

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

На правах рукописи

Новиков Алексей Александрович

**САМОПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В АКТИВНО-НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ
С РЕГУЛЯРНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2005

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Лаптев Георгий Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Ларионцев Евгений Григорьевич

кандидат физико-математических наук,
Суязов Николай Владимирович

Ведущая организация: Институт кристаллографии
им. А.В. Шубникова РАН

Защита состоится «__» _____ 2005 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2 Москва, Ленинские горы, МГУ, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «__» _____ 2005 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.31
кандидат физ.-мат. наук, доцент

Т.М. Ильинова

24. *Novikov A.A., Laptev G.D., Firsov V.V.* Q-switched quasi-phase matched self-frequency conversion in periodically poled Nd:Mg:LiNbO₃ // XI Conference on Laser Optics. St. Petersburg, Russia, June 30 – July 4, 2003. Technical Program, p. 15.

25. *Novikov A.A., Laptev G.D., Firsov V.V., Chirkin A.S.* Quasi-phase-matched self-frequency conversion in periodically poled Nd:Mg:LiNbO₃ crystal // Third Russian-French Laser Symposium. Moscow, Russia, October 8–10, 2003. Program of conference, p. 6.

26. *Naumova I.I., Evlanova N.F., Blokhin S.A., Chaplina T.O., Laptev G.D., Novikov A.A.* Periodic domain structure in LiNbO₃:Nd:Mg grown from flux // The 10th European Meeting on Ferroelectricity. Cambridge, UK, August 3–8, 2003. Journal of Conference Abstracts, V. 8. p. 239.

27. *Лантев Г.Д., Новиков А.А., Фирсов В.В.* Квазисинхронное самоудвоение и сложение частот в режиме модуляции добротности в лазере на кристалле Nd:Mg:LiNbO₃ с регулярной доменной структурой // Квантовая электроника, 2004. Т. 34, № 3. С. 233–235.

28. *Chirkin A.S., Novikov A.A., Laptev G.D.* Nonclassical light generation in the process of self-frequency halving in a periodically poled active nonlinear Nd:Mg:LiNbO₃ crystal // Journal Optics B: Quantum and Semiclassical Optics, 2004. V. 6. P. S483–S486.

29. *Novikov A.A., Chirkin A.S.* Photon statistics at self-parametric frequency conversion // X International Conference on Quantum Optics. Minsk, Belarus, May 30 – June 3, 2004. Book of abstracts, p. 20.

30. *Новиков А.А., Лантев Г.Д., Чиркин А.С.* Пространственная структура излучения в процессе самоудвоения частоты лазерной генерации // Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики-2004». Санкт-Петербург, Россия, 18–21 октября, 2004. Сборник трудов, с. 65.

31. *Новиков А.А., Чиркин А.С.* Неклассический свет при квазисинхронном параметрическом самопреобразовании частоты // ЖЭТФ, 2004. Т. 126, № 5. С. 1089–1100.

32. *Лантев Г.Д., Новиков А.А., Чиркин А.С.* Пространственные и энергетические характеристики лазерного излучения и второй гармоники при самоудвоении частоты // Квантовая электроника, 2005. Т. 35, № 1. С. 13–20.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одна из важных задач нелинейной оптики связана с поиском новых возможностей по преобразованию частот когерентного оптического излучения с целью получения излучения в новых спектральных диапазонах. Чрезвычайно интересным представляется создание и использование в качестве преобразователей частот интегральных элементов, например, активно-нелинейных кристаллов, которые одновременно выполняют функции источника когерентного излучения и нелинейно-оптического преобразователя частоты.

Под активно-нелинейными кристаллами (АНК) понимают нелинейные кристаллы, легированные примесями ионов редкоземельных элементов группы лантаноидов (например, Nd, Yb, Er). За счет ионов примесей в АНК под воздействием накачки возможно осуществление лазерной генерации излучения определенной частоты, а за счет нелинейных свойств кристаллической матрицы возможно нелинейно-оптическое преобразование частоты этого излучения. Процессы, в которых одновременно имеет место лазерная генерация излучения и нелинейное преобразование его частоты, получили название процессов самопреобразования частоты лазерного излучения. Осуществление процессов самопреобразования частоты привлекательно с точки зрения создания компактных твердотельных систем, генерирующих когерентное излучение в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах, что может быть с успехом использовано в целом ряде приложений (лазерная печать, устройства хранения и записи информации, медицина, оптическая связь и др.).

Исследования АНК и реализация в них процессов генерации лазерного излучения и удвоения частоты начались еще в конце 60-х годов прошлого века, однако существенный прогресс в использовании АНК наметился лишь к 1990-м годам с началом применения диодных лазеров в качестве источников накачки таких кристаллов. Следует отметить, что существующие в настоящее время

АНК позволяют реализовать лишь несколько нелинейно-оптических процессов в силу ограничений, связанных с дисперсионными свойствами кристаллов. Таких недостатков лишены нелинейно-оптические кристаллы с регулярной доменной структурой (РДС-кристаллы). В этой связи расширение диапазона генерируемых частот связывают с поиском новых АНК и с использованием АНК с регулярной доменной структурой.

РДС-кристаллы обладают периодически меняющимися на длине кристалла нелинейными свойствами. За счет подбора периода изменения нелинейных свойств в РДС-кристаллах возможно осуществление так называемых квазисинхронных процессов нелинейно-оптического преобразования частоты. Применение квазисинхронных процессов снимает ограничения на использование нелинейных кристаллов, накладываемые их дисперсионными характеристиками, и существенно расширяет их возможности по нелинейно-оптическому преобразованию частоты.

Активно-нелинейные РДС-кристаллы (РДС-АНК) сочетают в себе достоинства АНК и нелинейно-оптических РДС-кристаллов. В РДС-АНК возможна реализация различных квазисинхронных процессов самопреобразования частоты и получение за счет этого когерентного излучения в различных спектральных диапазонах.

Весьма перспективным представляется использование РДС-АНК в квантовой оптике, например, для получения неклассических состояний света и перепутанных фотонных состояний. Традиционно для этих целей используют процессы трехчастотного взаимодействия волн в нелинейных кристаллах. В процессе самопреобразования частоты также имеет место трехчастотное взаимодействие волн, при этом одна из этих волн усиливается за счет активных свойств среды.

Таким образом, РДС-АНК представляются весьма перспективными для создания компактных источников когерентного и неклассического света в различных спектральных диапазонах. В связи с этим возникает необходимость

неклассического света в активно-нелинейных кристаллах // Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики». Санкт-Петербург, Россия, 14–17 октября, 2002. Сборник трудов, С. 60–61.

14. *Chirkin A.S., Nikandrov A.V., Novikov A.A.* Squeezed light in periodically poled nonlinear and active-nonlinear crystals // *Deutsch-Russisches Lasersymposium*. Pommersfelden, Deutschland, 09.10–16.10, 2002. Abstracts, p. 4.

15. *Кравцов Н.В., Лантев Г.Д., Наумова И.И., Новиков А.А., Фирсов В.В., Чиркин А.С.* Внутррезонаторное квазисинхронное сложение частот в лазере на активно-нелинейном кристалле Nd:Mg:LiNbO₃ с регулярной доменной структурой // *Квантовая электроника*, 2002. Т. 32, № 10. С. 923–924.

16. *Laptev G.D., Novikov A.A., Firsov V.V.* Quasi-phase-matched self-frequency conversion in a periodically poled Nd:Mg:LiNbO₃ // *Photonics West – LASE 2003: Lasers and Applications in Science and Technology*, San Jose, California USA, January 25–31, 2003. Technical Summary Digest, P. 205–206.

17. *Новиков А.А., Лантев Г.Д., Чиркин А.С.* Сжатый свет при самоудвоении частоты в активно-нелинейных кристаллах с регулярной доменной структурой // *Оптика и спектроскопия*, 2003. Т. 94, № 5. С. 818–825.

18. *Наумова И.И., Евланова Н.Ф., Блохин С.А., Чаплина Т.О., Новиков А.А.* Регулярная доменная структура в кристалле ниобата лития: стабилизация периода // *Кристаллография*, 2003. Т. 48, № 4. С. 758–759.

19. *Evlanova N.F., Naumova I.I., Blokhin S.A., Chaplina T.O., Laptev G.D., Novikov A.A.* Grown periodically poled lithium niobate crystal: period stabilization // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2003. V. 5. P. 127–130.

20. *Laptev G.D., Novikov A.A., Firsov V.V.* Quasi-phase-matched self-frequency summing in a periodically poled Nd:Mg:LiNbO₃ // *Proceeding SPIE*, 2003. V. 4972. P. 42–49.

21. *Новиков А.А., Лантев Г.Д.* Неклассический свет при квазисинхронном самоделинии частоты пополам // III семинар памяти Д.Н. Клышко, Москва, Россия, 26–28 мая, 2003. Программа семинара.

22. *Лантев Г.Д., Новиков А.А., Чиркин А.С.* Взаимодействие световых волн в активно-нелинейных и нелинейных кристаллах с регулярной доменной структурой // *Письма в ЖЭТФ*, 2003. Т. 78, № 1. С. 45–58.

23. *Chirkin A.S., Novikov A.A., Laptev G.D.* Nonclassical light generation in the process of self-frequency halving in periodically poled active nonlinear crystals // 8th International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations. Puebla, Mexico, June 9–13, 2003. Program of Conference.

Nd:Mg:LiNbO₃ // Proceeding SPIE, 2001. V. 4268. P. 26–35.

4. *Laptev G.D., Novikov A.A., Naumova I.I.* Intracavity quasi-phase matched self-frequency conversions in periodically poled Nd:Mg:LiNbO₃ // XVII International Conference on Coherent and Nonlinear Optics. Minsk, Belarus, June 26 – July 1, 2001. Technical digest, p. 250.

5. *Новиков А.А., Лантев Г.Д.* Внутррезонаторные последовательные квазисинхронные взаимодействия в кристалле Nd:Mg:LiNbO₃ // Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2001». Санкт-Петербург, Россия, 16–19 октября, 2001. Сборник трудов, с. 101.

6. *Лантев Г.Д., Новиков А.А.* Внутррезонаторное квазисинхронное самопреобразование частоты оптического излучения в кристалле Nd:Mg:LiNbO₃ с регулярной доменной структурой // Квантовая электроника, 2001. Т. 31, № 11. С. 981–986.

7. *Новиков А.А.* Самопреобразование частоты лазерной генерации в активно-нелинейных кристаллах с регулярной доменной структурой // IX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2002». Москва, Россия, 9–12 апреля, 2002. Сборник тезисов, С. 94–95.

8. *Novikov A.A., Laptev G.D., Chirkin A.S.* Nonclassical light in periodically poled active nonlinear crystals // IX International Conference on Quantum Optics, Raubichi, Belarus, May 14–17, 2002. Book of abstracts, p. 42.

9. *Чиркин А.С., Лантев Г.Д., Морозов Е.Ю., Никандров А.В., Новиков А.А.* Квазисинхронные волновые взаимодействия в нелинейных и активно-нелинейных оптических кристаллах с регулярной доменной структурой // VIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах». Красновидово, Московская область, 26–31 мая, 2002. Труды, С. 7–8.

10. *Laptev G.D., Novikov A.A., Chirkin A.S.* Light wave interaction in active nonlinear crystals with quadratic nonlinearity // Journal of Russian Laser Research, 2002. V. 23. P. 183–210.

11. *Novikov A.A., Laptev G.D., Chirkin A.S.* Squeezed light generation by self-frequency conversions in periodically poled active nonlinear crystals // International Quantum Electronics Conference. Moscow, Russia, June 22–27, 2002. Technical Digest, p. 25.

12. *Лантев Г.Д., Новиков А.А.* Внутррезонаторные последовательные квазисинхронные взаимодействия в активно-нелинейной среде с регулярной доменной структурой // Оптика и спектроскопия, 2002. Т. 93, №1. С. 131–138.

13. *Новиков А.А., Чиркин А.С., Лантев Г.Д.* Квантовая теория генерации

детального исследования РДС-АНК и возможностей осуществления в таких кристаллах процессов самопреобразования частоты лазерного излучения, в частности, развитие классической и квантовой теорий процессов самопреобразования частоты в РДС-АНК и экспериментальные исследования этих процессов.

Цели и задачи диссертационной работы

К началу настоящей диссертационной работы в научной литературе имелось лишь несколько публикаций, посвященных исследованию квазисинхронного самоудвоения частоты – одного из возможных процессов самопреобразования частоты в РДС-АНК. В связи с этим целью диссертационной работы являлось детальное исследование процессов самопреобразования частоты лазерного излучения в РДС-АНК, в частности:

1. Экспериментальная реализация и исследование процессов самопреобразования частоты в РДС-АНК.
2. Теоретическое исследование процессов самопреобразования частоты.
3. Исследование возможности получения неклассического света в процессах самопреобразования частоты.

Научная новизна

1. Экспериментально реализованы и исследованы процессы самоудвоения частоты лазерного излучения и самосложения частот лазерного излучения и излучения накачки в РДС-АНК Nd:Mg:LiNbO₃ в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности резонатора.

2. Разработана теория трехчастотных процессов и последовательных процессов самопреобразования частоты лазерного излучения в РДС-АНК в приближении плоских волн. Проведены исследования процессов параметрического самопреобразования частоты, самосложения частот, последовательного самоудвоения частоты и последовательного параметрического самопреобразования частоты.

3. Исследованы пространственные характеристики излучения в процессах самоудвоения частоты и самосложения частот в РДС-АНК.

4. Разработана квантовая теория процессов самопреобразования частоты лазерного излучения в РДС-АНК. Продемонстрирована возможность генерации неклассического света в таких процессах.

Научная и практическая значимость работы

- Экспериментальные исследования показали, что РДС-АНК Nd:Mg:LiNbO_3 может быть использован для создания интегральных источников когерентного излучения с самопреобразованием частоты, работающих в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности резонатора.

- Развита теория процессов самопреобразования частоты позволяет находить параметры РДС-АНК, накачки и резонатора, при которых возможна эффективная реализация данных процессов.

- Развита квантовая теория процессов самопреобразования частоты лазерного излучения позволяет с помощью аналитических выражений рассчитывать статистические характеристики световых полей в процессах самопреобразования частоты в зависимости от параметров РДС-АНК, накачки и резонатора.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В кристалле Nd:Mg:LiNbO_3 с регулярной доменной структурой возможна реализация процессов квазисинхронного самопреобразования частоты лазерного излучения (самосложения, параметрического самопреобразования, последовательного самоутроения и последовательного параметрического самопреобразования).

2. Использование резонатора для лазерного излучения и излучения на преобразованной частоте в процессах самосложения, параметрического самопреобразования, последовательного самоутроения и последовательного параметрического самопреобразования частоты позволяет получить максимальную

менной структурой, выращенных по методу Чохральского. Проведены исследования мощностных и пространственных характеристик генерируемого излучения. Максимальная мощность излучения второй гармоники (длина волны 0,542 мкм) в непрерывном режиме генерации составила примерно 1,3 мВт, а в режиме модуляции добротности – 2 мВт. Параметр качества пучка второй гармоники составил $M_x^2 = 1,25$ и $M_y^2 = 2,08$. В процессе самосложения частот максимальная мощность излучения на суммарной частоте (длина волны 0,464 мкм) равнялась 35 мВт. Экспериментальные и теоретические мощностные зависимости имеют одинаковый вид.

4. Развита квантовая теория процессов самопреобразования частоты лазерного излучения в активно-нелинейных кристаллах с регулярной доменной структурой. Получены выражения для спектра флуктуаций квадратурных компонент генерируемого излучения и исследована их зависимость от параметров задачи. Исследованы квантовые свойства излучения, генерируемого в процессах самоудвоения, самоделения и самосложения частот. Установлено, что наибольшее подавление флуктуаций в квадратурных компонентах генерируемого излучения имеет место при самоудвоении частоты (~ 70%) и в подпороговом режиме генерации субгармоники при самоделении частоты (~ 90%).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Новиков А.А., Лантев Г.Д., Морозов Е.Ю. Преобразование оптических частот в активно-нелинейных средах с регулярной доменной структурой // II Международная конференция «Фундаментальные проблемы физики». Саратов, Россия, 9–14 октября, 2000. Материалы конференции, С. 7–8.

2. Новиков А.А., Морозов Е.Ю., Лантев Г.Д. Преобразования оптических частот в активно-нелинейных средах с регулярной доменной структурой // Научная молодежная школа «Оптика-2000». Санкт-Петербург, Россия, 17–19 октября, 2000. Сборник трудов, с. 92.

3. Laptev G.D., Novikov A.A., Chirkin A.S., Firsov V.V., Kravtsov N.V. Intracavity quasi-phase-matched self-frequency doubling and halving in periodically poled

ты:

1. Развита теория процессов самопреобразования частоты лазерного излучения в активно-нелинейных кристаллах с регулярной доменной структурой в приближении плоских световых волн. На основе этой теории детально изучены процессы самоудвоения частоты, самоделения частоты пополам, самосложения частот, последовательного самоутроения частоты и последовательного параметрического самопреобразования частоты. Получены аналитические выражения для интенсивностей волн, участвующих в этих процессах. Показано, что путем подбора параметров кристалла, накачки и резонатора можно существенно увеличить мощность излучения, генерируемого в процессах самопреобразования частоты.

2. Проведено исследование процессов самопреобразования частоты с учетом дифракционных эффектов. Численными методами изучены пространственные и энергетические характеристики излучения, генерируемого в процессах самоудвоения и самосложения частот в активно-нелинейном кристалле с регулярной доменной структурой, расположенном внутри резонатора. Установлено, что пространственное распределение интенсивности излучения, появляющегося за счет нелинейного процесса в кристалле, оказывает влияние на мощность лазерного излучения, слабо влияя на пространственное распределение его интенсивности. Показано, что на формирование пространственного распределения интенсивности получаемого в нелинейном процессе излучения оказывает влияние не только пространственная структура лазерного излучения, но и наличие резонатора по преобразованной частоте. Исследовано влияние параметров кристалла, накачки и резонатора на пространственные и энергетические характеристики рассматриваемых процессов и выявлены условия получения в них максимальной мощности.

3. В непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности резонатора экспериментально реализованы процессы самоудвоения частоты и самосложения частот в активно-нелинейных кристаллах Nd:Mg:LiNbO_3 с регулярной до-

мощность излучения при оптимальном подборе параметров активно-нелинейного кристалла с регулярной доменной структурой, накачки и резонатора.

3. В процессах самоудвоения частоты, параметрического самопреобразования частоты и самосложения частот в активно-нелинейных кристаллах с регулярной доменной структурой возможна генерация квадратурно-сжатого света. Наибольшее подавление квантовых флуктуаций в квадратурной компоненте можно получить в подпороговом режиме параметрического самопреобразования частоты.

Апробация работы

По материалам диссертации опубликовано 32 работы, из них 14 – в научных журналах: Квантовая электроника (2005, 2004, 2002, 2001); ЖЭТФ (2004); Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics (2004); Письма в ЖЭТФ (2003); Оптика и спектроскопия (2003, 2002); Кристаллография (2003); Journal of Optoelectronics and Advanced Materials (2003); Proceeding SPIE (2003, 2001); Journal of Russian Laser Research (2002).

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: Вторая международная конференция «Фундаментальные проблемы физики» (Саратов, Россия, 2000); Международная научная молодежная школа «Оптика-2000» (Санкт-Петербург, Россия, 2000); XVII International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (Minsk, Belarus, 2001); Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2001» (Санкт-Петербург, Россия, 2001); IX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2002» (Москва, Россия, 2002); IX International Conference on Quantum Optics (Raubichi, Belarus, 2002); International Quantum Electronics Conference (Moscow, Russia, 2002); VIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», (Красновидово, Московская область, 2002); Международная конференция

«Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург, Россия, 2002); Deutsch-Russisches Lasersymposium (Pommersfelden, Deutschland, 2002); Photonics West – LASE 2003: Lasers and Applications in Science and Technology (San Jose, California, USA, 2003); 8th International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations (Puebla, Mexico, 2003); XI Conference on Laser Optics (St. Petersburg, Russia, 2003); Third Russian-French Laser Symposium (Moscow, Russia, 2003); The 10th European Meeting on Ferroelectricity (Cambridge, UK, 2003); X International Conference on Quantum Optics (Minsk, Belarus, 2004); Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург, Россия, 2004) и опубликованы в их трудах, а также обсуждались на III семинаре памяти Д.Н. Клышко (Москва, Россия, 2003), научных семинарах кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и научном семинаре по физике и спектроскопии лазерных кристаллов Института кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН.

Список опубликованных работ приведен в конце настоящего автореферата на стр. 15 – 18.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения. В конце приведен список цитируемой литературы, содержащий 168 наименований. Полный объем диссертационной работы составляет 155 страниц, включая 69 рисунков и 3 таблицы.

Личный вклад

Приведенные в диссертации теоретические результаты получены автором лично, экспериментальные результаты получены при непосредственном участии автора.

В этой же главе проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов, полученных в Главе II и Главе III диссертации.

В **пятой главе** диссертации представлены результаты квантовой теории процессов самопреобразования частоты РДС-АНК. Получена система уравнений Гейзенберга-Ланжевена, описывающая эволюцию операторов полей, инверсной населенности и поляризации атомов среды. Система уравнений Гейзенберга-Ланжевена решалась при помощи линеаризации, когда оператор представлялся в виде суммы стационарного решения (классической величины) и оператора квантовых флуктуаций в окрестности стационарного значения, и последующего перехода к Фурье-спектрам операторов флуктуаций. Такой метод решения позволил получить аналитические выражения для спектральных плотностей флуктуаций в квадратурных компонентах генерируемого излучения в процессах самоудвоения, параметрического самопреобразования и самосложения. Было продемонстрировано, что в процессах самопреобразования частоты лазерного излучения возможна генерация неклассического (квадратурно-сжатого) света. Показано, что максимальная эффективность генерации неклассического света возможна в процессе самоудвоения частоты и в процессе параметрического самопреобразования частоты, когда имеет место генерация субгармоники в подпороговом режиме (см. Рис.3). Для процесса параметрического самопреобразования частоты была также исследована статистика фотонов генерируемого излучения.

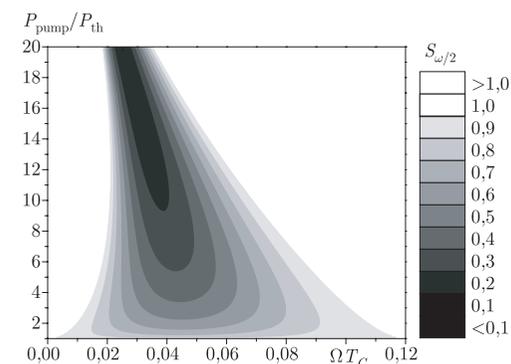


Рис.3. Спектральная плотность флуктуаций $S_{\omega/2}(\Omega)$ в X-квадратуре излучения субгармоники в подпороговом режиме ее генерации при различных превышениях мощности накачки над порогом P_{pump}/P_{th} .

В **Заключении** перечислены основные результаты диссертационной рабо-

($[Li]/[Nb]=0,942$), выращенные по методу Чохральского вдоль нормали к плотноупакованной грани $(01\bar{1}2)$.

В РДС-АНК $Nd:Mg:LiNbO_3$ в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности резонатора экспериментально реализованы процессы самоудвоения частоты и самосложения частот. РДС-АНК $Nd:Mg:LiNbO_3$ располагался внутри полуконцентрического резонатора, накачка осуществлялась непрерывным излучением полупроводникового лазера (длина волны $0,81$ мкм), модуляция добротности производилась акусто-оптическим модулятором.

Самоудвоение частоты лазерного излучения было реализовано в РДС-АНК $Nd:Mg:LiNbO_3$ с периодом РДС 7 мкм. Наблюдалась лазерная генерация излучения с длиной волны $1,084$ мкм и генерация его второй гармоники с длиной волны $0,542$ мкм. Средняя мощность второй гармоники в непрерывном режиме составила примерно $1,3$ мВт (см. Рис.2, а), в режиме модуляции добротности – 2 мВт.

Самосложение частот было реализовано в РДС-АНК $Nd:Mg:LiNbO_3$ с периодом РДС 4 мкм. Излучение накачки ($\lambda_{pump} = 0,81$ мкм), поглощаясь в кристалле, обеспечивало лазерную генерацию излучения ($\lambda = 1,084$ мкм), непоглощенное излучение накачки принимало участие в процессе нелинейного сложения (смешения) частот с лазерным излучением, в результате чего рождалась волна на суммарной частоте ($\lambda_{sum} = 0,464$ мкм). Средняя мощность излучения на суммарной частоте составляла примерно 35 мкВт (см. Рис.2, б).

Зависимость мощности второй гармоники ($0,542$ мкм) в процессе самоудвоения (а) и мощности волны суммарной частоты ($0,464$ мкм) в процессе самосложения (б) от поглощенной мощности накачки.

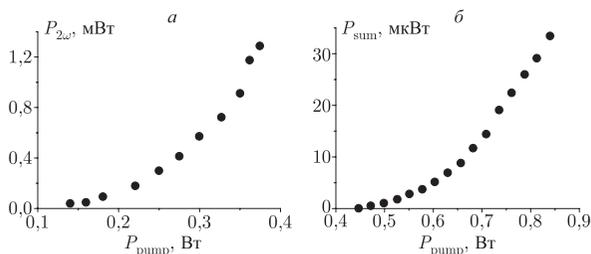


Рис.2. Зависимость мощности второй гармоники ($0,542$ мкм) в процессе самоудвоения (а) и мощности волны суммарной частоты ($0,464$ мкм) в процессе самосложения (б) от поглощенной мощности накачки.

Средняя мощность излучения на суммарной частоте составляла примерно 35 мкВт (см. Рис.2, б).

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дано обоснование темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные направления исследований, показана актуальность рассматриваемой проблемы в контексте ее научной и практической значимости, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Во Введении приведена также структура диссертации и кратко изложено ее содержание по главам.

Первая глава содержит обзор работ, посвященных экспериментальным и теоретическим исследованиям процессов самопреобразования частоты лазерного излучения в АНК и РДС-АНК. Проведена систематизация АНК. Рассмотрены основные современные методы создания РДС-АНК и результаты экспериментов с РДС-АНК, созданными различными методами. Анализ научных публикаций свидетельствует о том, что возможности РДС-АНК по преобразованию частоты когерентного оптического излучения существенно шире, чем у однородных по нелинейным свойствам АНК.

Рассмотрены модели, используемые для теоретического исследования процессов самоудвоения частоты в АНК.

Вторая глава диссертации посвящена разработке теории процессов самопреобразования частоты в РДС-АНК в приближении плоских волн. Получена система уравнений, описывающая различные трехчастотные процессы взаимодействия волн в случае, когда РДС-АНК помещается внутри резонатора, а накачка осуществляется через одно из зеркал резонатора. Подробно исследованы следующие случаи процессов самопреобразования частоты: 1) самоудвоение частоты ($\omega + \omega \rightarrow 2\omega$), когда в кристалле имеет место лазерная генерация излучения с частотой ω и одновременно генерация его второй гармоники; 2) параметрическое самопреобразование частоты (самоделиние частоты) ($\omega \rightarrow \omega/2 + \omega/2$), при котором в кристалле наряду с лазерной генерацией излучения с частотой ω происходит генерация его второй субгармоники;

3) самосложение частот ($\omega + \omega_{pump} \rightarrow \omega_{sum}$), когда в кристалле имеет место лазерная генерация излучения с частотой ω и одновременно процесс сложения его частоты с частотой излучения накачки ω_{pump} .

Получена система уравнений для описания последовательных волновых взаимодействий в РДС-АНК и исследованы следующие случаи таких процессов: 1) последовательное самоутроение частоты ($\omega + \omega \rightarrow 2\omega$, $\omega + 2\omega \rightarrow 3\omega$), при котором осуществляется лазерная генерация излучения с частотой ω и генерация третьей гармоники за счет последовательного утроения частоты лазерного излучения; 2) последовательное параметрическое самопреобразование частоты ($\omega_3 \rightarrow \omega_1 + \omega_2$, $\omega_2 + \omega_3 \rightarrow \omega_4$), когда одновременно происходит лазерная генерация излучения с частотой ω_3 , параметрический распад частоты $\omega_3 \rightarrow \omega_1 + \omega_2$ и сложение частот $\omega_2 + \omega_3 \rightarrow \omega_4$.

Получены аналитические решения систем уравнений для интенсивностей волн с различными частотами в случае стационарной генерации. При помощи найденных решений исследованы особенности протекания процессов самоудвоения частоты, параметрического самопреобразования частоты, самосложения частот и последовательного параметрического самопреобразования частоты. Численными методами исследованы особенности протекания последовательного самоутроения частоты. Выявлена зависимость эффективности исследуемых процессов от параметров РДС-АНК, накачки и резонатора (см. Рис.1). Расчеты выполнены применительно к РДС-АНК Nd:Mg:LiNbO₃, для которого длины волн излучения в рассмотренных процессах лежат в видимом (0,458 мкм, 0,464 мкм, 0,542 мкм и 0,725 мкм)

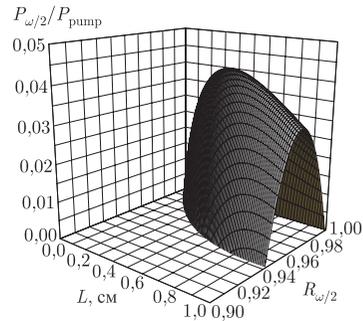


Рис.1. Зависимость нормированной мощности субгармоники на выходе резонатора от длины кристалла L и коэффициента отражения $R_{\omega/2}$ выходного зеркала для волны субгармоники в процессе самоудвоения частоты.

и инфракрасном (1,084 мкм и 2,168 мкм) спектральных диапазонах. Вычислены значения периодов модуляции нелинейной восприимчивости в РДС-АНК Nd:Mg:LiNbO₃, необходимых для осуществления процессов самоудвоения, самоделения, самосложения, последовательного самоутроения и последовательного параметрического самопреобразования частоты.

В **третьей главе** произведено рассмотрение процессов самопреобразования частоты в РДС-АНК с учетом дифракционных эффектов. Дифракционные эффекты при самопреобразовании частоты обусловлены распространением излучения в резонаторе, конечными размерами зеркал и апертуры РДС-АНК. Численными методами решены системы уравнений, описывающие в квазиоптическом приближении процессы самоудвоения частоты и самосложения частот в РДС-АНК, расположенном внутри резонатора. Для различных параметров исследуемых схем (размеров, радиусов кривизны и коэффициентов отражения зеркал; расстояний между зеркалами; длин РДС-АНК; мощностей и фокусировок накачки) численными методами рассчитаны пространственные и мощностные характеристики волн, участвующих в рассматриваемых процессах. Исследовано влияние вышеуказанных параметров на пространственные и энергетические характеристики излучения и выявлены условия, при которых мощность генерируемого излучения максимальна. Установлено, что пространственное распределение интенсивности излучения, которое появляется за счет нелинейного процесса в кристалле, слабо влияет на пространственное распределение интенсивности генерируемого лазерного излучения. Выявлено, что на формирование пространственного распределения интенсивности излучения, получаемого в результате нелинейного взаимодействия волн, оказывает влияние не только пространственное распределение интенсивности лазерного излучения, но и наличие резонатора по преобразованной частоте.

Четвертая глава диссертации посвящена экспериментальным исследованиям процессов самопреобразования частоты в РДС-АНК. В экспериментах использовались РДС-АНК Nd:Mg:LiNbO₃ с близким к конгруэнтному составом