

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт Автоматики и ЭлектрOMETрии
Сибирского Отделения Российской Академии Наук
(ИАиЭ СО РАН)

На правах рукописи

Яковин Михаил Дмитриевич

**Суперлюминесцентная параметрическая генерация света в кристалле PPLN
с накачкой от Nd:YAG лазера с СЗАОМ.**

01.04.05 “Оптика”

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

д. ф.-м. н. Донин Валерий Ильич

к. ф.-м. н. Сорокин Владимир Алексеевич

Новосибирск - 2019

Оглавление

	Стр.
Список сокращений и условных обозначений.....	4
Введение.....	6
Глава 1. ПГС среднего ИК диапазона с синхронной накачкой Nd:YAG-лазером с СЗАОМ (многоимпульсный режим).....	27
1.1 Описание экспериментальной установки.....	27
1.2 Экспериментальные результаты.....	30
1.3 Анализ полученных данных и выводы.....	46
Глава 2. Эффективная параметрическая суперлюминесценция в кристалле PPLN (одноимпульсный режим).....	50
2.1 Описание экспериментальной установки.....	51
2.2 Результаты экспериментов.....	53
2.3 Анализ полученных результатов.....	60
2.4 Выводы.....	65
Глава 3. Сравнение суперлюминесцентного и однорезонаторного режимов ПГС при накачке в одноимпульсном режиме.....	67
3.1 Режим суперлюминесцентной параметрической генерации света.....	68
3.2 Режим однорезонаторного ПГС.....	74

3.3 Анализ полученных результатов и выводы.....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	83
ПРИЛОЖЕНИЕ А Описание Nd:YAG лазера с СЗАОМ.....	85
Список цитируемой литературы.....	93
Публикации автора по теме диссертации.....	107

Список сокращений и условных обозначений

ПГС – параметрический генератор света

MOPA – master oscillator – power amplifier, система - задающий генератор-усилитель

OPO – optical parametric oscillator/oscillation, оптический параметрический генератор (осциллятор) / оптическая параметрическая генерация (осцилляция) с резонатором (с положительной обратной связью)

OPG – optical parametric generator/generation, оптический параметрический генератор / оптическая параметрическая генерация без резонатора (без обратной связи)

СЗАОМ – комбинация сферического зеркала и акустооптического модулятора бегущей волны для получения синхронизации мод и модуляции добротности лазера

QML – Q-switch mode locking, режим генерации лазера с одновременной модуляцией добротности и синхронизацией мод

УСИ – усиленное спонтанное излучение

DPSSL – diode pumped solid-state laser, твердотельный лазер с накачкой от лазерных диодов

TiSa – титан сапфировый

N – число атомов активной среды

N_c – критическая инверсная населенность (разность населенностей между верхним и основным уровнем энергии)

σ_0 – пиковое сечение перехода

Ω – телесный угол излучения УСИ

Λ – период поляризации нелинейного кристалла при квазифазовом синхронизме

$k(\omega)$ – волновое число в зависимости от частоты излучения ω

L_0 – длина резонатора лазера накачки (Nd:YAG лазера с СЗАОМ) при одноимпульсном режиме

ΔL_n – отстройка длины резонатора лазера накачки (Nd:YAG лазера с СЗАОМ)

ω_p – частота излучения накачки

ω_s – частота излучения сигнальной длины волны

ω_p – частота излучения холостой длины волны

λ_s – длина волны излучения накачки

λ_s – длина волны сигнального излучения (сигнальная длина волны) параметрической генерации

λ_i – длина волны холостого излучения (холостая длина волны) параметрической генерации

$P_{вых}$ – Прошедшая (выходная) мощность накачки через ПГС

$P_{вх}$ – Падающая (входная) мощность накачки на ПГС

Γ – Удельный коэффициент усиления параметрической генерации

I_{th} – Пороговая интенсивность накачки

I_p – интенсивность накачки

$P_{хол}$ – Средняя выходная мощность на холостой длине волны

$P_{сигн}$ – Средняя выходная мощность на сигнальной длине волны

$N_{эфф}$ – Число интерференционных колец между двумя соседними порядками

τ_p – длительность импульса излучения накачки

τ_s – длительность импульса параметрической генерации на сигнальной длине волны

τ_i – длительность импульса параметрической генерации на холостой длине волны

Введение

Суперлюминесцентный параметрический генератор света (ПГС) дает мультиволновое излучение с одновременной перестройкой в различных областях оптического спектра, от видимой до средней ИК. Создание такого источника явилось результатом появления диодно-накачиваемых твердотельных лазеров, генерирующих стабильные пикосекундные импульсы с высокой пиковой интенсивностью и нелинейных кристаллов с периодически поляризованными структурами.

Впервые явление *суперлюминесценции* для активных сред было описано в работе [1]. Оно заключалось в том, что при условии, когда длина активной среды L много больше пороговой длины усиления $L_t = g^{-1}$ (g – удельный коэффициент усиления в см^{-1}) и меньше либо равна кооперативной длине $L_c = c\tau_c$ (где $\tau_c = \frac{2}{\sqrt{\lambda^2 c \rho \gamma}}$ – время кооперативного излучения, ρ – плотность активных атомов, γ – скорость спонтанного излучения), т.е.: $L_t \ll L \leq L_c$, в системе с инверсной населенностью могут самопроизвольно возникать корреляции между излучающими атомами. За счет этого спонтанное излучение может принять форму кооперативного процесса и в таком случае ее максимальная интенсивность будет пропорциональна N^2 , а время излучения пропорционально N^{-1} , где N – число атомов активной среды. Помимо суперлюминесценции существует *усиленное спонтанное излучение* (УСИ) которое впервые было описано в работах [2-4].

В [5] проводится разграничение между понятием суперлюминесценции и усиленным спонтанным излучением. Последнее определяется как высокоинтенсивное излучение, которое возникает в активных лазерных средах с большим коэффициентом усиления в отсутствие резонатора при достижении критического значения инверсии населенности. Данное значение определяется, из соотношения [5]:

$$\frac{4[\sigma_0 N_c l \exp(\sigma_0 N_c l)]^{1/2}}{[\exp(\sigma_0 N_c l) - 1]^{3/2}} = \Omega, \quad (1)$$

где σ_0 – пиковое сечение перехода, N_c – критическая инверсная населенность, l – длина активной среды, $\Omega = \frac{\pi D^2}{4l^2}$ – телесный угол, в который излучается люминесценция УСИ.

В отличие от суперлюминесценции для УСИ отсутствует ограничение по длине активной среды и телесный угол излучения определяется геометрическими размерами среды, в то время как при суперлюминесценции телесный угол излучения определяется дифракцией λ/D [1].

Явление *параметрической люминесценции* впервые наблюдалось С. Е. Харрисом и Р. Л. Баером и описано в статье [6]. В ней была представлена генерация с уровнем мощности $\sim 10^{-12}$ Вт. На основании этой работы было дано определение параметрической люминесценции как оптического параметрического шума, возникающего из-за параметрического усиления воображаемого фотона с нулевой энергией и разработана специальная теория [7].

С тех пор, как начали получать параметрическую генерацию от пикосекундных импульсов накачки [8, 9], под *параметрической суперлюминесценцией* определяют усиленное излучение параметрической люминесценции, распространяющейся по направлению излучения накачки, т.е. безрезонаторную (беззеркальную) параметрическую генерацию [10, 11].

Интерес к накачке оптических параметрических генераторов пикосекундными импульсами возник в связи с задачами исследования динамики молекулярных процессов, с развитием методов спектроскопии нестационарных процессов [10], поляризационной сверхбыстрой спектроскопии фотоиндуцированного поглощения [12] и спектроскопии многофотонного поглощения.

Пикосекундные параметрические генераторы с высокой эффективностью преобразования по их практическому исполнению можно разделить на 3 схемы: 1) синхронно-накачиваемый однорезонаторный ПГС; 2) синхронно-накачиваемый двухрезонаторный ПГС; 3) суперлюминесцентный ПГС. Пороги генерации для таких схем достигают соответственно: 1) $\sim 1-10$ МВт/см²; 2) $\sim 0,1-1$ МВт/см²; 3) $\sim 100-500$ МВт/см² [13, 14].

Несмотря на низкие значения порога генерации двухрезонаторных ПГС, такие схемы не получили широкого распространения. Т.к. для них характерно возникновение кластерного эффекта, который появляется из-за того, что в резонаторе не обеспечивается одновременное согласование собственных мод резонатора с двумя модами выходного излучения, на сигнальной и холостой длинах волн. В результате этого возникают нестабильности мощности и частоты выходного излучения, что приводит к расщеплению непрерывного диапазона перестройки на отдельные участки (кластеры) [15].

Ввиду кластерного эффекта и необходимости плавной перестройки, широкое распространение получили однорезонаторные ПГС с синхронной накачкой. Так в 1983 году Онюшков Г. И. с соавторами в работе [16] продемонстрировал ПГС на кристалле ниобат бария-лития с синхронной накачкой второй гармоникой Nd:YAG лазера с синхронизацией мод. Диапазон перестройки был 0,8-1,6 мкм. Энергия в цуге импульсов синхронизации мод в Nd:YAG лазере была 2 мДж. Генерация второй гармоники происходила в кристалле LiIO₃, КПД преобразования по энергии был 30%. Для параметрической генерации использовался кристалл BaNaN с 90° синхронизмом. КПД преобразования ПГС составил 5%, минимальная

длительность выходного импульса достигала 10 пс. Истощение накачки было на уровне 35%, длительность импульса накачки была на уровне ~ 110 пс. В этот же период времени (1980е гг.) А. Пискарьевым была исследована синхронная накачка кристалла ниобата-лития второй гармоникой Nd:YAG-лазера с активной синхронизацией мод и модуляцией добротности (QML режим). В его работах [17, 18] был получен диапазон перестройки 0,85–1,4 мкм, средняя мощность выходного излучения была на уровне ~ 25 мВт, максимальная эффективность преобразования составила 17,5%.

С начала 1990х годов в качестве источников накачки в ПГС начинают широко использоваться твердотельные лазеры с накачкой от лазерных диодов (DPSSL). Их отличает высокая эффективность, компактность и стабильность по сравнению с лазерами с ламповой накачкой. Так, в 1992 году была впервые продемонстрирована синхронная накачка однорезонаторного ПГС на кристалле KTP от диодно-накачиваемого Nd:YLF-лазера с удвоением частоты выходного излучения [19]. Эффективность преобразования достигала 16% в сигнальную длину волны, диапазон перестройки был в области 1,002 – 1,096 мкм. Авторы указывают на высокую стабильность генерации собранной системы. Вслед за этой работой, М. Эбрагимзаде (M. Ebragimzadeh) с соавторами [20] продемонстрировал однорезонаторный ПГС с синхронной накачкой на кристалле LBO, перестраиваемого от 0,652 мкм до 2,65 мкм. В качестве лазера накачки использовался диодно-накачиваемый Nd:YLF-лазер с удвоением частоты выходного излучения, с синхронизацией мод и модуляцией добротности. Длительность импульса составляла 55 пс. Порог генерации наблюдался при средней мощности накачки в 10 мВт, КПД преобразования был 20%. Авторы отмечают, что все измерения проводились при превышении пороговой мощности накачки в ~ 2 раза и схема была не оптимизированной. В 1993 году была опубликована работа этих же авторов [21], в которой были продемонстрированы ПГС на кристаллах KTP и LBO. Накачка также проводилась второй гармоникой диодно-накачиваемого Nd:YLF-лазера с синхронизацией мод и модуляцией добротности.

Исследовались генерации при различных режимах накачки. Так при накачке в режиме синхронизации мод и модуляции добротности длительность импульса накачки ПГС на кристалле КТР была 15-18 пс, порог генерации ~ 2 мВт. Общий КПД был 10% при истощении импульса накачки в 41%. Длительности импульсов для сигнальной и холостой длины волны были 6-8 пс. При накачке в режиме непрерывной синхронизации мод этого же ПГС (кристалл КТР) общий КПД преобразования достигал 7%. Максимальная средняя мощность накачки составляла 570 мВт, общая выходная средняя мощность излучения ПГС была при этом ~ 40 мВт. Так как в режиме непрерывной синхронизации мод пиковая мощность уменьшается на 2-3 порядка при сравнении с режимом с синхронизацией мод и модуляцией добротности, то использовалась двухрезонаторная схема ПГС. В этом случае наблюдался кластерный эффект в спектре выходного излучения и большие нестабильности выходного излучения. Максимальный диапазон перестройки составил 0,946-1,020 мкм и 1,172-1,075 мкм для сигнальной и холостой длин волн, соответственно. При накачке ПГС на кристалле LBO в режиме модуляции добротности и синхронизации мод эффективность была на уровне 13% при однорезонаторной схеме и 35% - для двухрезонаторной. Пороги генерации составили 10 мВт и 4,5 мВт для однорезонаторной и двухрезонаторной схем, соответственно. Было установлено увеличение выходной длительности импульса с 12 пс до 35 пс при увеличении мощности накачки над порогом генерации. Длительность импульса накачки в этом случае была 55 пс. В режиме непрерывной синхронизации мод в двухрезонаторной схеме порог генерации составил 30 мВт. КПД преобразования достигал 53%. Диапазон перестройки составил 0,652–0,987 мкм и 2,65–1,11 мкм, для сигнальной и холостой длины волны соответственно для всех режимов. Длительности импульсов накачки и генерации составили – 2,5 пс и 1,7 пс соответственно.

В работе [22] в однорезонаторном ПГС на кристалле КТР накачка производилась Nd:YLF-лазера с непрерывной синхронизацией мод. Причем использовалась, как и длина волны генерации Nd:YLF-лазера – 1,053 мкм, так и

вторая гармоника от нее на кристалле LBO – 0,527 мкм. Длительности импульсов были 40 и 30 пс для 1,053 и 0,527 мкм, соответственно. Общий КПД преобразования ПГС составил 44% для длины волны накачки 0,527 мкм и 21% для 1,053 мкм. Диапазон перестройки был 1,01 – 1,1 мкм при накачке 0,527 мкм. При накачке 1,053 мкм диапазон перестройки был 1,55 – 1,56 мкм и 3,22 – 3,28 мкм для сигнальной и холостой длины волны. Средняя мощность накачки была 1,3 и 14 Вт для длин волн 0,527 и 1,053 мкм, соответственно. Выходные длительности импульсов были 14 пс для длины волны накачки в 0,527 мкм и 12 пс для 1,053 мкм. Использовались два кристалла КТР для разных длин волн накачки, причем для накачки 0,527 мкм кристалл имел угол сноса в 27° , а для 1,053 мкм – сноса не было, длины кристаллов были по 6 мм. Максимальные выходные мощности составили 580 мВт при накачке 0,527 мкм и 2 Вт (сигнальная длина волны), 0,8 Вт (холостая длина волны) при накачке 1,053 мкм.

В 1994 году сотрудниками центра нелинейной оптики лаборатории компании Филипс был продемонстрирован однорезонаторный ПГС на кристалле тиогаллат серебра с синхронной накачкой от Nd:YAG лазера с непрерывной активной синхронизацией мод [23]. Общий КПД преобразования составил ~17%. Максимальные выходные средние мощности были 100 мВт и 6 мВт для сигнальной и холостой длины волны, соответственно. Максимальная средняя мощность накачки составила 625 мВт, длительность импульса накачки – 100 пс при частоте повторения в 76 МГц. Выходная длительность импульса на сигнальной длине волны была в диапазоне 45-80 пс. Выходные длины волн были 1,319 мкм – сигнальная и 5,505 мкм – холостая. Истощение накачки составило 63% и находилось сравнением прошедшей мощности накачки через резонатор ПГС к падающей. Было установлено, что существенное истощение накачки идет при превышении мощности порога генерации в два раза.

В 90х годах прошлого столетия также наблюдался скачок в сверхбыстрых источниках лазерного излучения, связанных с появлением кристалла титан-сапфира и с развитием диодно-накачиваемых твердотельных лазерах с

синхронизацией мод и модуляцией добротности [24]. Такой активный элемент стал доступной альтернативой красителям в диапазоне длин волн генерации 0,680-1,100 мкм. Рост работ по исследованию и разработке титан-сапфирового (TiSa) лазера с накачкой от диодно-накачиваемых твердотельных лазеров с синхронизацией мод привел к появлению работ по синхронной накачке ПГС от такого лазера.

Так, в работе [25] был продемонстрирован ПГС на кристалле LBO с синхронной накачкой от TiSa лазера с непрерывной синхронизацией мод с частотой повторения 81 МГц, длительностью импульса 1,4-2 пс. Использовались кристаллы LBO с длиной 16 и 30 мм. Максимальные средние выходные мощности ПГС были 90 и 350 мВт для кристалла LBO длиной 16 и 30 мм, соответственно. Увеличение длины нелинейного кристалла приводило к увеличению выходной длительности импульса на сигнальной длине волны с 720 фс до 1,1 пс. Диапазон перестройки составил 1,290-1,973 мкм для обоих кристаллов. КПД преобразования составил 7,5% при истощении накачки в 20% в случае 16 мм кристалла и 30% при истощении накачки в 50% при длине кристалла в 30 мм.

Сотрудниками компании Spectra-Physics в работе [26] исследовался ПГС с синхронной накачкой от двух источников с синхронизацией мод – TiSa лазера и второй гармоникой Nd:YAG лазера. Были получены ультра-короткие длительности импульсов в 40 и 270 фс для накачки TiSa лазером и второй гармоникой Nd:YAG лазера, соответственно. TiSa лазер имел выходную среднюю мощность в 2 Вт с длительностью импульса 100 фс с длиной волны в диапазоне 800 нм, частота повторения была 80 МГц. Используя эту накачку, были получены импульсы ПГС с длительностью в 40 фс и максимальной средней выходной мощностью 550 мВт на длине волны 1,3 мкм, диапазон перестройки был 1,1-2,4 мкм. Nd:YAG лазер имел среднюю выходную мощность в 2 Вт и длительность импульса 6 пс при частоте повторения 80 МГц на длине волны 0,532 мкм. При такой накачке длительность импульса ПГС составила 270 фс, максимальная средняя выходная мощность 440 мВт на длине волны 0,875 мкм, а диапазон перестройки 0,6 – 2,6 мкм. В обоих

случаях использовалась схема компенсации chirpa. Обе системы производили фемтосекундные импульсы с минимальным джиттером.

Общее всех перечисленных работ является то, что однорезонаторные параметрические генераторы с синхронной накачкой от диодно-накачиваемых твердотельных лазеров обладают более высокой стабильностью генерационных характеристик, надежностью и компактностью. Появление нелинейных кристаллов таких как LBO, AGS, KTP в связке с развитием диодно-накачиваемых твердотельных лазеров позволило создавать эффективные параметрические генераторы, непрерывно перестраиваемые в широком диапазоне средней ИК области спектра с длительностями импульса на уровне 10^{-12} - 10^{-14} секунд. Появление таких параметрических генераторов привело к дальнейшему развитию техники спектроскопии сверхвысокого разрешения и лидарных приложений.

Новые материалы с периодической поляризованной структурой (регулярной доменной структурой) [27], такие как PPLN, дали возможность создавать эффективные параметрические генераторы света, с принципиально новым методом 3х волнового взаимодействия – квазифазовым синхронизмом. Принцип этого взаимодействия заключается в том, что фазовое рассогласование компенсируется за счет периодической модуляции вектора поляризации нелинейной среды с периодом Λ равным, как правило, длине нелинейной когерентности, когда энергия генерируемой волны при нелинейном преобразовании достигает максимума, т.е.:

$$k(\omega_p) = k(\omega_s) + k(\omega_i) + \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2)$$

Такое взаимодействие имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами согласования фаз в двулучепреломляющих кристаллах, а именно – отсутствие угла сноса между взаимодействующими волнами и более высокий коэффициент нелинейности. Также можно пренебречь таким понятием как угловая ширина синхронизма, так как взаимодействия по поляризации имеют вид eee и ooo. Теоретически такой вид согласования фаз был предложен в 1962 году

Дж. А. Армстронгом и Н. Бломбергенем [28, 29]. Однако широкое практическое применение он получил с развитием методов электростатической периодической переполюсовки вектора поляризации в ферроэлектриках [30, 31] в начале – середине 1990х годов.

С помощью таких материалов были созданы эффективные параметрические генераторы света (ПГС) с перестройкой в среднем ИК диапазоне со средней выходной мощностью на уровне десятков ватт [32-34], также на основе этих материалов созданы оптические синтезаторы частоты с перестройкой от УФ до среднего ИК диапазона [35-37].

Использование материалов с квазифазовым синхронизмом с высокими нелинейностями и твердотельных лазеров с мощной диодной накачкой позволили создавать ПГС с более высокой эффективностью преобразования и средней выходной мощностью, с узкой спектральной линией генерации и высокой стабильностью выходных характеристик. Расширились прикладные области их применения в науке и техники.

Так в [38] был продемонстрирован ПГС, собранный по 4х-зеркальной линейной схеме на кристалле PPLN, с синхронной накачкой от Nd:YVO₄ лазера с пассивной синхронизацией мод. Средняя выходная мощность составила более 1 Вт, длительность импульса – 34 пс, частота повторения импульсов была 235 МГц, диапазон перестройки – 1,461-1,601 мкм. В работе была получена сравнительно узкая линия генерации 15 МГц, пригодная для дистанционного зондирования атмосферы с целью выявления загрязняющих веществ. Расстройка длины резонатора для синхронной накачки была 0,5 мм. В [39] сообщается о ПГС с синхронной накачкой, с КПД преобразования 70%, на кристалле PPLN с общей максимальной средней мощностью в 12 Вт, где 8 Вт приходилось на сигнальную длину волны (1.85 мкм), а 4 Вт на холостую (2.5 мкм). Диапазон перестройки был 1.7–2.84 мкм. В качестве лазера накачки использовался Nd:YAG-лазер с непрерывной синхронизацией мод. Длительность импульса накачки была 80 пс, частота повторения – 76 МГц. Средняя мощность накачки достигала 18 Вт.

В работе [40] был продемонстрирован ПГС на кристалле PPLN с синхронной накачкой от волоконного иттербиевого лазера (Yb-волоконного лазера) с непрерывной синхронизацией мод с длительностью импульсов в 20 пс, частотой повторения в 81,1 МГц со средней выходной мощностью более 20 Вт на длине волны 1,064 мкм. Максимальная выходная средняя мощность ПГС составила 7,1 Вт для сигнальной длины волны на 1,56 мкм и 4,6 Вт для холостой на 3,33 мкм при средней мощности накачки в 16 Вт. Диапазон перестройки достигал 1,43-1,63 мкм и 4,16-3,06 мкм для сигнальной и холостой длин волн соответственно. Общая выходная средняя мощность была на уровне ~11 Вт при общей эффективности преобразования на уровне ~68% во всем диапазоне длин волн. Истощение накачки было на уровне ~78%. Длительность выходного импульса на сигнальной длине волны составила 17,3 пс. Резонатор ПГС был собран по четырехзеркальной схеме стоячей волны и имел высокую добротность на сигнальной длине волны. Используемый кристалл PPLN был 50мм длиной и толщиной в 1 мм, имел две области с периодами поляризации 28,5 и 30,5 мкм, на его торцы были нанесены антиотражающие покрытия с $R < 1\%$ для 1,45-1,75 мкм, с высоким пропусканием для длины волны накачки - 1,064 мкм ($T > 97\%$) и холостых длин волн в диапазоне 3-4,2 мкм ($T > 95,5\%$). Сотрудниками этой же группы впервые был продемонстрирован ПГС на кристалле PPLT с синхронной накачкой от описанного выше волоконного иттербиевого лазера с непрерывной синхронизацией мод [41]. Диапазон перестройки составлял 1,531-1,642 мкм и 3,488-3,022 мкм для сигнальной и холостой длин волн соответственно. Использовался нелинейный кристалл PPLT длиной 30 мм и шестью разными периодами поляризации от 29,15 мкм до 30,65 мкм. Толщина кристалла была 1 мм. Максимальная общая средняя выходная мощность составила 6,28 Вт при оптимальном выходном зеркале с пропусканием в 47% на сигнальной длине волны, средняя мощность накачки при этом была 13,4 Вт. Резонатор ПГС был тоже собран по четырехзеркальной схеме стоячей волны. Длительность импульсов на сигнальной длине волны составила 17,5 пс. Далее в публикации [42] были проведены работы по увеличению частоты повторения

импульсов выходного излучения ПГС на кристалле PPLN с синхронной накачкой от того же иттербиевого волоконного лазера.

Пикосекундные ПГС с синхронной накачкой от диодно-накачиваемых твердотельных и волоконных лазеров на кристаллах с периодической поляризованной структурой занимают важное место в направлении создания лазерных источников с ультракороткими импульсами, способных излучать в разных областях спектра – от УФ и видимого до среднего ИК диапазона [43]. Так в работе [44] получена перестройка в диапазоне 1,413-1,900 мкм и 2,418-4,307 мкм в синхронно-накачиваемом четырехзеркальном однорезонаторном ПГС с коэффициентом пропускания выходного зеркала для сигнальной волны 10%. Источником накачки служил иттербиевый волоконный лазер с максимальной средней выходной мощностью 20 Вт, длительностью импульса 20 пс и частотой повторения импульсов 79,4 МГц. Используемый нелинейный кристалл PPLN с периодом поляризации 28 мкм имел размеры 15x5x35 мм, грани были выполнены в виде цилиндрической поверхности. Такое исполнение граней позволяло выполнять перестройку выходного излучения ПГС при комнатной температуре с помощью поворота кристалла вокруг его вертикальной оси от 0° до 30° . Максимальный общий КПД преобразования составил 45% при максимальной средней мощности накачки 9 Вт, на длинах волн генерации 1,664 мкм и 2,950 мкм. Максимальные средние выходные мощности составили 2,4 и 1,7 Вт для сигнальной (1,664 мкм) и холостой (2,950 мкм) длин волн, соответственно.

В настоящее время пикосекундные и фемтосекундные ПГС на основе кристаллов с периодической доменной структурой, ввиду их долговременной стабильности, компактности, большого срока службы и устойчивости к грубым внешним воздействиям, находят широкое применение в прецизионном приборостроении, гражданской и военной промышленности, медицине и экологии. Также они находят применение в фундаментальных исследованиях связанных с созданием компактных источников перестраиваемого излучения в дальнем-ИК и терагерцовом диапазоне при использовании новых материалов, таких как GaAs

(OP-GaAs), GaP (OP-GaP), CSP [45-48].

Одновременно с работами по созданию пикосекундных ПГС с синхронной накачкой, выполнялись работы по получению параметрической суперлюминесценции (безрезонаторной параметрической генерации), т.к. уже отмечались ее преимущества связанные с простотой конструкции, универсальностью, многодиапазонной перестройкой для применений в абсорбционных спектрографах [49]. Так в работе [50] на кристалле ZGP получена параметрическая суперлюминесценция с квантовой эффективностью 17%. В качестве источника накачки использовался трехмикронный (2,79 мкм) твердотельный лазер на кристалле иттрий-скандий-галлиевого граната с ионами хрома и эрбия (Er^{3+} , Cr^{3+} :YSGG лазер) с активной синхронизацией мод. Диапазон перестройки длин волн выходного излучения был 5-5,3 мкм и 5,9-6,3 мкм с пиковой мощностью ~ 1 МВт. В работе [51] на двух кристаллах LBO был продемонстрирован суперлюминесцентный ПГС с накачкой от третьей гармоники Nd:YAG лазера с синхронизацией мод с длительностью импульса 18 пс. Эффективность преобразования была 28% на длине волны 0,425 мкм, диапазон перестройки составил 0,403-2,58 мкм. Интенсивность накачки достигала 5 ГВт/см². В работе [52] от накачки Nd:glass лазера с синхронизацией мод в кристаллах KDP и ВВО наблюдалась параметрическая суперлюминесценция с диапазоном перестройки 0,750-1,770 мкм с длительностью импульса 0,6 пс. Причем, кристалл KDP использовался для параметрической генерации затравочного излучения, а кристалл ВВО для последующего усиления.

В работе [53] была впервые показана безрезонаторная (суперлюминесцентная) параметрическая генерация на кристалле PPLN при накачке микрочип Nd:YAG лазером с пассивной модуляцией добротности, которая возникала за счет секции насыщающегося поглотителя Cr:YAG в кристалле. Выходная энергия в импульсе накачки была 156 мкДж при частоте повторения ~ 2 кГц, длительность импульса была ~ 1 нс. При интенсивности накачки в 1 ГВт/см² общий коэффициент преобразования генерации достигал 25% для длин волн 1,59

мкм и 3,22 мкм, длительность импульсов составила ~ 500 пс. Позднее [54] была продемонстрирована безрезонаторная каскадная параметрическая генерация от второй гармоники Nd:YAG лазера с пассивной модуляцией добротности Cr:YAG поглотителем с длительностью выходного импульса ~ 700 пс при частоте повторения – 3,93 МГц и максимальной энергии в импульсе 7,5 мкДж. Для удвоения частоты накачки и последующей параметрической генерации использовался один двухсекционный кристалл PPLN. Секция удвоения частоты была длиной 1 см и имела период поляризации в 20,4 мкм, секция параметрической генерации состояла из 5 “дорожек” (областей) с периодами поляризации: 11, 11,25, 11,5, 11,75 и 12 мкм, расстояние между дорожками параметрической генерации было 0,1 мм. Температура кристалла составляла 40°C и выбиралась для наиболее эффективного преобразования во вторую гармонику. При такой температуре генерировались следующие длины волн в секции параметрической генерации (сигнальная и холостая): (0,6223, 3,666 мкм), (0,6164, 3,885 мкм), (0,6104, 4,160 мкм), (0,6042, 4,452 мкм), (0,5971, 4,879 мкм) для периодов поляризации: 11, 11,25, 11,5, 11,75, 12 мкм, соответственно. Общий КПД преобразования накачки в параметрическую генерацию достигал 16%. В работе [55] на кристалле PPLN с накачкой от второй гармоники микрочип Nd:YAG лазера с пассивной модуляцией добротности была получена перестройка в области 0,640-0,680 мкм с максимальным КПД преобразования в 21% на длине волны 0,660 мкм.

В работе [56] представлен спектрограф лазерной колебательной спектроскопии суммарной частоты (vibrational sum frequency spectroscopy) в видимой и ИК области спектра с диапазонами перестройки 3,2-11 мкм. В качестве источника сканируемого излучения использовался TiSa лазер собранный по схеме задающий генератор-усилитель. Средняя выходная мощность накачки составляла 1,7 Вт, длительность импульса – 2 пс, частота повторения – 1 кГц. Использовались три каскада на кристаллах ВВО для создания безрезонаторной параметрической генерации, описано применение спектрографа на образцах полистирола и аморфной золотой поверхности.

В работе [57] представлен стехиометрический PPLN с допированием MgO 1,8 мол.%, с длиной 70 мм и периодом поляризации в 30,6 мкм. При изготовлении кристалла отношение Li/Nb выбиралось таким образом, чтобы эффекты фоторефракции при комнатной температуре отсутствовали. Был получен порог безрезонаторной параметрической генерации $12,3 \text{ МВт/см}^2$, КПД преобразования в сигнальную длину волны 1,61 мкм при температуре кристалла $55 \text{ }^\circ\text{C}$ составил 18%. Накачка производилась микрочип Nd:YAG лазером с пассивной модуляцией добротности с максимальной средней выходной мощностью 360 мВт, длительностью импульса 6 нс и частотой повторения 10,4 кГц.

От Nd:YAG лазера с модуляцией добротности, собранного по схеме задающий генератор – усилитель, с длительностью импульса 8 нс, частотой повторения 25 кГц и максимальной выходной средней мощностью 15 Вт, в работе [58] была получена безрезонаторная параметрическая генерация на кристалле PPLN с максимальным общим КПД преобразования 20%. В кристалле были 8 дорожек с периодами поляризации от 27,1 мкм до 29,9 мкм, температура кристалла менялась в диапазоне от 50 до $200 \text{ }^\circ\text{C}$, диапазон перестройки достигал 1,38-1,51 мкм и 3,5-4,6 мкм, для сигнальной и холостой длин волн соответственно.

В работе [59] приводится расчет и эксперимент по обратному каскадному преобразованию суммарной частоты в параметрическую генерацию в параметрическом усилителе на кристалле PPLN с периодом поляризации 25 мкм при накачке усиленными чирпированными импульсами от пикосекундного TiSa лазера. Показано, что с сокращением длительности импульсов накачки обратное каскадное преобразование усиливается за счет временного сноса импульсов параметрической генерации и суммарной частоты.

В работе [60] представлена впервые безрезонаторная параметрическая генерация на кристалле PPLN с периодом поляризации 30,6 мкм, с выходной пиковой мощностью $>2 \text{ МВт}$ на длине волны 1,560 мкм. Накачка производилась Nd:YAG лазером с пассивной модуляцией добротности, собранного по схеме задающий генератор-усилитель, с энергией импульса 6.1 мДж, длительностью

импульса 590 пс, с частотой повторения 100 Гц. Была получена выходная энергия импульса 1 мДж на 1,590 мкм, выходная длительность импульса составляла 390 пс. КПД преобразования на 1,590 мкм составил 16%.

В работе [61] представлено исследование генерации перестраиваемого излучения в области 2,2-2,4 мкм при уровнях средней выходной мощности ~6 Вт от безрезонаторной параметрической генерации на кристалле PPLN с последующим параметрическим усилением в двух кристаллах КТР с компенсацией сноса. Накачка PPLN и кристаллов КТР производилась иттербиевым волоконным лазером с синхронизацией мод на длине волны 1,030 мкм с максимальной средней выходной мощностью 120 Вт и длительностью импульсов 2 пс, частота повторения была 100 кГц. В первый каскад с PPLN вводилось затравочное излучение от непрерывного лазерного диода на сигнальной длине волны – 1,94 мкм и при средней мощности накачки 1,6 Вт средняя выходная мощность была 100 мВт на сигнальной длине волны. В каскаде кристаллов КТР при средней мощности накачки 42 Вт выходные средние мощности на сигнальной и холостой (2,2 мкм) длинах волн достигали значений 7 и 6 Вт соответственно, что соответствует общему КПД преобразования ~30%.

В работе [62] представлена безрезонаторная параметрическая генерация с КПД преобразования 46% на кристалле PPLN на длинах волн 1,555 и 3,370 мкм. Накачка производилась от твердотельного Nd:YAG микрочип лазера, пассивной модуляцией добротности с помощью пассивного модулятора Cr:YAG, собранного по МОР-архитектуре, на длине волны 1,064 мкм. Максимальная выходная энергия импульса накачки была 6 мДж, длительность импульса – 0,73 нс, частота повторения – 30 Гц. Период поляризации кристалла PPLN был 30,6 мкм, длина – 40 мм. В выходном излучении, кроме параметрической генерации также наблюдались линии в видимом диапазоне.

Авторы [63], используя Nd:YVO₄ систему МОР, сообщают о получении суммарной эффективности ~ 50 % при длительности импульса накачки 10 пс.

Несмотря на более высокий порог генерации, разработка безрезонаторных

ПГС на кристаллах с периодической поляризацией является актуальной задачей. Интерес их применения в инструментарию лазерных спектроскопических методов и лидарных приложений обусловлен в упрощении конструкции, возможностью одновременной генерации в нескольких областях оптического спектра за счет каскадной и последовательной нелинейной генерации, уменьшению габаритов и увеличению стабильности получающихся приборов [64-69].

Как видно из вышеизложенного, развитие безрезонаторных параметрических генераторов связано с появлением диодно-накачиваемых твердотельных лазеров с высокими пиковыми мощностями с новым конструкционным исполнением – МОРА системы и микрочип лазеры с продольной накачкой от мощных диодных линеек [57, 62]. При использовании таких лазеров в качестве источников накачки достигнуты общие КПД преобразования на уровне 10-40%. Дальнейшее увеличение общего КПД преобразования безрезонаторных параметрических генераторов, как и диапазона перестройки, связано, помимо прогресса в полупроводниковых технологиях и появлением новых материалов, с развитием методов получения различных режимов лазерной генерации, в диодно-накачиваемых твердотельных и волоконных лазерах, повышающих эффективность и стабильность их генерационных характеристик наряду с компактностью и устойчивостью к внешним воздействиям.

В группе, где работает автор, под руководством В. И. Доница разработан новый метод получения синхронизации мод и модуляции добротности на акустооптическом модуляторе (АОМ) бегущей волны в сочетании со сферическим зеркалом в диодно-накачиваемом Nd:YAG лазере [70-81]. Твердотельные лазеры с таким способом синхронизации отличаются высокой кратковременной и долговременной стабильностью генерационных характеристик, без использования дополнительных схем автоподстройки [81]. Это связано с большей шириной полосы синхронизации в сравнении с методами получения синхронизации мод с помощью акустооптического модулятора стоячей волны, которая достигается за счет возврата в резонатор дифрагированных пучков [82]. Для Nd:YAG-лазера с

СЗАОМ используемого в данной работе ширина полосы синхронизации $\Delta\nu_n$ определяется максимальной допустимой отстройкой длины резонатора $\Delta L_n = \pm 750$ мкм (см. приложение 1) и определяется как:

$$\Delta\nu_n = 2 \left(\frac{c}{2L_0} - \frac{c}{2(L_0 + \Delta L_n)} \right) \approx 100 \text{ кГц}, \quad (3)$$

Другие методы синхронизации мод, использующие АОМ бегущей волны [83-85], отличает использование дополнительных оптических элементов для возврата дифрагировавших пучков в резонатор. В методе СЗАОМ для возврата дифрагированного пучка используется сферическое выходное зеркало резонатора лазера, что существенно упрощает оптическую схему и, за счет этого, увеличивает компактность всей лазерной системы.

Генерация перестраиваемого излучения одновременно в различных областях спектра дает новые возможности, например, в ИК спектроскопии, где довольно часто спектры линий различных веществ перекрываются. Наличие излучения с отличной длиной волны повысит точность идентификации различных веществ из-за дополнительных данных в другой области спектра. Многоволновая перестраиваемая генерация придает такому источнику излучения большую универсальность.

Цель и задачи

Таким образом, **цель** данной работы состоит в разработке суперлюминесцентного перестраиваемого в видимой и средней ИК области спектра параметрического генератора света (ПГС) с накачкой от Nd:YAG лазера с методом СЗАОМ, в частности исследование влияния резонатора на выходные характеристики параметрической генерации.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) Получение и исследование характеристик суперлюминесцентной параметрической генерации при накачке от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ.
- 2) Создание и исследование лабораторного образца однорезонаторного ПГС с синхронной накачкой от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ.
- 3) Экспериментальное сравнение характеристик суперлюминесцентной генерации с генерацией однорезонаторного синхронно-накачиваемого ПГС.

Научной новизной работы является:

Впервые получена суперлюминесцентная параметрическая генерация с накачкой излучением от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ. Достигнут КПД преобразования по поглощенной мощности $\sim 80\%$. Общая пиковая мощность излучения ~ 200 кВт.

Обнаружено что однорезонаторный ПГС с синхронной накачкой от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ допускает увеличенный диапазон изменения длины резонатора, который в 10-20 раз больше, чем при других источниках синхронной накачки.

Установлено происхождение видимых линий в спектре параметрической генерации от кристалла PPLN, проведено измерение спектральной ширины этих линий и их области перестройки.

При сравнении характеристик излучения в режиме параметрической суперлюминесценции и синхронно-накачиваемом однорезонаторном ПГС от накачки пикосекундными импульсами установлено, что истощение накачки может достигать ~50%, что близко к теоретическому пределу [86]

Практическая значимость:

Результаты работы содержат рекомендации по созданию эффективных источников параметрического излучения суперлюминесцентного типа на основе лазера накачки с СЗАОМ и нелинейных кристаллов с периодически поляризованными структурами.

Генерируемое излучение содержит набор спектральных компонентов (от видимого до среднего ИК), перестройка длин волн которых происходит одновременно. Каждая из спектральных компонент имеет высокую пиковую мощность. Такие источники могут найти применения в спектроскопии быстро протекающих процессов и двухфотонного поглощения, мультифлуоресцентного анализа, биофотоники и дистанционного зондирования атмосферы, медицинских приложениях и др.

Положения выносимые на защиту

- 1) КПД преобразования излучения накачки в параметрическую суперлюминесцентную генерацию может достигать порядка 80% по поглощенной мощности и ограничен оптическим качеством нелинейного кристалла.
- 2) Максимальное значение истощения накачки в режиме суперлюминесценции и синхронно-накачиваемого однорезонаторного ПГС на кристалле PPLN при накачке Nd:YAG-лазером с СЗАОМ достигает уровня ~50% и слабо зависит от длины нелинейного кристалла в диапазоне от 20 до 50 мм.
- 3) Однорезонаторный ПГС с синхронной накачкой от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ допускает увеличенный диапазон изменения длины резонатора, который до 20 раз больше, чем при других источниках синхронной накачки.
- 4) ПГС суперлюминесцентного типа обладает спектральным диапазоном генерации выходного излучения значительно шире, чем однорезонаторный ПГС.

Апробация работы. Основные результаты были доложены на следующих конференциях:

- 1) XXV Международная Конференция “Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте”, Новороссийск, 2017 [79].
- 2) International Conference on Semiconductors Optoelectronics and Nanostructures, Париж, Франция, 2018 [87].

3) International Conference on Laser, Optics and Photonics, Париж, Франция, 2018 [88].

Всего по теме диссертации соискателем в соавторстве опубликовано 7 печатных работ, из них 4 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 3 – в тезисах конференций.

Личный вклад. Результаты данной работы получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор обеспечивал организацию и проведение всех экспериментов. Анализировал и обрабатывал полученные данные. Занимался подготовкой результатов к докладам и тезисам международных конференций, совместно с соавторами готовил научные публикации в печать.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, трех глав, заключения, одного приложения и списка литературы из 120 наименований. Полный объем работы содержит 107 страниц, в том числе 38 рисунков и 1 таблицу.

ГЛАВА 1

ПГС среднего ИК диапазона с синхронной накачкой Nd:YAG-лазером с СЗАОМ (многоимпульсный режим)

В главе представлены результаты получения параметрической генерации от нелинейного элемента с квазифазовым типом взаимодействия при синхронной накачке Nd:YAG-лазером с СЗАОМ. В качестве нелинейного элемента использовался допированный MgO (5 мол. %) кристалл PPLN с размерами 5x1x20 мм имел две области с периодами поляризации (регулярной доменной структуры) $\Lambda=29,5$ мкм и $\Lambda=30$ мкм. Применялась однорезонаторная схема ПГС, накачка осуществлялась 45-пикосекундным Nd:YAG-лазером с модуляцией добротности и синхронизацией мод по методу СЗАОМ [78] в многоимпульсном режиме. Такой режим лазера накачки был выбран, чтобы избежать деградацию и разрушение кристалла (более подробное описание режимов генерации лазера накачки см. в приложении А).

1.1 Описание экспериментальной установки

На рисунке 1 представлена использовавшаяся в работе схема экспериментальной установки с однорезонаторным ПГС. Лазер накачки 1,

выполненный по схеме [73], излучал на длине волны 1,0645 мкм цуг импульсов с частотой повторения 1 кГц, длительность цуга ~ 100-150 нс и отдельного импульса в цуге ~ 45 пс соответственно. Пиковая мощность составляла < 0,5 МВт. Падающая на PPLN кристалл мощность накачки плавно регулировалась с помощью поляризационного аттенюатора А.

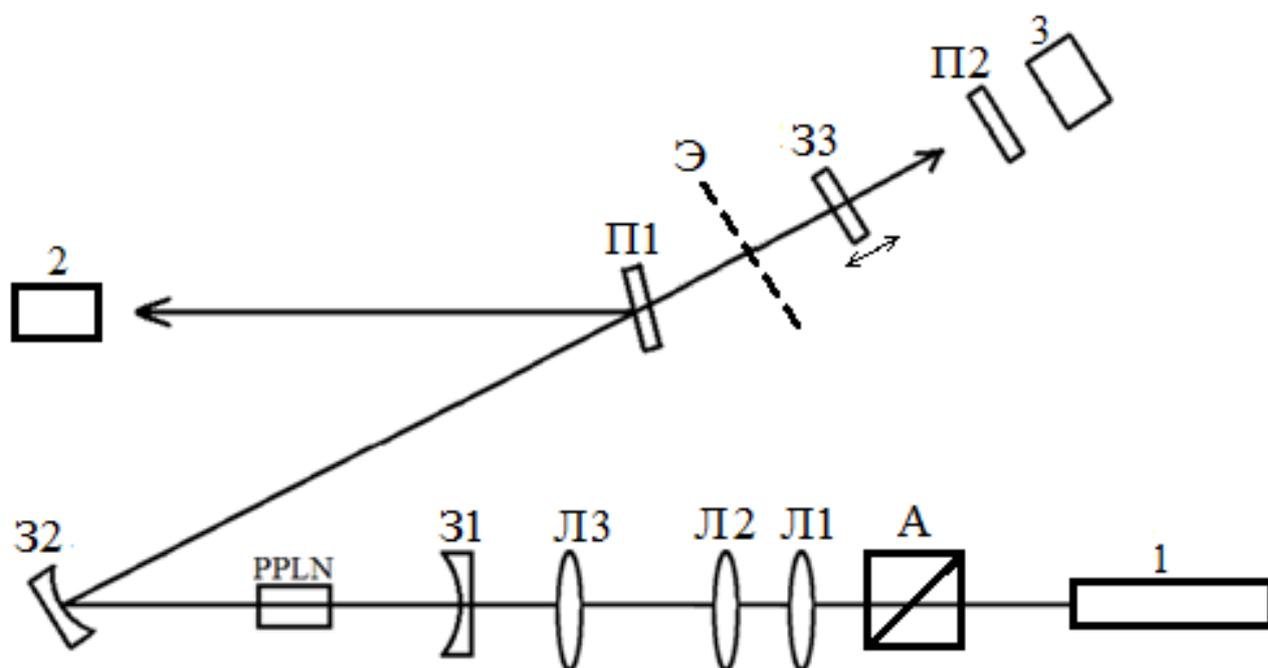


Рисунок 1. Экспериментальная установка. 1 – Nd:YAG лазер накачки; 2 – монохроматор МДР-23, 3 – измеритель мощности; А – поляризационный аттенюатор; Л1, Л2 – согласующие линзы; Л3 – фокусирующая линза; 31, 32, 33 – зеркала резонатора ПГС; П1 – сапфировая пластинка; П2 – германиевая пластинка; Э – поглощающий экран.

Резонатор ПГС был образован тремя зеркалами 31, 32 и 33. Зеркало 31 производства Layertec (Германия) имело радиус кривизны 100 мм, коэффициент отражения в области 1,4-1,7 мкм $R_{1,4-1,7} = 99,5\%$ и коэффициент пропускания на 1,064 мкм $T_{1,064} \approx 99,2\%$. Медное зеркало 32 имело радиус кривизны 125 мм и следующие коэффициенты отражения: $R_{1,0-1,7} \approx 90\%$ в области 1-1,7 мкм и $R_{3,0-4,0} \approx 97\%$ в области 3-4 мкм. Плоское выходное зеркало 33 на подложке из ZnSe

(Layertec) с коэффициентом отражения в области 1,2-1,7 мкм $R_{1,2-1,7}=99,5\%$ имело высокое пропускание на 1,064 мкм ($T_{1,064}=78\%$) и в диапазоне 3-4 мкм ($T_{3,0-4,0}=99,5\%$). Это зеркало (ЗЗ) можно было перемещать вдоль оси резонатора с помощью подвижного столика. Сапфировая пластинка П1 находилась под углом, близким к нормальному падению относительно оси резонатора, и отражала около 15% излучения из резонатора в монохроматор или на измеритель мощности. Германиевая пластинка П2 использовалась для селекции холостой длины волны. Линзы Л1 и Л2 уменьшали расходимость лазера накачки 1 в $\sim 4,5$ раза для обеспечения нужной каустики гауссова пучка накачки, чтобы нелинейный процесс происходил по всей длине кристалла с наибольшим КПД преобразования. Линза Л3 (с фокусным расстоянием 250 мм) фокусировала излучение накачки в нелинейный кристалл PPLN. Диаметр луча накачки в перетяжке составлял ≈ 120 мкм по уровню e^2 .

Экран Э использовался для наблюдения режима суперлюминесценции, когда резонатор отсутствует и генерация возникает за один проход в нелинейном кристалле. Кристалл находился в термостате, температура которого регулировалась с помощью ПИД-регулятора. В монохроматоре 2 типа МДР-23 с фотоэлектрической регистрацией спектра использовались дифракционные решетки с 600 штр./мм и 1200 штр./мм (обратная линейная дисперсия 2,6 и 1,3 нм/мм, соответственно), измерения проводились в первом порядке дифракции. Для контроля и измерения мощности холостой длины волны использовались пироэлектрический фотоприемник МГ-30 или измеритель мощности 3 типа Thorlabs s302c.

Особенностью лазера накачки помимо того, что синхронизация мод и модуляция добротности получались с помощью модулятора бегущей волны, являлось еще и то, что при отстройке длины резонатора от длины $L_0 = \frac{c}{4f} \approx 1,5$ м (где c – скорость света, f – частота звуковой волны в модуляторе) с помощью перемещения выходного зеркала резонатора происходил распад части

пикосекундных импульсов на два и более импульсов в зависимости от величины отстройки. Это связано с возбуждением нескольких конкурирующих поперечных мод, что приводило к распаду пикосекундных импульсов синхронизации мод на два и более импульсов с временным расстоянием между импульсами ~ 100 пс [78].

1.2 Экспериментальные результаты

Перестройка длины волны ПГС осуществлялась изменением показателя преломления за счет изменения температуры кристалла от 20 до 150 °С данный метод следует из условия квазифазового синхронизма для параметрической генерации и зависимости дисперсионного соотношения показателя преломления от температуры кристалла описываемой формулами Селмейера [89]:

$$\frac{2\pi n_p(T)}{\lambda_p} = \frac{2\pi n_s(T)}{\lambda_s} + \frac{2\pi n_i(T)}{\lambda_i} + \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.1)$$

$$n(T) = [4,5820 + 2,2971 \times 10^{-7}(T^2 - 88506,25) + \frac{0,09921 + 5,2716 \times 10^{-8}(T^2 - 88506,25)}{\lambda^2 - [0,21090 - 4,9143 \times 10^{-8}(T^2 - 88506,25)]^2} - 0,021940\lambda^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

В нашем случае сигнальная длина волны менялась в диапазоне 1,48 ÷ 1,55 мкм, а холостая в диапазоне 3,4 ÷ 3,8 мкм.

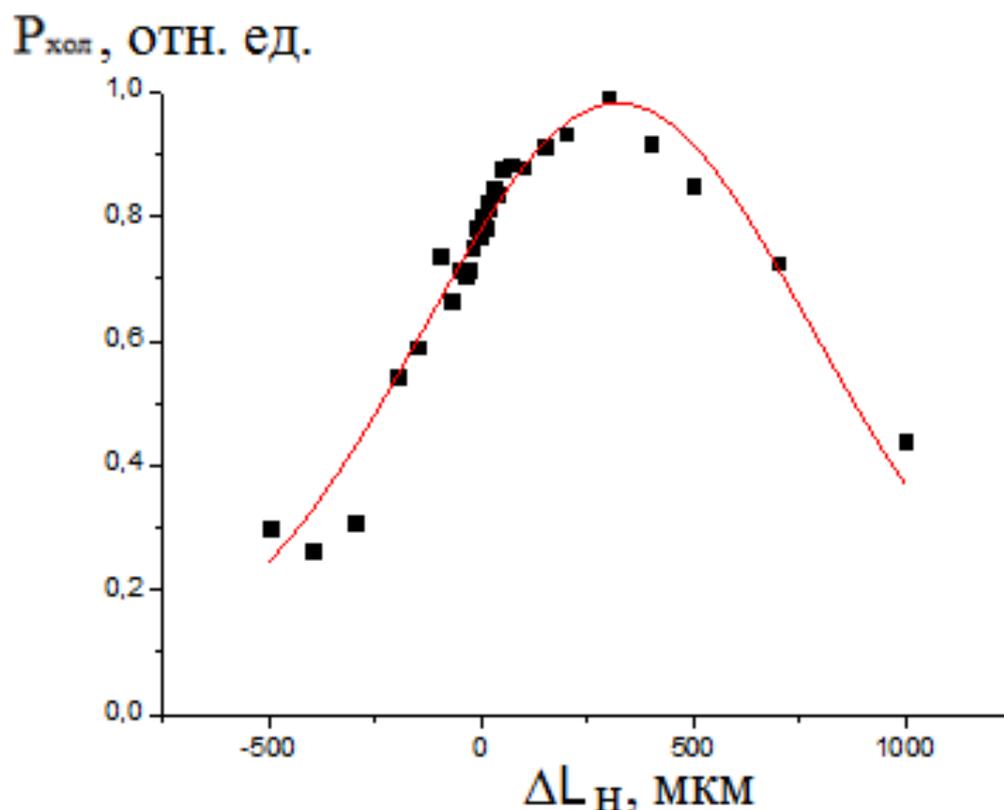


Рисунок 2. Зависимость выходной мощности $P_{хол}$ холостой длины волны от отстройки выходного зеркала резонатора лазера накачки (ΔL_n).

При двукратном превышении порога генерации ПГС была измерена зависимость его выходной мощности в относительных единицах от отстройки длины резонатора лазера накачки ΔL_n относительно $L_0=150$ см представленная на Рисунке 2, где $\Delta L_n=0$ соответствует “одноимпульсному” режиму генерации Nd:YAG лазера, при котором более 95% составляли одиночные пикосекундные импульсы, а 5% – двойные. Поскольку при одноимпульсном режиме (пиковая интенсивность накачки доходила до $\sim 10 \text{ ГВт}/\text{см}^2$) образовывались серые треки в кристалле, которые увеличивали поглощение кристалла и уменьшали КПД преобразования, дальнейшие измерения проводились при отстройке выходного зеркала лазера накачки от длины резонатора $\Delta L_n=300$ мкм (статистика импульсов накачки была $\sim 53\%$ одиночных, 37% двойных и $\sim 10\%$ тройных) и $\Delta L_n=700$ мкм (статистика импульсов: 25% - одиночные, 45% - двойные, 20% - тройные и 10% - четверные).

На рисунке 3 представлены зависимости мощности на сигнальной длине волны в резонаторе ПГС $P_{\text{сигн}}$ (кривая 1) и выходной мощности на холостой длине волны $P_{\text{хол}}$ (кривая 2) от средней мощности накачки с сапфировой пластинкой П1 в резонаторе (служившей для вывода части излучения на сигнальной длине волны) и зависимость выходной мощности холостой волны (кривая 3) без этой пластины при комнатной температуре на области кристалла PPLN с периодом поляризации $\Lambda=30$ мкм. Пороговая мощность накачки была на уровне 100 мВт во всем заданном температурном диапазоне и мало зависела от изменения температуры кристалла.

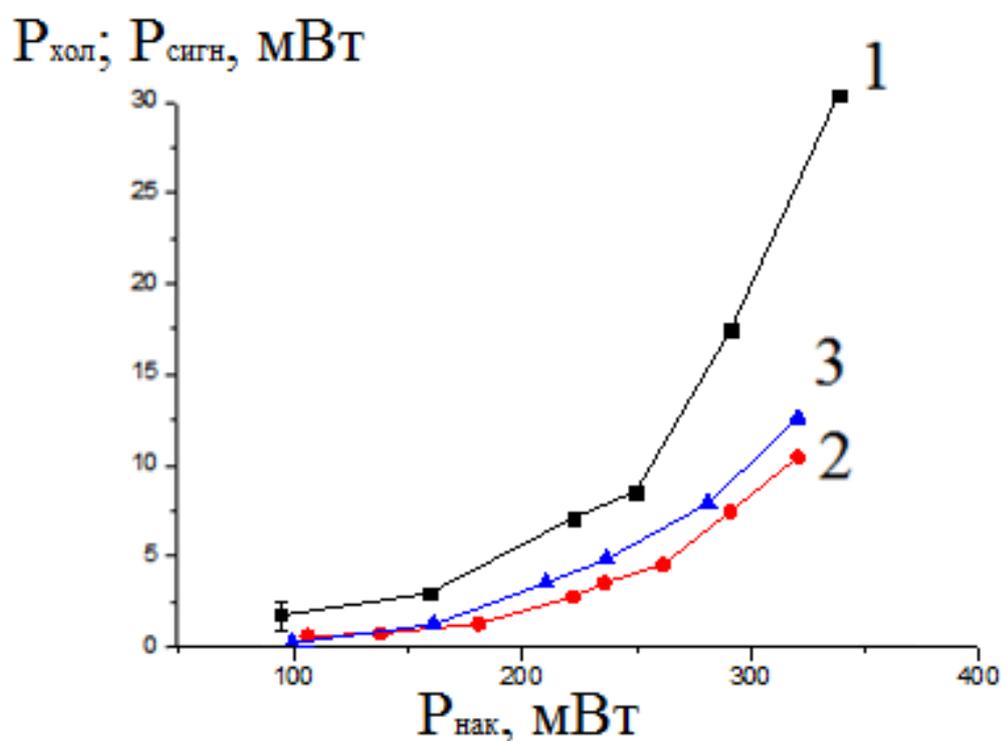


Рисунок 3. Зависимость выходной мощности холостой волны $P_{\text{хол}}$ и мощности сигнальной волны в резонаторе $P_{\text{сигн}}$ от средней мощности накачки при $\Delta L_{\text{н}}=300$ мкм. 1, 2 – мощность сигнальной волны в резонаторе ПГС и выходная мощность холостой волны с пластинкой П1, соответственно; 3 – выходная мощность холостой волны без пластины.

Излучение сигнальной длины волны выводилось из резонатора с помощью сапфировой пластины (полные потери на отражение от граней пластины $\sim 30\%$).

Часть излучения через светофильтр с диапазоном пропускания 1,4-1,6 мкм попадала на измеритель мощности и по ней определялась мощность в резонаторе. Для определения оптимального КПД преобразования мощности излучения накачки в мощность излучения холостой длины волны из резонатора вынималась пластинка П1. При этом выходная средняя мощность на холостой длине волны достигала 12 мВт.

Была измерена также прошедшая через нелинейный кристалл PPLN и отраженная от зеркала 32 мощность накачки $P_{\text{вых}}$ в зависимости от падающей мощности накачки $P_{\text{вх}}$, а из полученных данных было рассчитано поглощение накачки $k = 1 - \eta - \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$ (рисунок 4), где η потери на зеркалах в резонаторе ПГС составлявшие 10% (в основном на зеркале с медным покрытием). Необходимо отметить, что интерференция излучения накачки в резонаторе ПГС отсутствовала. Этот факт обусловлен тем, что длина когерентности излучения накачки меньше, чем длина резонатора ПГС.

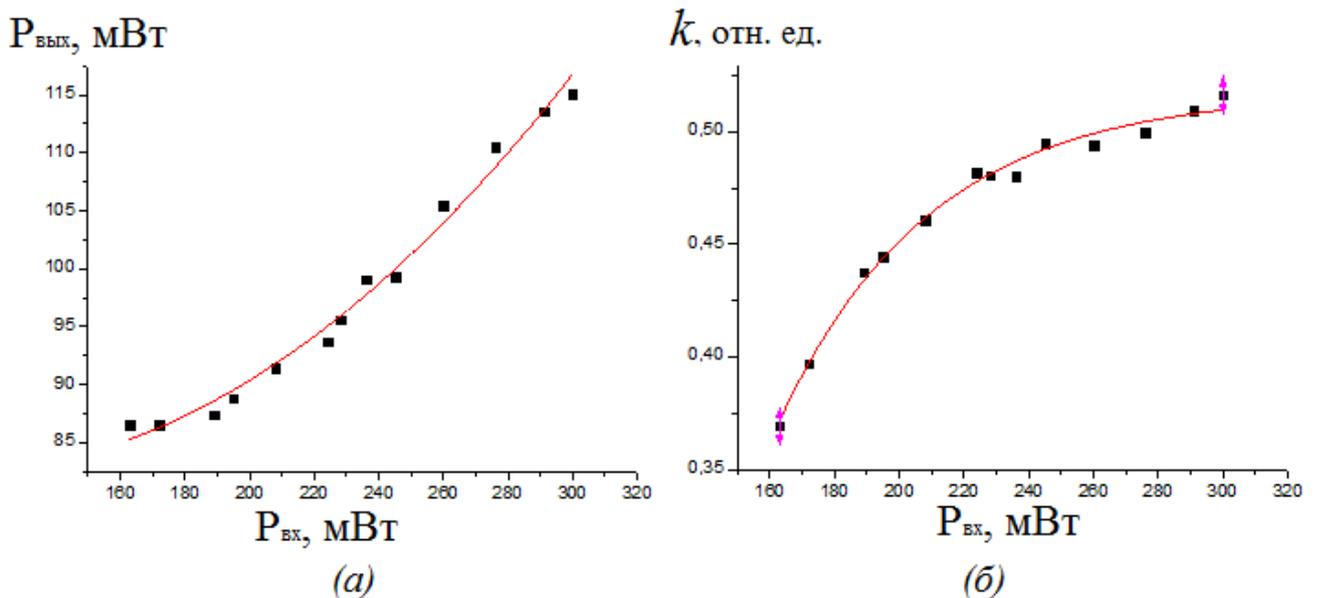


Рисунок 4. Зависимость прошедшей через PPLN средней мощности накачки (а) и коэффициента поглощения (б) от средней мощности накачки, падающей на резонатор ПГС.

Из рисунка 4 видно, что поглощение накачки (или “истощение” накачки) было на уровне $\sim 50\%$. Таким образом, КПД преобразования по поглощенной мощности для холостой длины волны был $\sim 10\%$.

Для эффективной генерации параметрического излучения в режиме ультракоротких импульсов необходимо обеспечить согласование частоты следования импульсов синхронизации мод лазера накачки с величиной обратной времени обхода резонатора ПГС для того, чтобы в последующем импульс параметрической генерации на сигнальной длине волны находился одновременно с импульсом излучения накачки в нелинейном кристалле, т.е. чтобы значения межмодовой частоты резонатора ПГС и межмодовой частоты лазера накачки были равны. Это достигалось подстройкой длины резонатора ПГС к длине резонатора лазера накачки ($L_0 \approx 1,5$ м). Точная подстройка длин резонаторов осуществлялась перемещением зеркала 33 вдоль оси резонатора ПГС. Ниже на Рисунке 5 представлены зависимости выходной мощности на холостой длине волны от изменения длины резонатора ПГС относительно L_0 при двух различных режимах работы лазера накачки, описанных выше (при $\Delta L_n = 300$ мкм и $\Delta L_n = 700$ мкм).

Из данной зависимости видно, что ширина изменения длины резонатора ПГС δ относительно L_0 на полувысоте была на уровне 8 мм в первом случае и 12 мм во втором.

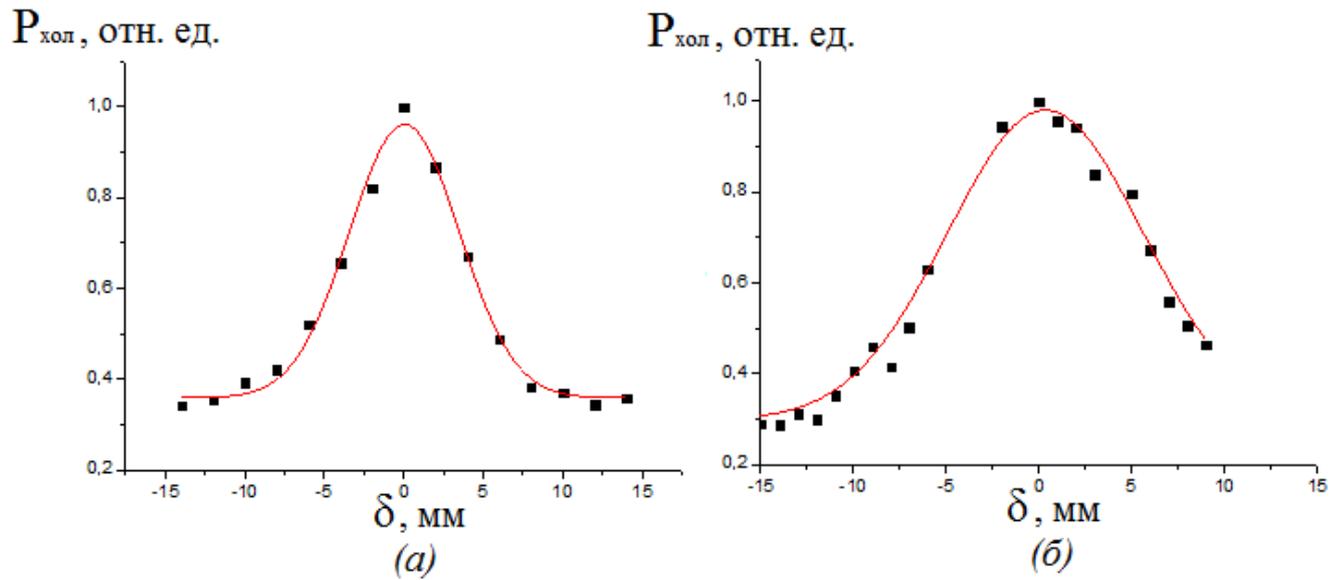


Рисунок 5 Зависимость относительной выходной мощности холостой длины волны $P_{\text{хол}}$ от δ изменения длины резонатора ПГС. (а) – при $\Delta L_n=300$ мкм; (б) – при $\Delta L_n=700$ мкм.

На двух областях с периодами поляризации в 30 и 29,5 мкм кристалла PPLN была измерена перестроечная характеристика сигнальной длины волны от температуры кристалла. На основании этих данных была рассчитана перестроечная характеристика холостой длины волны. Полученная перестроечная характеристика в диапазоне $1,48 \div 1,55$ мкм и $3,4 \div 3,8$ мкм изображена на рисунке 6.

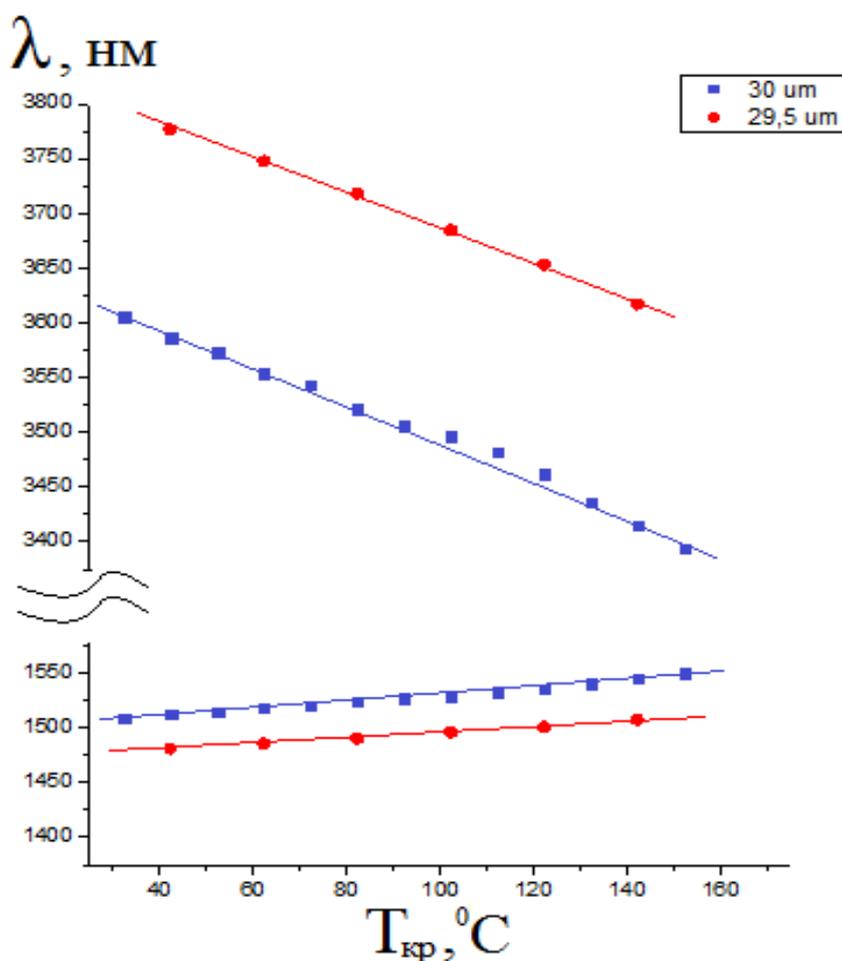


Рисунок 6. Перестроечная характеристика кристалла PPLN при периоде поляризации 29,5 и 30мкм.

При изменении температуры кристалла на $\Delta T = 130^\circ\text{C}$ холостая и сигнальная длина волны перестраиваются на ~ 200 нм и ~ 70 нм соответственно.

С помощью монохроматора МДР-23 с дифракционной решеткой с 1200 штр./мм при периоде поляризации кристалла 30 мкм, при комнатной температуре был измерен спектр генерации на сигнальной длине волны (рисунок 7). Ширина линии генерации сигнальной волны составила 13 см^{-1} или 400 ГГц. Ширина входной и выходной щелей монохроматора была 50 мкм.

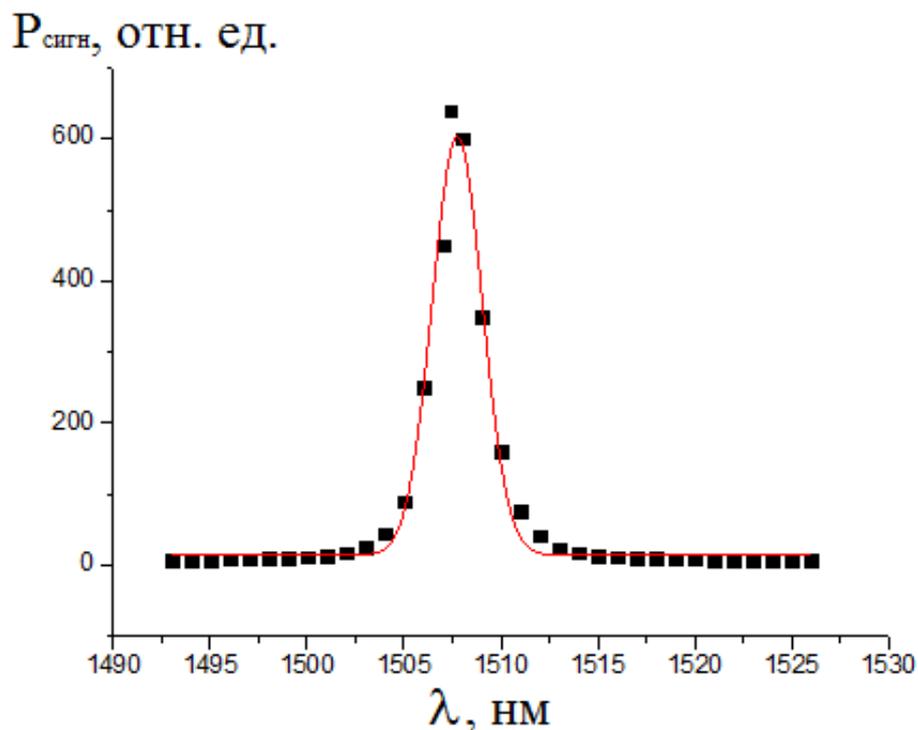


Рисунок 7. Спектр сигнальной длины волны при $\Lambda=30$ мкм и комнатной температуре кристалла PPLN.

Поскольку все излучение имело высокие пиковые мощности на длинах волн накачки и параметрической генерации (сигнальной и холостой), то возникали дополнительные нелинейные взаимодействия, результатом которых были линии видимого диапазона в выходном излучении. На рисунке 8 представлена перестройка длин волн, относящихся к этим линиям, при периоде поляризации 30 мкм и изменении температуры нелинейного кристалла.

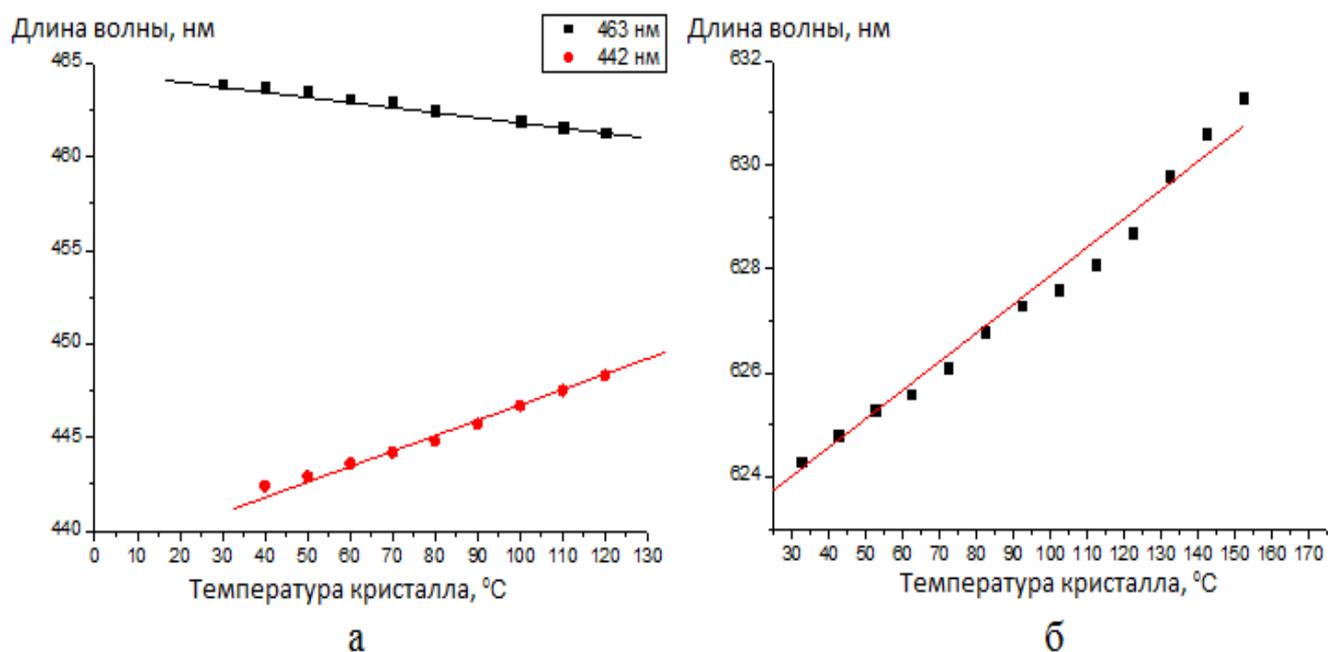


Рисунок 8. Перестроечные характеристики кристалла PPLN на длинах волн 442 и 463 нм (а), а также на 624 нм (б) при $\Lambda=30$ мкм.

Спектр видимого излучения измерялся с помощью панорамного спектрометра STS-VIS и монохроматора МДР-23 (входная и выходная щели монохроматора были по 50 мкм, обратная линейная дисперсия составляла 1,3 нм/мм) с фотоумножителем ФЭУ-68. Все измерения видимого диапазона проводились в режиме устойчивого резонатора (т.е. экран Э перед зеркалом З отсутствовал) с $\Lambda=30$ мкм. Полученная спектрограмма в диапазоне 350-830 нм при комнатной температуре кристалла представлена на рисунке 9. Наряду с линиями генерации вторых гармоник от накачки – 532 нм и сигнальной волны – 754 нм были получены спектральные линии с центрами на 624 нм, 463 нм, 442 нм, 392 нм и 355 нм. Линии 1-4 на рисунке 9 более широкие из-за более низкой разрешающей способности ~ 2 нм панорамного спектрографа. Также необходимо отметить, что на входе спектрометра STS-VIS помещался светофильтр ПС-15, ослаблявший линии на 532 и 624 нм в 40 и 30 раз соответственно.

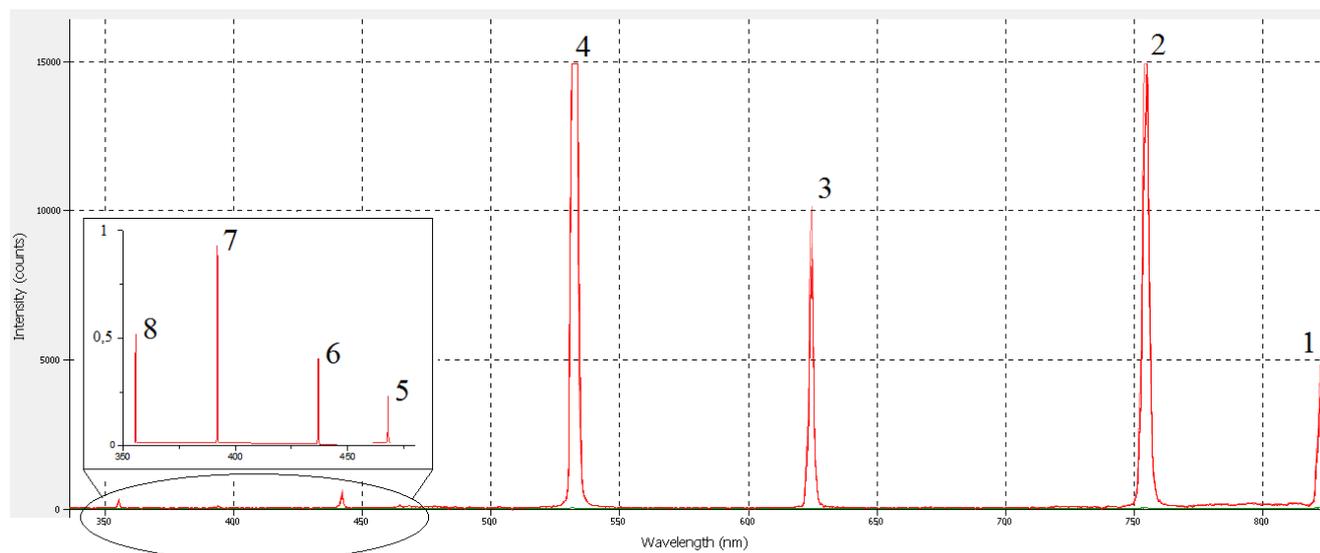


Рисунок 9. Спектральные характеристики выходного излучения в диапазоне 350-830 нм. 1 – линия 822 нм; 2 – 754 нм; 3 – 624 нм; 4 – 532 нм; 5 – 463 нм; 6 – 442 нм; 7 – 392 нм; 8 – 355 нм. На вставке показаны линии, полученные с монохроматором МДР-23.

На рисунке 10 представлены подробные спектрограммы линий видимого диапазона. Спектрограммы были получены с монохроматором МДР-23. Из них видно, что ширины линий были на уровне 0,3-1 нм. Во время записи линии с центром на 532 нм, перед излучением, падающим на монохроматор, помещался ослабитель. Чтобы избежать насыщения фотоумножителя.

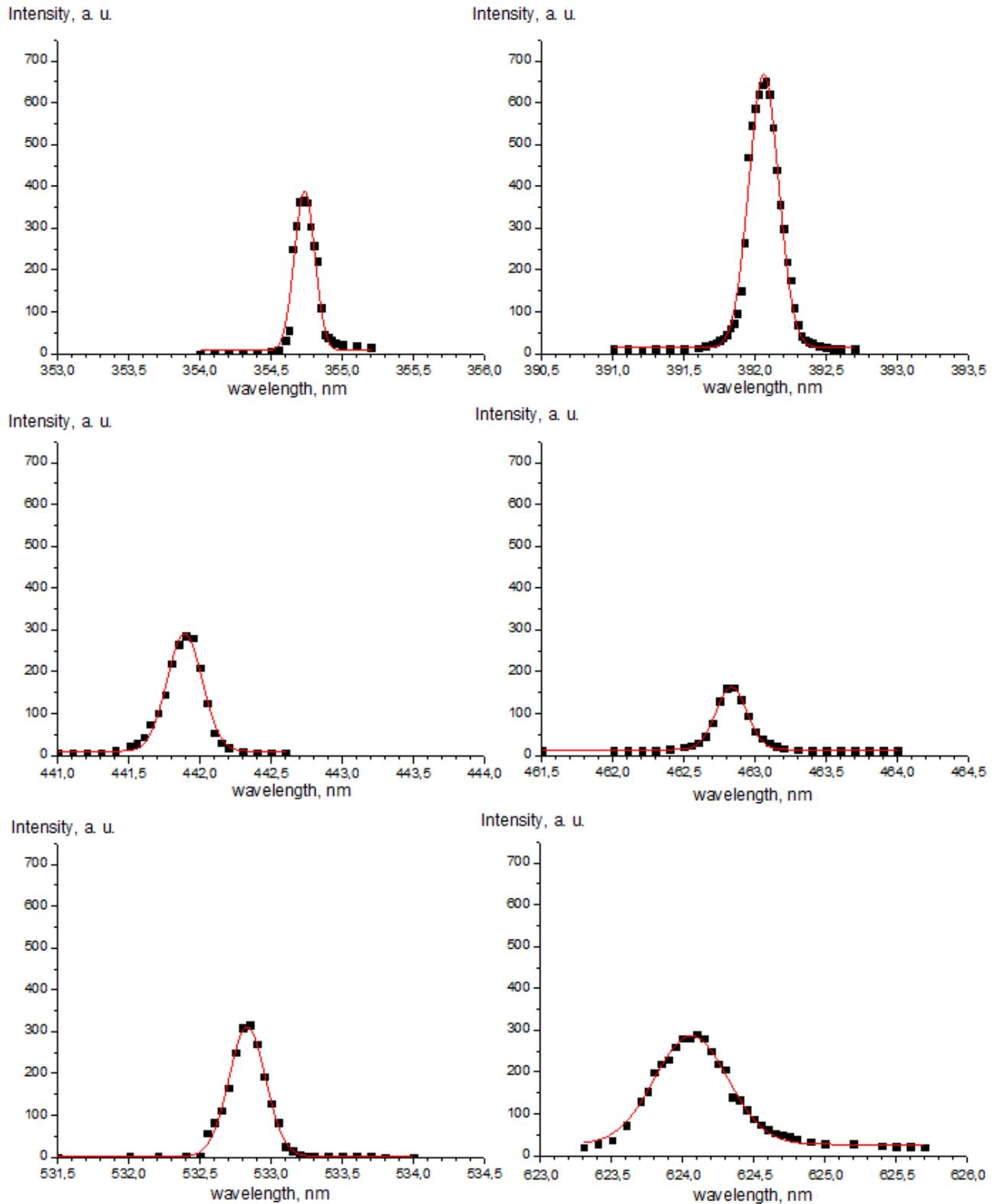


Рисунок 10. Измеренные на монохроматоре МДР-23 спектральные линии выходного излучения с центрами на 354,7 нм; 392 нм; 442 нм; 463 нм; 532 нм; 624 нм.

В частотной области ширины измеренных линий равны:

$$\Delta\nu_{355} \approx 340 \text{ ГГц}; \Delta\nu_{392} \approx 390 \text{ ГГц}; \Delta\nu_{442} \approx 390 \text{ ГГц}; \Delta\nu_{463} \approx 390 \text{ ГГц}; \\ \Delta\nu_{532} \approx 320 \text{ ГГц}; \Delta\nu_{624} \approx 220 \text{ ГГц}.$$

Известно, что наблюдаемая спектральная линия от спектрального прибора $F(\nu)$ есть свертка истинного спектрального контура $f(\nu)$ с аппаратным контуром $g(\nu)$ [90]:

$$F(\nu_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\nu_1 - \nu)g(\nu)d\nu \quad (1.3)$$

Для монохроматора при равных длинах a входной и выходной щелей аппаратная функция имеет вид [91]:

$$g(x) = \begin{cases} \frac{1}{a} \left[1 - \frac{|x|}{a} \right], & |x| \leq a \\ 0, & |x| \geq a \end{cases} \quad (1.4)$$

Так как ширина щели была 50 мкм, то спектральная ширина аппаратного контура на полувывоте составляла [91] $\Delta\lambda_{щ} = 50 \times 10^{-3} \times 1,3 \frac{\text{нм}}{\text{мм}} = 0,065 \text{ нм}$, или

в частотной области $\Delta\nu_{щ}(\lambda) = \frac{c\Delta\lambda_{щ}}{\lambda^2}$ для измеряемых длин волн:

$$\Delta\nu_{щ}(355\text{нм}) \approx 150 \text{ ГГц}; \quad \Delta\nu_{щ}(392\text{нм}) \approx 130 \text{ ГГц}; \quad \Delta\nu_{щ}(442\text{нм}) \approx 100 \text{ ГГц}; \\ \Delta\nu_{щ}(463\text{нм}) \approx 90 \text{ ГГц}; \Delta\nu_{щ}(532\text{нм}) \approx 70 \text{ ГГц}; \Delta\nu_{щ}(624\text{нм}) \approx 50 \text{ ГГц}.$$

С помощью программного пакета Mathcad, решая графически уравнение (1.3), находим искомые ширины линий:

$$\Delta\nu_{355} \approx 320 \text{ ГГц}; \quad \Delta\nu_{392} \approx 360 \text{ ГГц}; \quad \Delta\nu_{442} \approx 380 \text{ ГГц}; \quad \Delta\nu_{463} \approx 380 \text{ ГГц}; \\ \Delta\nu_{532} \approx 320 \text{ ГГц}; \Delta\nu_{624} \approx 220 \text{ ГГц}.$$

Необходимо отметить, что также в выходном спектре излучения была линия с центром на 822,5 нм, с измеренной спектральной шириной $\Delta\nu_{822} \approx 260 \text{ ГГц}$. На рисунке 11 представлена ее спектрограмма.

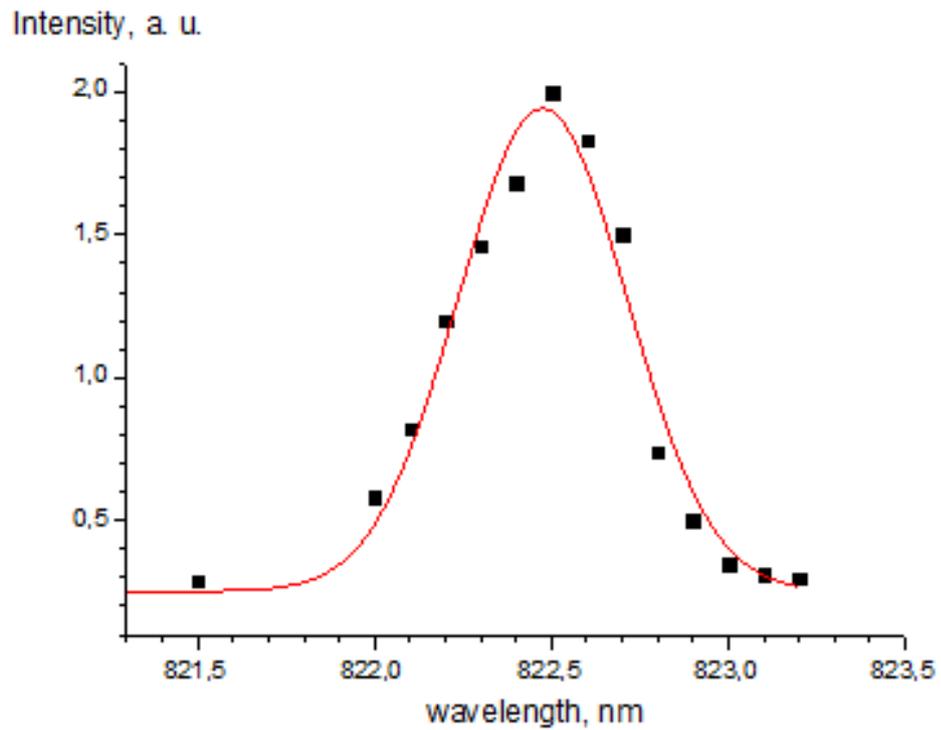


Рисунок 11. Спектрограмма линии с центром на 822,5 нм при $T_k=22,5$ °С.

С учетом спектральной аппаратной ширины МДР-23 $\Delta\nu_{\text{щ}}(822,5\text{нм}) \approx 30$ ГГц, ее искомая ширина была неизменной – 260 ГГц.

Значения амплитуд всех спектрограмм, изображенных на рисунке 10, были представлены с учетом спектральной чувствительности ФЭУ-68 $r(\lambda)$, зависимость которой приведена на рисунке 12.

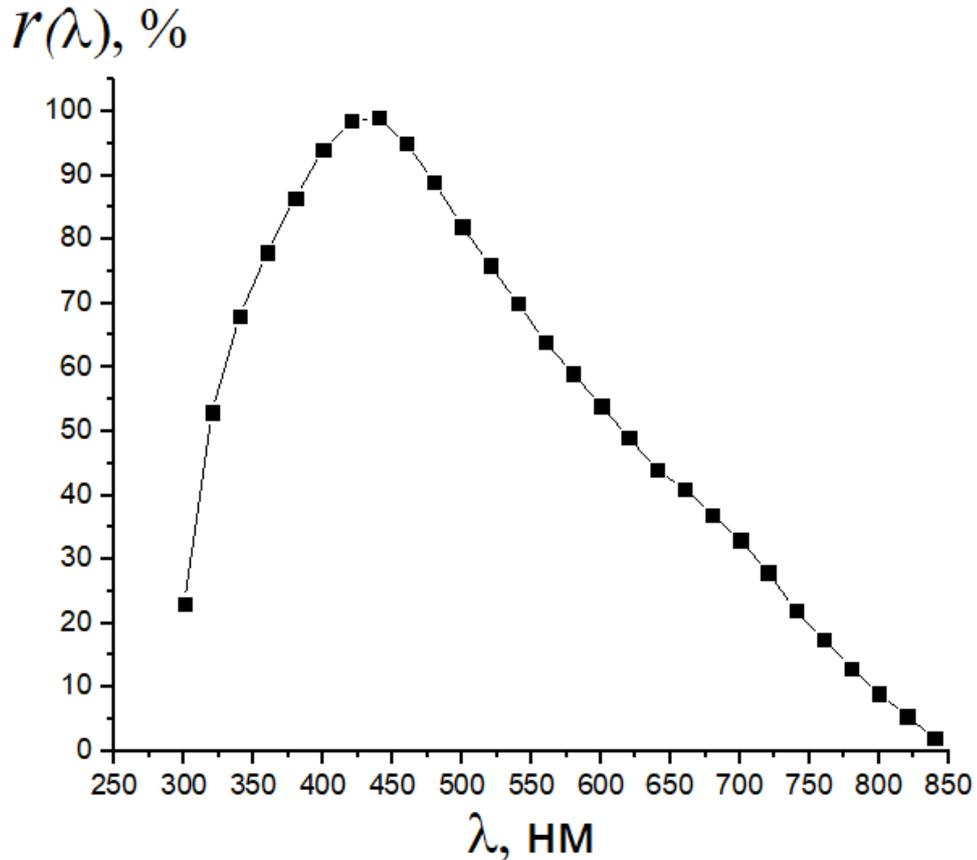


Рисунок 12. Спектральная чувствительность ФЭУ-68.

Для оценки КПД преобразования в каждую линию, была измерена зависимость мощности спектральных составляющих с центрами: 619 нм, 532 нм, 436 нм и 392 нм от температуры кристалла. В этом случае в качестве спектрального прибора использовалась дифракционная решетка с измерителем мощности Ophir Vega (PD300). Данные приводились к части мощности накачки, которая также выводилась из резонатора с помощью сапфировой пластинки и попадала на решетку. В таблице 1 представлены полученные результаты КПД преобразования в зависимости от температуры.

Таблица 1. Изменение КПД преобразования в видимые линии от температуры кристалла.

$T, ^\circ\text{C}$	η_{624}	η_{532}	η_{442}	η_{392}
137	0,09%	0,12%	0,06%	0,13%
97	0,06%	0,19%	0,04%	0,09%
23,5	0,05%	0,05%	0,04%	0,08%

Параметрическая генерация имела место и в режиме суперлюминесценции, когда перед выходным зеркалом 33 помещался непрозрачный экран. В обоих случаях, помимо холостой и сигнальной волн, в спектре выходного излучения присутствовали линии в видимом диапазоне. Измерения проводились с помощью пироприемника МГ-30 (рисунок 13). Максимальная выходная средняя мощность параметрической суперлюминесценции была на уровне ~ 4 мВт.

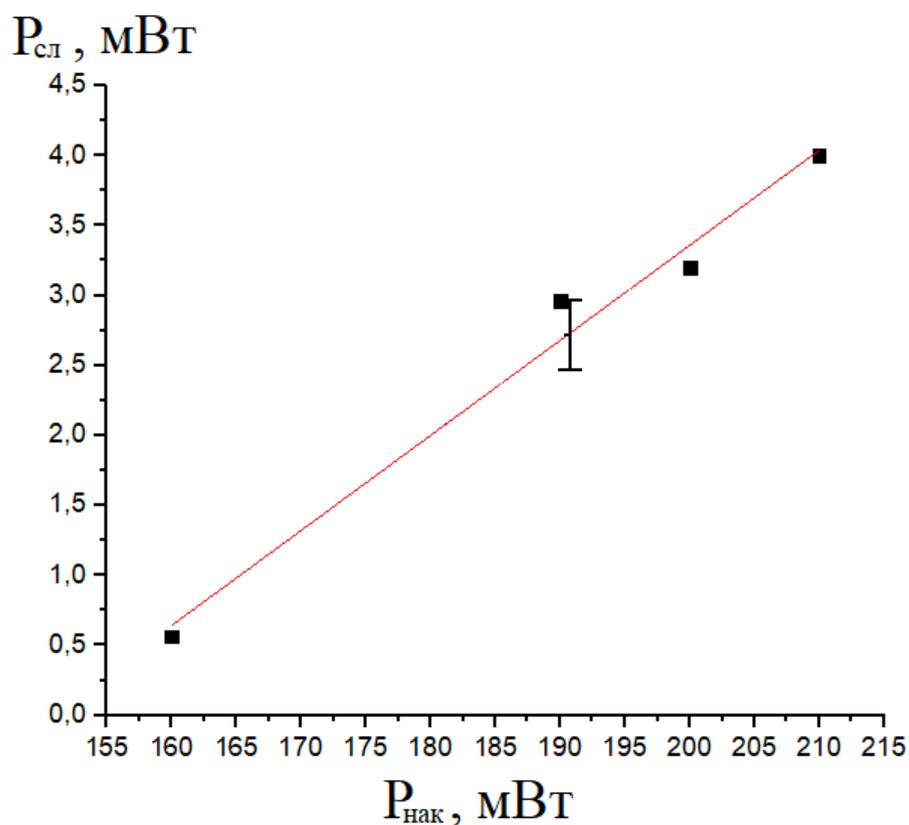


Рисунок 13. Выходная мощность в режиме параметрической суперлюминесценции.

Следует отметить, что после ~800 часов работы выходные характеристики резонаторного ПГС ухудшались, несмотря на порог разрушения кристалла в $10 \text{ ГВт}/\text{см}^2$ и максимальную рабочую интенсивность накачки в $\sim 3 \text{ ГВт}/\text{см}^2$. Это было связано с тем, что в нелинейном кристалле PPLN возникали серые треки и разрушения (рисунок 14), вызванные наведенным видимыми линиями поглощением в кристалле в ИК области, возникающим при большой пиковой мощности излучения накачки и в случае работы при комнатной температуре кристалла, а также поглощением УФ линий [92-95].

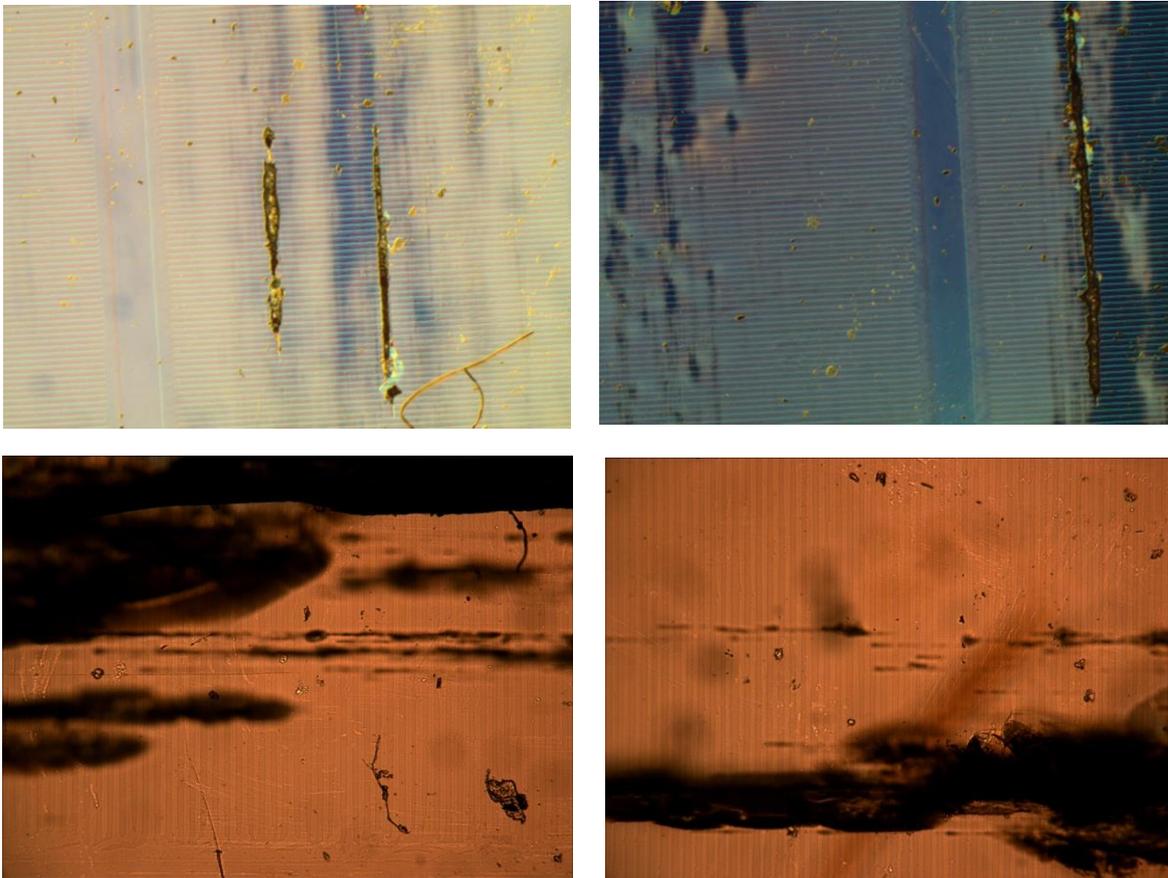


Рисунок 14. Сделанные под микроскопом фотографии используемого кристалла PPLN после 800 часов работы в однорезонаторном ПГС с синхронной накачкой от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ.

1.3 Анализ полученных результатов и выводы

Главной особенностью квазифазового взаимодействия является то, что передача энергии от волны накачки к холостой и сигнальной волнам в принципе должна эффективно происходить на всей длине нелинейного кристалла. Согласно [88] при трехкратном превышении накачки над порогом в случае гауссовых пучков обеднение накачки составляет ~50%, что согласуется с нашими экспериментальными данными. Коэффициент усиления на один проход в приближении больших интенсивностей в случае гауссовых пучков при оптимальной фокусировке определяется [96, 97] как

$$G = \frac{1}{4} e^{2\Gamma l} \quad (1.5)$$

где удельный Γ коэффициент усиления

$$\Gamma = 2\pi d_{eff} \sqrt{\frac{2g_s g_t I_p k}{n_s n_i n_p \varepsilon_0 c \lambda_s \lambda_i}}, \quad (1.6)$$

$n_{s,i,p}$ – показатели преломления PPLN на длинах волн сигнальной, холостой и накачки соответственно; d_{eff} – коэффициент эффективной нелинейности PPLN; $l = 20$ мм – длина кристалла PPLN; $\lambda_{p,s,i}$ – длина волны излучения накачки, сигнальной и холостой, соответственно; c – скорость света; ε_0 – электрическая постоянная; I_p – плотность мощности накачки в перетяжке кристалла, w_0 – радиус перетяжки; $g_s = \frac{w_p^2}{w_s^2 + w_p^2}$ и $g_t = \sqrt{\frac{\tau_p^2}{\tau_s^2 + \tau_p^2}}$ (в нашем случае $g_s = 0,9$ и $g_t = 0,86$); $k = 0,5$ – коэффициент истощения накачки; $\tau_{p,s}$ – длительности импульсов длин волн

накачки и сигнальной, соответственно. При $I_p \approx 3 \text{ ГВт/см}^2$, (соответствует отстройке лазера накачки $\Delta L_n=300 \text{ мкм}$ и $w_0 \approx 60 \text{ мкм}$), $d_{eff} = 14 \text{ пм/В}$ и $\lambda_s = 1,51 \text{ мкм}$, значение коэффициента усиления $G \approx 3 \times 10^{12}$.

С учетом того, что средняя выходная мощность $P_{хол} = 12 \text{ мВт}$, а импульс излучения на холостой и сигнальной длинах волн укорачивается согласно [98] до $\sim 30 \text{ пс}$, выходная пиковая мощность

$$P_m = \frac{P_{хол}}{N_u F \tau_i} 0,64 \approx 25 \text{ кВт} \quad (1.7)$$

где N_u – количество пикосекундных импульсов в цуге на его полувысоте; F – частота следования цуга импульсов; коэффициент 0.64 – поправка на многоимпульсность.

Обратимся к результатам рисунка 5. Ширина отстройки резонатора ПГС от длины резонатора лазера накачки δ составила 8 и 12 мм, что соответствует рассогласованию по времени $\Delta\tau$ в 27 пс и 40 пс, т.е. имеет один порядок с длительностью импульса излучения накачки $\sim\tau_p$. В условиях синхронной накачки ПГС (см. напр., [38]), ширина отстройки длины резонатора ПГС δ обычно составляет $(1/20-1/10)c\tau_p$. Ширина отстройки длины резонатора ПГС с синхронной накачкой наряду $c\tau_p$ определяется также дисперсией групповых скоростей импульсов накачки и сигнальной волны. В работе [99] компенсацией дисперсии резонатора дифракционной решеткой δ увеличили до $\sim 0.25c\tau_p$. В нашем случае $\delta \sim c\tau_p$ без использования элементов компенсации дисперсии, и это не совсем обычный результат. Увеличенная ширина кривых на рисунке 5, относительно других работ по синхронной накачке ПГС ([38, 99]), является следствием малого временного интервала между импульсами по сравнению с временем двойного обхода резонатора в многоимпульсном режиме. Можно ожидать, что при больших частотах следования импульсов синхронизации мод лазера накачки (свыше 10 ГГц) величина отстройки длины резонатора ПГС δ будет много больше величины $c\tau_p$ и не будет влиять на мощность генерации в широких пределах относительно этой

величины ($\sigma\tau_p$). Это подтверждается также работами по получению высоких частот повторения параметрической генерации в синхронно-накачиваемых ПГС [100].

Полученные спектральные линии в ближнем УФ и видимом диапазонах есть результат процессов смешения частот волны накачки (ω_p) и сигнальной волны (ω_s), возникающих в нелинейном кристалле:

$$2\omega_p = \omega_{532}, \quad 2\omega_s = \omega_{754}, \quad \omega_p + \omega_s = \omega_{624}, \quad 3\omega_p - \omega_s = \omega_{463},$$

$$\omega_p + 2\omega_s = \omega_{442}, \quad 2\omega_p + \omega_s = \omega_{392}, \quad 3\omega_p = \omega_{355}, \quad 2\omega_p - \omega_s = \omega_{822}.$$

Данный вывод был сделан из соображений, что в нелинейных преобразованиях обусловленными квадратичной нелинейной восприимчивостью χ^2 , к которым относятся рассматриваемые явления – параметрическая генерация света и генерация суммарных и разностных частот, должны участвовать волны с наибольшей мощностью, т.е. излучение на сигнальной длине волны и на длине волны накачки [101].

При изменении температуры кристалла линии, в генерации которых участвовала сигнальная волна, смещались за счет ее перестройки (см. рисунок 7). Линии 624 и 442 нм наблюдались ранее [102, 103]. Перестраиваемые линии 392, 463 и 822 нм наблюдались впервые.

Как было указано, КПД преобразования в излучение на длине холостой волны составил $\sim 10\%$. Он снижается за счет процессов смешения частот, а также генерации второй и третьей гармоник. Этот КПД может снижаться вследствие генерации не только зарегистрированных, но и других линий, например линии $3\omega_p + \omega_s = \omega_{286}$, которая полностью поглощается самим нелинейным кристаллом.

Эффективность преобразования перестраиваемых линий в видимом и УФ диапазонах может быть повышена путем изготовления кристалла PPLN в виде двух или трех отдельных секций, каждая из которых имеет свой период. В работе [102] таким способом на линии 624 нм получен КПД преобразования 21% в непрерывном режиме.

Выходная средняя мощность наблюдаемого режима параметрической люминесценции, когда перед зеркалом 33 помещался непрозрачный экран Э, была

на уровне 4 мВт. Данное значение, может быть увеличено: 1) при увеличении длины нелинейного кристалла PPLN; 2) при использовании одноимпульсного режима генерации лазера накачки и увеличении диаметра перетяжки в кристалле, чтобы интенсивность накачки не вызывала паразитных эффектов наведенного поглощения и не превышала порога разрушения.

Фотографии, изображенные на рисунке 13, наглядно свидетельствуют, что после 800 часов работы в кристалле возникали серые треки из-за наведенного поглощения в ИК области спектра зеленой линией выходного излучения [104], что приводило к возникновению разрушений в кристалле. В результате этого ухудшались выходные характеристики ПГС. Эффект наведенного поглощения может быть уменьшен: 1) с помощью увеличения площади перетяжки, тем самым уменьшив интенсивность излучения накачки и образующейся зеленой линии; 2) с помощью увеличения рабочей температуры нелинейного кристалла.

Таким образом, в настоящей главе исследованы основные особенности ПГС на основе кристалла PPLN с синхронной накачкой излучением Nd:YAG лазера с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод методом СЗАОМ. В частности, выяснено, что при использовании этого метода, требования к точности согласования длин резонаторов лазера накачки и ПГС снижаются в 10-20 раз, т.к. возможны многоимпульсные режимы генерации излучения накачки. Помимо сигнальной (1,48 – 1,55 мкм) и холостой (3,4 – 3,8 мкм) длин волн, в спектре выходного излучения наблюдались линии с длинами волн 822,5, 754, 624, 532, 463, 442, 392 и 355 нм. Перестраиваемые линии 392, 463 и 822,5 нм наблюдались впервые. Измерены диапазоны перестройки длин волн новых линий, которые лежали в области 5–10 нм (рисунок 8). Объяснено их происхождение.

ГЛАВА 2

Эффективная параметрическая суперлюминесценция в кристалле PPLN (одноимпульсный режим)

В данной главе представлены результаты по получению эффективной параметрической суперлюминесцентной генерации в кристалле PPLN при накачке, указанным выше, Nd:YAG-лазером с СЗАОМ.

В работе, описанной в главе 1, наблюдалась суперлюминесцентная генерация. Однако из-за небольшой длины кристалла и работы лазера накачки в многоимпульсном режиме, мощность суперлюминесценции была значительно ниже по отношению к случаю генерации с резонатором для сигнальной волны. Поэтому для получения эффективной суперлюминесцентной параметрической генерации при накачке цугами 45-пикосекундных импульсов от Nd:YAG-лазера, работающего в одноимпульсном режиме, было решено использовать PPLN-кристалл с размерами 1x7x50 мм. Для предотвращения образования серых треков в кристалле и его дальнейшего разрушения, был собран новый объектив, который уменьшал расходимость лазера накачки не в 4,5 раза, как в главе 1, а в 3,5 раза. Таким образом была увеличена перетяжка излучения накачки в PPLN.

2.1 Описание экспериментальной установки

На рисунке 15 представлена схема экспериментальной установки безрезонаторного ПГС. Nd:YAG-лазер с СЗАОМ, используемый в качестве лазера накачки, работал в одноимпульсном (95% одиночных и 5% двойных импульсов [78]) режиме. Максимальная пиковая мощность составляла $\sim 0,5$ МВт.

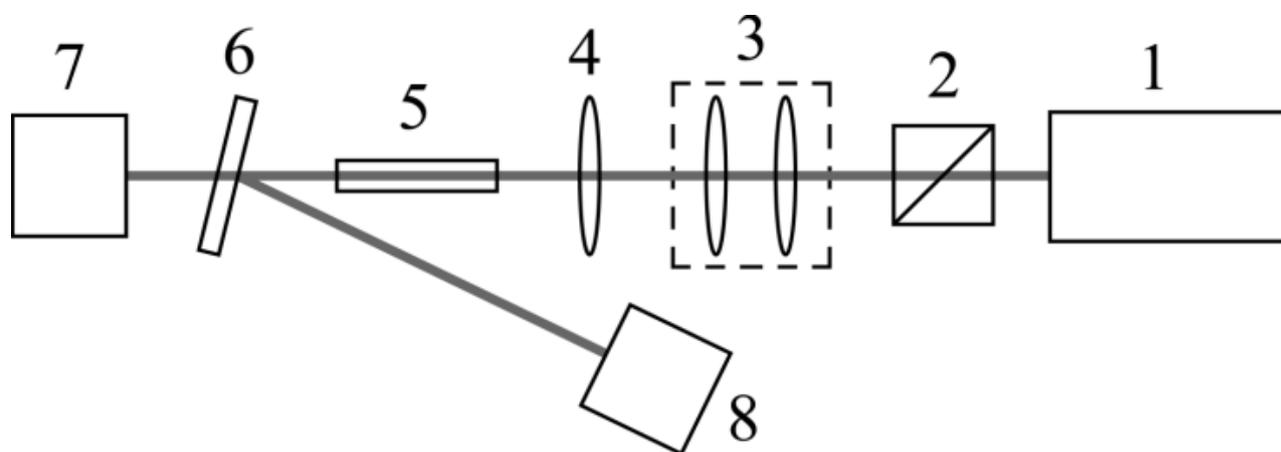


Рисунок 15. Схема эксперимента. 1 – Nd:YAG-лазер с СЗАОМ; 2 – регулятор мощности; 3 – объектив; 4 – фокусирующая линза; 5 – нелинейный кристалл PPLN; 6 – фильтрующий элемент; 7, 8 – измерители мощности.

В качестве регулятора мощности накачки 2 использовался поляризационный аттенуатор. Объектив 3 использовался для уменьшения расходимости лазера накачки в 3,5 раза. Полная расходимость (на уровне e^{-2}) после объектива составила 0,57 мрад. Фокусирующая линза 4 имела фокусное расстояние в 280 мм, которое выбиралось по соображениям получения максимально возможной выходной мощности, но исключающей разрушение и образования серых треков в кристалле при заданной энергии накачки. Кристалл PPLN размещался таким образом, чтобы

фокусное расстояние линзы 4 попадало ближе к передней грани, диаметр фокусировки составлял 160 мкм.

Нелинейный кристалл PPLN, допированный MgO (5% mol.), с размерами 1x7x50 мм и периодом регулярной доменной структуры 29,5 мкм не имел просветляющих покрытий на гранях. В качестве фильтрующего элемента 6 использовалось плотное зеркало на 1064 нм или пластинка из германия, соответственно при измерении суммарной или холостой мощности излучения. Термопарным измерителем мощности 7 (производства фирмы ОРНІR) регистрировалась выходная мощность на холостой длине волны и суммарная выходная мощность на всех длинах волн. Термопарный измеритель мощности 8 (производства фирмы Gentec) использовался для измерения падающей и прошедшей через кристалл мощности накачки.

Измерения спектральных характеристик выходного излучения проводились монохроматором МДР-23. Используемые в монохроматоре решетки были 600 и 1200 штрихов на миллиметр для областей спектра 700-2000 и 350-1000 нм (обратная линейная дисперсия 2,6 и 1,3 нм/мм, соответственно), а входная и выходная щели были по 50 мкм. В качестве приемника излучения использовался фотоумножитель ФЭУ-68 (область чувствительности 300-850 нм) или германиевый фотодиод с областью чувствительности 600–1700 нм. При измерениях расходимости холостой волны также использовался пироэлектрический приемник МГ-30 (область чувствительности 2000-20000 нм). Все измерения проводились при температуре кристалла 24 °С.

2.2 Результаты экспериментов

На рисунке 16 представлены мощность на холостой длине волны 3820 нм и суммарная выходная мощность на холостой и сигнальной 1475 нм (с 15% добавкой линии 2162 нм – см. ниже) при частоте повторения в 1 и 1,7 кГц в зависимости от мощности накачки. Измерения производились термопарным измерителем мощности производства фирмы ОРНІR. Значения всех мощностей указаны с учетом потерь на френелевское отражение на гранях нелинейного кристалла и потерь на фильтрующих элементах.

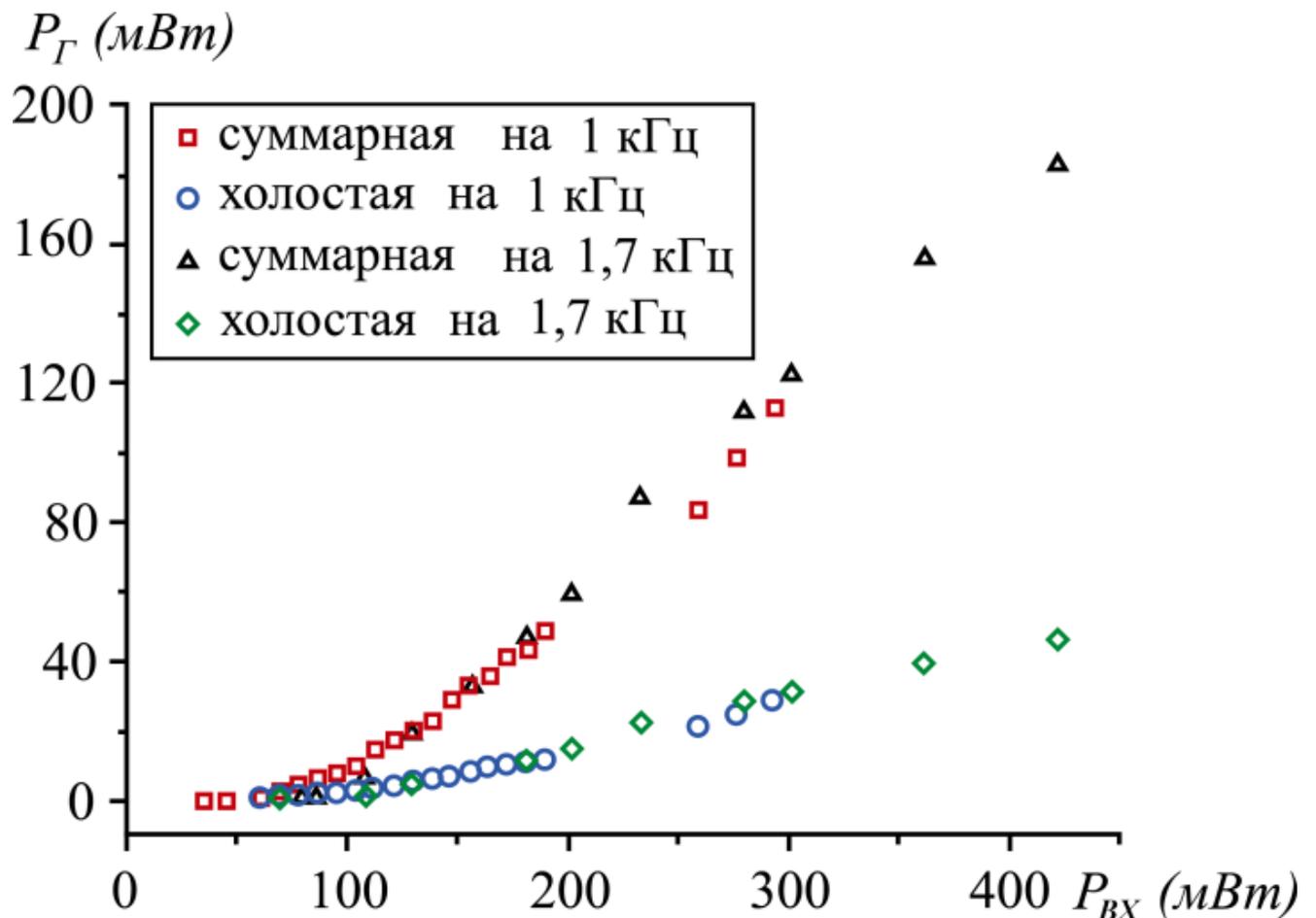


Рисунок 16. Зависимость выходной мощности $P_{Г}$ от входящей в кристалл мощности накачки $P_{ВХ}$ при частоте повторения 1 и 1,7 кГц.

Максимальная средняя суммарная выходная мощность на холостой и сигнальной длинах волн достигала 115 и 185 мВт при частоте повторения 1 и 1,7 кГц, максимальная пиковая мощность была соответственно ~ 210 и 200 кВт (исходя из формулы 1.3). Максимальная средняя мощность на холостой длине волны была 30 мВт при 1 кГц и 46 мВт при 1,7 кГц – соответственно пиковая мощность составила ~ 55 и 50 кВт. На рисунке 17 представлены зависимости эффективности преобразования в суммарную среднюю выходную мощность ПГС от средней мощности лазера накачки. Максимальное значение эффективности было ~40 и 44% при частоте повторения 1 и 1,7 кГц.

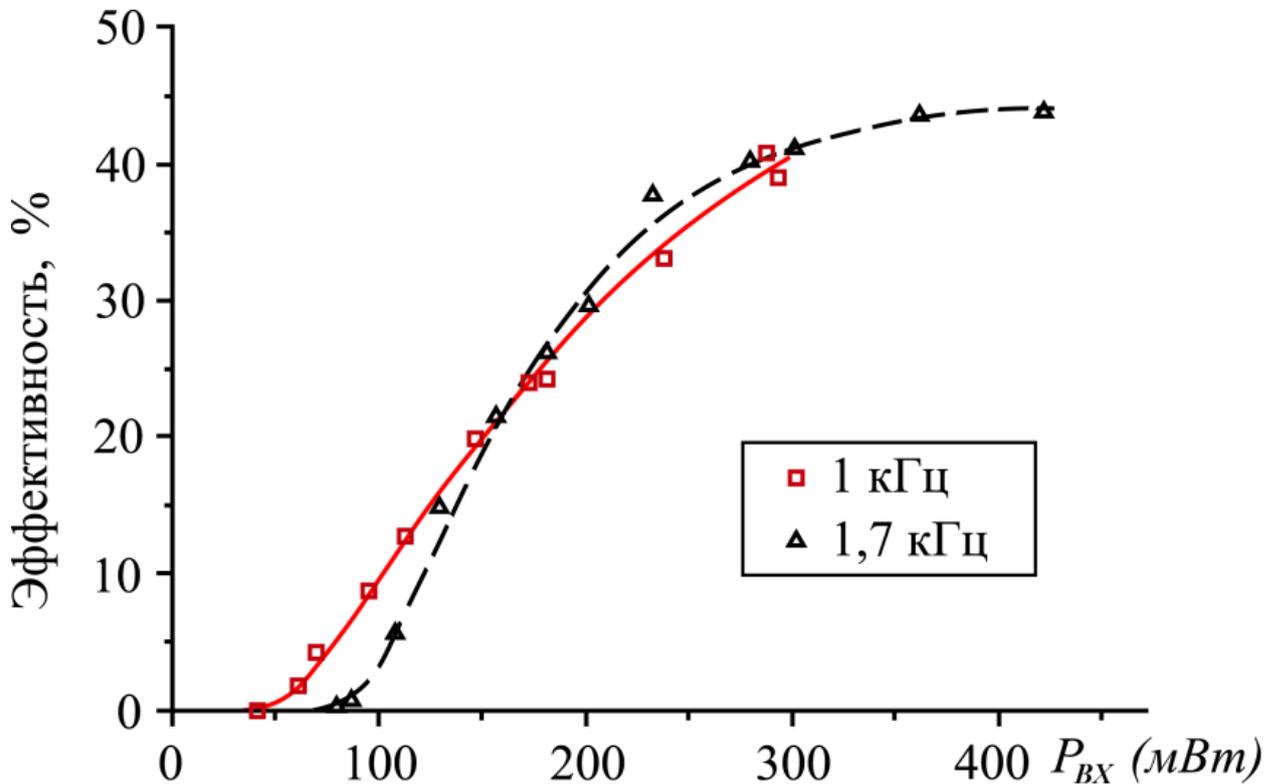


Рисунок 17. Суммарная эффективность преобразования на 1 и 1,7 кГц в зависимости от P_{BX}

Проводились измерения выходящей из кристалла PPLN средней мощности излучения накачки $P_{блх}$ в зависимости от величины входящей в кристалл средней мощности излучения накачки $P_{сх}$. По этой зависимости определялось истощение

накачки – $\eta = \frac{P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}$, где числитель – поглощенная в кристалле мощность излучения накачки (рисунок 18). Максимум истощения составил ~50 и 53% соответственно на 1 и 1,7 кГц. Соответственно эффективность преобразования по поглощенной мощности составляла ~80 и 83%.

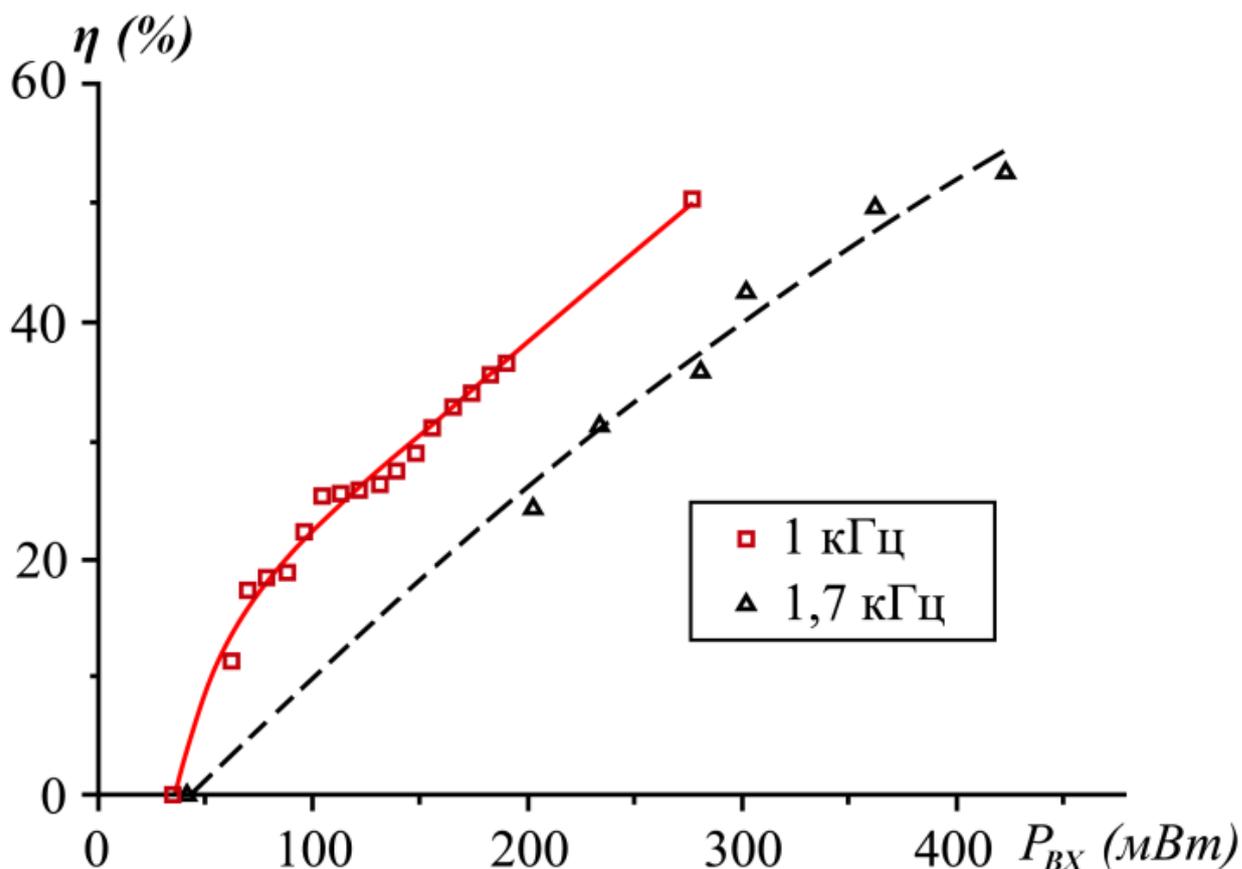


Рисунок 18. Истощение мощности накачки на 1 и 1,7 кГц в зависимости от $P_{\text{ВХ}}$

В коротковолновой части спектра также наблюдались слабые линии генерации. На рисунке 19 приведена их спектральная диаграмма в относительных единицах по мощности с учетом спектральной чувствительности фотоприемника. Суммарная мощность коротковолновых линий составляла ~1 мВт, поэтому при измерениях суммарной мощности ПГС (в условиях рисунка 16) их можно было не учитывать.

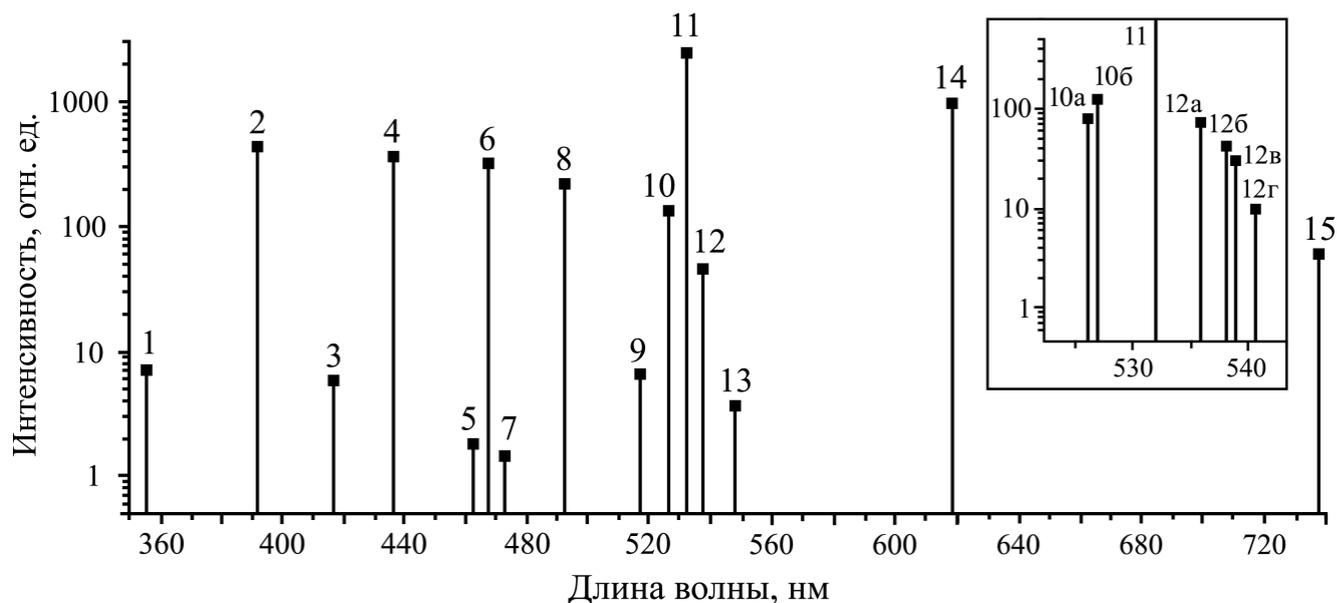


Рисунок 19. Спектральная диаграмма в области 350-740 нм. 1 – 354,7 нм; 2 – 391,2 нм; 3 – 416,2 нм; 4 – 435,8 нм; 5 – 461,9 нм; 6 – 467 нм; 7 – 472,4 нм; 8 – 491,6 нм; 9 – 516,6 нм; 10 – 526,9 нм; 11 – 532,1 нм; 12 – 537,8 нм; 13 – 547,7 нм; 14 – 617,9 нм; 15 – 737,5 нм.

На вставке справа более подробно показана структура линий 10 и 12.

Вблизи максимума генерации были измерены (с ошибкой измерений 10%) ширины коротковолновых линий $\Delta\nu$, которые составили: $\Delta\nu_{467} \sim 270$ ГГц, $\Delta\nu_{491} \sim 330$ ГГц, $\Delta\nu_{516} \sim 610$ ГГц, $\Delta\nu_{618} \sim 310$ ГГц.

Также была измерена зависимость ширины линии на сигнальной длине волны излучения – 1475 нм от мощности накачки в кристалле (рисунок 20). Как видно, с ростом мощности накачки ширина этой линии увеличивается в диапазоне 130-200 ГГц и при максимальной мощности накачки, в пределах ошибок измерений, совпадает с шириной линии лазера-накачки [73]. А при минимальной мощности накачки, соответствует расчетной ширине параметрического усиления, определяемой как [105]:

$$\Delta\nu_s = \frac{c}{l} \left| n_s - n_i + \lambda_i \frac{dn_i}{d\lambda} - \lambda_s \frac{dn_s}{d\lambda} \right|^{-1} \approx 137 \text{ ГГц},$$

где $l=5$ см – длина нелинейного кристалла.

В приближении больших усилений, ширина параметрического усиления (ширина синхронизма) находится из соотношения [105]:

$$\frac{BW(\text{high gain})}{BW(\text{low gain})} = \left[1 + \left(\frac{\Gamma l}{\pi} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Т.е. соответствует значению ~ 670 ГГц.

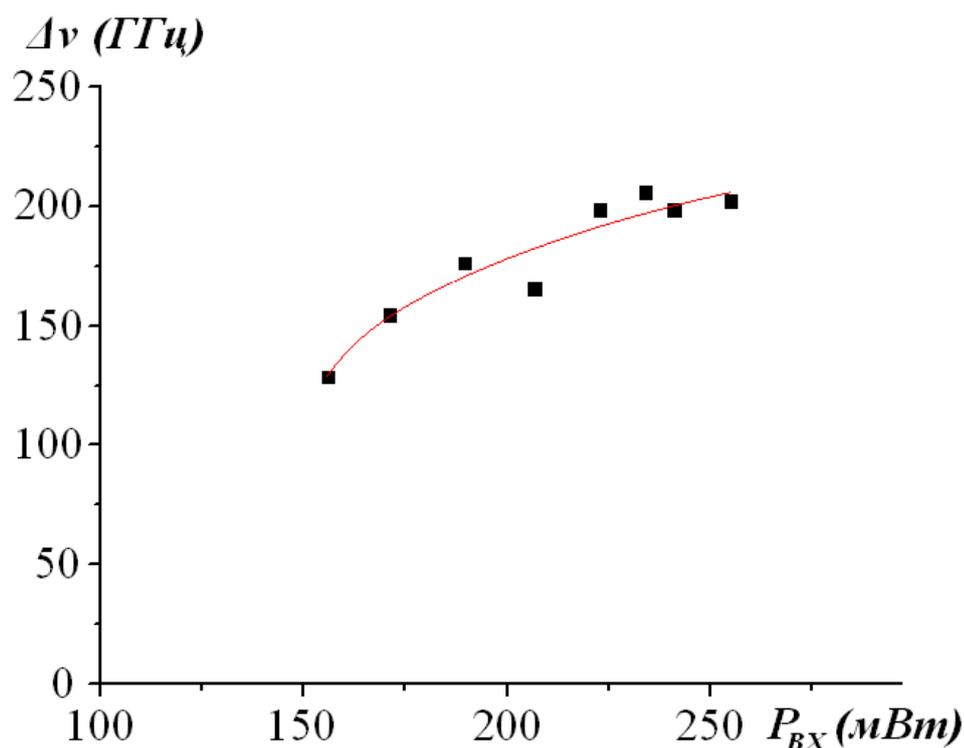


Рисунок 20. Зависимость ширины сигнальной линии $\Delta\nu$ от мощности накачки в кристалле P_{BX} на длине волны 1475 нм.

На рисунке 21 представлено пространственное распределение мощности генерации на $\lambda=619$ нм (сумма частот сигнальной волны и волны накачки) в плоскости поперечного сечения относительно направления излучения. Из полученного распределения вычислялось значение полной расходимости излучения, которое составило (30 ± 5) мрад.

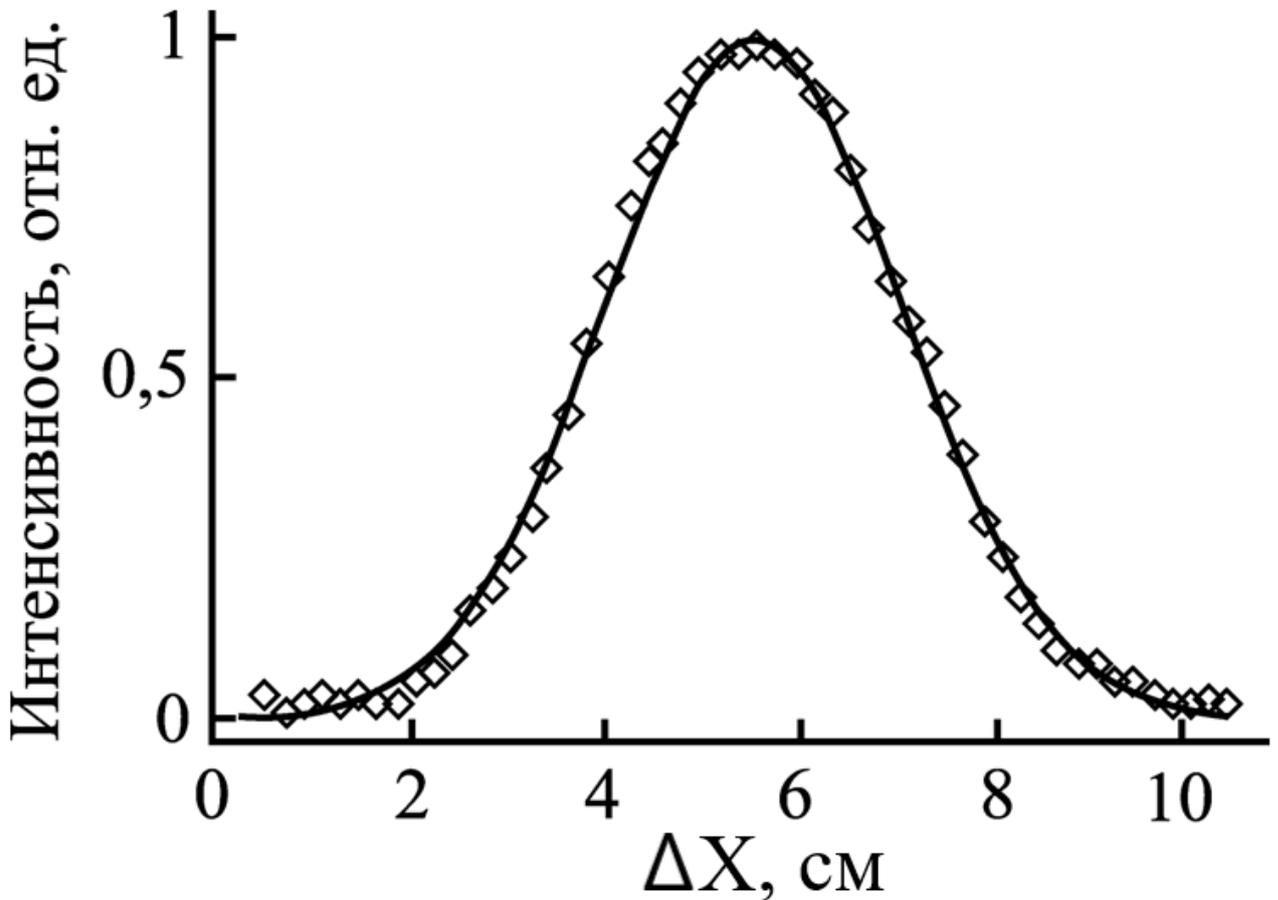


Рисунок 21. Поперечное распределение интенсивности генерации на $\lambda=619$ нм.

◇ – экспериментальные значения, сплошная линия – аппроксимация кривой Гаусса.

Измерения проводились на расстоянии $L=2$ м от PPLN кристалла (что соответствует дальней зоне дифракции), с помощью фотоприемника, закрепленного на координатный столик и перемещавшийся вдоль горизонтальной плоскости относительно направления излучения (Рисунок 22). Необходимая длина волны излучения выделялась с помощью светофильтров и плотного зеркала на 1064 нм.

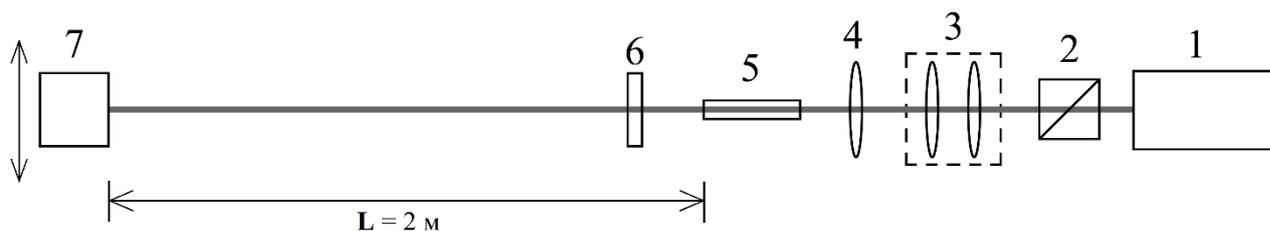


Рисунок 22. Схема измерения расходимости выходного излучения параметрической генерации. 1 – Nd:YAG-лазер с СЗАОМ; 2 – регулятор мощности; 3 – объектив; 4 – фокусирующая линза; 5 – нелинейный кристалл PPLN; 6 – фильтрующий элемент; 7 – фотоприемник.

В качестве фотоприемника использовались германиевый фотодиод (ЛФД-2) и пироприемник МГ-30. С помощью германиевого фотодиода регистрировалось излучение на длинах волн 619 нм, 1064 нм (длина волны излучения накачки) и 1475 нм (сигнальная длина волны), с помощью пироприемника МГ-30 регистрировалось излучение на холостой длине волны (3820 нм).

Из полученных распределений вычислялась полная расходимость излучения. Значения расходимости было одинаковым для холостой (3820 нм), сигнальной (1475 нм) и падающей на кристалл волны накачки (1064 нм), что в пределах ошибки измерений $\sim 15\%$ согласуется с расчетной расходимостью падающего на кристалл излучения накачки. Измерения расходимости на $\lambda=3820$ нм (с добавкой 10-15% на $\lambda=2160$ нм) были выполнены с помощью пироприемника МГ-30. Расходимости сигнальной и волны накачки регистрировались с помощью германиевого фотоприемника.

2.3 Анализ полученных результатов

Приведенные на рисунках 16-18 экспериментальные данные показывают, что в случае безрезонаторного ПГС с накачкой PPLN кристалла 45-пикосекундным Nd:YAG-лазером с СЗАОМ реализуется ограничиваемая порогом разрушения мощная (~155 кВт на сигнальной и 55 кВт на холостой волне) генерация с суммарной эффективностью по поглощенной мощности 80-83% с учетом истощения накачки. По-видимому, это рекордное значение эффективности. Здесь уместно отметить, что в цитируемой выше работе [63] (см. Введение) ничего не сказано об истощении накачки и поэтому сравнение с ней затруднено, хотя наша эффективность по входящей мощности близка к указанной в [63].

Суммарная эффективность преобразования безрезонаторного ПГС на основе PPLN кристалла в ИК область по поглощенной мощности составляет ~ 83% для частоты повторения Q-switch импульсов 1,7 кГц. Потери ~17% являются следствием, по нашему мнению, следующих причин:

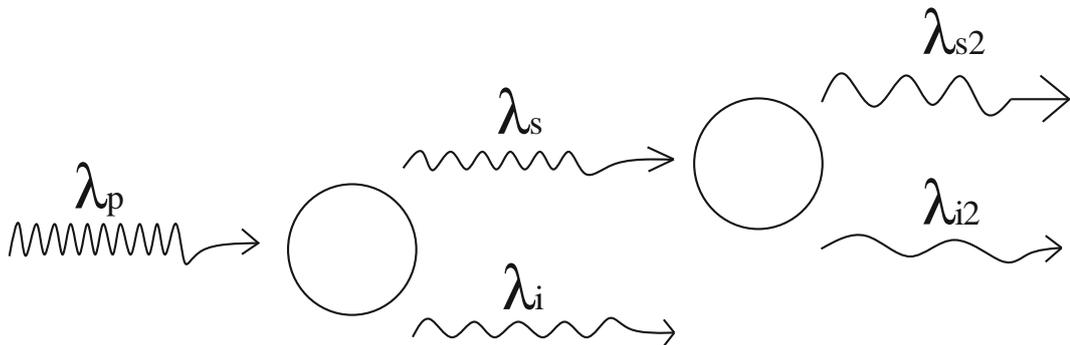
- 1) поглощение излучения на холостой волне (~3,8 мкм);
- 2) поглощение холостой волны при каскадной параметрической генерации;
- 3) поглощение слабых кратных и комбинационных гармоник в УФ области;
- 4) светоиндуцированное коротковолновыми линиями поглощение накачки [104].

Рассмотрим указанные причины подробнее.

1. Из спектра поглощения PPLN кристалла, измеренного в [63], был рассчитан коэффициент поглощения для холостой волны $\alpha \approx 0,042 \text{ см}^{-1}$ (для сигнальной волны поглощение отсутствует). Для нашего случая (длина кристалла

5 см) это дает поглощение для $\lambda=3820$ нм 19%. Следовательно, выходная мощность на $\lambda=3820$ нм, которая составляет 46 мВт, с учетом поглощения (19%) должна быть 57 мВт. Тогда из отношения длин волн 3820 нм /1475 нм мощность сигнальной волны составит 148 мВт. Суммарная выходная мощность параметрической суперлюминесценции должна быть 205 мВт, в отличие от измеренной 185 мВт.

2. При средней мощности сигнальной волны 148 мВт и высокого коэффициента усиления, может возникать процесс каскадной параметрической генерации [106, 107], иллюстрация которого для нашего случая изображена на рисунке 23. Из нее видно, что полученное излучение на 1475 нм может также последовательно преобразовываться в соответствующую сигнальную и холостую волну, т.е. происходит последовательное преобразование частоты в длинноволновую область путем последовательной параметрической генерации.



$$\text{OPG1: } \lambda_p \rightarrow \lambda_s + \lambda_i$$

$$\text{OPG2: } \lambda_s \rightarrow \lambda_{s2} + \lambda_{i2}$$

Рисунок 23. Иллюстрация каскадной параметрической генерации.

Согласно расчетам, выполненным в программном пакете SNLO [108], при периоде регулярной доменной структуры кристалла 29,5 мкм, каскадная параметрическая генерация (при накачке сигнальной волной 1475 нм) дает сигнальную волну (λ_{s2})

на 2162 нм и холостую (λ_{i2}) на 4642 нм. При этом, расчетные значения коэффициентов усиления совпадают для параметрической генерации от длины волны накачки 1475 нм и 1064 нм с точностью 15%.

Следовательно, для оценки КПД преобразования при длине волны накачки 1475 нм, можно применить полученный график КПД преобразования для длины волны накачки 1064 нм, изображенный на рисунке 16. Из него видно, что при мощности накачки 148 мВт суммарное преобразование составляет ~20% или ~30 мВт, а доля холостой волны составит ~9 мВт. Согласно [63] расчетный коэффициент поглощения α для каскадной холостой волны на 4642 нм равен $0,7 \text{ см}^{-1}$ и ее поглощение составит 97%. Тогда мощность генерации на сигнальных длинах волн 1475 и 2162 нм должна составить 139 мВт, что хорошо согласуется с измеренным значением.

3. Поглощение синих и УФ линий в PPLN составляет по нашим оценкам ~1 мВт.

4. Оставшийся дисбаланс ~14 мВт (или ~6%) между поглощенной мощностью накачки на 1064 нм (~220 мВт) и полной мощностью суперлюминесценции (~206 мВт) может быть объяснен наведенным зелеными и синими линиями поглощением волны накачки [104, 109].

Аналогичные оценки для случая частоты повторения 1 кГц дают расхождение ~10%.

Расчеты на основе данных [104] при экстраполяции по плотности мощности к нашему случаю (~1 МВт/см² на 532 нм) дают величину наведенного поглощения накачки в кристалле ~7%, что близко к нашим результатам.

Обращаясь к результатам измерения коротковолновых линий (рисунок 19), можно отметить ряд линий, наблюдавшихся в главе 1 с поправкой по значениям из-за отличий периодов поляризации кристаллов Λ ($\Lambda=30$ мкм – для главы 1 и 29,5 мкм для настоящей главы), которые являются результатом процесса смешения частот волн накачки ω_p , сигнальной ω_s , холостой ω_i и их гармоник:

$$\omega_{354,9} = 3\omega_p, \quad \omega_{391,2} = 2\omega_p + \omega_s, \quad \omega_{435,8} = \omega_p + 2\omega_s, \quad \omega_{467} = 2\omega_p + \omega_i,$$

$$\omega_{532} = 2\omega_p, \quad \omega_{617,9} = \omega_p + \omega_s, \quad \omega_{737,5} = 2\omega_s$$

Остальные линии наблюдались впервые, поэтому рассмотрим их происхождение. Синяя линия 491,6 нм является третьей гармоникой от сигнальной волны, а линия 416,2 нм является второй гармоникой от суммарной частоты волн накачки и холостой:

$$\omega_{491,6} = 3\omega_s, \quad \omega_{416,2} = 2(\omega_p + \omega_i)$$

В зеленой области спектра помимо линии 532,1 нм (второй гармоники от накачки) наблюдалось еще 8 линий (см. рисунок 19). Линии 526,1 нм, 526,9 нм, 537,85 нм и 538,4 нм (10а, 10б, 12б и 12в), по-видимому, являются результатом двухступенчатого каскадного процесса: генерации второй гармоники и вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) на продольных и поперечных оптических фононах (ТО и LO-колебаниях) в PPLN [110, 111]. В пользу доказательства этого процесса служит симметричное расположение указанных двойных линий и одинаковое расстояние между ними (Рисунок 24).

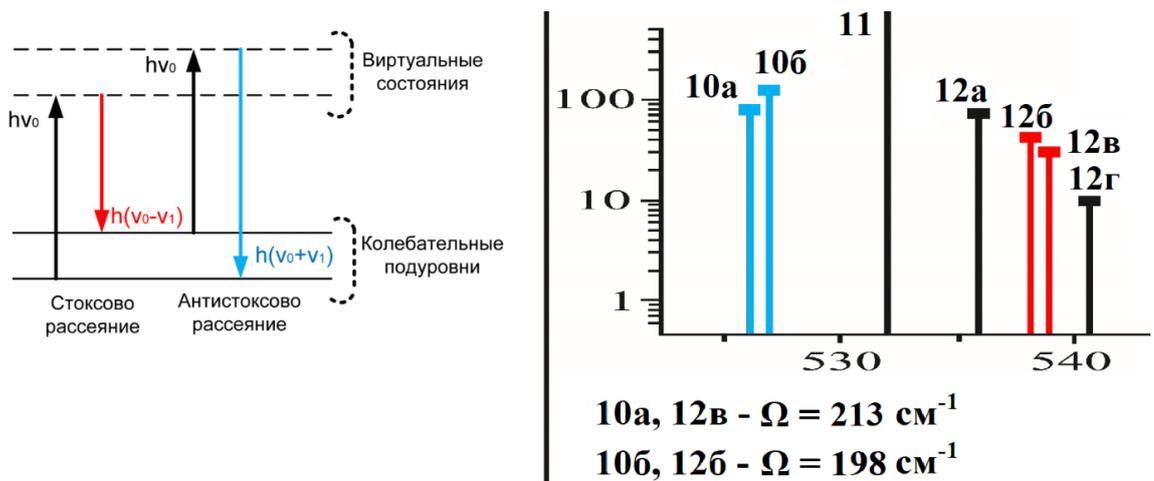


Рисунок 24. Общая иллюстрация ВКР (слева) и спектральная диаграмма ВКР от 532 нм в PPLN при параметрической суперлюминесценции.

Наиболее вероятно, что рассеяние было на колебаниях $E(1LO) - 194 \text{ см}^{-1}$ и $E(2LO) - (216 \text{ см}^{-1})$ [111]. Однако в нашем случае частоты указанных колебаний были несколько смещены ($\sim 193 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 217 \text{ см}^{-1}$), что может быть связано с дефектностью кристалла или (и) погрешностью измерений. Линии 516,6 нм и 547,7 нм (9 и 13), судя по всему, тоже являются следствием ВКР второй гармоники на фоне $4A_1$ (639 см^{-1}), частота которого была смещена и составляла $\sim 550 \text{ см}^{-1}$. Измеренная ширина линии 516,6 нм (610 ГГц) значительно превышает ширины других линий, что также подтверждает иное происхождение этой линии от нелинейных процессов обусловленными квадратичной нелинейной восприимчивостью χ^2 . Линия 535,9 нм (12а) может быть результатом смешения второй гармоники сигнальной волны (1081 нм) каскадной параметрической генерации и излучения накачки – 1064,2 нм, вторая гармоника которого попадает в рассматриваемую область. Линия 540,6 нм (12г) – четвертая гармоника от каскадной сигнальной.

Очень слабые линии 5 и 7 на рисунке 19 можно объяснить ВКР линии 6 (467 нм), точное измерение было затруднено ввиду низкой интенсивности линий.

Как следует из рисунка 21 расходимость суперлюминесценции на $\lambda=619 \text{ нм}$ (сумма сигнальной волны и волны накачки) составляет (30 ± 5) мрад. Такое же значение расходимости дали измерения для сигнальной, холостой и падающей на кристалл волны накачки. Все измерения расходимости были выполнены в дальней зоне дифракции на расстоянии $L=200 \text{ см}$, что много больше $kw_0^2/2 \approx 4,3 \text{ см}$, где $k=2\pi/\lambda$, w_0 – радиус перетяжки в фокусе линзы 4, равный 80 мкм для волны накачки $\lambda=1064 \text{ нм}$ и для волн 619 нм, 1475 нм и 3820 нм (конфокальные параметры последних будут 7 см, 3 см и 1,1 см, соответственно). Полные дифракционные углы расходимости ($\theta=2\lambda/\pi w_0$) при диаметре излучающей области 160 мкм составят 5 мрад, 12 мрад и 30 мрад для длин волн 619 нм, 1475 нм и 3820 нм соответственно. В то время как в режиме суперлюминесценции, расходимость ее излучения определяется только углом сходимости (расходимости) излучения накачки и не зависит от длины волны. Отличие вычисленных расходимостей на 619 нм и

1475 нм от измеренных (30 мрад), по-видимому, связано со структурой (многомодовостью) волны накачки [78] и коллинеарностью параметрической суперлюминесценции.

Таким образом, в нашем случае при суперлюминесцентной параметрической генерации в PPLN кристалле расходимость ее излучения определяется только углом сходимости (расходимости) излучения накачки и не зависит от длины волны.

2.4 Выводы

Вышеизложенные результаты показывают, что простой и удобный для практического использования суперлюминесцентный (безрезонаторный) ПГС на основе кристалла PPLN может обеспечивать пикосекундные импульсы на сумме сигнальной и холостой волн 210 и 200 кВт, а на холостой длине волны 55 и 50 кВт при частотах повторения 1 кГц и 1,7 кГц, соответственно. Поскольку энергия импульса накачки ~ 23 мкДж при диаметре фокусировки ~ 160 мкм близка к порогу разрушения кристалла, то дальнейшее повышение выходной мощности может быть получено путем увеличения частоты повторения импульсов и площади поперечного сечения луча накачки.

В нашем случае некоторое увеличение эффективности может быть получено путем перестройки холостой длины волны в область 3-2,5 мкм, где поглощение кристалла PPLN меньше. В этой области расчетная эффективность по поглощенной мощности составит $\sim 26\%$ для холостой и $\sim 88\%$ для суммарной мощности генерации.

Расходимость излучения холостой, сигнальной и являющихся результатом их смешения слабых коротковолновых линий определялась углом сходимости (расходимости) излучения накачки, т.е. была геометрическая.

Глава 3

Сравнение суперлюминесцентного и однорезонаторного режимов ПГС при накачке в одноимпульсном режиме

В предыдущей главе нами была продемонстрирована эффективная суперлюминесцентная параметрическая генерация с наиболее высоким КПД преобразования (более 80% по поглощенной мощности) при накачке Nd:YAG-лазером с СЗАОМ. Вопросы возможного повышения выходных характеристик за счет резонатора не изучались, а публикации по исследованию влияния резонатора на характеристики параметрической генерации с большим усилением в кристалле PPLN при пикосекундной накачке крайне редки и не совсем понятны. Так, в работе [112] сравнивались параметрическая генерация в безрезонаторном режиме (OPG) и в резонаторном (OPO) при накачке дисковым Yb:YAG лазером с пассивной синхронизацией мод (ML), а в работе [113] – при накачке Nd:YLF лазером с Q-switch. В [112, 113] наблюдалось увеличение мощности холостой волны ~10% в режиме OPO по отношению к случаю OPG при интенсивности накачки ~0,2 ГВт/см². В работе, описанной в главе 1, интенсивность накачки была ~3 ГВт/см² и указанное увеличение составляло в ~3 раза, однако длина рабочего кристалла при этом была в 2,5 раза меньше, чем в работе, описанной в главе 2.

В настоящей главе приводится сравнение выходных характеристик излучения в двух режимах параметрической генерации света – параметрической суперлюминесценции и синхронно-накачиваемого однорезонаторного ПГС на кристалле PPLN (длиной 50 мм) с накачкой от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ. Суммарная выходная средняя мощность на сигнальной (1475 нм) и холостой (3820

нм) длинах волн в режиме суперлюминесценции составила ~ 120 мВт (пиковая мощность ~ 120 кВт). Максимальная суммарная эффективность преобразования по поглощенной мощности в режиме суперлюминесценции была на уровне 60%. Максимальная эффективность преобразования в холостую длину волны по поглощенной мощности накачки составила 15% и 25% (квантовая 54% и 90%) соответственно для режима суперлюминесценции и однорезонаторного ПГС. Максимальные значения средней выходной мощности на холостой длине волны составляли ~ 30 мВт и ~ 60 мВт при истощении накачки 47% и 55% для режимов суперлюминесценции и однорезонаторного ПГС, соответственно.

3.1 Режим суперлюминесцентной параметрической генерации света

Используемая схема экспериментальной установки безрезонаторного ПГС приведена на рисунке 25 и была подобна схеме, описанной в главе 2.

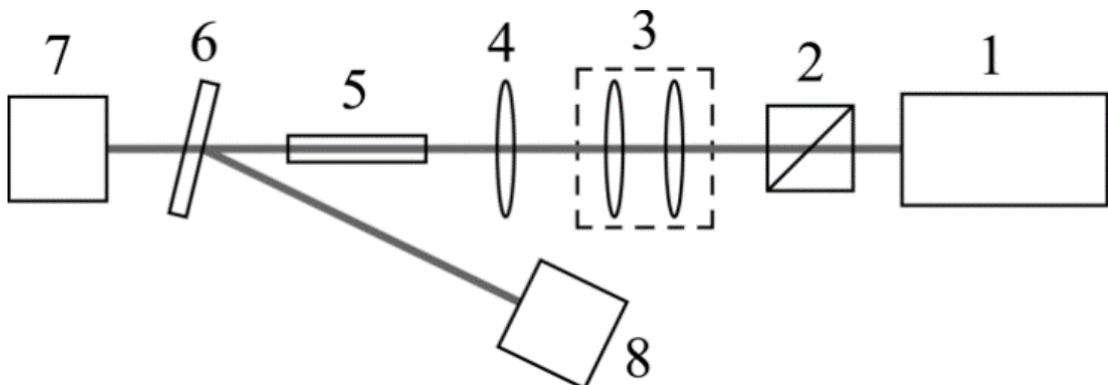


Рисунок 25. Схема эксперимента для режима суперлюминесценции. 1 – Nd:YAG-лазер с QML; 2 – поляризационный регулятор мощности; 3 – объектив; 4 – фокусирующая линза; 5 – нелинейный кристалл PPLN; 6 – фильтрующий элемент; 7, 8 – измерители мощности.

В качестве лазера накачки использовался Nd:YAG лазер, описанный в главе 1 и опубликованный в работах [78, 80], но работающий на частоте повторения цугов импульсов 2 кГц. Длительность цуга с увеличением частоты повторения до 2 кГц увеличивалась и была ~150-180 нс, длительность отдельных импульсов в цуге увеличивались незначительно до ~50 пс, частота их следования 100 МГц оставалась неизменной и определялась межмодовым расстоянием. Максимальная средняя мощность составляла ~400 мВт, соответственно пиковая мощность составляла:

$$P_{\text{Н}}^{\text{пик}} = \frac{400 \text{ мВт}}{F_{\text{rep}} N_{\text{и}} \tau_{\text{и}}} = \frac{400 \text{ мВт}}{2 \text{ кГц} \times 18 \times 50 \times 10^{-12} \text{ с}} \approx 0,2 \text{ МВт}, \quad (3.1)$$

где $N_{\text{и}} = 18$ – количество импульсов в цуге, $F_{\text{rep}} = 2 \text{ кГц}$ – частота повторения цугов импульсов, $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульсов синхронизации мод.

Излучение лазера фокусировалось в нелинейный кристалл PPLN линзой 4 с фокусным расстоянием 280 мм. Диаметр перетяжки излучения накачки в кристалле составлял 160 мкм. Регулировка мощности накачки производилась поляризационным регулятором 2. Объектив 3 использовался для уменьшения расходимости лазера накачки в 3,5 раза. Общая расходимость излучения после объектива составила ~0,57 мрад. В качестве фильтрующего элемента 6 использовалось плотное зеркало на 1064 нм или пластинка из германия, соответственно при измерении суммарной или холостой мощности излучения. Измеритель мощности 7 (производства фирмы OPHIR) использовался для измерения мощностей холостой и суммарной длины волны, а измеритель мощности 8 (производства фирмы Gentec) использовался для измерения прошедшей через кристалл мощности накачки. Кристалл PPLN, допированный MgO (5% mol.), имел размеры 5x1x50мм и период регулярной доменной структуры $\Lambda=29,5$ мкм. Торцы кристалла были с антиотражающими покрытиями

($R < 1\%$ @ 1,064 мкм; $R < 2\%$ @ 1,4-1,5 мкм; $R < 1\%$ @ 3,6-3,8 мкм). Все измерения проводились при температуре кристалла 24 °С.

На рисунке 26 представлены полученные зависимости выходной мощности на сигнальной (1475 нм) и холостой (3820 нм) длине волны от мощности накачки в режиме суперлюминесценции.

Выходная мощность, мВт

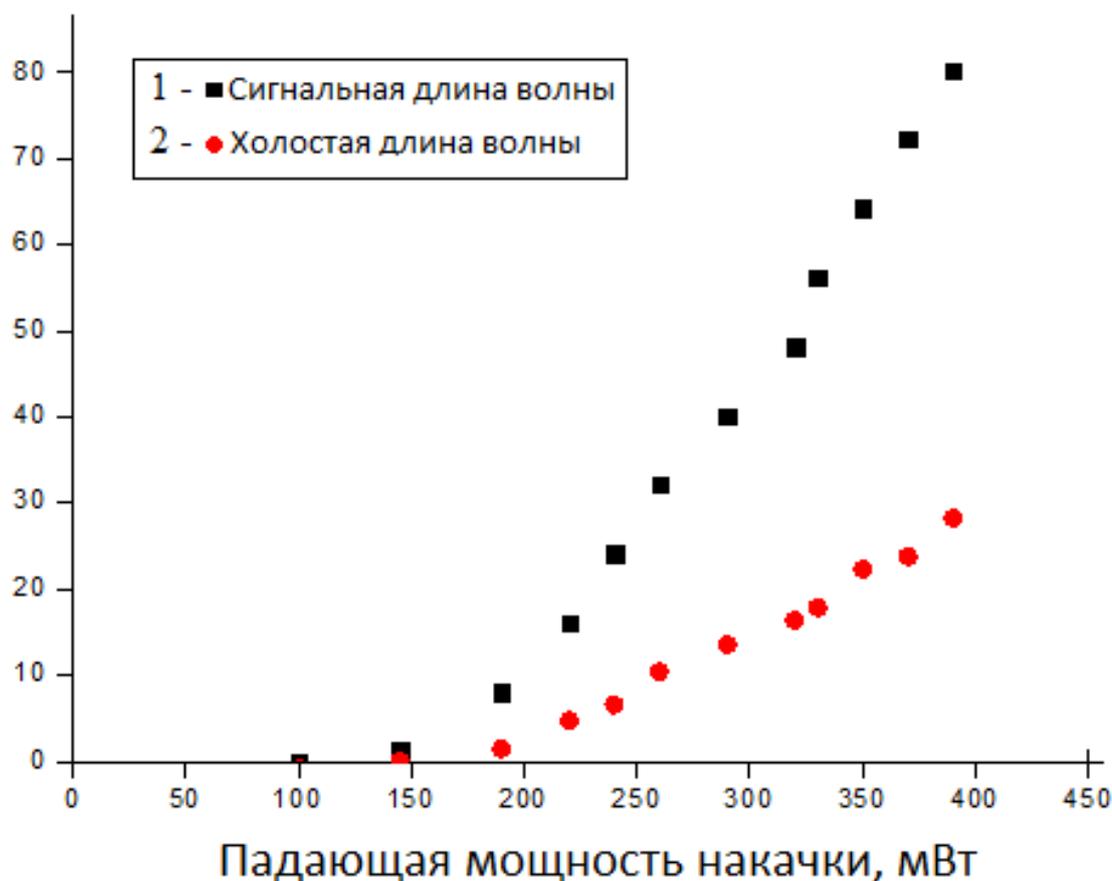


Рисунок 26. Зависимости выходной мощности на сигнальной (1) и холостой (2) длинах волн от падающей мощности накачки в режиме суперлюминесценции.

Максимальная выходная средняя мощность на холостой и сигнальной длинах волн достигала ~30 мВт и ~80 мВт при эффективности преобразования ~7,2% и ~21%, соответственно. Порог генерации составлял 100 мВт.

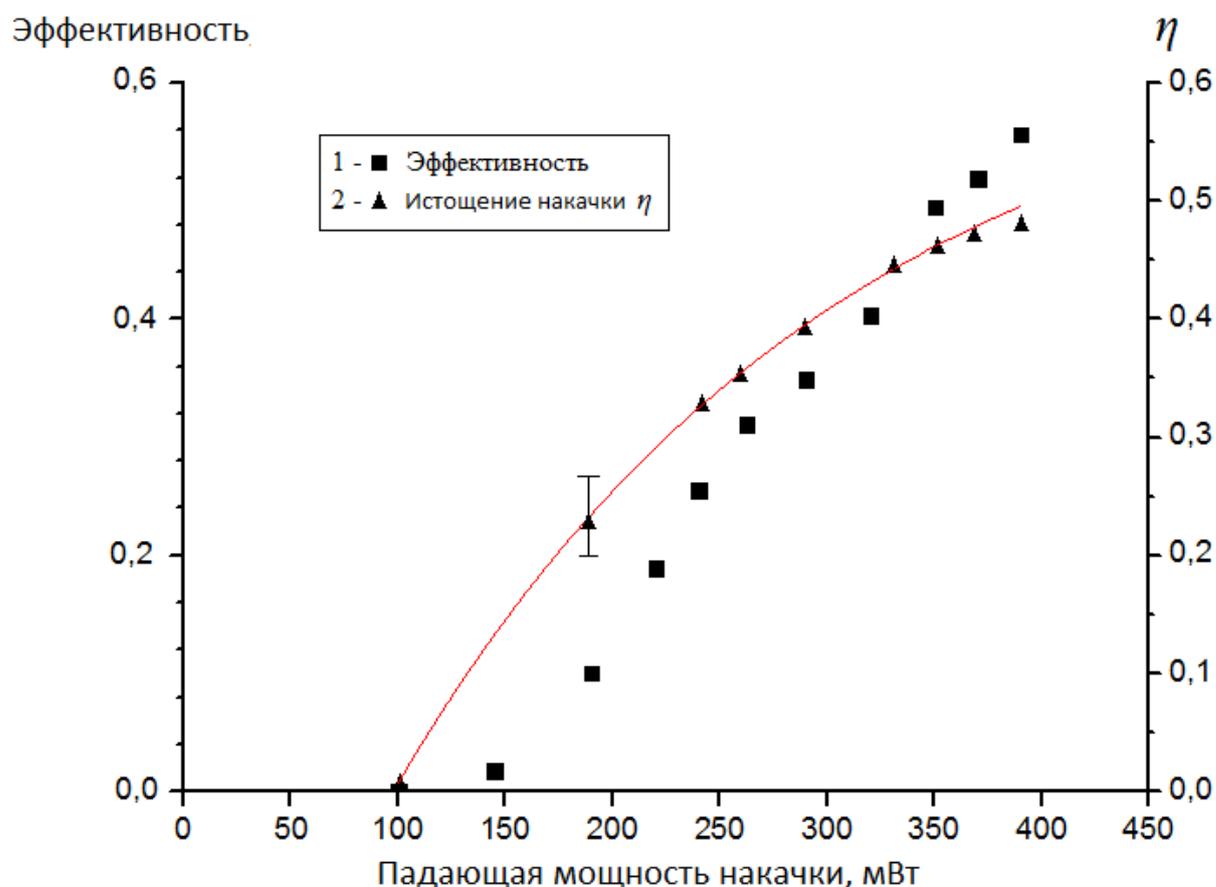


Рисунок 27. Суммарная эффективность преобразования (1) и коэффициент истощения накачки (2) в зависимости от падающей мощности накачки в режиме суперлюминесценции.

Также была измерена мощность накачки на выходе из кристалла PPLN $P_{вых}$ в зависимости от ее величины на входе в кристалл $P_{вх}$. На основании этой зависимости было рассчитан коэффициент истощения накачки (см. рисунок 27):

$$\eta = 1 - \frac{P_{вых}}{P_{вх}} \quad (3.2)$$

Максимум истощения достигал уровня 47% с точностью $\pm 3\%$. Следовательно, по поглощенной мощности эффективность преобразования составляла $\sim 60\%$ и $\sim 15\%$ соответственно для суммарной и холостой длин волн.

Для измерения истощения накачки за двойной проход через нелинейный кристалл использовалась схема, представленная на рисунке 28.

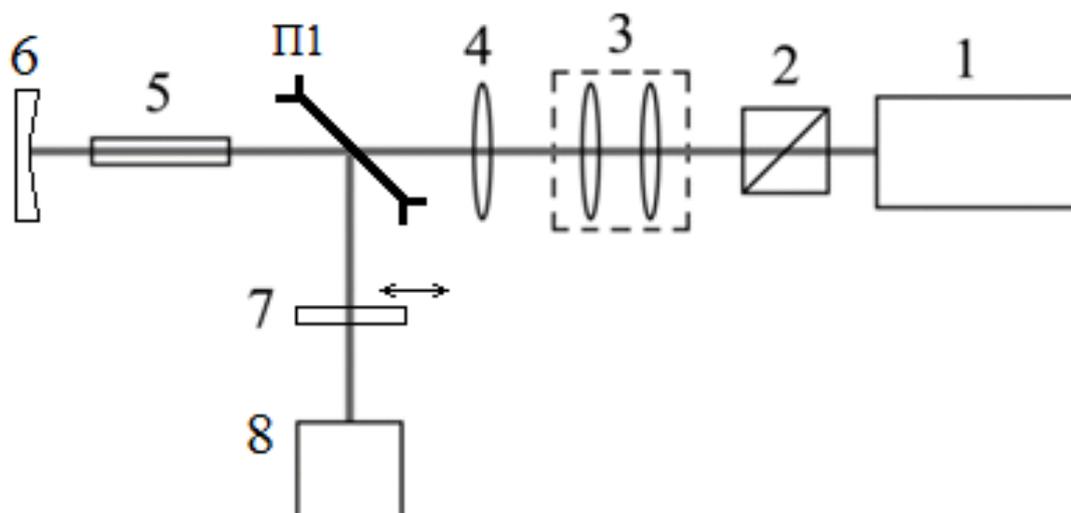


Рисунок 28. Схема измерения истощения накачки за два прохода. 1 – Nd:YAG лазер с синхронизацией мод и модуляцией добротности (QML); 2 – регулятор мощности накачки; 3 – объектив; 4 – фокусирующая линза; 5 – нелинейный кристалл PPLN; 6 – сферическое медное зеркало; 7 – узкополосный фильтр на 1064нм; 8 – измеритель мощности; П1 – сапфировая пластинка.

Сферическое медное зеркало 6 устанавливалось на такое расстояние H от перетяжки в кристалле PPLN, чтобы его радиус кривизны ($R=125\text{мм}$) совпадал с кривизной волнового фронта, т.е. $H \sim R$. Сапфировая пластинка П1 использовалась для отражения части излучения за двойной проход через нелинейный кристалл на измеритель мощности. Далее истощение пересчитывалось по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{вых}}}{R[(1-R)P_{\text{вх}}]}, \quad (3.3)$$

где R – коэффициент отражения от двух граней пластинки, $P_{\text{вх}}$ – прошедшая мощность через кристалл за 2 прохода и отраженная от сапфировой пластинки, $P_{\text{вх}}$ – входящая мощность перед сапфировой пластинкой.

Значение истощения накачки при $P_{\text{вх}}=360$ мВт за два прохода составило 50 % (в отличие от истощения за один проход 45%).

В режиме суперлюминесценции расходимость излучения определяется геометрией излучающей области, т.е. углом фокусировки падающей на кристалл волны накачки. Измеренная в горизонтальной плоскости расходимость суперлюминесценции в дальней зоне дифракции на расстоянии 2 м от PPLN кристалла на $\lambda=619$ нм (сумма сигнальной волны и волны накачки) составила (33 ± 5) мрад. Измерения проводились по схеме на рисунке 25: отраженный луч от фильтра 6 проходил через светофильтр КС-15 и попадал на фотоприемник 8 (ФД-2 с диаметром фоточувствительной области 1,3 мм), который крепился на координатный столик и двигался в горизонтальном направлении перпендикулярно ходу луча. Такое же значение расходимости было получено для сигнальной и холостой волны. Эти данные в пределах ошибки измерений совпали с измерениями работы, описанной в главе 2. Пороговая мощность накачки 100 мВт соответствует плотности мощности в перетяжке ~ 200 МВт/см². Расчетное значение этой величины по формуле [114]:

$$I_{th} = 5 \frac{\epsilon_0 c \lambda_s \lambda_i}{FL^2} \quad (3.4)$$

(где $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-14} \frac{\text{Ф}}{\text{см}}$ – электрическая постоянная, $\lambda_s=1475$ нм – сигнальная длина волны, $\lambda_i=3820$ нм – холостая длина волны, $F=d_{\text{eff}}^2/n^3=19,75$ пм²/В² и $L=5$ см) составило 160 МВт/см², что неплохо согласуется с измеренными данными.

Полученная эффективность преобразования по поглощенной мощности $\sim 60\%$ ниже, чем было получено нами в главе 2. Данный факт связан, по-видимому,

с более низким качеством кристалла, использовавшегося в данной работе (на что указывает и более высокий порог генерации).

3.2 Режим однорезонаторного ПГС

Схема однорезонаторного ПГС с синхронной накачкой представлена на рисунке 29 и была подобной схеме в описанной в главе 1. Различие было в том, что длина кристалла PPLN в данной работе была 50 мм, а фокусирующая линза имела фокус 280 мм. Накачка производилась, указанным выше, Nd:YAG-лазером с СЗАОМ при частоте следования цуга импульсов 2 кГц.

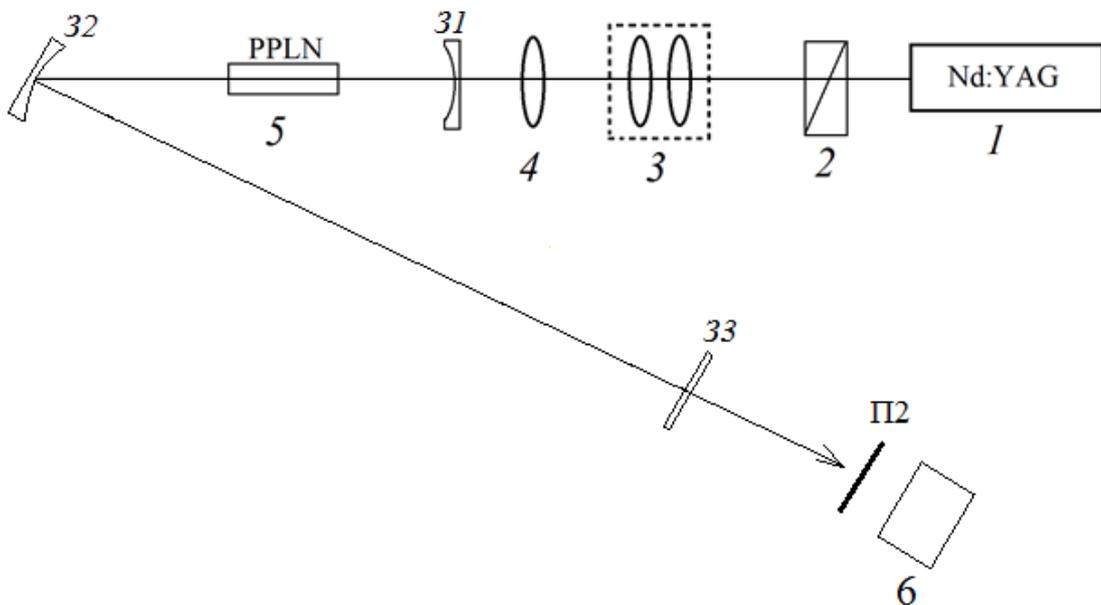


Рисунок 29. Схема однорезонаторного ПГС. 1 – Nd:YAG-лазер с QML; 2 – регулятор мощности; 3 –объектив; 4 – фокусирующая линза; 5 – нелинейный кристалл PPLN; 6 –измеритель мощности (OPHIR); 31-33 – зеркала резонатора ПГС; П2 – германиевая пластинка.

Резонатор ПГС был образован зеркалами 31, 32 и 33. Зеркало 31 имело радиус кривизны 100 мм, коэффициент отражения в области 1,4-1,7 мкм $R_{1,4-1,7}=99,5\%$ и пропускание на длине волны 1,064 мкм около 99%. Медное зеркало 32 имело радиус кривизны 125 мм и коэффициенты отражения $R_{1,0-1,7}=90\%$, $R_{3,0-4,0}=97\%$. Плоское выходное зеркало 33 на подложке из ZnSe ($R_{1,2-1,7} = 99,5\%$) имело высокое пропускание на 1.06 мкм (78%) и в диапазоне 3.0–4.0 мкм (99,5%). Это зеркало можно было перемещать вдоль оси резонатора с помощью юстировочного столика.

Порог генерации ПГС составил 60 мВт ($I_{th}=120 \text{ МВт/см}^2$), что значительно отличается от расчетного значения порога генерации по формулам из [115, 116]:

$$I_{th} = \frac{l}{L^2} \frac{n^3 \epsilon_0 c^3}{2 \omega_s \omega_i d_{eff}^2 g_s g_t h_{sm}} \approx 13 \text{ МВт/см}^2, \quad (3.5)$$

где $l = 0,3$ – общие потери в резонаторе на двойной проход для сигнальной длины волны; L – длина кристалла; $g_s=0,4$ – коэффициент пространственного согласования; $g_t=0,6$ – коэффициент временного согласования; значение функции h_{sm} (определено в [115]), для нашего случая составляет 0,1.

По-видимому, данное различие связано с тем, что мы определяли порог генерации по визуальному наблюдению через красный светофильтр момента появления линии $\lambda=619$ нм на зеркале резонатора, т. е. фактически наблюдался порог возникновения суммарной частоты $\omega_s + \omega_p$.

При максимальной мощности накачки средняя выходная мощность на холостой длине волны (3820 нм) составила ~ 60 мВт.

Проводились и измерения прошедшей мощности накачки через резонатор ПГС без нелинейного кристалла. На основе этих измерений была рассчитана зависимость истощения накачки от падающей мощности накачки, когда кристалл находился в резонаторе, по формуле:

$$\eta_{рез} = 1 - [(1 + \alpha)P_{в\text{ых}}/P_{в\text{х}}], \quad (3.6)$$

где $\alpha=0,28$ – измеренные на $\lambda=1064$ нм потери на поглощение в зеркалах резонатора, $P_{в\text{х}}$ – падающая мощность накачки, $P_{в\text{ых}}$ – измеренная мощность накачки, прошедшая через резонатор с нелинейным кристаллом, а $(1+\alpha)P_{в\text{ых}}$ – рассчитанная мощность накачки на выходе нелинейного кристалла в резонаторе. Зависимость истощения накачки представлена на рисунке 30.

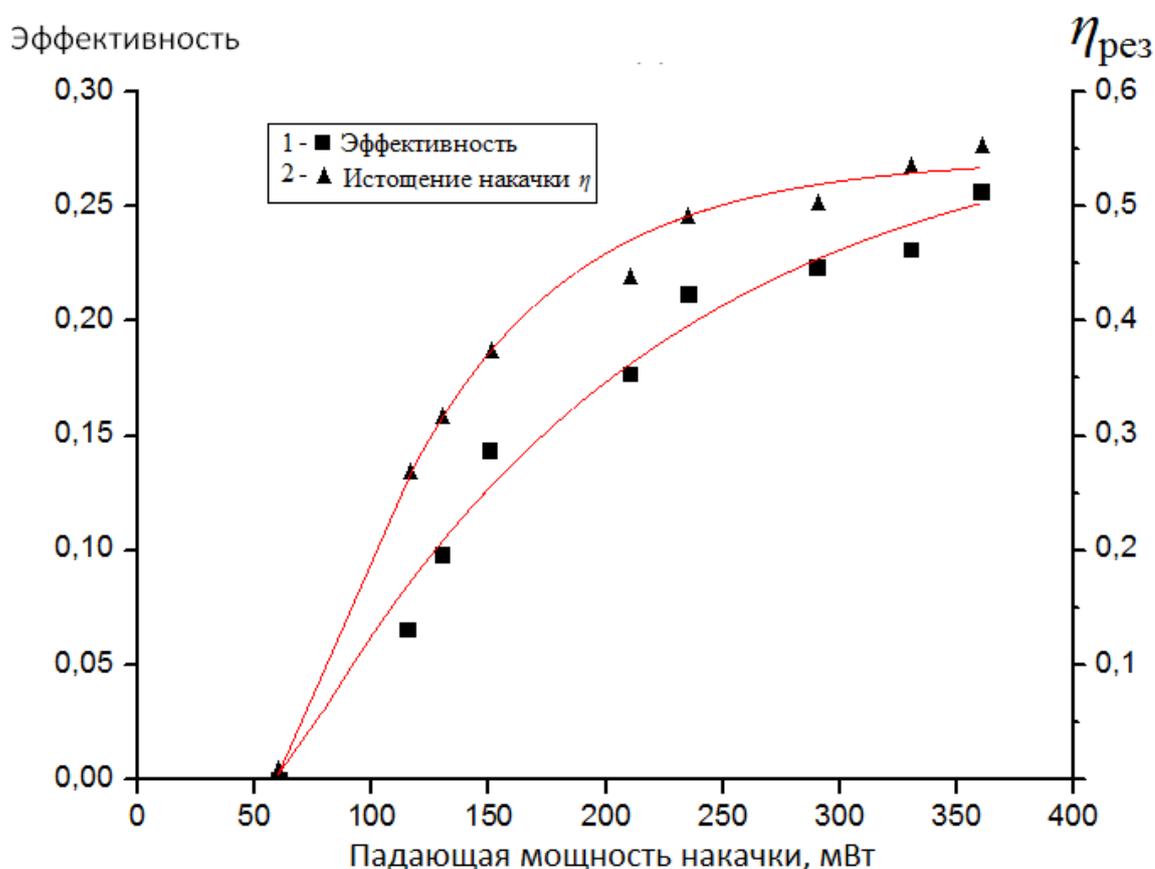


Рисунок 30. Зависимости эффективности преобразования в холостую длину волны по поглощенной мощности (1) и истощения накачки в резонаторе ПГС (2) от падающей мощности накачки.

Максимум истощения составил ~55% при мощности накачки в 360 мВт, что превышает значение в режиме суперлюминесценции за один (45%) и два (50%) прохода.

Была также вычислена эффективность преобразования в холостую длину волны по поглощенной мощности накачки (рисунок 30). Как видно из приведенного графика, максимальная эффективность преобразования составила ~25% по поглощенной мощности, что соответствует квантовой эффективности преобразования ~90%.

Расходимость излучения на холостой и сигнальной длинах волн измерялась в дальней зоне на расстоянии 5 м. Излучение ПГС выводилось из резонатора с помощью сапфировой пластинки, которая располагалась вблизи плоского выходного зеркала резонатора. В качестве светофильтров использовалась германиевая пластинка для фильтрации излучения на холостой длине волны, для фильтрации излучения на сигнальной длине волны вместо германиевой пластинки использовались плоское плотное зеркало на 1064 нм и светофильтр ИКС-5. Детектор излучения крепился на двухкоординатный столик, который мог перемещаться по горизонтали (ось X в плоскости резонатора) и вертикали (ось Y перпендикулярно к плоскости резонатора) перпендикулярно направлению излучения. Измерялось пространственное распределение интенсивности пучка по осям OX, OY и по полученным показаниям вычислялась полная расходимость излучения. В случае измерения на сигнальной длине волны, в качестве детектора излучения использовался германиевый фотодиод ФД-2, а для измерения на холостой длине волны пироприемник МГ-30 (размер приемной площадки – 1 мм²). Данные фотоприемников регистрировались цифровым осциллографом и представлены на рисунок 31.

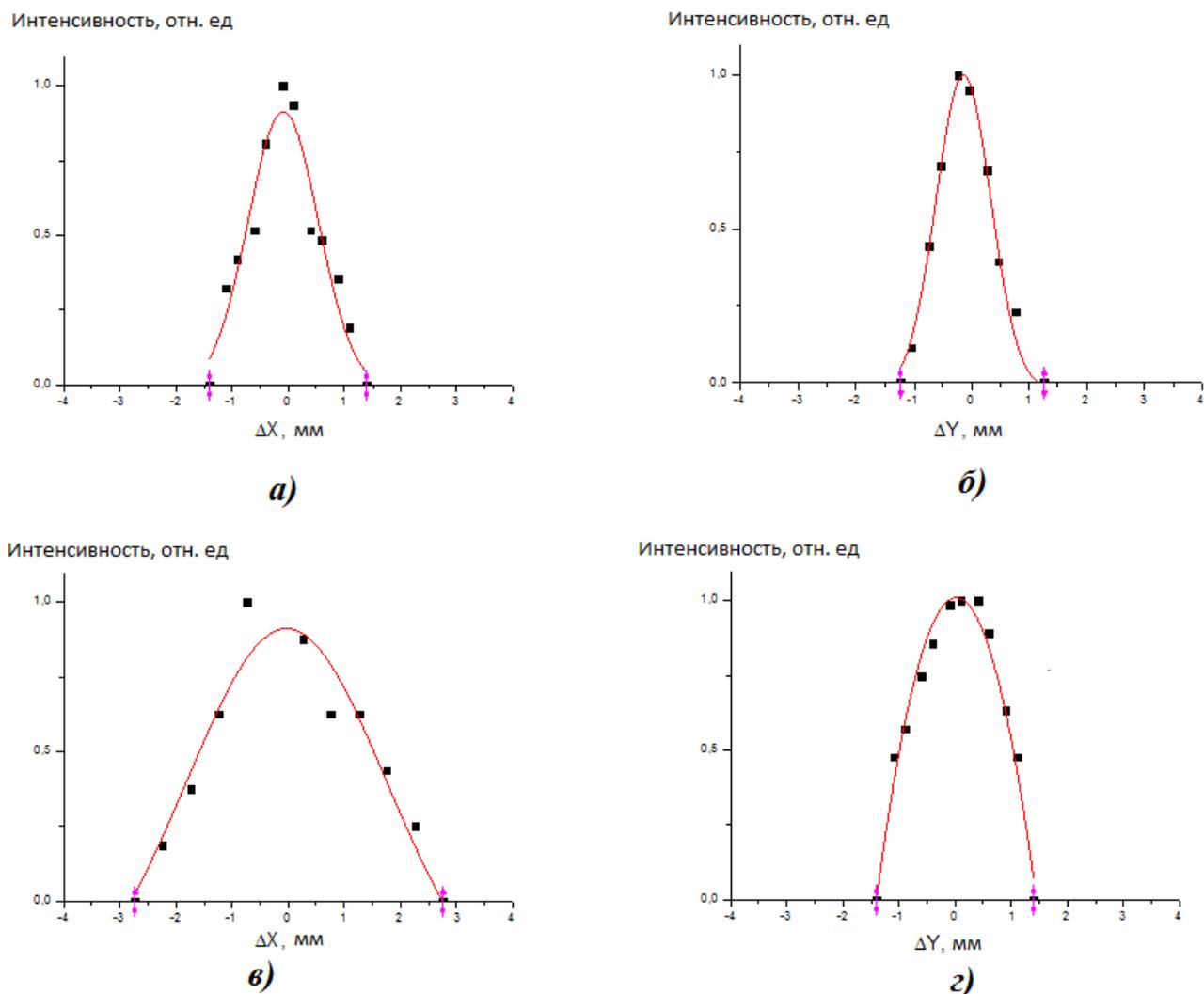


Рисунок 31. Поперечные распределения интенсивности выходного излучения на расстоянии 5 м: а) на сигнальной (1475 нм) длине волны по ОХ; б) на сигнальной длине волны по ОУ; в) на холостой (3820 нм) длине волны по ОХ; г) на холостой длине волны по ОУ.

Полная расходимость выходного излучения в дальней зоне дифракции по оси ОХ и ОУ на холостой длине волны составила $\Theta_X=6$ мрад и $\Theta_Y=4$ мрад, а на сигнальной – $\Theta_X=3$ мрад и $\Theta_Y=2,6$ мрад. Различие расходимостей по осям ОХ и ОУ вызвано астигматизмом резонатора лазера накачки [81]. Погрешности измерения расходимостей были на уровне $\pm 10\%$.

3.3 Анализ полученных результатов и выводы

Полученные данные позволяют провести сравнительный анализ параметрической суперлюминесценции и генерации в режиме однорезонаторного ПГС.

Из зависимостей на рисунках 27 и 30 видно, что наличие плотного резонатора на сигнальной длине волны по сравнению с режимом суперлюминесценции приводит к понижению порога генерации в $\sim 1,7$ раза (со 100 мВт до 60 мВт) и увеличению средней выходной мощности на холостой длине волны с ~ 30 мВт до ~ 60 мВт. Это связано с влиянием резонатора и накоплением энергии в резонаторе на сигнальной длине волны при синхронной накачке. Увеличение числа фотонов на сигнальной длине волны приводит к уменьшению пороговой мощности накачки и увеличению мощности холостой волны, поскольку в резонаторе происходит процесс генерации разностной частоты между этими волнами (сигнальной и накачки):

$$\left. \begin{aligned} h\omega_i &= h\omega_p - h\omega_s \\ k_p - k_s &= k_i + \frac{2\pi}{\Lambda} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Более низкая эффективность преобразования в режиме суперлюминесценции по сравнению с результатами, полученными в главе 2, объясняется более низким качеством используемого кристалла. Из рисунка 23 было получено, что максимальное отношение числа фотонов на сигнальной длине волны к числу фотонов на холостой длине волны составляет $\sim 1,3$, что свидетельствует о поглощении кристаллом ($\sim 20\%$) в области 3,8 мкм, как это уже отмечалось в предыдущей главе.

Значение порога генерации в режиме суперлюминесценции ~ 200 МВт/см² неплохо совпадает с расчетным значением ~ 160 МВт/см² [114]. При синхронной накачке однорезонаторного ПГС измеренный порог ~ 120 МВт/см² приблизительно на порядок выше рассчитанного по формулам из [115, 116], что связано, по-видимому, с особенностями точного экспериментального определения порога генерации.

Истощение накачки в режиме ПГС составило $\sim 55\%$, а в режиме суперлюминесценции $\sim 45\%$ для одного прохода и 50% для двукратного прохода. Отсюда следует, что не имеет смысла применять более длинные нелинейные кристаллы. Данный факт определяется насыщением коэффициента усиления уже за один проход при превышении порога генерации в 5 и более раз, что неплохо согласуется с теоретическим анализом в [86]. Поскольку максимальное превышение мощности накачки над пороговой в исследуемых режимах суперлюминесценции и однорезонаторного ПГС составляло 4 и 6,5, то истощение накачки по [86] должно было бы составлять 65 и 70%. Различие в результатах связано с тем, что в теоретической модели [86] рассматривалось одномодовое излучение накачки, а у нас использовался лазер в многомодовом режиме, при котором эффективность преобразования ниже [117]. Следует отметить, что анализ в [86] рассматривает случай параметрических генераторов с резонатором (одно- и двухрезонаторные схемы). Нами же наблюдается насыщение истощения накачки и в случае безрезонаторной параметрической генерации. Рассмотрим этот результат более детально, для этого обратимся к рисунку ##, на котором изображена каустика пучка излучения накачки в кристалле.

Диаметр перетяжки излучения накачки в кристалле составлял 160 мкм. Кристалл PPLN размещался таким образом, чтобы фокусное расстояние линзы 4 попадало чуть ближе к передней грани (расстояние между фокальной плоскостью и передней гранью PPLN составляло 2 см).

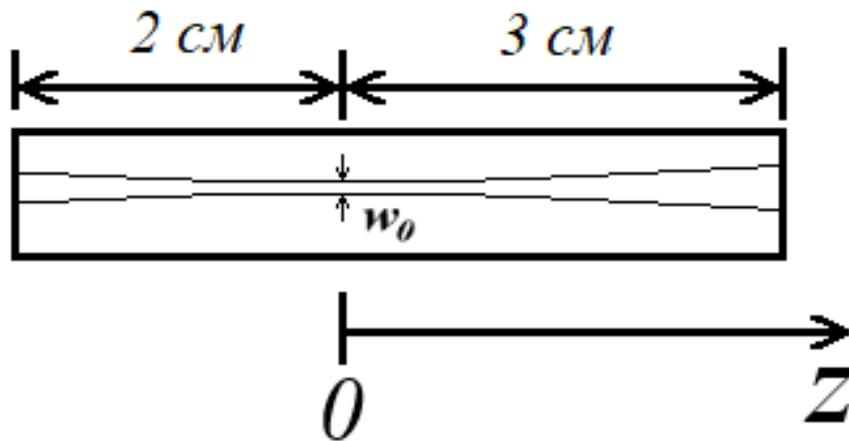


Рисунок 32. Изображение каустики пучка накачки в нелинейном кристалле.

Гауссов пучок по мере удаления от перетяжки расширяется по закону [118]:

$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]$$

Найдем теперь интенсивность, прошедшего через нелинейный кристалл, излучения накачки на выходной грани кристалла, учитывая, что пиковая мощность $P_H^{\text{пик}}$ определяется формулой (3.1):

$$I_{out} = \frac{P_H^{\text{пик}}}{\pi w^2(z = 3 \text{ см})} \approx 280 \text{ МВт/см}^2$$

Видно, что данное значение имеет один порядок с пороговой интенсивностью накачки, т.е. показано, что анализ в [86] справедлив и для случая безрезонаторного ПГС. Т.е. суперлюминесцентный параметрический генератор так же, как и резонаторные ПГС, может быть рассмотрен в качестве ограничителя мощности накачки [119].

Таким образом, в настоящей работе исследованы безрезонаторный ПГС в режиме суперлюминесценции и однорезонаторный ПГС с синхронной накачкой от Nd:YAG лазера с модуляцией добротности и синхронизацией мод методом СЗАОМ (сферическое зеркало – акустооптический модулятор) [80, 74]. Показано, что наличие резонатора приводит к увеличению эффективности преобразования в

холостую длину волны ~ 2 раза и уменьшению порога генерации не менее чем в 1,7 раза по сравнению с режимом суперлюминесценции.

В режиме суперлюминесценции в спектре выходного излучения присутствует мощная сигнальная волна и общая эффективность преобразования по поглощенной мощности довольно высока (60-80%). Общую эффективность преобразования можно существенно повысить за счет получения мощного перестраиваемого излучения в красной области спектра путем суммирования сигнальной волны с волной накачки. Для этого достаточно за исследуемым кристаллом PPLN поместить PPLN с другим периодом Λ (на суммарную частоту). Как было выше отмечено, эта перестраиваемая линия генерации будет иметь ту же расходимость излучения, что и ИК линии суперлюминесцентной ПГС. Очевидным преимуществом суперлюминесцентной ПГС является отсутствие резонатора и необходимости его согласования с резонатором накачки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты:

- 1) Был создан безрезонаторный суперлюминесцентный параметрический генератор с общей эффективностью преобразования по поглощенной мощности $\sim 80\%$ с накачкой от Nd:YAG лазера с СЗАОМ. Изучены его генерационные и спектральные характеристики. Максимальная общая выходная пиковая мощность составила 210 кВт.
- 2) Был создан однорезонаторный ПГС с синхронной накачкой от Nd:YAG лазера с СЗАОМ. Показано, что в многоимпульсном режиме генерации лазера накачки, ширина отстройки резонатора ПГС увеличивается в 10-20 раз.
- 3) Показано, что истощение излучения накачки в суперлюминесцентном и однорезонаторном режиме параметрической генерации остается на уровне $\sim 50\%$ и не зависит от длины кристалла при использовании в качестве лазера накачки Nd:YAG лазера с СЗАОМ.
- 4) В обоих режимах параметрической генерации объяснено происхождение линий в видимой области спектра. Линии на 392, 463, 822 нм в однорезонаторном режиме и линии на 416,2, 491,6, 516,6, 526,1, 526,9, 537,85, 538,4, 540,6 и 547,7 нм в режиме суперлюминесценции наблюдались впервые.
- 5) Показано, что резонатор на сигнальную длину волны для синхронной накачки влияет на параметры суперлюминесцентной генерации следующим образом – уменьшается порог генерации и увеличивается КПД

преобразования для холостой длины волны в ~ 2 раза. Ограничивается спектр выходного излучения до спектра холостой длины волны (средней ИК диапазон).

Таким образом, результаты работы демонстрируют, что при современном развитии лазерной техники уже можно проводить нелинейные преобразования частоты напрямую в режиме суперлюминесценции. Использование резонатора для таких преобразований стало менее критическим и определяющим для КПД преобразования. В аспекте увеличения областей перестройки преобразованного излучения, использование резонатора носит существенно ограничивающий характер.

Автор выражает благодарность Яковину Дмитрию Васильевичу, за неоценимую помощь в проведении экспериментов и полезное обсуждение результатов. Грибанову Алексею Валерьевичу за помощь в подготовке экспериментов. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Донину Валерию Ильичу, за неоценимую помощь в проведении экспериментов, анализе и обработке полученных результатов, написании статей, за поддержку и чуткое руководство на протяжении всей работы. Автор благодарит сотрудников лаборатории физики лазеров ИАиЭ СО РАН Микерена Сергея Львовича, Симанчука Андрея Эдуардовича, Угожаева Владимира Дмитриевича, Кучьянова Александра Сергеевича, Атутова Сергея Никитича, Чубакова Павла Александровича за полезное обсуждение результатов. Особую благодарность автор выражает своему научному руководителю на время защиты Сорокину Владимиру Алексеевичу за оказанную помощь в интерпретации результатов, оформлении текста диссертации и за полезные обсуждения. За техническую помощь автор выражает отдельную благодарность сотрудникам лаборатории спектроскопии конденсированных сред ИАиЭ СО РАН Пугачеву Алексею Марковичу и Окотрубу Константину Александровичу.

Приложение А

Описание Nd:YAG лазера с СЗАОМ

В качестве источника накачки для параметрических генераторов, описываемых в данной работе, использовался диодно-накачиваемый Nd:YAG лазер с модуляцией добротности и с синхронизацией мод, выполненный по методу СЗАОМ. Общая схема лазера показана на Рисунке 1 [73].

Выходные параметры лазера накачки:

Максимальная средняя выходная мощность – 2 Вт

Частота следования цуга импульсов – 1-2 кГц

Частота следования импульсов в цуге – 100 МГц

Поляризация – линейная

Длительность цуга импульсов на полувысоте – 150 нс

Длительность импульса – 45 пс

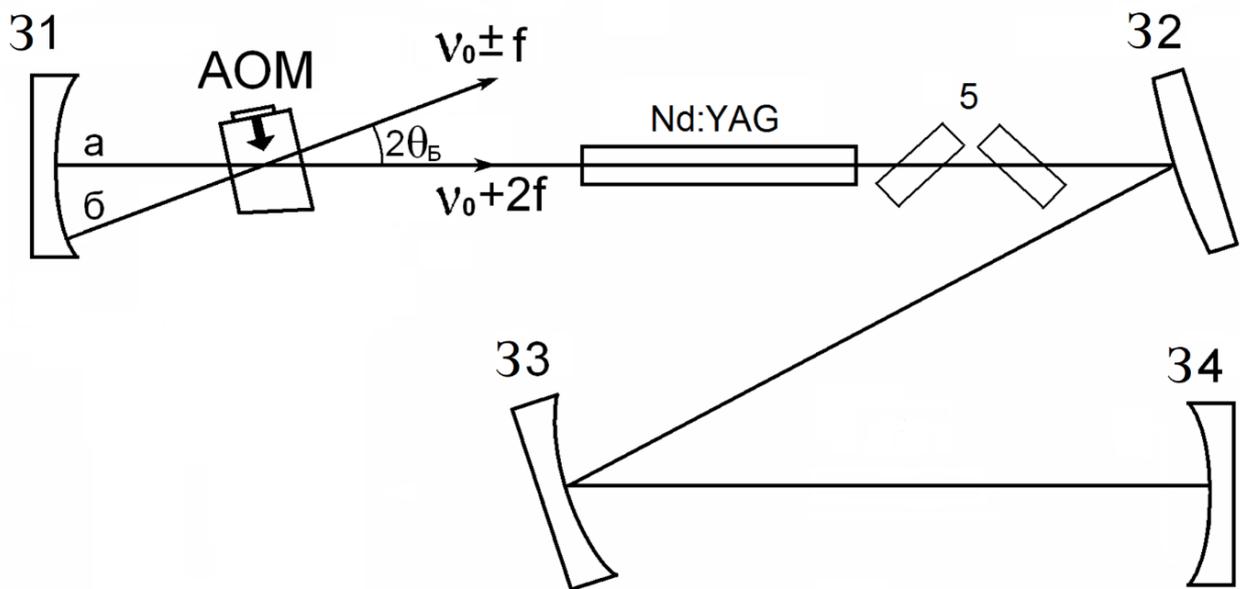


Рисунок 1. Оптическая схема Nd:YAG лазера с СЗАОМ. 31-34 – зеркала резонатора; 5 – поляризатор; АОМ – акустооптический модулятор [73].

В качестве активного элемента использовался кристалл Nd:YAG (массовая концентрация Nd составляла 1%) диаметром 2 мм и длиной 63 мм с поперечной накачкой тремя линейками лазерных диодов на длине волны 808 нм. Коэффициент отражения зеркал 32-34 на длине волны $\lambda = 1064$ нм составлял более 99,5%. Сферическое зеркало 31 имело пропускание $T = 20\%$ на $\lambda = 1064$ нм. Поляризатор 5 состоял из двух пластин из плавленного кварца, расположенных под углом Брюстера таким образом, чтобы обеспечивать линейную поляризацию необходимую для параметрической генерации на кристалле PPLN. Оптическая длина резонатора составляла $L = 1,5$ м.

Метод реализации режима QML СЗАОМ конструктивно состоит из сферического зеркала 31 резонатора и АОМа бегущей волны. Принцип работы метода СЗАОМ схематично иллюстрируется на Рисунке 2 [80].

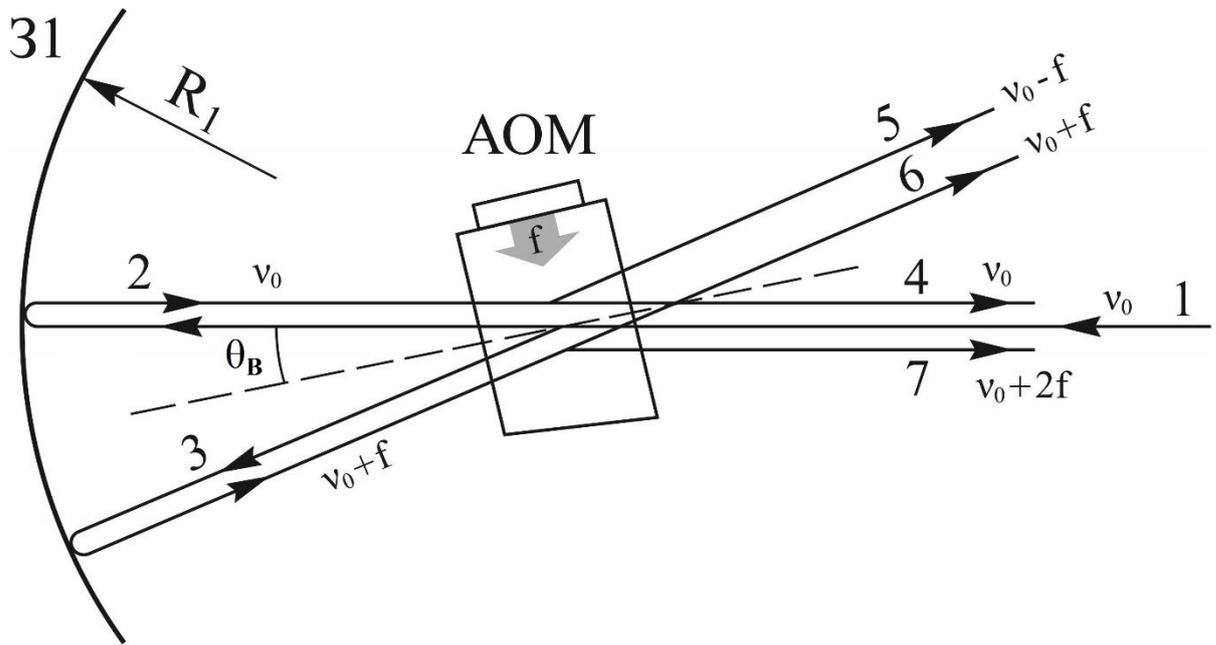


Рисунок 2. Схема работы СЗАОМ [80].

Для обеспечения режима QML модулятор располагался под углом Брэгга (θ_B) к оптической оси резонатора рядом с выходным сферическим зеркалом 31 так, чтобы оптическая длина пути между центром модулятора и отражающей поверхностью зеркала была равна радиусу кривизны R_1 этого зеркала. При подаче на пьезопреобразователь АОМа рабочей частоты $f = 50$ МГц, равной половине межмодового интервала лазера $c/2L = 2f$, в кристалле (светозвукопроводе) модулятора образуется бегущая звуковая волна, на которой происходит дифракция Брэгга лазерного излучения. Для определенности положим дифракционную эффективность АОМа в 50%, которая близка к оптимальной. При прохождении светового луча 1 (с частотой ν_0) через АОМ справа налево на зеркало падает два луча (лучи 2 и 3). Луч 2 (с частотой ν_0) проходит по оси резонатора, отражается от зеркала и возвращается в АОМ, где распадается на лучи 4 и 5 с частотами ν_0 и $\nu_0 - f$ соответственно. Луч 4 распространяется в обратном направлении по оси резонатора, луч 5 выходит из резонатора в обратном направлении под углом $2\theta_B$. Луч 3, испытывающий дифракцию Брэгга, падает на зеркало с частотой $\nu_0 + f$ и, отражаясь от сферической поверхности зеркала, попадает обратно в АОМ, где

распадается на луч 6 без изменения частоты $\nu_0 + f$, выходящий из резонатора в обратном направлении под углом $2\theta_B$, и на луч 7 после повторной дифракции в светозвукопроводе модулятора. Последний луч с частотой $(\nu_0 + 2f)$ распространяется в обратном направлении по оси резонатора. За счет этого луча достигается эффект фазовой синхронизации мод. Выходящие под углом $2\theta_B$ из резонатора лучи 5 и 6 с частотами $\nu_0 - f$ и $\nu_0 + f$ обеспечивают модулирующие добротность резонатора потери, и лазер работает в режиме модуляции добротности с частотой повторения импульсов, задаваемой частотой переключения модулятора ($\sim 1 \div 100$ кГц). При этом после отключения рабочей частоты звуковая волна в светозвукопроводе АОМа отключается за время $t = d_c/V_{зв} = 0,2\text{см}/5 \cdot 10^5 \text{ см/с} \approx 0,4$ мкс (где d_c – диаметр лазерного луча в светозвукопроводе, $V_{зв}$ – скорость звука). Длительность импульса генерации лазера в режиме Q-switch составляет ~ 150 нс, т. е. в течении t за счет луча повторной дифракции с частотой $(\nu_0 + 2f)$ в импульсе генерации одновременно происходит синхронизация мод. Вернемся к рассмотрению выходящих из резонатора лучей 5 и 6. Интенсивности этих лучей равны, а их сумма будет включать интерференционный член, содержащий составляющую на разностной частоте $2f$. Таким образом, суммарная интенсивность лучей 5 и 6 будет промодулирована с частотой $2f$. Следовательно, вносимые этими лучами потери можно рассматривать, как модулирующие потери, также обеспечивающие синхронизацию мод лазера.

На рисунке 3 представлена осциллограмма Q-switch импульса с синхронизацией мод. Измеренная нестабильность интенсивности Q-switch импульсов была не более $\pm 2\%$ (в области частот повторения 1-5 кГц).

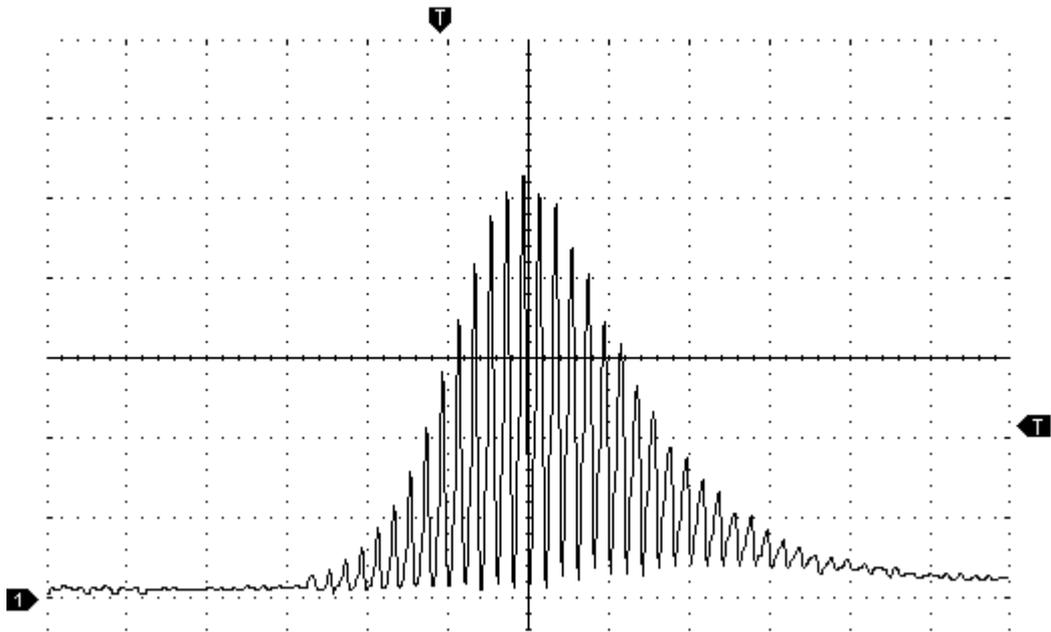


Рисунок 3. Импульс генерации Nd:YAG лазера ($\lambda = 1,064$ мкм) в режиме Q-switch с синхронизацией мод. Цена деления по оси абсцисс 50 нс [80].

На рисунке 4 изображены снимок временной развертки синхронизации мод, сделанный на стрик-камере АГАТ при разрешении 0,7 нс (шкала 10 нс/см) и их денситограмма [78]. На снимке отображена часть цуга импульсов синхронизации мод (полный вид цуга импульсов изображен на рисунке 3).

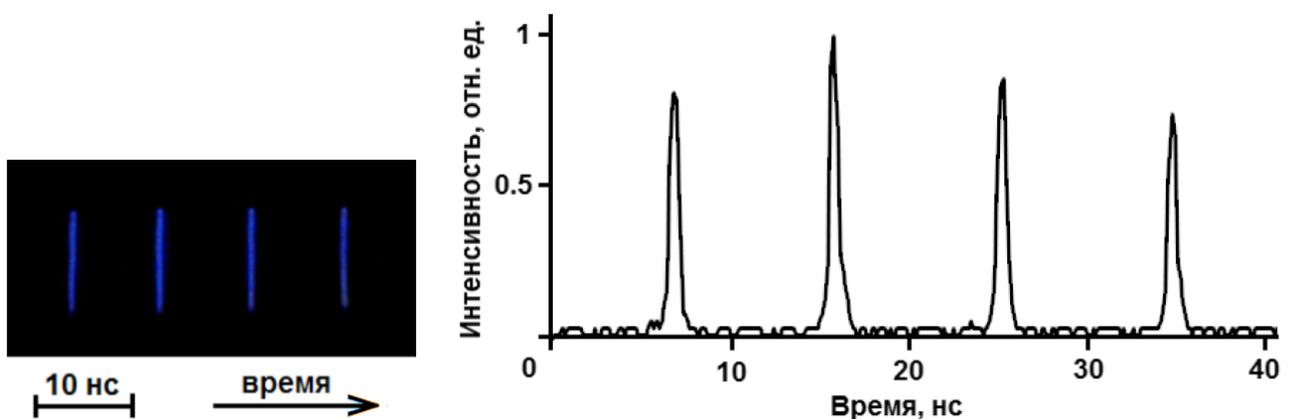


Рисунок 4. Временная развертка (шкала 10 нс/см) и денситограмма импульсов синхронизации мод [78].

Запуск стрик-камеры производился одиночными импульсами длительностью 2 нс с частотой повторения 8 Гц и был синхронизирован с моментом, когда импульс генерации попадал на вход стрик-камеры. За счет этого могло происходить выделение одиночного импульса синхронизации мод из всего цуга генерации.

При отстройке длины резонатора происходит отстройка частоты межмодовых биений продольных мод от удвоенной частоты бегущей звуковой волны модулятора ($2f = c/2L_0$). За счет этого возникает возбуждение поперечных мод и распад импульсов синхронизации мод. При точной настройке ($\Delta L = 0$) длины резонатора, когда частота межмодовых биений продольных мод совпадает с удвоенной частотой бегущей звуковой волны, импульс синхронизации мог распадаться 2, а при отстройке длины резонатора – на три и более. Ниже на рисунке 5 представлена статистика импульсов на снимках с экрана стрик-камеры АГАТ (шкала 0,34 нс/см, разрешение ~ 6 пс) в зависимости от значения отстройки длины резонатора. При каждом значении отстройки делалась серия из 80 снимков экрана стрик-камеры АГАТ, после чего высчитывалась доля снимков с соответствующим количеством изображенных импульсов и составлялась гистограмма.

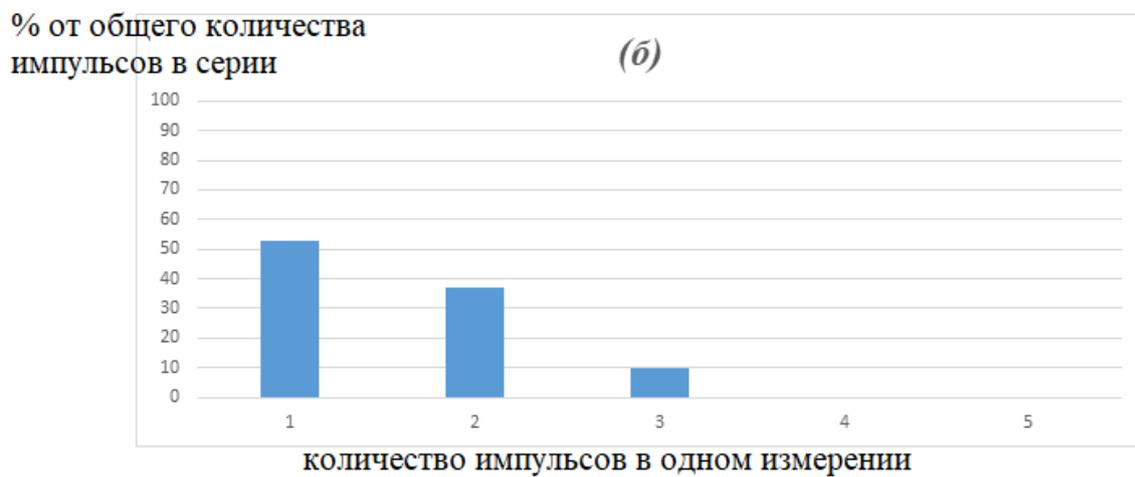


Рисунок 5. Статистика импульсов синхронизации мод. **(a)** – при $\Delta L = 0$; **(б)** – при $\Delta L = 300$ мкм; **(в)** – при $\Delta L = 700$ мкм [120].

Как видно из приведенных на рисунке 5 гистограмм, с увеличением отстройки доля одиночных импульсов снижается и лазер начинает работать не в одноимпульсном режиме синхронизации мод. Распад импульса синхронизации мол при точной настройке на два в 5% случаев связан со значением джиттера частоты акустооптического модулятора ± 300 Гц и с люфтом юстировочного столика выходного зеркала ± 2 мкм, с помощью которого производилась настройка длины резонатора. На рисунке 6 изображена зависимость количества моноимпульсов от значения отстройки длины резонатора [120].

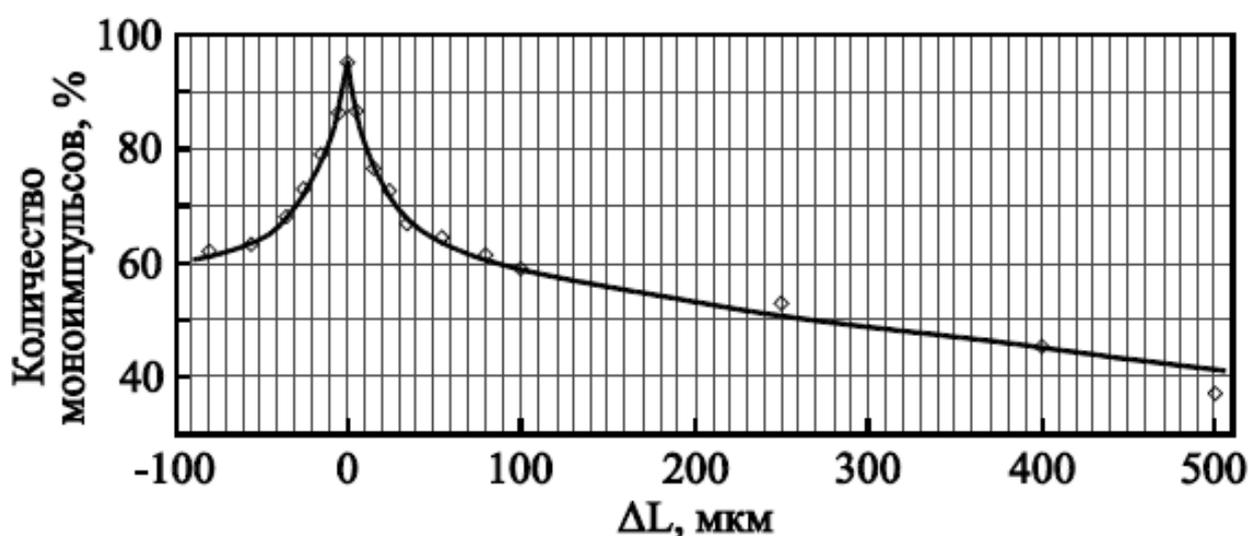


Рисунок 6. Зависимость количества моноимпульсов от отстройки длины резонатора [120].

Максимальная критичность к отстройке наблюдалась вблизи максимума – $\Delta L = 0$. При отстройке $\Delta L = \pm 5$ мкм, количество моноимпульсов в серии падало на 9%.

В диссертационной работе средняя мощность накачки не превышала 500 мВт, для того, чтобы не возникало разрушения кристаллов PPLN. Для увеличения мощности, необходимо использовать кристаллы с толщиной более 1 мм.

Список цитируемой литературы

1. Bonifacio R., Lugiato L. A. Cooperative radiation processes in two-level systems: Superfluorescence // *Physical Review A*. – 1975 – v. 11 – №5 – p. 1507-1521
2. Tonks L. Photon Avalanches from a Population Inversion // *Journal of Applied Physics* – 1964 – v. 35 – №4 – p. 1134-1141
3. Trenholme J. B. Fluorescence Amplification and Parasitic Oscillation Limitations in Disk Lasers // *NAVAL RESEARCH LABORATORY* – 1972 – p.57
4. Linford G. J., Peressini E. R., Sooy W. R., Spaeth M. L. Very Long Lasers // *Applied Optics* – 1974 – v. 13 – №2 – p. 379-390
5. Звелто О. Принципы лазеров // Москва: МИР – 1990 – с. 81-83
6. Harris S. E., M. K. Oshman, Byer R. L. Observation of tunable optical parametric fluorescence // *Physical Review Letters*. – 1967 – v. 18 – №18 – p. 732-734
7. Kleinman D. A. Theory of Optical Parametric Noise // *Physical Review*. – 1968 – v. 174 – №3 – p. 1027-1041
8. Akmanov A. G., Akhmanov S. A., Khokhlov R. V., Kovrigin A. I., Piskarskos A. S., Sukhorukov A. P. Parametric Interactions in Optics and Tunable Light Oscillators // *IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*. – 1968 – v. 4 – №11 – p. 828-831
9. Бурнейка К. П., Игнатавичус М. В., Кабелка В. И., Пискарскас А. С., Стабинис А. Ю. Параметрическая генерация сверхкоротких импульсов перестраиваемого по частоте излучения // *Письма в ЖЭТФ*. – 1972 – т. 16 – №7 – с. 365-367

10. Данелюс Р., Пискарскас А., Сируткайтис В. Пикосекундные параметрические генераторы света и их применение в абсорбционной спектроскопии быстропротекающих процессов // Квантовая электроника. – 1982 – т. 9 – №12 – с. 2491-2501
11. Водопьянов К. Л., Андреев Ю. А., Бхар Г. Ч. Параметрическая суперлюминесценция на кристалле $ZnGeP_2$ с температурной перестройкой и накачкой эрбиевым лазером // Квантовая электроника. – 1993 – т. 20 – №9 – с. 879-882
12. Бакулин А. А., Паращук Д. Ю., ван Лоосдрехт П. Х. М., Пшеничников М. С. Сверхбыстрая поляризационная спектроскопия фотоиндуцированных зерядов в полупроводниковом полимере // Квантовая электроника. – 2009 – т. 39 – №7 – с. 643-648
13. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика // Москва: ФИЗМАТЛИТ – 2004 – с. 282
14. Rabin H., Tang C. L. Quantum Electronics: A Treatise. Volume 1: Nonlinear optics. Part B // New York: Academic Press – 1975 – p. 599
15. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика // Москва: МИР – 1976 – с. 198
16. Онюшков Г. И., Фомичев А. А., Холодных А. И. Пикосекундный параметрический генератор света с накачкой излучением непрерывно накачиваемого лазера на АИГ: Nd^{3+} // Квантовая электроника. – 1983 – т. 10 – №8 – с. 1525-1526
17. Пискарскас А., Стабинис А., Умбрасас А., Янкаускас А. Параметрический чирп и 20-кратное сжатие импульсов квазинепрерывного пикосекундного ПГС // Квантовая электроника. – 1985 – т. 12 – №11 – с. 2335-2337
18. Пискарскас А., Смильгявичюс В., Умбрасас А., Юодишюс И. Параметрическая генерация пикосекундных световых импульсов в кристалле $LiNbO_3$ с частотой повторения до 10 кГц // Квантовая электроника. – 1986 – т. 13 – №6 – с. 1281-1284

19. McCarthy M. J., Hanna D. C. Continuous-wave mode-locked singly resonant optical parametric oscillator synchronously pumped by a laser-diode-pumped Nd:YLF laser // *Optics Letters*. – 1992 – v. 17 – №6 – p. 402-404
20. Ebrahimzadeh M., Hall G. J., Ferguson A. I. Singly resonant, all-solid-state, mode-locked LiB_3O_5 optical parametric oscillator tunable from 652 nm to 2.65 μm // *Optics Letters*. – 1992 – v. 17 – №9 – p. 652-654
21. Hall G. J., Ebrahimzadeh M., Robertson A., Malcolm G. P. A., Ferguson A. I. Synchronously pumped optical parametric oscillators using all-solid-state pump lasers // *Journal of the Optical Society of America B*. – 1993 – v. 10 – №11 – p. 2168-2179
22. Grasser Ch., Wang D., Beigang R., Wallenstein R. Singly resonant optical parametric oscillator of KTiOPO_4 synchronously pumped by the radiation of a continuous-wave mode-locked Nd:YLF laser // *Journal of the Optical Society of America B*. – 1993 – v. 10 – №11 – p. 2218-2221
23. Cheung E. C., Koch K., Moore G. T. Silver thiogallate, singly resonant optical parametric oscillator pumped by a continuous-wave mode-locked Nd:YAG laser // *Optics Letters*. – 1994 – v. 19 – №9 – p. 631-633
24. Maker G. T. Ti:sapphire laser pumped by a frequency-doubled diode-pumped Nd:YLF laser // *Optics Letters*. – 1990 – v. 15 – №7 – p. 375-377
25. French S., Ebrahimzadeh M., Sibbett W., Miller A. Picosecond LiB_3O_5 OPO Synchronously-Pumped by a 81 MHz Ti:Sapphire Laser // *OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers*. – 1995 – v. 24 – p. 167-171
26. Kafka J. D., Watts M. L., Pieterse J. W. Synchronously pumped optical parametric oscillators with LiB_3O_5 // *Journal of the Optical Society of America B*. – 1995 – v. 12 – №11 – p. 2147-2157
27. Magel G. A., Lim E. J., Fejer M. M., Byer R. L. Second harmonic generation in periodically-poled LiNbO_3 // *Optics News*. – 1989 – v. 15 – №12 – p. 20-21

28. Armstrong J. A., Bloembergen N., Ducuing J., Pershan P. S. Interactions between Light Waves in a Nonlinear Dielectric // *Physical Review* – 1962 – v. 127 – №6 – p. 1918-1939
29. Bloembergen N., Sievers A. J. Nonlinear Optical Properties of Periodic Lamellar Structures // *Applied Physics Letters* – 1970 – v. 17 – №11 – p. 483-485
30. Chen Q., Risk W. P. Periodic poling of KTiOPO_4 using an applied electric field // *Electronics Letters* – 1994 – v. 30 – №18 – p. 1516-1517
31. Zhu S., Zhu Y., Zhang Z., Shu H., Wang H., Hong J., Ge C. LiTaO_3 crystal periodically poled by applying an external pulsed field // *Journal of Applied Physics* – 1995 – v. 77 – №10 – p. 5481-5483
32. Kumar C., Das R., Samanta G. K., Ebrahimzadeh M. High-power, Broadband, Continuous-wave, Mid-infrared Optical Parametric Oscillator based on MgO:PPLN // *Conference on Lasers and Electro-Optics: Mid-IR Parametric Sources* – 2010 – CThH6.
33. Peng Y., Wei X., Wang W., Li D. High-power $3.8 \mu\text{m}$ tunable optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN // *Optics Communications* – 2010 – v. 283 – №20 – p.4032-4035
34. Wu B., Kong J., Shen Y. High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN -based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2 W at $3.82 \mu\text{m}$ // *Optics Letters*. – 2010 – v. 35 – №8 – p. 1118-1120
35. Iwakuni K., Okubo S., Tadanaga O., Inaba H., Onae A., Hong F.-L., Sasada H. Generation of a frequency comb spanning more than 3.6 octaves from ultraviolet to mid infrared // *Optics Letters*. – 2016 – v. 41 – №17 – p. 3980-3983
36. Bao C., Liao P., Kordts A., Karpov M., Pfeiffer M. H. P., Zhang L., Yan Y., Xie G., Cao Y., Almain A., Ziyadi M., Li L., Zhao Z., Mohajerin-Ariaei A., Wilkinson S. R., Tur M., Fejer M. M., Kippenberg T. J., Willner A. E. Demonstration of optical multicasting using Kerr frequency comb lines // *Optics Letters*. – 2016 – v. 41 – №16 – p. 3876-3879

37. Rolland A., Li P., Kuse N., Jiang J., Cassinerio M., Langrock C., Fermann M. E. Ultra-broadband dual-branch optical frequency comb with 10^{-18} instability // *Optica*. – 2018 – v. 5 – №9 – p. 1070-1077
38. Graf T., McConnell, Ferguson A. I., Bente E., Burns D., Dawson M. D. Synchronously pumped optical parametric oscillation in periodically poled lithium niobate with 1-W average output power // *Applied Optics* – 1999 – v. 38 – №15 – p. 3324-3328
39. Hoyt C. W., Sheik-Bahae M., Ebrahimzadeh M. High-power picosecond optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate // *Optics Letters*. – 2002 – v. 27 – №17 – p. 1543-1545
40. Kokabee O., Esteban-Martin A., Ebrahimzadeh M. Efficient, high-power, ytterbium-fiber-laser-pumped picosecond optical parametric oscillator // *Optics Letters*. – 2010 – v. 35 – №19 – p. 3210-3212
41. Chaintanya Kumar S., Ebrahimzadeh M. High-power, fiber-laser-pumped, picosecond optical parametric oscillator based on MgO:sPPLT // *Optics Express*. – 2011 – v. 19 – №27 – p. 26660-26665
42. Kimmelma O., Chaintanya Kumar S., Esteban-Martin A., Ebrahimzadeh M. Multi-gigahertz picosecond optical parametric oscillator pumped by 80-MHz Yb-fiber laser // *Optics Letters*. – 2013 – v. 38 – №22 – p. 4550-4554
43. Ebrahimzadeh M., Chaintanya Kumar S. Yb-Fiber-Laser-Pumped Ultrafast Frequency Conversion Sources From the Mid-Infrared to the Ultraviolet // *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*. – 2014 – v.20 – №5 – p. 7600519
44. Chaintanya Kumar S. Wei J., Debray J., Kemlin V., Boulanger B., Ishizuki H., Taira T., Ebrahimzadeh M. High-power, widely tunable, room-temperature picosecond optical parametric oscillator based on cylindrical 5%MgO:PPLN // *Optics Letters*. – 2015 – v. 40 – №16 – p. 3897 – 3900

45. Schaar J. E., Vodopyanov K. L., Fejer M. M. Intracavity terahertz-wave generation in a synchronously pumped optical parametric oscillator using quasi-phase-matched GaAs // *Optics Letters*. – 2007 – v. 32 – №10 – p. 1284 – 1286
46. Vodopyanov K. L., Avetisyan Yu. H. Optical terahertz wave generation in a planar GaAs waveguide // *Optics Letters*. – 2008 – v. 33 – №20 – p. 2314 – 2316
47. Ebrahimzadeh M. Optical Parametric Oscillators: New Horizons // *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference – 2017* – 978-1-5090-6736-7.
48. Carbajo S., Schulte J., Wu X., Ravi K., Schimpf D. N., Kartner F. X. Efficient narrowband terahertz generation in cryogenically cooled periodically poled lithium niobate // *Optics Letters*. – 2015 – v. 40 – №24 – p. 5762 – 5765
49. Данелюс Р., Пискарскас А., Сируткайтис В. Пикосекундные параметрические генераторы света и их применение в абсорбционной спектроскопии быстропротекающих процессов // *Квантовая электроника*. – 1982 – т. 9 – №12 – с. 2491-2501
50. Водопьянов К. Л., Воеводин В. Г., Грибенюков А. И., Кулевский Л. А. Высокоэффективная пикосекундная параметрическая суперлюминесценция в кристалле $ZnGeP_2$ в диапазоне 5-6,3 мкм // *Квантовая электроника*. – 1987 – т. 14 – №9 – с. 1815-1819
51. Krause H.-J., Daum W. Efficient parametric generation of high-power coherent picosecond pulses in lithium borate from 0.405 to 2.4 μm // *Applied Physics Letters* – 1992 – v. 60 – №18 – p. 2180-2182
52. Danielius R., Piskarskas A., Podenas D., Di Trapani P., Varanavicius A. High power, subpicosecond, 750-1770 nm tunable pulses from travelling wave parametric generator // *Optics Communications* – 1992 – v. 87 – №1 – p. 23 – 27
53. Zayhowski J. J. Periodically poled lithium niobate optical parametric amplifiers pumped by high-power passively Q-switched microchip lasers // *Optics Letters*. – 1997 – v. 22 – №3 – p. 169 – 171

54. Chiang A. C., Huang Y. C., Fang Y. W., Chen Y. H. Compact, 220-ps visible laser employing single-pass, cascaded frequency conversion in monolithic periodically poled lithium niobate // *Optics Letters*. – 2001 – v. 26 – №2 – p. 66 – 68
55. Herault E., Forget S., Lucas-Leclin G., Georges P. Continuously tunable visible compact laser source using optical parametric generation in microlaser-pumped periodically poled lithium niobate // *Advanced Solid-State Photonics*. – 2003 – p.339
56. Hore D. K., King J. L., Moore F. G., Alavi D. S., Hamamoto M. Y., Richmond G. L. Ti:Sapphire-Based Picosecond Visible-Infrared Sum-Frequency Spectroscopy from 900-3100 cm^{-1} // *Applied Spectroscopy*. – 2004 – v. 58 – №12 – p. 1377-1384
57. Maruyama M., Nakajima H. Optical damage resistant 70-mm-long periodically poled Mg doped stoichiometric LiNbO_3 for low-threshold optical parametric generation // *Conference on Lasers and Electro-Optics: Periodically Poled Materials* – 2006 – CMB1
58. Nittmann M., Bauer T., L'huillier J. A., Lewis of Menar P. V., Bartschke J., Anstett G., Raab M. Powerful high repetition rate nanosecond optical parametric generator in MgO:PPLN tunable from 3.5 μm to 4.6 μm // *Conference on Lasers and Electro-Optics: Poster Session II* – 2006 – JWA44
59. Levenius M., Conforti M., Baronio F., Pasiskevicius V., Laurell F., Gallo K. Quadratic Cascading Effects in Broadband Optical Parametric Generation // *Advanced Solid-State Photonics* – 2012 – AT2A.3
60. Yue J., Tamada T., Kamata M., Zheng L., Ishizuki H., Taira T. >2 MW peak power at 1560 nm from micro giant-pulse laser/amplifier with PPMgLN OPG // *Laser Congress* – 2016 – ATh4A.8
61. Novak O., Vylecka M., Roskot L., Smrz M., Endo A., Mocek T. High-power mid-IR picosecond pulses tunable between 2.2 and 2.4 μm // *The European Conference on Lasers and Electro-Optics* – 2017 – CF_4_3

62. Ishizuki H., Taira T. Efficient optical parametric generation pumped by a sub-nanosecond MOPA source // High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress – 2018 – MW1C.1
63. Anstett G., Ruebel F., L’huiller J. A. MIR-generation with short and ultra short laser pulses using frequency conversion in periodically poled Lithium niobate // Proceedings SPIE – 2009 – v. 7483 – p. 74830A
64. Lim H.-H., Prakash O., Kim B.-J., Pandiyan K., Cha M., Rhee B. K. Ultra-broadband optical parametric generation and simultaneous RGB generation in periodically poled lithium niobate // Optics Express. – 2007 – v. 15 – №26 – p. 18294-18299
65. Lin S.-T., Chang G.-W., Huang Y.-C. Monolithic PPLN Bragg Q-switch and Wavelength Converter // Japan Society of Applied Physics-Optical Society of America Joint Symposia – 2013 – 18a_D5_7
66. Lambert-Girard S., Allard M., Piche M., Babin F. Broadband and tunable optical parametric generator for remote detection of gas molecules in the short and mid-infrared // Applied Optics – 2015 – v. 54 – №10 – p. 2594-2605
67. Ciriolo A. G., Negro M., Devetta M., Cinquanta E., Facciala D., Pusala A., De Silvestri S., Stagira S., Vozzi C. Optical Parametric Amplification Techniques for the Generation of High-Energy Few-Optical-Cycles IR Pulses for Strong Field Applications // Applied Sciences – 2017 – v. 7 – №3 – p.265.1-265.28
68. Shibata Y., Nagasawa C., Abo M. Development of 1.6 μm DIAL using an OPG/OPA transmitter for measuring atmospheric CO₂ concentration profiles // Applied Optics – 2017 – v. 56 – №4 – p. 1194-1201
69. Fan J., Chen W., Gu C., Song Y., Chai L., Wang C., Hu M. Noise characteristics of high power fiber-laser pumped femtosecond optical parametric generation // Optics Express. – 2017 – v. 25 – №20 – p. 24594-24603
70. Донин В. И., Грибанов А. В., Хомутов А. Н., Яковин Д. В., Яковин М. Д. Синхронизация мод нелинейным кристаллом в зеленом Q-switch Nd:YAG лазере с диодной накачкой // Труды молодежной школы-конференции с

междун. участием «Лазеры и лазерные технологии», посвящен. 50-летию первого в мире лазера, 22-27 ноября 2010, г.Томск, с.51-52

- 71.Донин В. И., Никонов А. В., Яковин Д. В., Грибанов А. В. Мощный одномодовый диодно-накачиваемый Nd:YAG–лазер с излучением гармоник 0,532мкм и 0,355 мкм для прецизионной обработки материалов // Доклады IV Всеросс. конференции «Взаимодействие высококонцентрирован.потоков с материалами в перспективных технолог. и медицине», 22-25 марта 2011, г.Новосибирск, с.70-73
- 72.Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В. Лазер с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод // Патент РФ №2478242 от 27.03.2013
- 73.Donin V. I., Yakovin D. V., Gribanov A. V. Diode-pumped green Nd:YAG laser with Q-switch and mode locking // Optics Letters. – 2012 – v. 37 – №3 – p. 338-340
- 74.Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В. Модуляция добротности и синхронизация мод в диодно-накачиваемом Nd:YAG лазере с удвоением частоты // Квантовая электроника. – 2012 – т. 42 – №2 – с. 107-110
- 75.Donin V. I., Yakovin D. V., Gribanov A. V. // In book: Nd YAG Laser, INTECH Open Access Publisher. – 2012 – p. 97-110
- 76.Донин В. И., Трубецкой А. В., Яковин Д. В., Грибанов А. В., Затолокин В. Н. Лазер с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод // Патент РФ №2606348 от 10.01.2017
- 77.Донин В. И., Грибанов А. В., Яковин Д. В. Самоорганизация режима Q-switch с одновременной синхронизацией мод в диодно-накачиваемом Nd:YAG-лазере // Письма в ЖЭТФ. – 2015 – т. 101 – №12 – с. 881-884
- 78.Донин В. И., Грибанов А. В., Яковин Д. В. Структура пикосекундных импульсов генерации в диодно-накачиваемом Nd:YAG-лазере с модуляцией добротности и синхронизацией мод // Квантовая электроника. – 2015 – т. 45 – №12 – с. 1117-1120

- 79.Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В., Яковин М. Д. Новый метод управления длительностью импульсов генерации в твердотельных лазерах // Труды XXV Международной Конференции "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте", г. Новороссийск, ГМУ имени Ф. Ф. Ушакова, 4-9 сентября 2017г, с.13
- 80.Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В., Яковин М. Д. Новый метод модуляции добротности резонатора и синхронизации мод в твердотельных лазерах // Оптический журнал – 2018 – т. 85 – №4 –с. 8-11
- 81.Донин В. И., Грибанов А. В., Яковин Д. В. Режимы генерации Nd:YAG-лазера с синхронизацией мод акустооптическим модулятором бегущей волны и сферическим зеркалом // Квантовая электроника – 2018 – т. 48 – №8 – с. 699-702
- 82.Корниенко Л. С., Кравцов Н. В., Наний О. Е., Шелаев А. Н. Твердотельный кольцевой лазер с обратной дифракционной акустооптической связью мод// Квантовая электроника – 1981 – т. 8 – №12 – с. 2552-2555
- 83.Кравцов Н. В. и др. Синхронизация мод лазера с помощью модулятора на бегущей акустической волне // Письма в ЖТФ. – 1983. – Т. 9. – №. 7. – С. 440-443
- 84.Bourdet G. L. et al. Active mode locking of a high pressure CW waveguide CO₂ laser // Applied Physics B. – 1987. – V. 44. – №. 2. – P. 107-110
- 85.Надточеев В. Е., Наний О. Е. Использование бегущих акустических волн для синхронизации мод в лазерах // Квантовая электроника. – 1989. – Т. 16. – №. 11. – С. 2231-2234
- 86.Bjorkholm J. E. Some effects of spatially nonuniform pumping in pulsed optical parametric oscillators // IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS. – 1971 – v. 7 – №3 – p. 109-118
- 87.Donin V. I., Yakovin D. V., Griбанov A. V., Yakovin M. D. New Method of Control of the Duration of Output Pulses in Solid-state Lasers // International

- Conference on Semiconductors Optoelectronics and Nanostructures, Invited Talks (Day1), p. 27, August 20-21, 2018, Paris, France.
88. Donin V. I., Yakovin D. V., Yakovin M. D. Parametric generation in PPLN crystal with pumping by a Q-switched mode locked Nd:YAG laser: Comparison of super luminescent and singly-resonant regimes // International Conference on Laser, Optics and Photonics, p. 13, August 23-24, 2018, Paris, France
89. Nikogosyan D. N. Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey // Springer – 2005 – p. 42
90. Тарасов К. И. Спектральные приборы // Издательство “Машиностроение” – 1968 – с. 33-39
91. Лебедева В. В. Техника оптической спектроскопии // Издательство Московского Университета – 1977 – с. 175-182
92. Furukawa Y., Kitamura K., Alexandrovski A., Route R. K., Fejer M. M. Green-induced infrared absorption in MgO doped LiNbO₃ // Applied Physics Letters – 2001 – v. 78 – №14 – p. 1970-1972
93. Hirohashi J., Pasiskevicius V., Wang S., Laurell F. Picosecond blue-light-induced infrared absorption in single-domain and periodically poled ferroelectrics // Journal of Applied Physics – 2007 – v. 101 – №3 – p. 033105
94. Waasem N., Markosyan A., Fejer M. M., Buse K. Green-induced blue absorption in MgO-doped lithium niobate crystals // Optics Letters. – 2013 – v. 38 – №16 – p. 2953-2956
95. Sun J., Xu C. Green-induced infrared absorption in annealed proton-exchanged MgO:LiNbO₃ waveguides // Journal of the Optical Society of America B. – 2014 – v. 31 – №11 – p. 2779-2785
96. Harris S. E. Tunable optical parametric oscillators // Proceedings of the IEEE – 1969 – v. 57 – №12 – p.2096-2113
97. McCarthy M. J., Hanna D. C. All-solid-state synchronously pumped optical parametric oscillator // Journal of the Optical Society of America B. – 1993 – v. 10 – №11 – p. 2180-2190

98. Becker M. F., Kuizenga D. J., Phillion D. W., Siegman A. E. Analytic expressions for ultrashort pulse generation in mode-locked optical parametric oscillators // *Journal of Applied Physics* – 1974 – v. 45 – №9 – p. 3996-4005
99. Laporte C., Dherbecourt J.-B., Melkonian J.-M., Raybaut M., Drag C., Godard A. Analysis of cavity-length detuning in diffraction-grating narrowed picosecond optical parametric oscillators // *Journal of the Optical Society of America B.* – 2014 – v. 31 – №5 – p. 1026-1034
100. Tian W., Wang Z., Zhu J., Wei Z. Harmonically pumped femtosecond optical parametric oscillator with multi-gigahertz repetition rate // *Optics Express.* – 2016 – v. 24 – №26 – p. 29814-29821
101. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика // Москва: ФИЗМАТЛИТ – 2004 – с. 12
102. Bosenberg W. R., Alexander J. I., Myers L. E., Wallace R. W. 2.5-W, continuous-wave, 629-nm solid-state laser source // *Optics Letters.* – 1998 – v. 23 – №3 – p. 207-209
103. Abu-Safe H. H. Investigation of multiconversion processes in periodically poled LiNbO₃-based optical parametric oscillators // *Applied Optics* – 2005 – v. 44 – №34 – p. 7458-7466
104. Hirohashi J., Tago T., Nakamura O., Miyamoto A., Furukawa Y. Characterization of GRIIRA properties in LiNbO₃ and LiTaO₃ with different compositions and doping // *Proceedings SPIE* – 2008 – v. 6875 – p. 687516
105. Rabin H., Tang C. L. *Quantum Electronics: A Treatise. Volume 1: Nonlinear optics. Part B* // New York: Academic Press – 1975 – p. 629
106. Li S., Ju P., Liu Y., Jiang X., Ni R., Zhao G., Lv X., Zhu S. Efficiency-enhanced picosecond mid-infrared optical parametric downconversion based on a cascaded optical superlattice. // *Chinese Optics Letters* – 2016 – v. 14 – №4 – p.041402

107. Boyko A. A., Marchev G. M., Petrov V., Pasiskevicius V., Kolker D. B., Zukauskas A., Kostyukova N. Y. // *Optics Express*. – 2015 – v. 23 – №26 – p. 33460-33465
108. Smith A. V. *Crystal nonlinear optics: with SNLO examples* // Albuquerque: AS-Photonics – 2015 – p. 445
109. Hirohashi J., Pasiskevicius V., Wang S., Laurell F. Picosecond blue-light-induced infrared absorption in single-domain and periodically poled ferroelectrics // *Journal of Applied Physics* – 2007 – v. 101 – №3 – p. 033105
110. Сушинский М. М. Резонансное неупругое рассеяние света в кристаллах // *Успехи Физических Наук* – 1988 – т.154 – №10 – с.353-379
111. Margueron S., Bartasyte A., Glazer A. M., Simon E., Hlinka J., Gregora I., Gleize J. Resolved E-symmetry zone-centre phonons in LiTaO₃ and LiNbO₃ // *Journal of Applied Physics* – 1964 – v. 35 – №4 – p. 1134-1141
112. Sudmeyer T., Aus der Au J., Paschotta R., Keller U., Smith P. G. R., Ross G. W., Hanna D. C. Novel ultrafast parametric systems: high repetition rate single-pass OPG and fibre-feedback OPO // *Journal of Physics D: Applied Physics* – 2001 – v. 34 – №16 – p. 2433-2439
113. Zhang X., Wang Y., Ju Y., Yao B., Zhang Y. Low-threshold mid-IR MgO:PPLN optical parametric generation with high reflectivity mirror for signal wavelength // *Chinese Optics Letters* – 2008 – v. 6 – №3 – p.204-206
114. Agnesi A., Piccinini E., Reali G. C., Solcia C. All-solid-state picosecond tunable source of near-infrared radiation // *Optics Letters*. – 1997 – v. 22 – №18 – p. 1415-1417
115. Guha S., Wu F.-J., Falk J. The effects of focusing on parametric oscillation // *IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*. – 1982 – v. 18 – №5 – p. 907-912
116. Cheung E. C., Liu J. M. Theory of a synchronously pumped optical parametric oscillator in steady-state operation // *Journal of the Optical Society of America B*. – 1990 – v. 7 – №8 – p. 1385-1401

117. Marshall L. R., Kaz A., Aytur O. Multimode pumping of optical parametric oscillators // IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS. – 1996 – v. 32 – №2 – p. 177-182
118. Kogelnik H., Li T. Laser Beams and Resonators // Proceedings of the IEEE. – 1966 – v. 54 – №10 – p. 1312-1329
119. Siegman A. E. Nonlinear Optical Effects: An Optical Power Limiter // Applied Optics – 1962 – v. 1 – №6 – p. 739-744
120. Грибанов А. В. НОВЫЙ МЕТОД МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ РЕЗОНАТОРА С ОДНОВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД В ДИОДНО-НАКАЧИВАЕМОМ Nd:YAG-ЛАЗЕРЕ // Кандидатская диссертация ИАиЭ СО РАН – Новосибирск – 2016 – с. 59

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в журналах ВАК:

1. Донин В. И., Яковин Д. В., Яковин М. Д. Параметрический генератор света среднего ИК диапазона с синхронной накачкой от Nd:YAG лазера с модуляцией добротности и синхронизацией мод // Квантовая электроника. – 2016 – т. 46 – №12 – с. 601-605
2. Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В., Яковин М. Д. Новый метод модуляции добротности резонатора и синхронизации мод в твердотельных лазерах // Оптический журнал – 2018 – т. 85 – №4 – с. 8-11
3. Donin V. I., Yakovin D.V. Yakovin M.D. Gribanov A.V. Superluminescent high-efficient parametric generation in PPLN crystal with pumping by a Q-switched mode locked Nd:YAG laser // Laser Physics Letters – 2018 – v. 15 – №3 – p. 035005
4. Донин В. И., Яковин М. Д., Яковин Д. В., Грибанов А. В. Параметрическая генерация в кристалле PPLN при накачке Nd:YAG лазером с модуляцией добротности и синхронизацией мод: сравнение суперлюминесцентного и

однорезонаторного режимов // Квантовая электроника. – 2018 – т. 48 – №10 – с. 936-940

Публикации в тезисах и трудах конференций:

5. Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В., Яковин М. Д. Новый метод управления длительностью импульсов генерации в твердотельных лазерах // Труды XXV Международной Конференции "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте", г. Новороссийск, ГМУ имени Ф. Ф. Ушакова, 4-9 сентября 2017г, с.13
6. Donin V. I., Yakovin D. V., Gribanov A. V., Yakovin M. D. New Method of Control of the Duration of Output Pulses in Solid-state Lasers // International Conference on Semiconductors Optoelectronics and Nanostructures, Invited Talks (Day1), p. 27, August 20-21, 2018, Paris, France.
7. Donin V. I., Yakovin D. V., Yakovin M. D. Parametric generation in PPLN crystal with pumping by a Q-switched mode locked Nd:YAG laser: Comparison of super luminescent and singly-resonant regimes // International Conference on Laser, Optics and Photonics, p. 13, August 23-24, 2018, Paris, France