – воздух для волны третьей гармоники, а $\eta_3(\ell_1) = I_3(\ell_1)/I_{10}$ эффективность преобразования сигнала в третью гармонику на выходе первого слоя. Согласно выражению (3), полученному для эффективности преобразования, проанализирован динамический процесс частотного преобразования в третью гармонику в структурах ZnO/PMMA.

Было установлено, что при более высоких концентрациях ZnO, из-за большей длины взаимодействия нелинейной среды,

¹Tagiev, Z. H., Kasumova, R.J. Safarova, G.A. Third-harmonic generation in regular domain structures // Journal of Russian Laser Research, – 2010. 31 №4, – p.319-331.

пленки генерируют более сильный сигнал третьей гармоники рис.3.

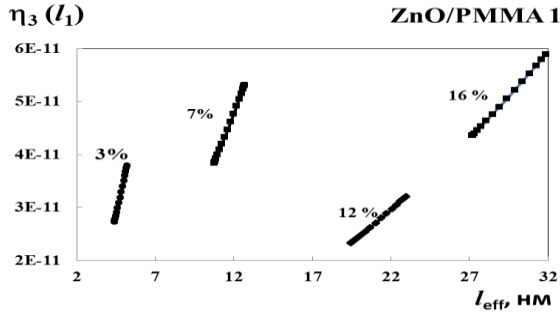


Рисунок 3. Зависимости эффективности преобразования волны накачки в волну третьей гармоники от эффективной длины при интенсивности накачки 20 ГВт/см² для $\delta_3=3\delta_l=0.06 \cdot 10^4 \text{см}^{-1}$ (кривые 1 и 3), $0.076 \cdot 10^4 \text{см}^{-1}$ (кривые 2 и 4) и $0.13 \cdot 10^4 \text{см}^{-1}$ (кривые 5 и 6).

Третья глава диссертационной работы посвящается параметрическим процессам нелинейного взаимодействия оптических волн, за счет наведенной нелинейной поляризации в метаматериалах, в результате которых изменяются параметры нелинейной среды.

В рассматриваемой главе, обсуждается параметрическое взаимодействие волн в квадратичной среде метаматериала с учетом фазовых эффектов при НЧ и ВЧ накачках, где частоты волны накачки и холостой волны лежат в области положительных значений показателя преломления, а сигнальной волны – в области отрицательных значений.

Соответствующие этой геометрии рассматриваемых волн граничные условия можно представить в виде:

$$A_{2,3}(z=0) = A_{20,30} \exp(i\varphi_{20,30}), \quad A_1(z=l) = A_{1l} \exp(i\varphi_{1l}), \quad (4)$$

здесь $z=0$ соответствует входу слева в метаматериал, $A_{20,30}, \varphi_{20,30}$ - начальные амплитуды и фазы холостой волны и волны накачки при входе слева в нелинейную среду, A_{1l}, φ_{1l} - начальная

амплитуда и фаза сигнальной волны при входе в нелинейную среду справа ($z = \ell$).

Учитывая граничные условия (4), получаем выражения для комплексных амплитуд обратной волны при НЧ и ВЧ накачках. Далее рассматриваются два важных параметра, определяющих эффективность преобразования и динамику процесса усиления в метаматериале при НЧ и ВЧ накачках.

Эффективность частотного преобразования сигнальной волны в случае НЧ накачки имеет вид

$$\eta_1(z=0) = \frac{\Gamma_3^2 \sin^2 \lambda \ell}{\lambda^2 \cos^2 \lambda \ell + \frac{\Delta^2}{4} \sin^2 \lambda \ell}, \quad (5)$$

где $\lambda = \sqrt{\frac{\Delta^2}{4} - \Gamma_3^2 - \Gamma_2^2}$, а в случае ВЧ накачки

$$\eta_1 = \frac{\Gamma_3^2 \sin^2 \lambda \ell}{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 \sin^2 \lambda \ell + \lambda^2 \cos^2 \lambda \ell}, \quad (6)$$

где $\lambda = \sqrt{\frac{\Delta^2}{4} + \Gamma_3^2 - \Gamma_2^2}$, $\Gamma_3^2 = \gamma_1 \gamma_2 I_{30}$, $\Gamma_2^2 = \gamma_1 \gamma_3 I_{20}$, $I_j = A_j \cdot A_j^*$.

Коэффициент усиления сигнальной волны в случае НЧ накачки определяется выражением:

$$\eta_{yc} = \frac{1}{\cos^2 \lambda \ell + \left(\frac{\Delta}{2\lambda}\right)^2 \sin^2 \lambda \ell}, \quad (7)$$

при ВЧ накачки выражение для коэффициента усиления сигнальной волны имеет вид:

$$\eta_{yc} = \frac{|\sin \lambda z + ib \cos \lambda z|^2}{|\sin \lambda \ell + ib \cos \lambda \ell|^2}, \quad (8)$$

здесь $b = \frac{2\lambda}{\Delta}$.

На основе аналитических выражений коэффициента усиления и эффективности преобразования в метаматериале при

НЧ накачке построены графики зависимостей, дающих наглядную картину взаимодействия.

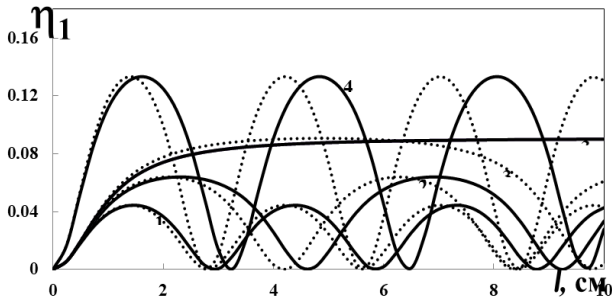


Рисунок 4. Зависимость эффективности преобразования в сигнальную волну от полной длины метаматериала ℓ , полученные в ПЗИ, для $I_{1\ell}=0$, $\Gamma_3=1 \text{ см}^{-1}$ при $\Delta=3 \text{ см}^{-1}$ (сплошные кривые 1 и 4), 2.5 см^{-1} (сплошная кривая 2) и 2.097688 см^{-1} (сплошная кривая 3), $I_{20}/I_{30}=0.1$ (сплошные кривые 1-3) и 0.3 (сплошная кривая 4). Результаты, полученные в ПЗП даны точечными кривыми.

Из рисунка 4 видно, что для каждого значения фазовой расстройки существует оптимальное значение полной длины метаматериала, при которой эффективность преобразования максимальна. В данном случае оптимальное значение полной длины метаматериала играет так называемую роль когерентной полной длины нелинейной среды, понятие, которое в обычной среде характерно для текущей длины материала. С ростом фазовой расстройки амплитуда осцилляций падает, а частота осцилляций растет (сравнить кривые 1 и 2).

Результаты для эффективности преобразования в сигнальную волну для двух разных уровней входной интенсивности сигнальной волны $I_{20}/I_{30}=0.1$ и 0.2 представлены на рис. 5.

Как следует из поведения зависимостей с увеличением входного (справа в среду) значения интенсивности сигнальной волны $I_{1\ell}$ в 2 раза коэффициент усиления на выходе слева из

метаматериала $I_1(z=0)$ растет в 2 раза (кривые 2 и 4), при этом оптимальное значение мощности накачки равно 2.85 Вт. Отсюда, выбором большего уровня обратной волны на входе можно реализовать более интенсивную сигнальную волну на выходе из метаматериала.

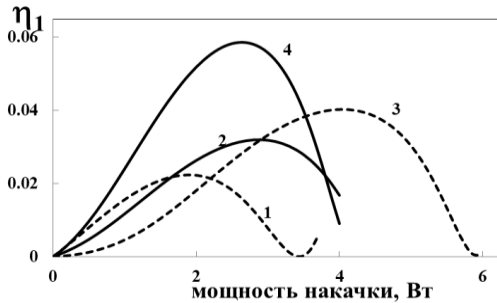


Рисунок 5. Зависимость эффективности преобразования в сигнальную волну от мощности накачки для $I_{1\ell} = 0$ при $I_{20}/I_{30} = 0.1$ (кривые 1-3) и 0.2 (кривая 4) и $\Delta = 5 \text{ см}^{-1}$ (кривая 3), 5.5 см^{-1} (кривые 2 и 4) 6 см^{-1} (кривая 3).

В результате анализа выражения для коэффициента усиления, в случае, когда на входе в метаматериал присутствуют все три волны (см. рисунок б), рост коэффициента усиления сигнальной волны зависит от соотношения уровней интенсивностей холостой и сигнальной волн на входе в метаматериал. Чем больше это соотношение, тем выше коэффициент усиления сигнальной волны, например сравнить кривые 2 и 7, где уровень интенсивности холостой волны к сигнальной отличается в 5 раз.

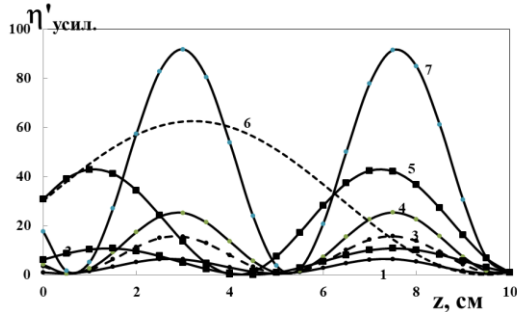


Рисунок 6. Зависимости коэффициента усиления, от длины метаматериала для $\Gamma_3=1 \text{ см}^{-1}$, $\ell=10 \text{ см}$, $\Delta=2.5 \text{ см}^{-1}$ при $I_{20}/I_{30}=0.1$ (кривые 1, 3, 4 и 6), 0.3 (кривые 2 и 5) и 0.5 (кривая 7), $I_{20}/I_{1\ell}=1$ (кривая 1), 5 (кривая 3), 10 (кривые 2 и 4), 50 (кривые 5, 6 и 7)

Отсюда, согласно полученным в работе аналитическим выражениям в ПЗИ, можно рассчитывать ожидаемые значения для коэффициента усиления и эффективности преобразования в метаматериале при НЧ накачке для каждого конкретного условия эксперимента.

В случае ВЧ наблюдаются бесконечно большие значения эффективности преобразования в сигнальную волну и коэффициента усиления сигнальной волны при выборе оптимального значения полной приведенной длины метаматериала (см. рисунок 7).

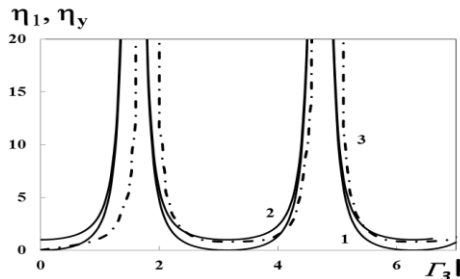


Рисунок 7. Зависимости эффективности преобразования в сигнальную волну (кривая 1) и коэффициента усиления (кривые

2 и 3) от полной приведенной длины метаматериала для $\Delta = 0$, $I_{1\ell} / I_{20} = 0.1$. Кривые 1 и 2 рассчитаны в ПЗИ, а кривая 3 в ПЗП.

Результаты для эффективности преобразования в сигнальную волну для трех разных уровней входной интенсивности сигнальной волны $I_{1\ell} / I_{20} = 0.1; 0.3; 0.5$ представлены на рисунке 8. Как следует из поведения зависимостей с увеличением входного (с правой стороны метаматериала) значения интенсивности сигнальной волны $I_{1\ell}$ в 5 раз коэффициент усиления на выходе слева из метаматериала $I_1(z=0)$ растет почти в 2 раза (при этом оптимальное значение мощности накачки равно 4.205 Вт). Отсюда, выбором большего входного значения обратной (сигнальной) волны можно реализовать более интенсивный сигнал обратной волны на выходе из метаматериала.

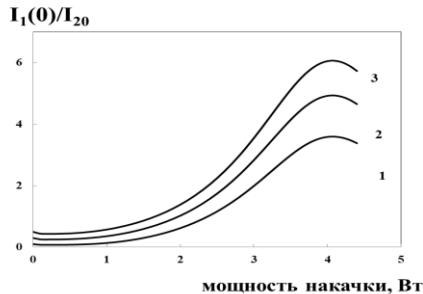


Рисунок 8. Зависимость эффективности преобразования в сигнальную волну от мощности накачки для полной длины метаматериала $\ell = 2$ см, $\Delta\ell/2 = 2.6$ при $I_{1\ell} / I_{20} = 0.1$ (кривая 1), 0.3 (кривая 2) и 0.5 (кривая 3).

В четвертой главе теоретически рассмотрены ГВГ и параметрическое взаимодействие электромагнитных волн в нанокompозитах и халькогенидных кристаллах среднего ИК диапазона в ПЗИ.

В этой главе обсуждаются фазовые эффекты в кристаллах $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$, $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ и $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$. В этих

соединениях за счет увеличения содержания одного и уменьшения содержания другого элемента теоретически показана возможность разработки кристаллов с некритичным фазовым синхронизмом на интересующей длине волны излучения.

Для нелинейного преобразования теоретический анализ в ПЗИ взаимодействия волн в отрицательных одноосных кристаллах $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ осуществляется с использованием системы укороченных уравнений²

$$\begin{aligned} \frac{dA_s}{dz} + \delta_s A_s + \frac{\gamma_n}{2} I^{n-1} A_s &= -i\gamma_s A_p A_i^* \exp(i\Delta z), \\ \frac{dA_i}{dz} + \delta_i A_i + \frac{\gamma_n}{2} I^{n-1} A_i &= -i\gamma_i A_p A_s^* \exp(i\Delta z), \\ \frac{dA_p}{dz} + \delta_p A_p + \frac{\gamma_n}{2} I^{n-1} A_p &= -i\gamma_p A_s A_i \exp(-i\Delta z). \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь $A_{s,i,p}$ - комплексные амплитуды сигнальной, холостой волн и волны накачки, распространяющихся в направлении оси z на соответствующих частотах. Коэффициенты нелинейной связи и потерь для j -й волны ($j=s,i,p$) обозначены, как γ_j и δ_j соответственно, γ_n - константа n -фотонного поглощения.

Предполагается, что кристалл имеет линейное и двухфотонное поглощение ($n=2$). А фазовая расстройка между взаимодействующими волнами имеет вид $\Delta = k_p - k_s - k_i$.

Задача исследовалась в общем случае, когда на входе присутствуют все три волны с соответствующими частотами $\omega_{p,i,s}$, поэтому граничные условия приобретают следующий вид:

$$A_{p,i,s}(z=0) = A_{p0,i0,s0} \exp(i\varphi_{p0,i0,s0}) \quad (10)$$

где $\varphi_{p0,i0,s0}$ - начальные фазы волны накачки, холостой и сигнальной волн при входе в среду, $z = 0$ соответствуют входу в

²Тагиев, З.А., Касумова, Р.Дж., Салманова, Р.А. Теория вырожденного четырёхволнового взаимодействия в приближении заданной интенсивности // – Санкт-Петербург: Оптика и спектроскопия, – 1999, 87, №1, – с. 94-97.

кристалл.

Решая систему уравнений (9) относительно комплексной амплитуды холостой волны A_i в ПЗИ, с применением граничных условий (10) для интенсивности холостой волны на выходе кристалла, которая определяется как $I_i(\ell_1) = A_i(\ell_1) \cdot A_i^*(\ell_1)$, получаем следующее выражение

$$I_i(\ell_1) = I_{io} \exp(-2\delta_i \ell_1) \left[\cosh^2 q \ell_1 + \left(\frac{\Delta}{2} + \frac{\gamma_i A_{so}^* A_{po}}{A_{io}} \right)^2 \frac{\sinh^2 q \ell_1}{q^2} \right], \quad (11)$$

где $q^2 = \Gamma_p^2 - \Gamma_s^2 - \frac{\Delta^2}{4}$, $\Gamma_s^2 = \gamma_i \gamma_p I_{so}$, $\Gamma_p^2 = \gamma_s \gamma_i I_{po}$.

Согласно полученным нами аналитическим выражениям для эффективности преобразования основной волны в волну второй гармоники и коэффициентов усиления изучается динамика процессов на основе построенных графиков зависимостей.

Как видно из кривых рис. 9, при определенных значениях параметра задачи в кристалле GaS_{Se} можно получить более сильный сигнал холостой волны, чем в GaSe. Здесь же показаны, экспериментальные точки (квадраты-GaS_{Se} и точки- GaSe)³.

Ниже в таблице 1 приведены рассчитанные величины угла синхронизма и углового дисперсионного коэффициента второго порядка для кристалла Hg_{0.7}Cd_{0.3}Ga₂S₄ для случая параметрической генерации света на холостой волне.

³Miyata, K., Picosecond mid-IR optical parametric amplifier based on the wide-bandgap GaS_{0.4}Se_{0.6} pumped by a Nd:YAG laser system at 1064 nm / K.Miyata, G.Marchev, A.Tyazhev [et al.] // Optics Letters, – 2011, 36, – p. 1785-1787

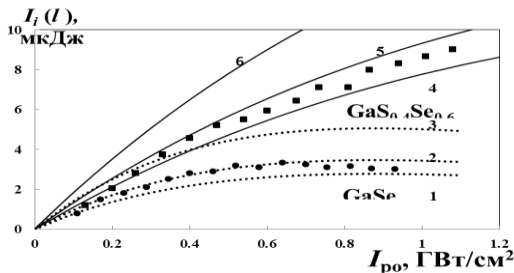


Рисунок 9. Зависимости интенсивности холостой волны $I_i(\ell)$ в кристаллах $\text{GaS}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ (кривые 4-6) и GaSe (кривые 1-3) в зависимости от приведенной интенсивности накачки I_{p0} , рассчитанные в ПЗИ при $I_{i0} = 1$ мкДж (кривые 1 и 4), 2 мкДж (кривые 2 и 5) и 5 мкДж (кривые 3 и 6), $I_{s0} / I_{p0} = 4.5 \cdot 10^{-8}$. Для следующих параметров кристалла $\text{GaS}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$: $\ell = 0.47 \text{ см}^3$, $\delta_i = 0.07 \text{ см}^{-1}$ и $\gamma_n = 0.415 \text{ см/ГВт}$ и кристалла GaSe : $\ell = 0.39 \text{ см}^3$, $\delta_i = 0.29 \text{ см}^{-1}$ и $\gamma_n = 1.46 \text{ см/ГВт}$.

Таблица 1. Данные по кристаллу $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Ga}_2\text{S}_4$ для случая параметрической генерации света на холостой волне.

кристалл	λ , мкм	n_o^ω	n_e^ω	Тип синхронизма	d_{eff} , пм/В	θ_s , градус	Угловой дисперсионный коэффициент второго порядка, $\text{см}^{-1} \text{угл. мин.}^{-1}$
$\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Ga}_2\text{S}_4$	1.064 накачка	2.430 288	2.398 99	$e \rightarrow o$ o	24. 94	90	0.0000634 955
	1.5772 сигнальная	2.405 065	2.367 763				
	3.27 холостая	2.386 262	2.352 55				

Далее рассматривался эффект генерации второй гармоники в перспективных кристаллах $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ и $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$.

Задача решалась для случая плоских волн: волны накачки с комплексной амплитудой A_1 на частоте ω_1 и второй гармоники с комплексной амплитудой A_2 на частоте ω_2 . Анализ генерации гармоники в среде можно описать известными укороченными уравнениями вида (взаимодействие $oo \rightarrow e$)⁴

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dz} + \delta_1 A_1 &= -i \frac{8\pi^2 d_{1eff}}{\lambda_1 n(\omega_1)} A_2 A_1^* \exp(-i\Delta z), \\ \frac{dA_2}{dz} + \delta_2 A_2 &= -i \frac{4\pi^2 d_{2eff}}{\lambda_2 n(\omega_2)} A_1^2 \exp(i\Delta z) \end{aligned} \quad (12)$$

здесь $\delta_{1,2}$ - коэффициенты поглощения, $d_{1,2eff}$ - эффективные нелинейные коэффициенты для случая $oo \rightarrow e$ скалярного синхронизма, $\lambda_{1,2}$ - длины волн, $\Delta = k_2 - 2k_1$ - фазовая расстройка, $n(\omega_{1,2})$ - показатели преломления кристалла, а k_1, k_2 - величины волновых векторов на частотах $\omega_{1,2}$, соответственно.

Исследование проводилось при следующих граничных условиях

$$A_1(z=0) = A_{10} \exp(i\varphi_{10}), \quad A_2(z=0) = 0, \quad (13)$$

где $z=0$ соответствует входу в кристалл, а φ_{10} - начальная фаза волны накачки на входе в среду.

Решаем систему укороченных уравнений (12), проинтегрировав второе уравнение относительно амплитуды гармоники и применяя ПЗИ. В результате для эффективности преобразования во вторую гармонику на выходе кристалла ($z = \ell$) получаем⁵:

⁴Дмитриев, В.Г. Прикладная нелинейная оптика: Генераторы второй гармоники и параметрические генераторы света / В.Г.Дмитриев, Л.В.Тарасов. - Москва: Физматлит, - 2004, - 512 с.

⁵ Tagiev, Z.H., Constant-intensity approximation in a nonlinear wave theory / Z.H.Tagiev, R.J.Kasumova, R.A.Salmanova [et al.] // Journal of Optics B: Quantum and Semiclass, - 2001.3, - p. 84-87.

$$\eta_2(\ell) = I_2(\ell)/I_{10} = \gamma_2^2 I_{10} \ell^2 \operatorname{sinc}^2 \lambda \ell \exp[-(\delta_2 + 2\delta_1)\ell] \quad (14)$$

где $\lambda^2 = 2\Gamma^2 - (\delta_2 - 2\delta_1 + i\Delta)^2/4$, $\Gamma^2 = \gamma_1\gamma_2 I_{10}$, $\operatorname{sinc} x = \sin x/x$,
здесь γ_1, γ_2 - коэффициенты нелинейной связи волн второго
порядка .

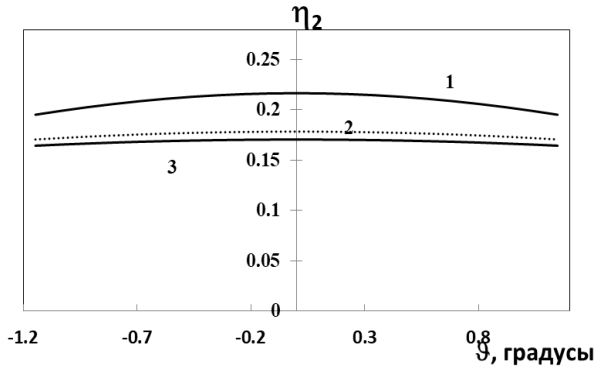


Рисунок 10. Зависимость эффективности преобразования второй гармоники в кристалле $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ от фазовой расстройки, при $\delta_{1,2}=0.1 \text{ см}^{-1}$, $I_{10}= 1.5 \text{ мВт/см}^2$, длине кристалла $l=0.2 \text{ см}$ для трех значений параметра $x=0$ (кривая 3), 0.2 (кривая 2) и 1 (кривая 1).

Из поведения кривых 1-3 рисунка 10 видно, что зависимость становится более гладкой с увеличением параметра x . Этот факт подтверждает тот факт, что режим не критичности кристалла к выполнению условия фазового синхронизма лучше выполняется с ростом концентрации серы. Однако при этом уменьшается нелинейная восприимчивость исследуемой структуры. Дальнейшие экспериментальные исследования данных перспективных нелинейных кристаллов $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ позволят определить компоненты тензора нелинейной восприимчивости для разных концентраций серы. А это, в свою очередь, позволит аналитически рассчитать в ПЗИ оптимальное относительное содержание серы в данном перспективном соединении и дать рекомендации разработчикам лазерных устройств.

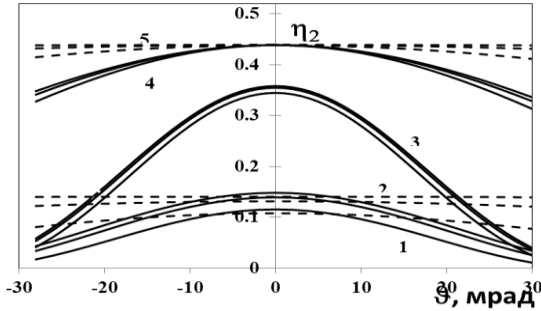


Рисунок 11. Зависимости эффективности преобразования волны второй гармоники в кристалле $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ от фазовой расстройки при $I_{10} = 0.6 \text{ МВт/см}^2$ для $x=0.7$ (группы кривых 1 и 4), 0.6 (группы кривых 2 и 5), 1 (группы кривых 3). В каждой из групп верхняя кривая соответствует длине волны равной 9.64 мкм, средняя – 9.55 мкм, а нижняя кривая – 9.31 мкм. Длина кристалла⁶ $l = 1.05 \text{ см}$, (группы кривых 1 и 2), 0.8 см (кривая 3) и 0.65 см (группы кривых 4 и 5). Для AgGaSe_2 кристалла $\delta_1 = 0.09 \text{ см}^{-1}$, $\delta_2 = 0.15 \text{ см}^{-1}$ и $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ $\delta_1 = 0.06 \text{ см}^{-1}$, $\delta_2 = 0.08 \text{ см}^{-1}$.

На рисунке 11 показаны результаты анализа ПЗИ процесса частотного преобразования в случае трех разных содержания индия в кристалле $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$: 0, 0.3 и 0.4. Рассмотрены три варианта длин волн накачки CO_2 лазера: 9.31 мкм, 9.55 мкм и 9.64 мкм.

Из сравнения поведения группы кривых 3, 4 и 5 видно, что с увеличением концентрации индия (т.е. параметра x) от 1 до 0.6 зависимость уплощается, становится все более полой. Это свидетельствует о переходе к режиму не критичности кристалла к выполнению условия фазового синхронизма. Так, например, в кристалле AgGaSe_2 изменение эффективности преобразования на 0.036 % происходит в угловом интервале значений от -0.6 мрад до $+0.6$ мрад. Замещение в кристалле части Ga на индий до содержания $x=0.7$ ($\text{AgGa}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{Se}_2$) ведет к аналогичному изменению эффективности, но уже в угловом интервале большем в 1.67 раз (от -1 мрад до $+1$ мрад). Дальнейшее

внедрение в кристалл индия до $x=0.6$ ($\text{AgGa}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{Se}_2$) увеличивает угловой интервал в 33 раза ($- 20$ мрад $+ 20$ мрад) по сравнению со случаем кристалла AgGaSe_2 . Отсюда в кристаллах $\text{AgGa}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{Se}_2$ не критичность к выполнению условия фазового синхронизма выполняется в большем угловом диапазоне, чем в $\text{AgGa}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{Se}_2$, а тем более в AgGaSe_2 . Данный вопрос был экспериментально исследован в⁶, но при длине экспериментального образца кристалла $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$, равной 1.05 см. В нашем случае это соответствует группе кривых 1 ($x=0.7$) и 2 ($x=0.6$). Сравнение кривых групп 1 и 4 и групп 2 и 5 показывает, что использование когерентной длины, т.е. оптимальной длины кристалла-преобразователя может позволить в 3 раза поднять эффективность преобразования с 0.15 до 0.45.

Кроме нелинейных трехчастотных процессов в халькогенидных кристаллах в этой главе так же рассматривается ГВГ в нанокompозитных пленках ZnO/PMMA . Нанокристаллики ZnO были получены методом электрохимического осаждения на поверхности пленок PMMA .

Изучение морфологии поверхности пленок проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа. Кроме того был проведен рентгеноструктурный анализ, результаты которого приведены на рис.12.

Приведенная дифрактограмма иллюстрирует пленки, осажденные при -1.0 В. Согласно рисунку, пленки являются поликристаллами с гексагональной фазой и обладают сильным пиком в плоскости (002).

⁶ Андреев, Ю.М., Удвоение частоты CO_2 -лазеров в новом нелинейном кристалле $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ / Ю.М.Андреев, И.С.Батулин, П.П.Гейко [и др.] // Квантовая электроника, – Москва: – 1999. 29, №1, –с. 66-70.

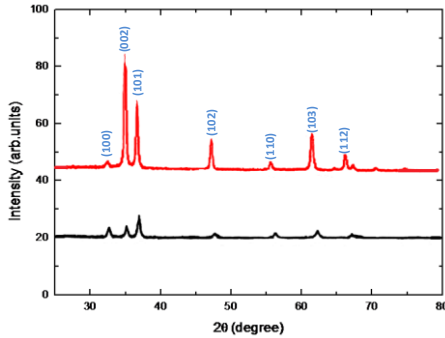


Рисунок 12. Рентгеноструктурная картина ZnO пленок

На рис. 13, показаны спектры оптического пропускания пленок оксида цинка осажденных при различных катодных потенциалах.

Для пленки, нанесенной при $- 1.0$ В, оптический коэффициент пропускания составляет около $\sim 85\%$. Ширина запрещенной зоны пленки составляет 3.3 эВ.

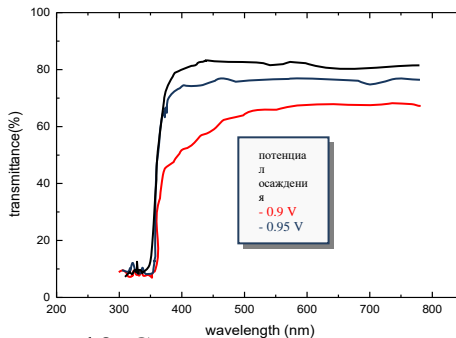


Рисунок 13. Спектры оптического пропускания

В этом же разделе показаны так же различные способы вычисления показателей преломления для ZnO. Эмпирическая модель поглощения Коши была использована при анализе⁷ из работы

$$n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$$

⁷Tompkins, H. G. Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry and / H.G.Tompkins, W.A.McGahan, – New York: John Wiley & Sons, – 1999. – p. 93.

для ZnO/PMMA2 (таблица 2) и для ZnO/PMMA1(таблица 3).

Таблица 2. Показатели преломления для ZnO/PMMA2, вычисленные методом Коши

λ , нм	A	B, нм ²	C, нм ⁴	$n_{\omega,2\omega}$
1064	1.9960	-0.024	0.01	1.9960
532	1.9960	-0.024	0.01	1.9960

Таблица 3. Показатели преломления для ZnO/PMMA1, вычисленные методом Коши

λ , нм	A	B, нм ²	C, нм ⁴	$n_{\omega,2\omega}$
1064	1.984	-0.023	0.011	1.984
532	1.984	-0.023	0.011	1.984

Благодаря теоретически полученным результатам было обнаружено уменьшение квадратичной восприимчивости с ростом концентрации ZnO в отличие от аналогичных объемных материалов. Однако из-за большой длины взаимодействия оптических волн пленки ZnO/PMMA генерируют сильный сигнал второй гармоники. Этот вывод согласуется с экспериментальными результатами работы⁸.

⁸Kulyk, B. Linear and nonlinear optical properties of ZnO/PMMA nanocomposite films / B.Kulyk, B.Sahraoui, O.Krupka [et al.] //Journal of Applied Physics, – 2009. 106, – p. 093102-1-093102-6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При интенсивности накачки 20 ГВт/см^2 , для 16% -ной концентрации ZnO, эффективность преобразования при ГТГ максимальна на когерентной длине, равной 0.64 мкм. По мере увеличения концентрации ZnO с 3% до 16% эффективность частотного преобразования увеличивается почти в 1.6 раза при ГТГ, а в случае генерации второй гармоники увеличение концентрации с 5% до 15% приводит к увеличению эффективности преобразования почти в два раза.

2. Учет обратной реакции волны третьей гармоники на фазу основного излучения в материалах с отрицательным показателем преломления приводит, к тому что, с увеличением интенсивности основного излучения в интервале $\Gamma\ell = 0.7 \div 1$ эффективность преобразования падает в три раза.

3. В результате рассмотрения эффекта самовоздействия в метаматериале, обнаружено, что изменение фазовой расстройки от 0.1 до 0.5 приводит к увеличению фазы волны накачки приблизительно в пять раз, а в случае обычной кубичной среды это изменение составляет в 26.4 раз меньшую величину.

4. В метаматериале при НЧ накачке при уровне входной интенсивности холостой волны, превышающей входную интенсивность сигнальной в 5 раз, наблюдается рост усиления сигнальной волны почти в 20 раз. В случае ВЧ накачки при оптимальном значении полной приведенной длины метаматериала наблюдаются бесконечно большие значения эффективности преобразования и коэффициента усиления сигнальной волны.

5. По мере увеличения интенсивности накачки максимум параметрического преобразования достигается на меньших когерентных длинах кристалла. Режим не критичности $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ и $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ кристаллов к выполнению условия фазового синхронизма лучше выполняется с увеличением параметра x в этих соединениях. В кристалле $\text{AgGa}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{Se}_2$ изменение эффективности преобразования на 0.036% происходит в угловом

интервал в 33 раза больше по сравнению с кристаллом AgGaSe_2 .

6. В кристалле GaSSe при интенсивности накачки ($\lambda=1.0642$ мкм) 0.7 ГВт/см^2 и потерях 0.07 см^{-1} происходит усиление холостой волны ($\lambda=6.45$ мкм) от 5 мкДж до 10 мкДж. Режим не критичности рассматриваемых кристаллов к точности выставления угла синхронизма можно реализовать при малых уровнях интенсивностей волны накачки и сигнальной волны.

7. В нанокompозитных тонких пленках ZnO/PMMA , полученных методом электрохимического осаждения, рентгеноструктурным анализом подтверждена гексагональная фаза пленок.

Список опубликованных статей по теме диссертации

1. Qasımova, R.C., Səfərova, G.Ə., Şamilova, Ş.A., Məlikova Əhmədova, N.A. Metamateriallarda üçüncü harmonikanın generasiyası // “Fizikanın aktual problemləri” VIII Respublika Konfransının materialları, – Bakı: –17 dekabr, –2015, –səh. 174-178.

2. Qasımova, R.C., Şamilova, Ş.A., Səfərova, G.A., Məlikova Əhmədova, N.A. Metamateriallarda optik dalğaların parametrik qarşılıqlı təsiri // “Fizikanın aktual problemləri” IX Respublika Konfransının materialları, – Bakı: –22 dekabr, – 2016, – səh.138-140.

3. Şamilova, Ş.A., Məlikova Əhmədova, N.A. Mənfı indeksli mühitlərdə üçüncü harmonika dalğasının kompleks amplitudu // “XƏZƏRNEFTQAZYATAQ”-2016 elmi-təcrübi konfransı, –Bakı: –24-25 dekabr, – 2016, səh. 646-650.

4. Касумова, Р.Дж., Амиров, Ш.Ш., Шамилова, Ш.А. Встречное взаимодействие оптических волн в метаматериалах при низкочастотной накачке квантовая электроника // – Москва: Квантовая электроника, – 2017, 47 №7, – с. 655-660.

5. Касумова, Р.Дж., Мамедов, Г.М., Шамилова, Ш.А. Получение и генерация второй гармоники в ZnO/PMMA

нанокомпозитных пленок // – Dusseldorf: Eastern-European Scientific Journal, – 2016., – p.112-115.

6. Касумова, Р.Дж., Мамедов, Г.М., Шамилова, Ш.А. Получение и исследование оптических свойств ZnO/PMMA нанокомпозитных пленок // “Opto, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası” Beynəlxalq Konfrans, – Bakı: – 25-26 dekabr, – 2015, – səh. 45-47.

7. Шамилова, Ш.А., Касумова, Р.Дж. Параметрическое взаимодействие встречных волн при высокочастотной и низкочастотной накачках // Magistrantların və gənc tədqiqatçıların “Fizika və astronomiya problemləri” Beynəlxalq Elmi konfrans, – Bakı: – 24-25 may, – 2018, s.144-146.

8. Kasumova, R.J., Phase effects in metamaterials at Third-Harmonic Generation / R.J.Kasumova, G.A.Safarova, Sh.A.Shamilova [et al.] // International Journal of Engineering and Technology, – 2015, 15, № 06, – p. 19–30.

9. Kasumova, R.J., Mamedov, H.M., Shamilova, Sh.A., Mamedova, V.C. Angular dispersion coefficient for GaS_{0.4}Se_{0.6} at 6.45 mcm // Materials of 8th International Scientific Conference «Science and Society», – London: – 24-29 November, – 2015, – p. 43-46.

10. Kasumova, R.J., Shamilova, Sh.A. Optical parametric amplification at 6.45 mcm for GaS_xSe_{1-x} // International Journal of Scientific & Technology Research, – 2014. 3, № 6, – p. 189-192.

11. Kasumova, R.J., Shamilova, Sh.A. Phase Effects at Third Harmonic Generation in ZnO/PMMA nanocomposite films // International Journal of Engineering and Technology, – 2015. 15, № 4, – p. 10-21.

12. Kasumova, R.J., Shamilova, Sh.A. Second harmonic generation of laser radiation in AgGa(Se_{1-x}S_x)₂ crystal // Materials digest of the X International Scientific and Practice Conference “Trends of modern science 2014”, – Sheffield: – May 30-June 7, – 2014, 23, – p. 58 – 60.

13. Kasumova, R.J., Safarova, G.A., Shamilova, Sh.A., Kerimova, N.V. GaS_{0.4}Se_{0.6} crystals as parametric converters in mid-IR range of spectrum // Materials digest of the IX International

Conference "Science, Technology and Higher Education", – Canada: – 23-24 december, № 2015, – p. 218-221.

14. Kasumova, R.J., Mamedov, H. M., Shamilova, Sh.A. Phase Effects at Second-Harmonic Generation in ZnO/PMMA nanocomposite films // Journal of Physical Sciences and Application , – 2015. 7, №5, – p. 48-58.

15. Kasumova, R.J., Mamedov, H.M., Shamilova, Sh.A., Mamedova, V.C. // Materials of 8th International Scientific Conference «Science and Society» , – London: – 24-29 November, –2015, – p. 43-46.

16. Kasumova, R.J., Mamedov, H.M., Shamilova, Sh.A, Safarova, G.A., Kerimova, N.V. Phase Effects in ZnO/PMMA nanocomposite films, at Second-Harmonic Generation // Proceeding of International Conference “Modern Trends in Physics“ – Baku:, – 20-22 April, – 2017, – p.25-27.

17. Kasumova, R.J., Optical parametric oscillation in $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$ / R.J.Kasumova, Sh.A.Shamilova, G.A.Safarova [et al.] International Journal of Engineering and Sciences, – 2015, 15, № 02, – p. 16-22.

18. Kasumova, R.J., Phase Effects at parametrical interaction in metamaterials / R.J.Kasumova, Z.H.Tagiyev, Sh.Sh.Amirov [et al.] // Journal of Russian Laser Research, – 2017.38, №4, – p. 211-218.

19. Mamedov, H. M., Electrical and photoelectrical characteristics of c-Si/Porous-Si/CdS heterojunctions / H. M.Mamedov, A.Kukevecz, Z.Konya [et al.] // Russian Physics Journal, – 2019. 61, №. 9, –p. 1660-1666.

20. Mamedov, H.M., Mamedova, V.J., Ahmadova, Kh.M., Shamilova, Sh.A., Safarov, V.H., Garibov, G.I. Effect of deposition and heat treatment regimes on the electrical and photoelectrical properties Of heterojunctions p-Si/ $Cd_{1-x}Zn_xO$ //Opto-nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası, – Bakı, – 25-26 dekabr, – 2015, – səh.218-221.

21. Shamilova, Sh.A. Influence of doping material on optical parametric oscillation in $Hg_{1-x}Cd_xGaS_4$ crystal // – Baku: Journal of Low Dimensional Systems, – 2019. 4, №1, – p.9-14.

22. Shamilova, Sh.A. Influence of doping material on second harmonic generation in AgGaSe₂ crystal // – Baku: Journal of Low Dimensional Systems, – 2019. 3, №2, – p.23-29.

Защита диссертации состоится 11 ноября 2021 – го года в 15⁰⁰ на заседании Диссертационного совета ЕД 2.19 действующего, на базе Бакинского Государственного Университета.

Адрес: AZ 1148, г. Баку, ул. З. Халилова 23, Бакинский Государственный Университет

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Бакинского Государственного Университета.

Электронная версия диссертации и автореферата размещены на официальном сайте Бакинского Государственного Университета.

Автореферат разослан по соответствующим адресам 08 октября 2021 – го года.

Подписано в печать: 05.10.2021

Формат бумаги: A5

Объем: 37039

Тираж: 70