

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Քերոբյան Մերուժան Իսրայելի

ՆԵՐՈՒՋՈՆԱՏՈՐԱՅԻՆ ԵՐԿՐՈՐԴ ՀԱՐՄՈՆԻԿԻ

ԳԵՆԵՐԱՅՄԱՄԲ ԿԱՆԱԶ ՄԻԿՐՈԶԻՊ ԼԱԶԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ ԵՎ ՄՇԱԿՈՒՄ

Ա.04.21 – «Լազերային ֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական  
գիտությունների թեկնածուի զինական աստիճանի հայցման ատենախոսության  
ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2015

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА  
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Керопян Меружан Исраелович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЗЕЛЕННОГО МИКРОЧИП ЛАЗЕРА С  
ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ

АВТОРЕФЕРАТ

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

ЕРЕВАН – 2015

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական Հետազոտությունների Ինստիտուտում

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր,  
ՀՀ ԳԱԱ Ակադեմիկոս  
Ռ. Բ. Կոստանյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր,  
Պրոֆեսոր Ռ.Բ. Ալավերդյան  
Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր,  
Է.Պ. Կոկանյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և  
Էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2015 թ. հունիսի 6-ին, ժամը 12<sup>00</sup>-ին, Երևանի Պետական Համալսարանում (Ալեք Մանուկյան 1) ԲՈՀ-ի Ֆիզիկայի-049 մասնագիտական խորհրդում:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Ատենախոսության սեղմագիրը առաքված է 2015 թ. Մայիսի 5-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական  
քարտուղար, ֆիզմաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ,

Վ.Պ. Քալանթարյան

---

Тема диссертации утверждена в Институте Физических Исследований НАН РА

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук,  
Академик НАН РА  
Р.Б. Костанян

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук,  
Профессор Р.Б. Алавердян  
доктор физ.-мат. наук,  
Э.П. Коканян

Ведущая организация:

Институт Радиофизики и  
Электроники НАН РА

Защита диссертации состоится 6-ого июня 2015 г. в 12<sup>00</sup> часов, в Ереванском Государственном Университете (Алек Манукяна 1) на заседании Специализированного совета ВАК Физика-049.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат диссертации разослан 5-ого мая, 2015 г.

Ученый секретарь специализированного совета,  
Канд. физ.-мат. наук, доцент

В.П. Калантарян

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

Один из важных этапов развития лазерной физики является создание полностью твердотельных лазеров, т.е. кристаллических лазеров накачиваемых излучением полупроводниковых лазерных диодов. Замена широкополосного лампового источника накачки узкополосным излучением диодных лазеров привело к кардинальным изменениям в лазерной технике. При сохранении высокого качества луча резко повышалась эффективность работы лазерных систем, снизилась энергопотребляемость, себестоимость и появилась возможность разработки монолитных, малогабаритных компактных лазеров различных длин волн. Очевидно, что наличие подобных мобильных миниатюрных лазеров, кроме традиционных применений приведет к новым неожиданным использованиям лазеров в первую очередь в научной, информационной и высокотехнологических областях.

Разработка высокоэффективных, мощных, энергосберегающих и компактных лазеров на длине волны 532 нм является актуальной задачей в связи с широкой областью их применений. Такие лазеры используются в научных исследованиях, в медицине, в высокотехнологичных оборудованьях и в военной промышленности.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые за последние 3 – 4 года в разработке полупроводниковых зеленых лазеров на основе нитрида галлия с индием, наиболее эффективным на длинах волн близко 532 нм в настоящее время является синтетический зеленый лазер, представляющий собой твердотельный лазер с диодной накачкой и внутрирезонаторным удвоением частоты.

Идея создания высокоэффективных зеленых микрочип лазеров состоит в максимальном, уменьшении их размеров, при заданной мощности выходного излучения. Трудности их создания связаны с помещением активного элемента лазера, нелинейного оптического кристалла, зеркал резонатора, системы накачки и охлаждения в объем несколько кубических сантиметров, созданием уплотненной монолитной конструкции и обеспечением оптимального режима. Для достижения цели следует использовать диодные лазеры как источник накачки, использовать малые размеры активного и нелинейного кристаллов, зеркала резонатора наносить на торцы кристаллов, поместить нелинейный оптический кристалл в резонатор и использовать элемент Пельтье для фиксирования температуры. Помещение нелинейного кристалла в резонатор решает сразу две задачи: 1. в резонаторе излучение в разы мощнее чем выходящее из него, так что ГВГ будет значительно эффективнее, 2. не нужно использовать дополнительных деталей для юстировки кристаллов, а лишь отполировать оба кристалла до некоторой степени параллельности.

Разработка таких лазеров требует решения ряда специфических проблем, связанных с малыми размерами, с достаточно жесткими требованиями к параллельности и плоскостности составных частей резонатора, с качеством оптического контакта между ними и влиянием этих факторов на свойства резонатора и выходные параметры лазера. В ряду проблем следует отметить также необходимость учесть влияния термооптических свойств резонатора, и его влияние на зависимость выходной мощности и стабильности работы лазера.

Подчеркнем, что ввиду специфики задач, обусловленных малыми размерами оптических компонент, монолитности конструкции и многослойных диэлектрических покрытий, выполнение указанных исследований требует также разработки специальных нестандартных методик определения параметров компонент лазера и характеристик микрочип лазеров.

**Целью работы** является разработка специальных методов определения параметров миниатюрных составных частей монолитного микрочип лазера. Исследование их влияния на характеристики зеленого микрочип лазера на кристалле  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  с внутрирезонаторной генерацией второй гармоники на кристалле  $\text{PPNL}:\text{MgO}$  и разработка лазера с объемом излучающей головки  $\leq 3 \text{ мм}^3$  с высокой выходной мощностью на длине волны 532 нм.

**В диссертации были поставлены следующие задачи:**

1. Разработать метод для исследования параллельности миниатюрных оптических деталей, с апертурой в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.
2. Использовать разработанный метод для измерения параллельности поверхностей композитных частей микрочип лазера.
3. Разработать неразрушающий метод измерения качества оптического контакта между двумя составными кристаллами микрочип лазера.
4. Использовать данный метод для измерения коэффициента отражения от оптического контакта в микрочип лазере.
5. Исследовать влияние отражения от оптического контакта на рабочие параметры микрочип лазера.
6. Исследовать особенности термической линзы в микрочип лазере и ее влияние на работу лазера.
7. Исследовать основные параметры микрочип лазера. Реализовать внутрирезонаторную ГВГ с выходной мощностью до 400 мВт и эффективностью преобразования 30 – 35 %.

**Научная новизна:**

1. Предложен и реализован метод измерения параллельности миниатюрных оптических деталей, с размерами апертуры в несколько миллиметров и в субмиллиметровом диапазоне. Метод допускает измерение углов клина вплоть до нескольких микрорадан, а также дает возможность исследовать неоднородность угла клина по длине детали.
2. Разработан и продемонстрирован новый неразрушающий метод измерения коэффициента отражения от оптического контакта между активным и нелинейным кристаллами. Метод основан на изучении отражения от трехзеркального интерферометра Фабри-Перо, позволяя измерять остаточное отражение от оптического контакта превосходящее 0.1 %, не требуя рабочего режима микрочип лазера.
3. Впервые экспериментально и теоретически исследован процесс генерации второй гармоники в резонаторе микрочип лазера с учетом интерференции между многократно отраженными лучами основной и второй гармоники, приводящей к нестабильности мощности выходного излучения микрочип лазера и к понижению эффективности преобразования основного излучения во вторую гармонику.
4. Экспериментально исследована термическая линза в активной среде микрочип лазера, выявлено условие улучшения стабильности резонатора и увеличения коэффициента преобразования ГВГ посредством уменьшения диаметра пучка в оптически нелинейном кристалле при мощностях накачки в несколько Ватт, а также получено условие для согласования мод микрочип лазера.
5. Исследована зависимость порога генерации от качества оптического контакта и показано, что в микрочип лазерах с меньшим внутрирезонаторным отражением порог генерации меньше. Приведена приближенная формула, связывающая порог генерации с коэффициентом отражения от оптического контакта.

### **Практическая ценность работы:**

1. Разработанные методы определения значений параллельности миниатюрных оптических деталей и коэффициентов отражения от оптического контакта активного элемента и нелинейного кристалла в резонаторе микрочип лазера не требуют больших времен измерений и дорогостоящей аппаратуры и могут быть использованы независимо от целей изложенных в настоящей работе. Данные методы используют анализ интерференционных колец от интерферометра Фабри-Перо и позволяют проводить измерения с высокой степенью точности.
2. Метод определения плоско-параллельностей поверхностей малых оптических деталей могут применяться для определения их качеств при изготовлении.
3. Созданный зеленый микрочип лазер может применяться в различных приложениях, в частности уже используется при изготовлении лазерных проекционных экранов.
4. Результаты работы могут быть применены в предприятиях занимающихся разработкой и конструированием различных микрочип лазерных устройств.

### **Основные защищаемые положения:**

1. Метод определения малых углов параллельности поверхностей малогабаритных составных компонент зеленого микрочип лазера с точностью  $\leq 7\%$ .
2. Неразрушающий метод определения коэффициента отражения от оптического контакта между монокристаллическим композитом активного и нелинейного кристаллов с минимально регистрируемым значением  $0.1\%$ .
3. Осцилляционный характер кривой зависимости интенсивности второй гармоники от температуры нелинейного кристалла, обусловлен интерференционными эффектами в резонаторе микрочип лазера с внутрирезонаторной ГВГ.
4. Улучшение качества оптического контакта, оптимизация накачки с учетом термической линзы позволяют существенно увеличить значение выходных параметров микрочип лазера.
5. Упрощенная конструкция и использование кристаллов  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  в качестве активного и  $\text{PPLN}:\text{MgO}$  в качестве нелинейного кристаллов, позволяют создать высокоэффективные микрочип лазеры с внутрирезонаторной генерацией второй гармоники с энергопотреблением на менее  $100 \text{ Вт/см}^3$ . Коэффициент преобразования оптика – оптика составляет  $30 - 35\%$  (от  $808 \text{ нм}$  в  $532 \text{ нм}$ ).

### **Апробация работы:**

Полученные результаты были представлены и обсуждены автором диссертации на конференциях 1. The international conference Laser Physics 2012, October 9 – 12, (Аштарак, Армения, 2012), 2. “Winter College On Optics: Trends in Laser Development and Multidisciplinary Applications to Science and Industry” (ICTP, Триест, Италия, 2013), 3. The international conference Laser Physics 2013, October 8 – 11, (Аштарак, Армения, 2013), 4. Восьмая международная конференция молодых ученых и специалистов “Оптика – 2013”, Октябрь 14 – 18, (Санкт-Петербург, Россия, 2013), 5. 14th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science, SPO – 2013, October 24 – 27, (Киев, Украина, 2013), 6. IONS conference in Optics & Photonics, September 11 – 14, (Ереван – Аштарак, Армения, 2013), 7. 1st International Conference and School "Saint-Petersburg OPEN 2014", March 25 – 27, (Санкт-Петербург, Россия, 2014), 8. 2nd International Symposium "Optics & its Applications", September 1 – 5, (Ереван – Аштарак, Армения, 2014).

### **Публикации:**

По теме диссертации опубликовано 12 работ (в том числе 6 статей в рецензируемых журналах).

### **Структура и объем работы:**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 106 страницах, включая 31 рисунок и 15 таблиц. Список литературы содержит 81 наименование.

### **Краткое содержание работы:**

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы поставленные задачи, научная новизна и практическая ценность работы, представлены основные положения выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание работы.

В **первой главе** приведен краткий обзор микрочип лазеров зеленой области длин волн спектра. Проанализированы существующие методы измерения параллельности поверхностей активного и нелинейного кристаллов. Описаны традиционные методы измерения коэффициента отражения от оптического контакта между активным и нелинейными кристаллами. В главе приведены также основные оптические и тепловые характеристики составных кристаллов зеленого микрочип лазера, которые в дальнейшем будут использованы в диссертации.

**Вторая глава** посвящена созданию микрочип лазера и исследованию параметров составных частей резонатора. Приведена схема работы зеленого микрочип лазера с внутррезонаторной ГВГ. Обоснован выбор активного и нелинейного оптического элементов, и приведены критерии выбора лазерных диодов накачки [II].

Описывается метод измерения параллельности миниатюрных оптических деталей, и приводятся результаты измерений для составных кристаллов различных микрочипов.

Микрочип лазер состоит из двух кристаллов. Первый кристалл,  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ , является активным элементом. В нем генерируется лазерное излучение на длине волны 1064 нм. Второй кристалл, Ниобат Лития с периодически поляризованной сегнетоэлектрической доменной структурой (PPLN), преобразовывает излучение с длиной волны 1064 нм в излучение с длиной волны 532 нм (Генерация Второй Гармоники: ГВГ). Эти два кристалла соединены с помощью оптического контакта, и вместе с зеркалами нанесенными прямо на торцы кристаллов создают резонатор зеленого микрочип лазера. Зеркала резонатора представляют собой многослойные диэлектрические покрытия, и имеют следующие отражательные (пропускающие) способности. Входное зеркало полностью пропускает излучение накачки на длине волны 808 нм ( $R < 2\%$ ), и полностью отражает излучение на длинах волны 1064 нм и 532 нм ( $R > 99\%$ ). Выходное зеркало полностью отражает излучение на длине волны 1064 нм, и пропускает излучение на длине волны 532 нм.

Выбор активного элемента обусловлен высоким коэффициентом поглощения на длине волны излучения накачки, а выбор нелинейного кристалла обусловлен высоким нелинейным коэффициентом и устойчивостью к оптическим повреждениям.

Накачка осуществляется лазерными диодами, которые излучают на длине волны 808 нм. Оптимальный режим осуществится, при совпадении длины волны излучения диодного лазера накачки с длиной волны максимального поглощения активного кристалла, при температуре квазисинхронизма в нелинейном кристалле. В работе исследованы необходимые для этого условия.

Поскольку зеркала напылены на торцы кристаллов, то для стабильного резонатора необходимо обеспечить параллельность составных частей резонатора. Интерферометрические измерения компонент малых размеров, связаны с трудностями в сравнении с такими же измерениями на оптических деталях с апертурами в несколько миллиметров и больше. Общей проблемой является дифракция от границ деталей, которая накладывается на интерференционную картину, делая измерения очень сложными или невозможными

Анализ проблем связанных с интерферометрическими измерениями параллельности миниатюрных оптических деталей можно найти в [1-4]. Из анализа интерферометра Хайдингера следует, что для измерения угла клина равной 1 мрад, на кристалле с коэффициентом преломления  $n = 1.5$ , сканированием лазерным излучением с длиной волны  $\lambda = 632.8$  нм, необходимо использовать детали с апертурой не менее 5 мм [5, 6]. Апертуры кристаллов использованные нами в микрочип лазерах порядка 1 мм.

Для измерения угла клина малых оптических деталей мы разработали новый метод, который базируется на модифицированном интерферометре Хайдингера.

Метод основан на изучении интерференционных колец в отраженном свете от исследуемого образца, когда последний передвигается поперек падающему лазерному излучению. При ненулевом угле клина, при таком движении меняется локальная толщина образца, на месте где падает лазерное излучение. Как известно, от толщины образца зависит положение интерференционных колец. Если толщина образца изменится на столько, что фазовый сдвиг при обходе образца будет равен  $\pi$ , то интерференционные кольца поменяются так, что в месте максимума получится минимум и наоборот. Таким образом, если посчитать переходы от максимума до минимума и наоборот, то можно найти угол клина. Расчеты показывают, что угол клина дается следующей формулой.

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{Q\lambda}{4n|x_1 - x_2|} \quad (1)$$

где  $Q$  число переходов от максимума к минимуму и наоборот,  $\lambda$  длина волны сканирующего лазерного излучения,  $n$  коэффициент преломления среды, и  $|x_1 - x_2|$  область сканирования.

Для демонстрации работы метода были проведены измерения параллельности нескольких пластин со сканирующим He-Ne лазером. Интенсивность лазера составляла 2 мВт, а фокусное расстояние линзы, которая фокусировала лазерное излучение на исследуемый образец, равно 11 мм. Образец был смонтирован на передвижном оптическом столике, который перемещается в направлении перпендикулярном падающему сканирующему лазерному излучению с помощью шагового двигателя с точностью в 10 мкм.

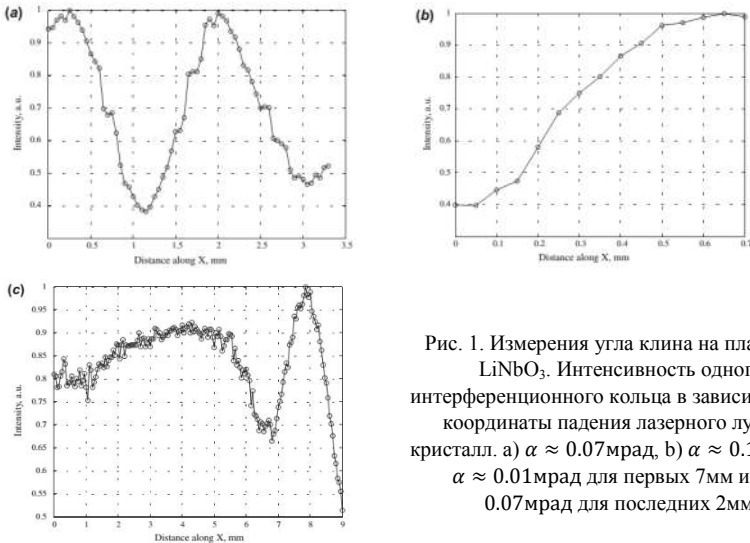


Рис. 1. Измерения угла клина на пластинах  $\text{LiNbO}_3$ . Интенсивность одного интерференционного кольца в зависимости от координаты падения лазерного луча на кристалл. а)  $\alpha \approx 0.07$  мрад, б)  $\alpha \approx 0.1$  мрад, с)  $\alpha \approx 0.01$  мрад для первых 7 мм и  $\alpha \approx 0.07$  мрад для последних 2 мм.

Образец помещен на расстоянии примерно  $2.5 - 3$  мм от фокуса. Интенсивность интерференционных колец регистрируется с помощью фотодетектора. Данные фотодетектора вводились в компьютер, который осуществлял также, управление шаговым двигателем. Управление перемещением образца, сбор и обработка данных осуществлялись с помощью программы LabView. Измерялась зависимость интенсивности данного интерференционного кольца от координаты точки падения сканирующего луча на образец, потом считывалось количество переходов от максимума до минимума и наоборот, и определялась величина угла клина образца. Во избежание погрешностей и для повышения точности измерения шаг переноса образца был взят намного меньше чем дистанция на которой будет один переход  $\Delta x \ll \lambda/4n\alpha$ . Ясно, что шаг зависит от ожидаемого угла клина и чем больше угол клина, тем меньше должна быть величина шага. В наших экспериментах типичный шаг был равен 50 мкм.

Измерения проводились на пластинах  $\text{LiNbO}_3$  с толщиной 1.5 мм с полированными торцами с апертурами  $1 \times 0.8 \text{ мм}^2$ ,  $1 \times 3.5 \text{ мм}^2$  и  $1 \times 10 \text{ мм}^2$ . Экспериментальные данные представлены на рис. 1, где приведена зависимость интенсивности интерференционного кольца от координаты падения луча на кристалл.

На рис.1а представлены результаты для пластины с апертурой  $1 \times 3.5 \text{ мм}^2$ . В результате экспериментов было обнаружено, что на расстоянии сканирования  $S = 2.8$  мм обнаружено  $Q = 3$  перехода от максимума к минимуму и наоборот. Подставляя полученные результаты в уравнение (1) получим что угол клина равен  $\alpha = 0.07$  мрад. На рис.1б и 1с представлены результаты измерений на пластинах с апертурами  $1 \times 0.8 \text{ мм}^2$  и  $1 \times 10 \text{ мм}^2$  соответственно. На рис.1б наблюдается один переход от минимума к максимуму на дистанции сканирования в  $S = 0.7$  мм, что означает, угол клина данного образца  $\alpha = 0.1$  мрад. Из рис.1с видно неравномерное распределение угла клина. Видно, что распределение интенсивности отраженного света на фотодиоде не синусоидально в зависимости от координаты. Для первых  $S_1 = 7$  мм дистанции сканирования был замечен только один переход, в то время как на последних  $S_2 = 2$  мм было зарегистрировано  $Q = 2$  перехода. Из этого следует, что на дистанции  $S_1 = 7$  мм угол клина составляет  $\alpha_1 = 0.01$  мрад а на последних  $S_2 = 2$  мм,  $\alpha_2 = 0.07$  мрад. Это означает что изменения оптической толщины по длине сканирования нелинейно.

**Глава 3** посвящена исследованиям оптического контакта в микрочипах лазера. Описывается методика измерений и приводятся результаты измерений. Отражение от оптического контакта является одним из основных параметров, влияющих на выходные параметры зеленого микрочип лазера. При идеальном оптическом контакте, отражение от него является Френелевским, которое при нормальном падении луча, на длине волны 632.8 нм составляет  $2.5 \times 10^{-4} \%$ . Ввиду неидеальности оптического контакта, между двумя кристаллами могут оставаться пустоты, что приведет к увеличению отражения от оптического контакта до 2 % [III, VII].

Традиционные методы, использованные для обнаружения пустот между контактируемыми поверхностями двух пластин включают в себя Рентгеновскую топографию (X-ray topography - XRT), сканирующую акустическую микроскопию (scanning acoustic microscopy - SAM) и визуализация видимым или инфракрасным излучением (visible or infrared imaging) [7 – 11].

Нами разработан простой метод измерения отражения от оптического контакта между компонентами микрочип лазера. Преимущество метода состоит в том, что при измерении не используется дорогое оборудование, нет необходимости рабочего режима микрочипа, метод не разрушает оптический контакт и время измерений не превосходит 10 – 15 минут.

Метод основан на изучении температурного отклика отражения внешнего источника света от монолитного активного элемента микрочип лазера. В данном случае резонатор



выступает в роли трехзеркального интерферометра Фабри-Перо. Известно, что величина отражения от трехзеркального интерферометра Фабри-Перо обратно пропорциональна следующей величине  $D$  [12].

$$D = 1 + R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3 + 2\sqrt{R_1 R_2}(1 + R_3) \cos \delta_1 + 2\sqrt{R_2 R_3}(1 + R_1) \cos \delta_2 + 2\sqrt{R_1 R_3} \cos(\delta_1 + \delta_2) + 2\sqrt{R_1 R_3}(1 + R_3) \cos(\delta_1 - \delta_2)$$

где,  $R_1$ ,  $R_3$ , и  $R_2$  коэффициенты отражения от входного и выходного зеркал, и от оптического контакта соответственно,  $\delta_i = 2kn_i l_i$ , ( $i = 1, 2$ ) фазовый сдвиг получаемый волной, при обходе активного ( $i = 1$ ) и нелинейного ( $i = 2$ ) кристаллов резонатора, при нормальном падении,  $k = 2\pi/\lambda$  волновое число падающего излучения в вакууме,  $l_i$  и  $n_i$  геометрическая длина и коэффициент преломления частей резонатора соответственно,  $\lambda$  длина волны в вакууме.

Если предположить что коэффициенты отражения не зависят от температуры, то зависимость отражения всей системы от температуры будет зависеть только от  $\delta_i$ , которая включает в себя термо-оптический эффект и тепловое расширение кристаллов.

Более наглядно можно показать эту зависимость графически. На рис. 2 представлена зависимость отражения от резонатора микроchip лазера.

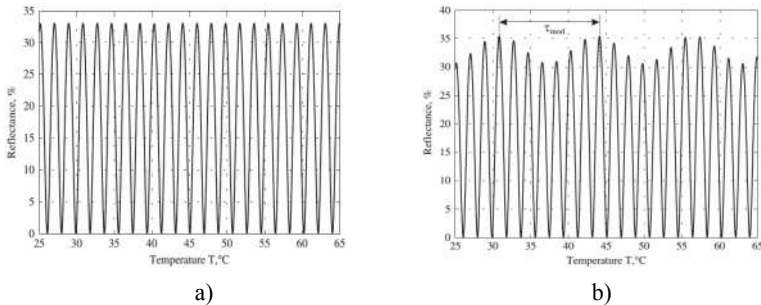


Рис. 2. Зависимость отражения от резонатора микроchip лазера в зависимости от температуры. а)  $R_2 = 0\%$ , б)  $R_2 = 0.001\%$

Из рис. 2 видно, что при нулевом отражении от оптического контакта, трехзеркальный интерферометр превращается в двухзеркальный, и отражение дается формулой Эйри. При не нулевом отражении, периодические осцилляции модулируются другой периодической функцией с более низким температурным периодом. На рис. 2б) температурный период модулирующей функции обозначен  $\tau_{mod}$  и в данном частном случае равен 12.8 °C. Глубиной модуляции обозначается  $m = A_{max}/A_{min}$ , где  $A_{max}$  и  $A_{min}$  амплитуды на максимуме и минимуме. Легко заметить, что  $m$  зависит от  $R_2$  (коэффициента отражения от оптического контакта), и измеряя  $m$  можно однозначно вычислить  $R_2$ .

Экспериментальные результаты приведены на рис. 3. Из этих данных можно вычислить коэффициент отражения от оптического контакта, который в первом случае равен  $R_2 = (1.4 \pm 0.3) \%$  а во втором случае  $R_2 = (0.12 \pm 0.07) \%$ , на длине волны 632.8 нм.

Измерения проводились на длине волны 632.8 нм по причине приемлемых значений отражений зеркал резонатора на этой длине волны. Для пересчета коэффициента отражения на длин волн 532 нм или 1064 нм можно воспользоваться предположением, что отражение происходит от зазора между двумя кристаллами. Тогда можно вычислить отражение от зазора в зависимости от толщины зазора на разных длинах волн. На рис. 4 представлены эти вычисления для 532 нм, 632.8 нм и 1064 нм.

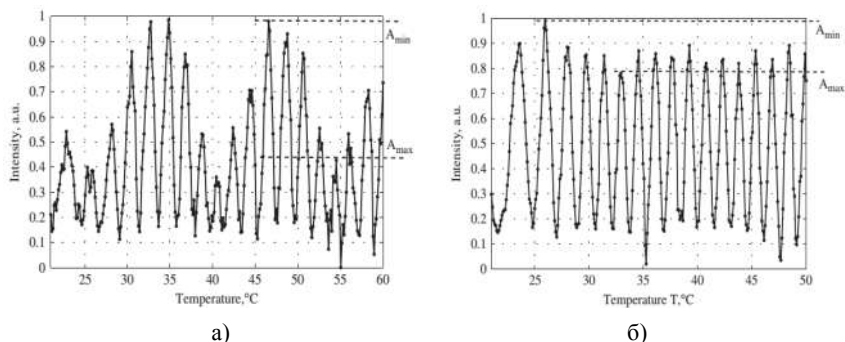


Рис. 3. Отражение от резонатора микрочип лазера в зависимости от ее температуры.  
 $l_{10} = l_{20} = 1.5 \text{ мм}, R_1 = R_3 = 5\%, \tau_{mod} = (12.3 \pm 0.5)^\circ\text{C}, \lambda = 632.8 \text{ нм}$ . а)  $m = 2.5 \pm 0.5, R_2 = (1.4 \pm 0.3)\%$ , б)  $m = 1.3 \pm 0.1, R_2 = (0.12 \pm 0.07)\%$

Значит, определяя отражение от оптического контакта на одной длине волны (632.8 нм) можно вычислить толщину зазора и рассчитать отражение на другой длине волны.

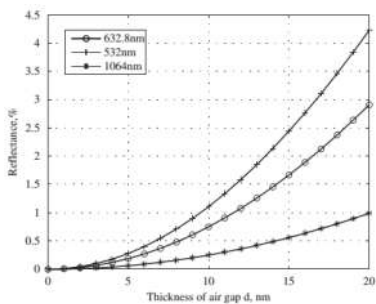


Рис. 4. Отражение от зазора между  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{YVO}_4$  в зависимости от толщины зазора

Нужно отметить, что рассчитанный таким образом зазор между кристаллами нельзя считать номинальным расстоянием между ними. Эта толщина является неким эффективным расстоянием, и в некоторых местах оно может быть больше, в некоторых местах вообще отсутствовать. Но эксперименты показывают, что вычисление таким образом отражений на других длинах волны с большой точностью совпадают с реальностью.

В четвертой главе представлены результаты исследований влияния отражения от оптического контакта и наведенной накачкой термической линзы, в активном элементе, на работу лазера и исследованы его основные параметры [I, IV – VI, VIII – XII].

При исследовании температурной зависимости интенсивности выходного лазерного излучения микрочип-лазеров, обнаружены два типа зависимостей: достаточно гладкие кривые с полной шириной на полувысоте примерно  $20 - 25^\circ\text{C}$ , и кривые с ярко выраженными периодическими осцилляциями с периодом  $(5.4 \pm 0.7)^\circ\text{C}$  (рис. 5).

Спад мощности за пределами интервала  $20 - 25^\circ\text{C}$  обусловлен температурной шириной синхронизма  $\delta T$  для квазисинхронной ГВГ в кристалле PPLN:MgO. В приближении плоских волн расчетное значение  $\delta T$  для кристалла длиной 1.5 мм составляет  $18.4^\circ\text{C}$ .

Установлено, что осциллирующий характер кривой наблюдается только для микрочип-лазеров с заметным отражением от границы контакта ( $R_2 \geq 1 - 2\%$ ). Для проверки предположения, что эти осцилляции обусловлены многократными отражениями в нелинейном кристалле, была проведена серия экспериментов по однопроходной ГВГ в

плоскопараллельных пластинах нелинейного кристалла. Исследовалась температурная зависимость мощности однопроходной ГВГ для пластины нелинейного кристалла, идентичной пластине, используемой в микрочип-лазере, а также для пластин с различными длинами. В качестве источника накачки использовался непрерывный одночастотный лазер (1064 нм) с выходной мощностью 100 мВт.

В этих экспериментах один торец нелинейно оптических кристаллов был отполирован, а другой отполирован и покрыт многослойным диэлектрическим покрытием, идентичным покрытию выходного зеркала в микрочип-лазере. На рис. 5а представлена экспериментальная кривая зависимости мощности однопроходной ГВГ от температуры для пластины нелинейного кристалла длиной 1.5 мм. Важно отметить, что период осцилляций составляет  $(5.1 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ , что с хорошей точностью совпадает с периодом температурной зависимости интенсивности ГВГ микрочип лазера. Для пластин PPLN: MgO с длинами 1.17 мм и 0.86 мм измеренные периоды осцилляций составляли, соответственно,  $(6.3 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  и  $(8.5 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ , то есть, период осцилляций коррелирует с длиной нелинейно оптического кристалла (рис. 5б и 5в соответственно).

Для выяснения роли многократных отражений в нелинейном кристалле излучений 1064 нм и 532 нм был проведен эксперимент с пластиной нелинейного кристалла,

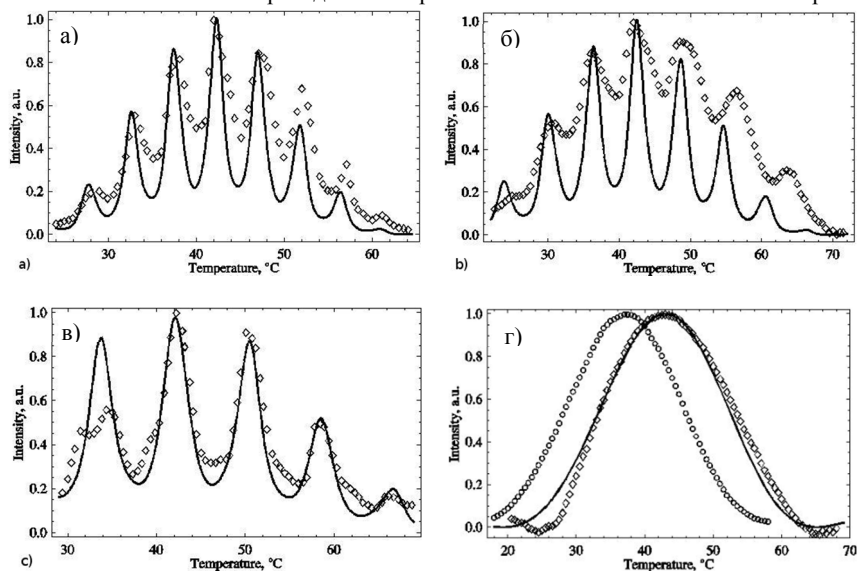


Рис.5. Зависимость интенсивности второй гармоники от температуры нелинейного кристалла. Сплошная линия – теоретический расчет, маркеры – Экспериментальные данные: а)  $l = 1.5$  мм, б)  $l = 1.17$  мм, в)  $l = 0.86$  мм, г)  $l = 1.5$  мм, ◇ – двусторонне покрытие ○ – не перпендикулярное падение.

имеющей дихроичные покрытия с обеих сторон (C1 и C2) со следующими параметрами: C1,  $R > 99.8\%$  для 1064 нм,  $R < 0.5\%$  для 532 нм (идентично выходному зеркалу микрочип-лазера), и C2,  $R < 0.3\%$  для 1064 нм,  $R > 99.8\%$  для 532 нм.

Следующий эксперимент для подтверждения роли интерференции в формировании осцилляций интенсивности второй гармоники был проведен с плоскопараллельным кристаллом без покрытий, который наклонен относительно падающего луча под

некоторым углом, который обеспечивает несовпадение между двумя соседними отраженными лучами как основной, так и второй гармоники. Температурные кривые однопроходной ГВГ для этих образцов оказались совершенно гладкими.

Интерференционные явления в генерации второй гармоники были изучены также теоретически. Предположим, что излучение основной частоты падает перпендикулярно на нелинейно оптический кристалл, и поляризация падающего излучения параллельна С-оси кристалла. Для нахождения интенсивности второй гармоники, в общем случае надо решить волновое уравнение для второй гармоники [13].

Как уже было сказано, поляризации волн основной и второй гармоники параллельны С-оси кристалла. Для решения волнового уравнения использовались следующие приближения: приближение монохроматической плоской волны, приближение заданного поля и приближение медленно меняющихся амплитуд.

Из за многократных отражений в нелинейном кристалле, поле основной гармоники можно представить в виде двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях, которые, теоретически, являются суммами бесконечных многократно отраженных волн. Решение уравнения также следует искать в виде сумм двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях. После вычислений для амплитуды выходного излучения второй гармоники на выходном зеркале нанесенное на торец нелинейного кристалла  $A_2^{\pm}(l)$  получим следующее выражение

$$A_2^{\pm}(l) = C \text{sinc}\left(\frac{\Delta k l}{2}\right) \frac{(A_1^+)^2 e^{i\frac{\Delta k l}{2}} + r_1'(A_1^-)^2 e^{-i\frac{\Delta k l}{2}}}{ik_2(1 - r_1' r_2' e^{2ik_2 l})}$$

где  $l$  длина кристалла,  $C = 8\pi d_{eff} \omega_2^2 / c^2$  константа,  $\Delta k = 2k_1 - k_2 - \Lambda^{-1}$ ,  $k_1$  и  $k_2$  волновые числа волн основной и второй гармоники,  $\Lambda$  период доменной структуры нелинейного кристалла,  $r_1'$  и  $r_2'$  коэффициенты отражения двух поверхностей нелинейного кристалла на длине волны второй гармоники, а  $A_1^+$  и  $A_1^-$  амплитуды волн основной гармоники, которые распространяются в нелинейном кристалле противоположно друг другу вследствие многократных отражений от поверхностей, которые представляют собой функции Эйри. Здесь условно “+” и “-” это направления вдоль падающей волны и противоположно ей соответственно.

Как видно из рис. 5, теоретические расчеты и результаты эксперимента хорошо согласуются.

Исследовалось также влияние отражения от оптического контакта на эффективность работы, пороговую мощность накачки, стабильность выходного излучения зеленого микроchip-лазера с внутрирезонаторной ГВГ и определение оптимальных условий для высокоэффективной работы лазера. Экспериментально и расчетно показано, что повышение значения коэффициента отражения от оптического контакта приводит к уменьшению эффективности работы лазера, увеличению пороговой мощности накачки и нестабильностям выходного излучения микроchip лазера.

В данной главе была исследована также термическая линза в микроchip лазере, которая имеет большое влияние на качество и расходимость выходного излучения, стабильность резонатора и т.д.

Для теоретических расчетов мы воспользовались простой формулой приведенной в [14]. Измерение термической линзы напрямую в микроchip лазере представляется сложной и даже нерешаемой задачей, поэтому мы измерили расходимость пучка и вычислили фокальное расстояние термической линзы.

Резонатор микроchip лазера представляет собой плоскопараллельный резонатор с термической линзой, которую можно учесть, если считать входное зеркало не плоским, а

сферическим. В резонаторе с одним сферическим и одним плоским зеркалом, диаметр пучка в резонаторе  $\omega_0$  на выходном зеркале, вычислен в [15].

Из теории генерации второй гармоники, хорошо известно, что диаметр перетяжки пучка второй гармоники в  $\sqrt{2}$  раз меньше диаметра перетяжки пучка основной гармоники. Размер перетяжки пучка второй гармоники на выходном зеркале связан с углом расходимости выходного излучения. Для полного угла расходимости выходного излучения зеленого микро칩 лазера, с учетом термической линзы, легко получить следующую формулу

$$\theta = \sqrt{\frac{2\lambda}{\pi}} \left( \frac{1}{df} - \frac{1}{f^2} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Следовательно измеряя угол расхождения выходного излучения, можно найти фокусное расстояние термической линзы в резонаторе микро칩 лазера (рис. 6).

В экспериментах проводились измерения угла расходимости выходного излучения микро칩 лазера при различных мощностях накачки, постоянной температуре и диаметра пучка накачки в резонаторе. На рис.6 маркерами представлены результаты эксперимента.

На рис. 6а маркерами представлены углы расходимости лазерного излучения, а 6б фокусные расстояния наведенной термической линзы в зависимости от мощности накачки. На этих же рисунках линиями показаны зависимости угла расходимости и фокусного расстояния термической линзы в зависимости от мощности накачки полученные теоретически. Рис. 6 показывает, что при больших мощностях накачки (выше 450 мВт) теоретические и экспериментальные данные находятся в соответствии с друг другом. При малых мощностях измеренное значение фокусного расстояния несколько больше расчетного значения, что обусловлено сложной, не Гауссовой формой пучка накачки.

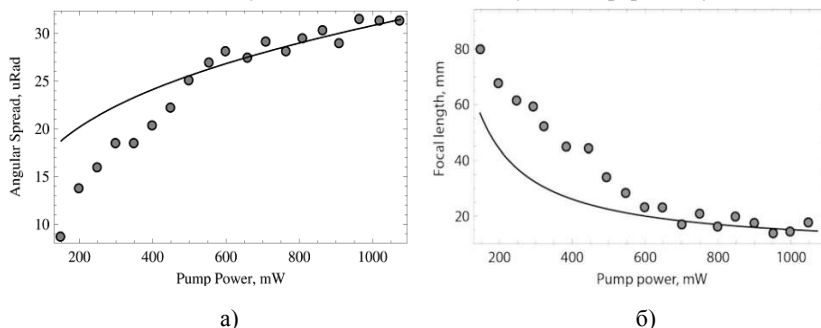


Рис.6. Зависимость угла расходимости выходного лазерного излучения (а) и фокального расстояния термической линзы от мощности накачки (б).

В конце главы исследованы и приведены значения основных параметров микро칩 лазера с внутрирезонаторной генерацией второй гармоники с преобразованием излучения с длиной волны 1064 нм, на длину волны 532 нм.

**В заключении** сформулированы основные результаты:

1. Разработан и реализован метод измерения малых углов клина миниатюрных оптических деталей. Метод основан на исследовании интерференционных колец, не требует специальных установок и большого времени измерения. С помощью данного метода можно измерять углы клина вплоть до нескольких микрорадианов, с погрешностью не больше 7%.

2. С помощью данного метода измерялись углы клина составных частей резонатора микрочип лазера, и выбирались соответствующие образцы для создания лазера.
3. Разработан и реализован метод измерения отражения от оптического контакта. Для измерения исследуется температурный отклик от трехзеркального интерферометра Фабри-Перо, которым в частности является резонатор с оптическим контактом. Метод не требует специальных установок, время измерения составляет 10 – 15 минут, и с помощью данного метода можно измерять отражения более 0.1 %.
4. Используя вышеупомянутый метод, измерялись отражения от оптического контакта в резонаторе микрочип лазеров.
5. Исследовано влияние отражения от оптического контакта в резонаторе микрочип лазера на его рабочие параметры. Показано, что отражение от оптического контакта приводит к осцилляционному характеру температурной зависимости выходного излучения, повышает порог и ухудшает стабильность генерации.
6. Исследовано влияние термической линзы в микрочип лазере на работу лазера. С учетом термической линзы и выбора размеров пучка накачки, выявлены условия согласования мод резонатора, необходимые для эффективной работы лазера.
7. В результате исследований создан микрочип лазер с средней выходной мощностью до 400 мВт на длине волны 532 нм (пиковая мощность 800 мВт), при средней мощности излучения лазерного диода накачки 1125 мВт на длине волны 808 нм.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

- I. S. Essaian, J. Khaydarov, S. Slavov, V. Ter-Mikirtychev, G. Gabrielyan, M. Kerobyany, S. Sghomonyan, "Microchip green laser sources: broad range of possibilities", Proc. SPIE, **8240**, 82400I-1 – 82400I-8, 2012
- II. M. Kerobyany, A. Gyulasaryan, S. Sghomonyan, G. Gabrielyan, S. Essaian, "An interference method for measuring parallelism of miniature optical components", J. Modern Optics, **60** (10), 808-813, 2013
- III. M. Kerobyany, A. Gyulasaryan, A. Khachikyan, S. Sghomonyan, G. Gabrielyan, S. Essaian, "Measurement of residual reflection at the interface between optically contacted components of microchip laser", Optics Communications, **311**, 38-43, 2013
- IV. M. Kerobyany, "Interference effects in microchip laser with intracavity frequency doubling", Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, **4** (6), 772-777, 2013
- V. M. Kerobyany, R. Kostanyan, S. Sghomonyan, S. Essaian, "Fabry-perot interference in quasi-phase-matched second harmonic generation in green microchip laser", Arm. J. Physics, **7** (4), 201-212, 2014
- VI. M. Kerobyany, R. Kostanyan, V. Nersesyan, S. Sghomonyan, "Thermal lensing in diode pumped Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub>/LiNbO<sub>3</sub> green microchip laser", IOP J. Phys.: Conf. Ser., **541**, 012052, 2014.
- VII. M. Kerobyany, A. Gyulasaryan, S. Sghomonyan, "Measurement of reflectivity of bonded interface in microchip laser cavity using scanning interferometry", Laser physics 2012, Ashtarak, Armenia, Book of abstracts, p. 10.
- VIII. М. И. Керопян, "Многолучевая интерференция в микрочип лазере в внутрирезонаторной генерацией второй гармоники", Сборник трудов VIII международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика - 2013», Санкт-Петербург, 14-18 октября 2013, ISBN 978-8-7577-0442-5, 160 – 162.
- IX. M. Kerobyany, "Interference effects in second harmonic generation in nonlinear plane parallel crystal", 14<sup>th</sup> international young scientist's conference optics and high technology material science SPO 2013, October 24-27, 2013, 143 – 144.

- X. M. Kerobyan, "Interference effects in nominally single-pass quasi-phase matched second harmonic generation", International conference "IONS – Armenia", 11 – 14 September, Book of abstracts, p. 35
- XI. Р.Б. Костанян, М.И. Керопян, "Влияние отражения от оптического контакта на параметры Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub>/LiNbO<sub>3</sub> зеленого микрочип-лазера", Известия НАН Армении, **50**(2), 194-198, 2015.
- XII. М. Kerobyan, "Multiple beam interference in second harmonic generation in plane-parallel nonlinear slab", Laser physics 2013, Ashtarak, Armenia, Book of abstracts, p. 4.

#### **Цитируемая литература:**

1. S. Reichelt, A. Bieber, B. Aatz, H. Zappe, Proc. SPIE, **5856**, 437-446, 2005
2. A. Davies, B. Bergner, N. Gardner, Proc. SPIE, **5177**, 67-81, 2003
3. H. Ottevaere, H. Thienpont, Encyclopedia of Modern Optics, Elsevier: Oxford, vol. 4, 21-33, 2004
4. V. Gomez, G. Young-Sik, et al. Meas. Sci. Technol. **20**, 025901, 2009
5. D. Malacara, Optical shop testing, John Wiley & Sons Inc: Hoboken, NJ, 2007
6. Б.Е. Мошкин, Б.С. Майоров, Оптический журнал, **74**, 24-27, 2007
7. Q. Tong, U. Gosele, Semiconductor wafer Bonding: Science and Technology. John Wiley & Sons Inc: Hoboken, NJ, 1999
8. A.G. Horn, M. Gabriel, J. Lesniak, T.J. Mackin, Journal of Electrochemical Society, **156**, H27, 2009
9. A.N. Podjue, W. Kerr, K.T. Turner, ECS Transactions **33**, 537, 2010
10. W.P. Maszara, Journal of the Electrochemical Society, **138**, 341, 1991
11. A. Ploessl, G. Kraeuter, Material Science and Engineering, **R25**, 1, 1999
12. H. van de Stadt, J.M. Muller, Journal of the Optical Society of America, **2**, 1363, 1985
13. R. Boyd, Nonlinear Optics, 3rd edition, Academic Press, New York, 2008
14. M.E. Innocenzi, H.T. Yura, C.L. Fincher, R.A. Fields, Applied Phys. Letters, **56**, 1831-1833, 1990
15. W. Koechner, Solid State Laser Engineering, New York, 2006

Ատենախոսությունը նվիրված է բարձր էֆեկտիվությամբ կանաչ միկրոչիպ լազերների հետազոտմանը և մշակմանը: Կանաչ միկրոչիպ լազերի ռեզոնատորը բաղկացած է ակտիվ միջավայրից ( $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ ) և ոչ գծային օպտիկական բյուրեղից (periodically polled  $\text{MgO}$  doped  $\text{LiNbO}_3$  PPNL:MgO): Այս երկու բյուրեղները իրար են ամրացված օպտիկական կոնտակտի միջոցով: Ռեզոնատորի հայելիները բազմաշերտ դիէլեկտրիկ ծածկույթներ են, որոնք փոշենաստեցված են բյուրեղների արտաքին մակերևույթներին: Մուտքային հայելին թափանցիկ է 808 նմ ալիքի երկարության ճառագայթման համար, և անդրադարձնում է 1064 նմ և 532 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթումները: Ելքային հայելին թափանցիկ է 532 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթման համար, և անդրադարձնում է 1064 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթումը: Որպես մղման աղբյուր օգտագործվել է լազերային դիոդ, 808 նմ ճառագայթման ալիքի երկարությամբ: Ոչ գծային օպտիկական բյուրեղում կատարվում է ակտիվ միջավայրում գեներացված 1064 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթման երկրորդ հարմոնիկի գեներացիա, որի համար անհրաժեշտ է ապահովել 44 °C ջերմաստիճան: Այդ նպատակի համար օգտագործվել է ջերմաէլեկտրական կարգավորող սարք (Պելտյե էլեմենտ), որը ապահովում է 0.1 °C ճշտություն: Տվյալ Պելտյե էլեմենտը կարգավորում է ոչ միայն ոչ գծային օպտիկական բյուրեղում քվադի-սինխրոնիզմի ջերմաստիճանը, այլ նաև մղման լազերային դիոդի ջերմաստիճանը:

Ռեզոնատորի հարթ զուգահեռ լինելը կարևոր նշանակություն ունի միկրոչիպ լազերի աշխատանքի համար: Դա ստուգելու նպատակով, մենք նախագծել և իրականացրել ենք փոքր (միլիմետրանոց և սուբմիլիմետրանոց) չափերի ապերտուրայով օպտիկական տարրերի մակերևույթների զուգահեռությունը չափելու նոր մեթոդ: Այդ մեթոդի օգնությամբ չափվել են ընդհուպ մինչև մի քանի տասնյակ միկրոտադիան անկյուններ, կանաչ միկրոչիպ լազերի բաղկացուցիչ մաս կազմող բյուրեղների մակերևույթների միջև: Տվյալ մեթոդը թույլ է տալիս կատարել չափումներ 7 % ճշտությամբ:

Կանաչ միկրոչիպ լազերի բաղկացուցիչ մասերը իրար են ամրացված օպտիկական կոնտակտի միջոցով: Օպտիկական կոնտակտից անդրադարձումը ոչ իդեալական կոնտակտի պատճառով կարող է հասնել մի քանի տոկոսի: Այդպիսի մեծ անդրադարձումները ռեզոնատորի ներսում բերում են լազերի գեներացիայի ռեժիմի խախտման, կայունության անկման և այլ անցանկալի հետևանքների: Որպեսզի գնահատել օպտիկական կոնտակտից անդրադարձումը, մեր կողմից մշակվել է օպտիկական կոնտակտից անդրադարձման գործակցի չափման նոր մեթոդ: Մեթոդը թույլ է տալիս չափել 0.1 %-ից մեծ արժեքներով անդրադարձման գործակիցները:

Կանաչ միկրոչիպ լազերի ելքային հզորության ջերմաստիճանային կախվածության մեջ նկատվել են հզորության պարբերական տատանումներ: Փորձականորեն ցույց է տրվել, որ այդ տատանումների ամպլիտուդան կախված է օպտիկական կոնտակտից անդրադարձման հետ, որը բերում են ինչպես հիմնական,



այնպես ել երկրորդ հարմոնիկ ալիքների բազմակի անդրադարձումների ոչ գծային օպտիկական բյուրեղում: Տեսականորեն հետազոտվել են բազմակի անդրադարձումների ազդեցությունը կանաչ միկրոչիպ լազերում երկրորդ հարմոնիկի գեներացիայի վրա: Տեսական հաշվարկների արդյունքում ստացվել է անալիտիկ բանաձև, որը փորձերի արդյունքների հետ մեծ ճշտությամբ համընկնումով բացատրում է կանաչ միկրոչիպ լազերի ելքային հզորության ջերմաստիճանային կախվածության մեջ հզորության տատանումները: Բանաձևից ստացված արդյունքներից և փորձնական չափումներից ստացված տատանումների պարբերությունները համապատասխանում են միմյանց, իսկ ամպլիտուդաների մեջ դիտվում է անհամապատասխանություն: Այդ անհամապատասխանությունը գալիս է տեսական հաշվարկների ժամանակ կատարված մոտավորություններից:

Օգտվելով մեր կողմից մշակված մեթոդից, չափվել են օպտիկական կոնտակտից անդրադարձման գործակիցները կանաչ միկրոչիպ լազերում, և հետազոտվել է այդ անդրադարձման ազդեցությունը լազերի աշխատանքի վրա: Փորձերը ցույց են տվել, որ օպտիկական կոնտակտից անդրադարձումը բերում է լազերի գեներացիայի շեմի մեծացմանը և ելքային փնջի կայունության վատացմանը: Տեսականորեն հաշվարկվել է լազերի գեներացիայի շեմի կախվածությունը օպտիկական կոնտակտից անդրադարձման գործակցից: Ստացված բանաձևը գտնվում է որակական համաձայնության մեջ փորձնական տվյալների հետ:

Փորձնականորեն հետազոտվել է կանաչ միկրոչիպ լազերում առաջացող ջերմային ռսպնյակի ֆոկուսային հեռավորության կախվածությունը մղման հզորությունից: Կառուցվել է կանաչ միկրոչիպ լազերի ռեզոնատորի մոդել, որը հաշվի է առնում ակտիվ միջավայրում առաջացող ջերմային ռսպնյակի ազդեցությունը: Համապատասխան այդ մոդելի, ստացվել են մղման փնջի օպտիմալ չափերը, որի դեպքում մղման հզորությունը օպտիմալ ձևով է օգտագործվում գեներացիա ստանալու համար:

Օգտագործելով հետազոտությունների արդյունքները, մշակվել է կանաչ միկրոչիպ լազեր, որի ելքային 532 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթման հզորությունը հասցվել է մինչև 400 մՎտ, մղման 808 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթման 1125 մՎտ հզորության պայմաններում: Դա ապահովել է ընդհուպ մինչև 30-35% էֆեկտիվություն 808 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթումից 532 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթման ստանալու պրոցեսում:

## SUMMARY

The dissertation is devoted to the creation and investigation of green microchip lasers. Microchip laser is composed of two planar components: active (gain) medium ( $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ ) and nonlinear optical medium (PPNL:  $\text{MgO}$ ). These two crystals are joint by optical contacting (direct bonding). Mirrors of the resonator are multilayer dielectric coatings, which are directly applied to the outer surfaces of the components of microchip laser. In the nonlinear optical crystal, quasi-synchronized SHG process leads to the generation of the second harmonic wave. This process requires temperature of the nonlinear optical crystal to be set to 44 °C: This temperature was fixed by thermo-electro cooler (Peltie element), which is able to provide 0.1 °C precision of the fixed temperature. The green microchip laser is pumped with the radiation of laser diode at the 808 nm wavelength. It is known, that wavelength of the radiation of the laser diode depends on the temperature, thus laser diode is also placed on the same thermo-electro cooler, and laser diodes are chosen to radiate at the 808 nm wavelength at the temperatures of quasi-phase matching of the nonlinear optical crystal.

Parallelism of the components of the green microchip laser is important, because resonator of the green microchip laser consists of two plane-parallel crystals, and in case of non-parallel components, resonator would unstable. To be able to measure parallelism of small optical components such as parts of green microchip laser, we have developed a method for measuring parallelism on miniature optical components. By the use of this method, we were able to measure as small wedge angles as tens of microradian on the components of the green microchip laser. The developed method allows to measure wedge angles on transparent optical components with the 7% precision.

Components of the green microchip laser are joint via optical contact. Reflection from the optical contact in case of Fresnel reflection for this particular case is about  $2.5 \times 10^{-4}$ , which is negligibly small value. Because of non-ideality of the optical contact, reflection coefficient could be much bigger and reach up to 2 %. Such reflection in the resonator leads to the modification of laser spectra, destabilize the laser's output power and other undesirable effects. To be able to measure the reflection coefficient from interface of optical contact between two planar components of the green microchip laser we have developed a new, nondestructive method. This method based on the analysis of the temperature response of the three-mirror Fabri-Pero interference and do not require a working regime of the laser. We were able to measure as small as 0.1 % reflections from the interface of the optical contact.

In the green microchip laser output power versus temperature dependency, periodic oscillations were found. It was shown experimentally, that amplitude of this oscillations are related to the reflection from optical contact, which leads to the multiple beam interference of fundamental wave as well as second harmonic wave in the nonlinear optical crystal. Influence of multiple beam interference on the process of SHG is investigated theoretically.

As a result analytic formula is derived for SHG efficiency in the resonator of green microchip laser, which takes into account multiple beam interference in the nonlinear crystal. This formula is in a good agreement with the results of the measurements, and explains the periodic oscillations in the output power of microchip laser versus temperature dependency. The periods of the oscillations measured in the experiments are the same calculated from the formula. The difference between theoretic results and the experiments are in the amplitudes of the oscillations, which is the result of the approximations, which were made during the calculations.

Using the method of measuring reflection coefficient from the interface of optical contact, we have measured reflections from the optical contact in the green microchip laser, and investigated it's influence on the working regime of the laser. Analytic formula was derived, which shows, that reflection from optical contact leads to the increase of the laser generation threshold. The same result was obtained from the experiments. Besides, experiment show correspondence between stability of the output laser radiation and reflection coefficient from the optical contact in the resonator of microchip laser. According to the experimental results, the higher the reflection coefficient, the lower the stability of output beam.

Focal length of induced thermal lens in the active medium of the green microchip laser dependency on pump power was investigated experimentally. Model of the green microchip laser resonator, with thermal lens was built, and according to that model, we obtain optimal pump parameters for mode matching of pump wave and resonator mode. This allows to effectively use pump power.

Using the result of these investigations, green microchip laser was created, which has a 400 mW output power (800 mW at peak) at the 532 nm wavelength, when pump power at 808 nm was 1125 mW. This gives about 30-35% optics to optics (from 808 nm to 532 nm) conversion efficiency.

