

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

Направление 03.03.03 «Радиофизика»
Профиль «Фундаментальная радиофизика»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ
СВЕТА СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА ZGP**

«К защите допущен»:

Зав. кафедрой общей физики,
профессор, д.ф.–м.н.

_____ Бакунов М.И.

Научный руководитель,
в.н.с ИПФ РАН, д.ф.–м.н.

_____ Антипов О.Л.

Рецензент,
доцент, к.ф.-м.н.

_____ Шарков В. В.

Консультант по технике безопасности
доцент, к.ф.–м.н.

_____ Курин В.В.

Студент 4-го курса

_____ Завьялов А.Г.

Нижегород
2021 год

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА СВЕТА	4
2. ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО МОЩНЫМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРАМ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА ZGP.....	11
3. МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ ПГС.....	12
4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ ПГС	17
4.1 ПРОГРАММА «Zemax»	17
4.2 ПРОГРАММА «reZonator»	19
4.3. РАСЧЁТ РЕЗОНАТОРОВ	21
5. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТА	31
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	33
7. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	34
8. ПРИЛОЖЕНИЕ 1	37
9. ПРИЛОЖЕНИЕ 2	39
10. ПРИЛОЖЕНИЕ 3	40
11. ПРИЛОЖЕНИЕ 4	56

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие бурно развивается такое направление в лазерной физике как параметрические генераторы света (ПГС) на основе нелинейных кристаллов. Это направление перспективно тем, что благодаря нелинейным эффектам, происходящим в кристалле, мы можем расширить спектральный диапазон лазерного излучения. Благодаря тому, что ПГС имеет широкий диапазон перестройки длины волны (например, от 2 до 9 мкм в среднем ИК диапазоне), лазеры, основанные на таком эффекте, имеют большой спектр применений: медицина, зондирование загрязнений в атмосфере, обработка материалов, дистанционный контроль химического процесса.

За последние годы достигнуты заметные успехи на пути создания мощных ПГС среднего ИК диапазона. Наиболее впечатляющие результаты достигнуты на пути создания ПГС среднего ИК диапазона на основе кристалла фосфида германия цинка (далее ZGP). Настоящая дипломная работа направлена на оптимизацию резонатора ПГС на основе кристалла ZGP с целью повышения мощности и эффективности преобразования излучения в среднем ИК диапазоне – на длинах волн 3,5...5 мкм.

Для описания резонатора ПГС на ZGP используются такие программы, как Zemax и reZonator, которые помогают узнать, какие моды распространяются в резонаторе и как ведет себя световой пучок в разных участках резонатора.

1. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА СВЕТА

Параметрический генератор света (ПГС) – это нелинейный эффект, основанный на преобразовании частоты накачки в сигнальные и холостые частоты или преобразовании одной частоты из двух волн накачки. В нашей работе реализуется первый случай, когда из кванта накачки одновременно формируется два кванта: квант сигнальной волны и квант холостой волны. При этом выполняется закон сохранения энергии:

$$h\nu_p = h\nu_s + h\nu_{id} \quad (1.1)$$

где ν_p – частота волны накачки;
 ν_s – частота сигнальной волны;
 ν_{id} – частота холостой волны.

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_{id}} \quad (1.2)$$

где λ_p – волна накачки;
 λ_s – сигнальная волна;
 λ_{id} – холостая волна.

Это условие частотного синхронизма. Так же у нас должен выполняться фазовый синхронизм, это условие наиболее эффективной реализации способности нелинейной среды преобразовывать частоту:

$$\frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s} + \frac{n_{id}}{\lambda_{id}} \quad (1.3)$$

где λ_p – волна накачки;
 λ_s – сигнальная волна;
 λ_{id} – холостая волна;
 n_p – показатель преломления для волны накачки;
 n_s – показатель преломления для сигнальной волны;
 n_{id} – показатель преломления для холостой волны;

При повороте кристалла или его нагреве условие фазового синхронизма выполняется для другой пары частот, таким образом,

производится плавная перестройка частоты. Так как у нас сохраняется энергия при прохождении через нелинейную систему, энергия холостой и сигнальной волны меньше чем энергия волны накачки, а также энергия холостой волны меньше чем сигнальной, так как длина волны сигнальной волны меньше, чем холостой. При прохождении через резонатор энергия холостой и сигнальной волны возрастает, так как в кристалле эти волны многократно проходят через кристалл, тем самым усиливая излучение. В системе ПГС используют резонаторы 2 типов: однорезонаторные и двухрезонаторные. В однорезонаторной системе зеркала настроены на одну длину волны: холостую или сигнальную, в то время как в двухрезонаторной на 2 волны. Отличием одного от другого также заключается в том, что двухрезонаторный ПГС имеет меньший порог, чем однорезонаторный. Это подтверждает формулой (1.4), в которой величина отражения зеркала R_1 одинакова для двух резонаторов:

$$\left[\frac{(g_{\text{пор}}L)_{\text{однорез}}}{(g_{\text{пор}}L)_{\text{двухрез}}} \right]^2 = \frac{2}{1-R_2}, \quad (1.4)$$

где $g_{\text{пор}}$ – пороговое условие для появления генерации ПГС;

L – длина кристалла;

R_2 – коэффициент отражения зеркала.

Однако стабильность однорезонаторного ПГС выше, чем стабильность двухрезонаторного. Параметрическая генерация имеет место, если усиление сигнальной и холостой волн превосходит потери за один проход в резонаторе, т.е. добротность резонатора должна быть большой. Большая ширина спектральной линии накачки или плохое качество пучка излучения приводят к росту порога и снижению выходной мощности ПГС.

Существуют разные механизмы перестройки частоты параметрического генератора света. Один из них – это изменение ориентации кристалла. Так как у нас идёт накачка необыкновенной волной, а кристалл ZGP имеет анизотропию, то в нем распространяются обыкновенные волны: холостая и сигнальная, для которых выполняется условие синхронизма:

$$\omega_3 n_3 = \omega_1 n_1 + \omega_2 n_2$$

При фиксированном угле θ_0 – формула переписывается в виде:

$$\omega_3 n_{30}(\theta_0) = \omega_1 n_{10} + \omega_2 n_{20}$$

Теперь если мы повернём кристалл на малый угол $\Delta\theta_0$ – при этом изменится показатель преломления n_3 , в силу анизотропии кристалла. Тогда изменятся показатели преломления для сигнальной и холостой волн и их частота:

$$n_{30} \rightarrow n_{30} + \Delta n_3, n_{10} \rightarrow n_{10} + \Delta n_1, n_{20} \rightarrow n_{20} + \Delta n_2$$

$$\omega_{10} \rightarrow \omega_{10} + \Delta\omega_1, \omega_{20} \rightarrow \omega_{20} + \Delta\omega_2, \Delta\omega_1 = -\Delta\omega_2$$

Условие синхронизма должно выполняться для новых частот, поэтому перепишем его:

$$\omega_3(n_{30} + \Delta n_3) = (\omega_{10} + \Delta\omega_1)(n_{10} + \Delta n_1) + (\omega_{20} - \Delta\omega_1)(n_{20} + \Delta n_2)$$

Пренебрегая членами малого порядка, найдём $\Delta\omega_1$:

$$\Delta\omega_1 = \frac{\omega_3 \Delta n_3 - \omega_{10} \Delta n_1 - \omega_{20} \Delta n_2}{n_{10} - n_{20}} \quad (1.5)$$

Поскольку накачка осуществляется необыкновенной волной, то показатель преломления для неё зависит от угла ориентации кристалла. А показатели преломления холостой и сигнальной волны уже не зависят от ориентации кристалла, но зависят от частоты, поэтому:

$$\Delta n_1 = \frac{\partial n_1}{\partial \omega} \Delta\omega_1, \quad \Delta n_2 = \frac{\partial n_2}{\partial \omega} \Delta\omega_2, \quad \Delta n_3 = \frac{\partial n_3}{\partial \theta} \Delta\theta$$

Используя формулу для расчёта показателя преломления необыкновенной волны при изменении угла распространения луча:

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2(\theta)}{n_o^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{n_e^2} \quad (1.6)$$

Продифференцировав это выражение по углу, и подставив в (1.5), показывающую изменение частоты от угла, мы получим окончательную формулу изменения частоты сигнальной (холостой) волны с изменением угла кристалла:

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial \theta} = \frac{-\frac{1}{2} \omega_3 n_{30}^3 \left(\left(\frac{1}{n_e^3} \right)^2 - \left(\frac{1}{n_o^3} \right)^2 \right) \sin(2\theta)}{(n_{10} - n_{20}) + \left(\omega_{10} \left(\frac{\partial n_1}{\partial \omega} \right) - \omega_{20} \left(\frac{\partial n_2}{\partial \omega} \right) \right)} \quad (1.7)$$

Все выше упомянутые рассуждения могут быть использованы для описания изменения любых других физических параметров.

Кристалл ZGP хорошо подходит для параметрического генератора света, так как у него: высокая прозрачность (имеет минимальное поглощение) как для накачки, так и для сигнальной и холостой волн, имеет высокий коэффициент квадратичной оптической нелинейности, но низкий коэффициент кубичной оптической нелинейности, оптически анизотропный, обладает высокой теплопроводностью (необходимой для работы в импульсно-периодическом или непрерывном режимах), имеет высокую механическую прочность (твёрдость), имеет высокий порог оптического пробоя для излучения накачки, сигнальной и холостой волн. Диапазон хорошей прозрачности для кристалла ZGP от ~ 1 нм до ~ 12 мкм, причём при длине волны короче 2 мкм идёт многофотонное поглощение примесей и дефектов, а в длинноволновом диапазоне ограничивается многофотонным поглощением. Для длины волны накачки, генерируемой лазером $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$, равной 2,097 мкм поглощение меньше $0,04 \text{ см}^{-1}$, а на генерируемых волнах, соответствующим сигнальной – 3,8 мкм и холостой – 4,679 мкм коэффициент поглощения равен меньше $0,03 \text{ см}^{-1}$. Размеры самих кристаллов ZGP варьируются от $8*8*30 \text{ мм}^2$ до $20*20*15 \text{ мм}^2$ [4-22], так как большие кристаллы не нужны из-за малых размеров пучка и плотности потока энергии: идёт ограничение по мощности генерируемой лазером накачки и при больших мощностях могут проявляться нелинейные эффекты высшего порядка. Для кристалла ZGP порог пробоя составляет $w = 0.5 \text{ Дж*с/см}^2$, это вызвано тем что на разных стадиях выращивания кристалла технология несовершенна, если считать, что кристалл без дефектов и у него нет примесей, то порог пробоя может быть еще больше. Частота повторения импульсов сильно влияет на порог пробоя. Критическая плотность энергии при котором происходит пробой элемента вычисляется через плотность потока энергии излучения:

$$w = \frac{2\pi P}{f r_0^2}, \quad (1.8)$$

где P – излучаемая лазером мощность;
 f – частота повторения лазерных импульсов;
 r_0 – критический радиус пучка излучения, меньше которого происходит пробой.

Как видно из формулы, чем чаще будут подаваться импульсы лазера, тем меньше должен быть размер пучка. Это объясняется тем, что тепло успевает отводиться от кристалла и эффекта пробоя мы не наблюдаем. Расчёт производился исходя из того, что подбирался такой радиус накачки, который был чуть больше критического радиуса пробоя кристалла.

В нелинейных кристаллах, в частности ZGP, наблюдается эффект самофокусировки при подаче на него излучения большой мощности. При таких условиях кристалл нагревается, и из-за того, что у него высокая квадратичная нелинейность, в нем наводится тепловая линза, причем собирающая. Фокусное расстояние такой наведенной линзы описывается формулой [3]:

$$F_T = \left(\left(\frac{dn}{dT} \right)_{eff} \frac{\alpha P \eta_h}{\pi K} \int_0^L \frac{e^{-\alpha z}}{\omega_p^2(z)} dz \right)^{-1}, \quad (1.9)$$

где $\left(\frac{dn}{dT} \right)_{eff}$ – термооптический коэффициент;
 α – коэффициент поглощения на волне накачки;
 P – мощность лазерного излучения;
 η_h – доля лазерного излучения, перешедшего в тепло;
 K – коэффициент теплопроводности;
 L – длина кристалла;
 $\omega_p(z)$ – радиус гауссова пучка в данном сечении.

Все вышеперечисленные значения, кроме мощности накачки, длины кристалла и радиуса пучка, берутся из справочника [4]. Долю лазерного излучения, перешедшего в тепло можно оценить путем измерения мощности

излучения на выходе из резонатора ПГС, и по оценкам она равна примерно 50%.

При распространении излучения в кристалле часть излучения переходит в тепло, а часть в излучение сигнальной и холостой волны. Так как часть излучения перешло в генерируемые волны, то нагрев в следующем сечении кристалла немного меньше, а значит в этом сечении наводится тепловая линза слабее, чем в предыдущем сечении кристалла. Уменьшение постоянной градиента n_2 в этом случае составляют примерно 18-20% от первоначального значения в кристалле. Такая же ситуация с потерей энергии излучения, то есть часть энергии переходит в тепло, происходит если у нас в конструкции линейного резонатора присутствует два и более кристалла ZGP. Здесь уже при входе излучения во второй кристалл, эта энергия составляет 92% от энергии на входе в первый кристалл ZGP. Естественно, во втором кристалле тепловая линза становится еще слабее, но влиянием этой линзы пренебречь нельзя.

Из теории гауссова пучка известно, что у него есть перетяжка в определенном сечении. Чтобы добиться максимального эффекта от тепловой линзы, эту перетяжку располагается в центре кристалла, если имеется однокристалльный резонатор, или в середину между ними, чтобы обеспечить максимальную плотность потока лазерного излучения. Интенсивность лазерного излучения имеет гауссово распределение и радиус пучка определяется на уровне e^{-2} от максимума интенсивности. В свободном пространстве радиус пучка и радиус кривизны волнового фронта гауссова пучка меняется по закону:

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left(1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right) \quad (1.10)$$

$$R(z) = z \left(1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right) \quad (1.11)$$

где $\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} = z_0 = \frac{\omega_0}{V_s}$ – расстояние Релея (дифракционный параметр) – расстояние, на котором радиус кривизны волнового фронта максимален, а радиус пучка минимален (перетяжка);

V_s – угловой разброс, под которым расходится дальняя зона поля.

При меньших значениях пучка накачки надо учитывать вышеупомянутый дифракционный параметр пучка, так как может нарушиться его параксиальность и результаты расчётов будут неверны. Изучив основы теории ПГС, распространения гауссова пучка, можно переходить к моделированию резонатора на основе матричной оптики.

2. ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО МОЩНЫМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРАМ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА ZGP

Среди рассмотренных работ [4-22] была выявлена тенденция параметрических генераторов света, накачиваемых длиной накачки 2.0-2.5 мкм. Генерация происходила на длинах волн 3-5 мкм, причем в диапазоне 3-3.9 мкм соответствовала сигнальной волне, а 4-5 мкм – сигнальной. Все кристаллы были вырезаны под углом 40-60 градусов для перестройки в разные диапазоны волн, так как выполняется условие волнового синхронизма. Резонаторы все были настроены на 2 длины волны: сигнальную и холостую. Есть ряд статей [2,6,21], в которой использовалась модель тандема кольцевого резонатора и линейного резонатора-усилителя, но в настоящей работе рассматривается только один резонатор. В резонаторах чаще всего использовалась конфигурация из плоских зеркал. Зеркала подбирались таким образом, чтобы на выходе выходили все длины волн, а потом с помощью фильтров проводилась их селекция. Кристаллы ZGP имеют размеры небольшие: в сечении до 8*8 см и длиной до 30 мм. В зависимости от технологической особенности производства кристаллов ZGP, коэффициент поглощения составлял от 0,03 до 0,05 см⁻¹, а также порог пробоя находился в диапазоне 3.5-0.8 Дж/см². На выходе пучок расходится больше, чем на входе: параметр M² составлял в диапазоне от 2 до 5. Мощность преобразованного излучения составлял 45-65% от мощности накачки, причем это суммарная мощность как сигнальной, так и холостой волны.

3. МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ ПГС

В таком разделе физики, как оптика, есть метод описания распространения параксиальных пучков в разных средах, как матричная оптика. Любую оптическую систему можно описать с помощью системы уравнений, с введением ABCD-матрицы.

Имеется параксиальный луч, который проходит через линзу с фокусным расстоянием F . Его расстояние от оси до луча обозначим через x , а угол наклона α , под которым этот луч распространяется, и выходные параметры через входные можно связать через выражения:

$$x_2 = x_1 \quad (2.1)$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 - \frac{x_2}{F} \quad (2.2)$$

Тогда для входного луча можно составить матрицу:

$$r' = \begin{bmatrix} x(z) \\ \alpha(z) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Выходной луч связывается выражением:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Как известно, для собирающей линзы фокус положительный, для рассеивающей отрицательный. Для резонатора должно выполняться условие самосогласованности мод, то есть входящий луч должен повторять выходящий как по радиусу от оси распространения, так и по углу отклонения. В резонаторной системе присутствуют такие элементы как: пустое пространство, плоское зеркало и кристалл с квадратичным показателем преломления. Для этих элементов резонатора соответствующие свои матрицы:

1. Пустое пространство:

$$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2. Плоское зеркало:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

3. Среда с квадратичным профилем показателем преломления:

$$\begin{bmatrix} \cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L\right) & \sqrt{n_2 n_0} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L\right) \\ -\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L\right) & \cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L\right) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Схема кольцевого резонатора выглядит представлена на рисунке 1:

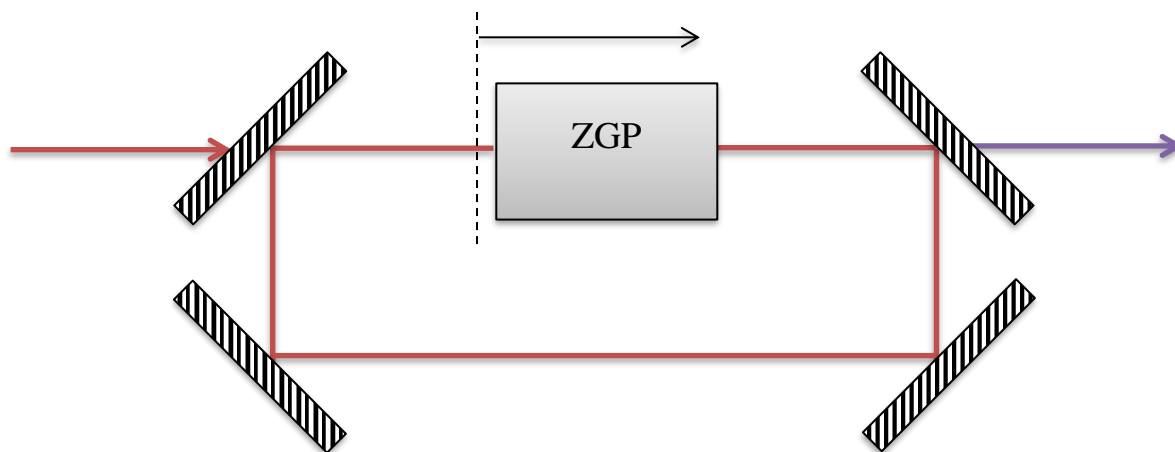


Рис.1 Схема кольцевого резонатора

Выбирая опорную плоскость вначале кристалла, возможно получить в этой плоскости параметры пучка: радиус кривизны и радиус моды пучка. Матрица полного обхода луча в резонаторе:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

где ABCD-матрица, матрица полного обхода луча резонатора:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) & L_1 \cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) + \sqrt{\frac{n_0}{n_2}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) \\ -\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) & -L_2 \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) + \cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Сравнивая индексы матрицы:

$$A = \cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) \quad (2.10)$$

$$B = L_1 \cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) + \sqrt{\frac{n_0}{n_2}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) \quad (2.11)$$

$$C = -\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) \quad (2.12)$$

$$D = -L_2 \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) + \cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}}L_2\right) \quad (2.13)$$

Применяя правило самосогласования, когда вектор-столбцы на входе и выходе совпадают:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Если раскрыть эту систему, и записать в виде системы уравнений:

$$x_1 = Ax_1 + B\alpha_1$$

$$\alpha_1 = Cx_1 + D\alpha_1$$

Поделив первое уравнение на второе и введя такой параметр как $q = \frac{x_1}{\alpha_1}$, решить систему относительно $\frac{1}{q}$ достаточно просто:

$$q = \frac{Aq+B}{Cq+D} \quad (2.15)$$

$$Cq^2 + q(D - A) + B = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{q} = \frac{(D-A) \pm \sqrt{(D-A)^2 + 4BC}}{2B} \quad (2.17)$$

Для вышеупомянутой матрицы, очевидно, выполняется условие $AD - BC = 1$:

$$\frac{1}{q} = \frac{D-A}{2B} \pm \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{D+A}{2}\right)^2}}{B} \quad (2.17.a)$$

Из теории распространения гауссова пучка, условие устойчивости пучка в резонаторе соответствует действительности значения ω^2 , т.е. $|(D+A)/2| \leq 1$. Подставив в выражение для радиуса кривизны и радиуса моды в формулу для гауссова пучка, возможно получить соответствующие выражения для резонатора в данном сечении, записав

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2 n},$$

и сравним с выражением (2.17.а):

$$R = \frac{2B}{D-A} \quad (2.18)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi}} \frac{\sqrt{B}}{\left(1 - \left(\frac{D+A}{2}\right)^2\right)^{\frac{1}{4}}} \quad (2.19)$$

Для нахождения радиуса моды в другом сечении, надо строить матрицу с другими значениями длины сред. Если учитывать потери в параметре n_2 , то кристалл разбивается на несколько участков, в котором постоянная градиента и матрица участка будет в каждом участке своя. И с учётом разбиения:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \prod_{k=1}^n \begin{bmatrix} \cos\left(\sqrt{\frac{n_2\left(1-\frac{0.2}{n}\right)^{k-1} L_2}{n_0}}\right) & \sqrt{\frac{n_0}{n_2\left(1-\frac{0.2}{n}\right)^{k-1}}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2\left(1-\frac{0.2}{n}\right)^{k-1} L_2}{n_0}}\right) \\ -\sqrt{\frac{n_2\left(1-\frac{0.2}{n}\right)^{k-1}}{n_0}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2\left(1-\frac{0.2}{n}\right)^{k-1} L_2}{n_0}}\right) & \cos\left(\sqrt{\frac{n_2\left(1-\frac{0.2}{n}\right)^{k-1} L_2}{n_0}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

где n – количество разбиений кристалла на секции, k – номер секции.

Для нахождения моды в линейном резонаторе, матрицу надо составлять с учетом двойного обхода сред с квадратичным профилем преломления, это и есть полный обход резонатора. Система будет более громоздкой, в отличие от кольцевого резонатора. Вывод формулы для матрицы ABCD этой системы представлен ниже, а решение приведено в Приложении 2. Схема линейного резонатора представлена на рисунке 2.

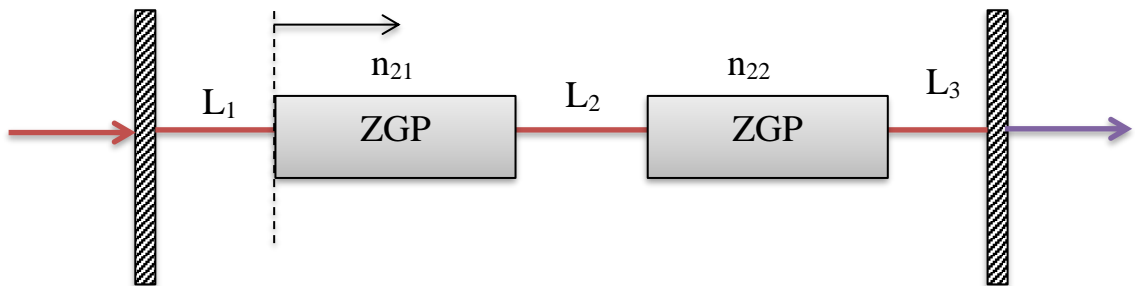


Рисунок 2. Схема линейного резонатора с двумя кристаллами ZGP

Матрица полного обхода луча линейного резонатора без учета потерь постоянной градиента n_2 :

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \\
&* \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Так же можно сделать пересчёт фокуса тепловой линзы, обозначив через F фокусное расстояние линзы, которая находится примерно в середине кристалла, как потом будет выяснено из подхода сравнений схем. Вывод этой формулы представлен в Приложении 2.2.

$$F = \frac{1}{\sqrt{n_0 n_2}} \frac{\cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} L\right)}{\sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} L_2\right)} \tag{2.22}$$

В результате теоретического описания резонатора, получились громоздкие формулы для вычисления радиуса моды и радиуса кривизны в каждом сечении. На листке решать будет очень долго и есть вероятность ошибиться, поэтому используются такие программы, как «reZonator», которая и использует метод матричной оптики, и Zemax, который позволяет строить телескопы и другие оптические системы с использованием гауссова пучка, а также других видов излучения.

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ ПГС

4.1 ПРОГРАММА «Zemax»

Zemax – пакет программ для моделирования оптических систем. Zemax довольно точно моделирует оптические системы в отличие от подобных ей программ благодаря технологии трассировки лучей. Интерфейс программы интуитивно понятен и прост в усвоении. Весь интерфейс программы можно изучить в инструкции, а пока будет рассмотрен пример построения телескопа с заданными входными и выходными данными. Вся оптическая система строится в окне Lens Data Editor, в которой добавляются плоскости, которым можно присваивать разные параметры (толщина, заполнение среды, угол поворота). По умолчанию стоят 3 плоскости: ODJ (параметры объекта), STO (параметры светового пучка), IMA (изображение). Часть работы состоит в том, что надо спроектировать телескоп для лазера, чтобы преобразовать диаметр пучка, который имеется у лазера, в пучок нужного диаметра для хорошего перекрытия мод резонатора с модой накачки. Имеется лазер с диаметром гауссова пучка 1.3 мм с расходимостью ~ 0.0041 рад и набор линз:

1) $F_1=76$ mm, $R_1=39$ mm, $R_2=234$ mm, $d=4$ mm

2) $F_2=-25$ mm, $R_1=22$ mm, $R_2=22$ mm, $d=4$ mm

3) $F_3=105$ mm, $R_1=344$ mm, $R_2=53,3$ mm, $d=4$ mm

4) $F_4=-20$ mm, $R_1=18$ mm, $R_2=18$ mm, $d=4$ mm

Чтобы установить параметры пучка, надо нажать на пункт General, вписать в Aperture Value значение 1.3 мм, и указать в Aperture Type: Entrance Pupil Diameter, Apodization Type: Gaussian, Apodization Factor = 1 (показатель гауссова распределения). Далее, нажав правой кнопкой мыши на строку STO и клавишу Insert, добавляем плоскость оптической системы. Линза в этой программе представлена в виде 2-х плоскостей, вогнутых (выпуклых) с двух сторон с разным радиусом кривизны. На выходе должен получиться пучок диаметром 0.8 мм с минимальной расходимостью. Для этого надо установить параметры оптической системы:

1) OBJ – не трогать, так как нет объектов;

2) STO – Surf: type: Paraxial (т.к. лучи исходят под малым углом к оси), Thickness: 5 мм, Semi-Diameter: 0.65 мм, Focal length: -157 (параметр подбирался вручную, исходя из расходимости пучка лазера)

3) 2*-слой – Radius: 39 мм, Thickness: 4 мм, Glass: n=1.44, Semi-Diameter: 15 мм

3) 3*-слой – Radius: -234 мм, Thickness: 98.49 мм, Semi-Diameter: 15 мм

4) 4*-слой – Radius: -22 мм, Thickness: 3.5 мм, Glass: n=1.44, Semi-Diameter: 17 мм

5) 5*-слой – Radius: 22 мм, Thickness: 60 мм, Semi-Diameter: 17 мм

6) IMA – его не трогать, так как параметр Semi-Diameter рассчитывается автоматически.

При таких параметрах диаметр пучка на выходе оптической системы равен 0.800046 мм с расходимостью 0.00335 рад, диаметр пучка рассчитывался на уровне e^{-2} от максимальной интенсивности. Данные пучка на выходе находились в разделе Analysis-Illumination-Illumination XY Scan. В этом меню происходит вычисление относительной освещенности от протяженного источника вдоль линии, проходящей через поверхность изображения. В пункте Settings, можно выбрать такие параметры, как область наблюдения освещенности, разрешение сетки, номер плоскости и др. Для численного значения в каждой точке можно воспользоваться пунктом Text, который даст основные параметры оптической системы и таблицу данных зависимости освещенности (от максимального значения в единицах) от точки наблюдения. Все эти данные программа позволяет сохранить в формате .TXT. В разделе Wavefront представлен график искажения волнового фронта на разных поверхностях. Также можно воспользоваться окном Spot Diagram для просмотра диаграммы пятна рассеяния. В нём указаны радиус географический (реальный) и среднеквадратичный. В этом окне варьируются такие параметры, как количество лучей, выбор плоскости наблюдения, длин волн и др. На рисунке 3 представлен пример расчета телескопа с окнами LDE, Layout и Spot Diagram.

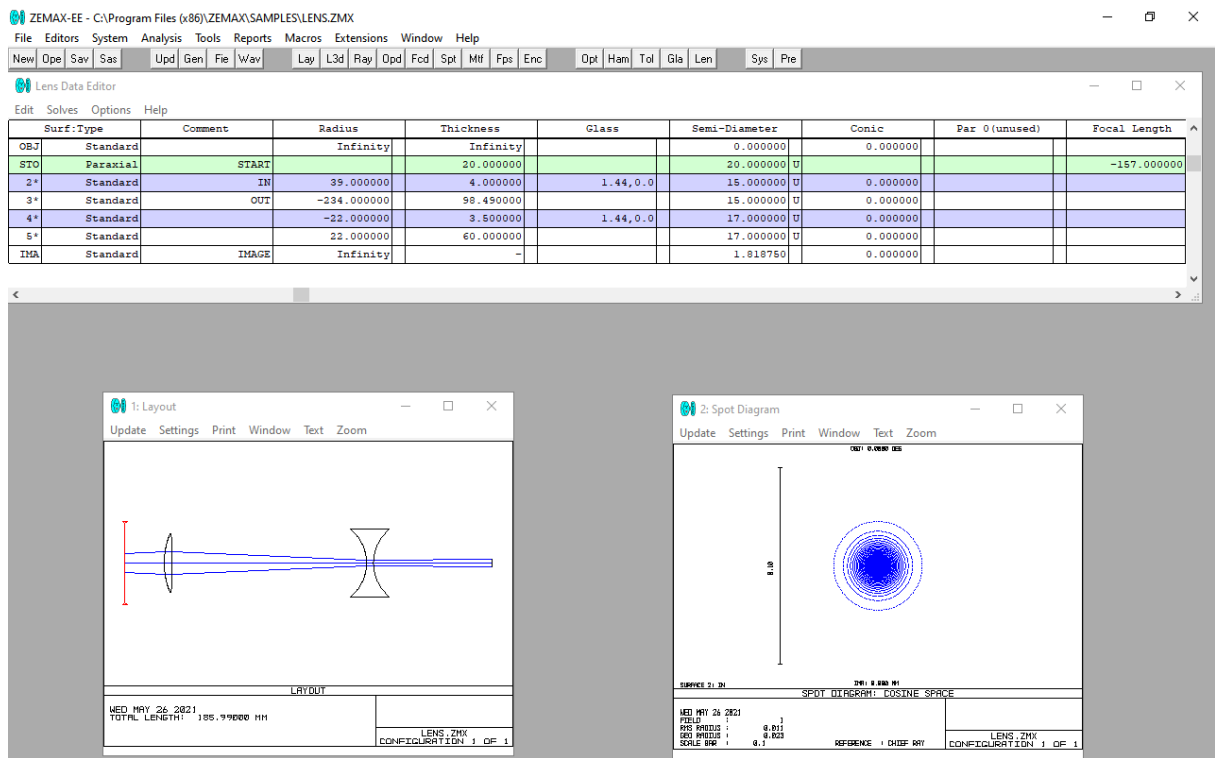


Рисунок 3. Интерфейс программы с расчётом телескопа.

4.2 ПРОГРАММА «reZonator»

Программа «reZonator» предназначена для расчета резонаторов разной конфигурации матричным методом. Поддерживаются обычные резонаторы, кольцевые резонаторы и однопроходные оптические системы. Если использовать эту программу для проектирования однопроходных систем, то она значительно уступает Zemax в силу её функциональности. Перед тем как проектировать резонатор, программа нам даёт выбор – какой резонатор будет проектировать: кольцевой или линейный. После выбора программа открывает главное окно, изображенное на рисунке 4, на котором есть схема со списком элементов резонатора.

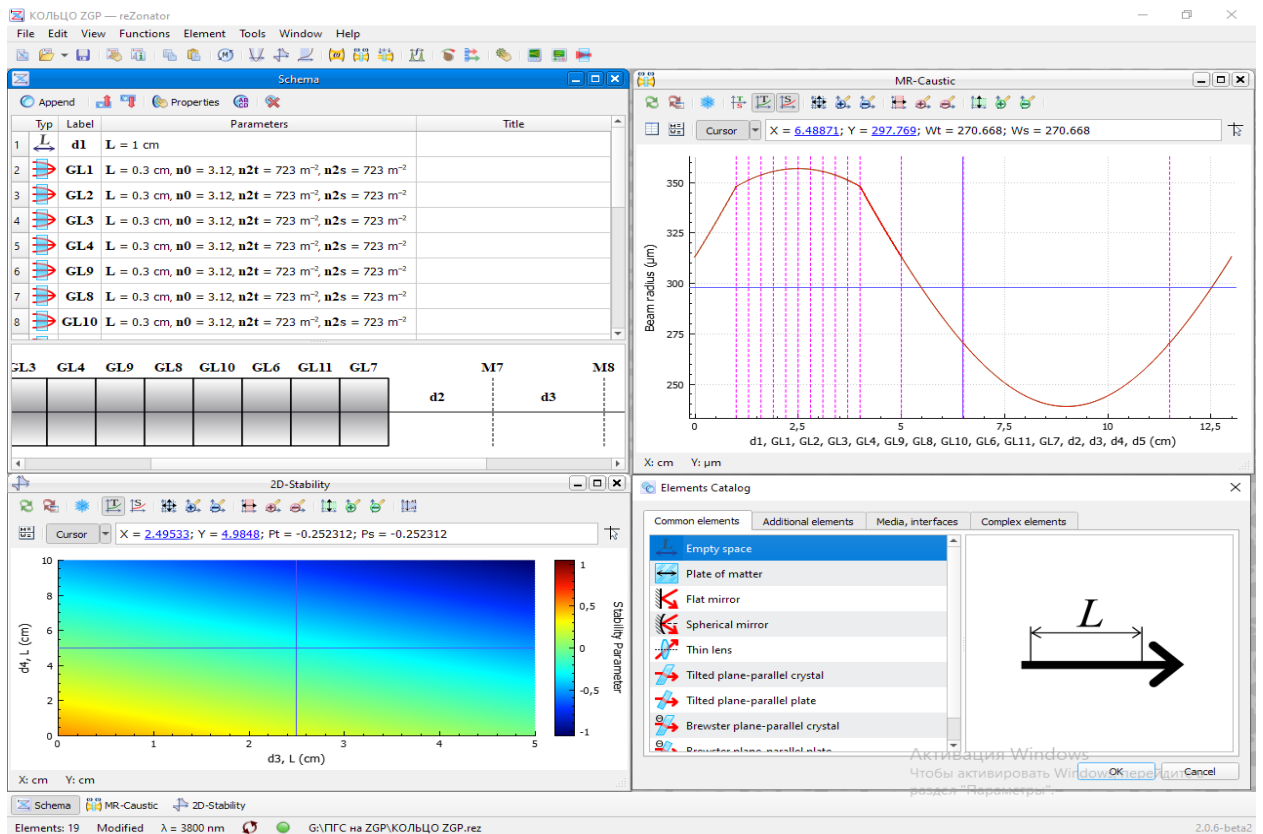


Рисунок 4. Главное окно программы «reZonator»

Для моделирования резонатора нужно выбрать элемент матрицы и расставить в нужном порядке. Это находится в «Append», добавив нужные нам элементы, которых, кстати говоря, большое количество. После выбора элементов, и задав параметры для этих элементов, можно посмотреть моду, которая сформировалась в резонаторе, при условии их самосогласованности. Это можно увидеть в «Multirange caustic», программа открывает окно, в котором показывает распределение моды в резонаторе в каждом его сечении. Бывают такие случаи, когда система резонатора нестабильна, программа не может показать распределение поперечных мод. Для этого есть карта стабильности, которая находится в кнопке «2D Stability Map». В ней мы выбираются параметры, которые можно варьировать и диапазон изменения параметров. После этого, он нам показывает двумерную картину, в которой красно-бордовым цветом обозначена высокая стабильность системы, а темно-синим – самая низкая стабильность. В случае с тепловой линзой этого делать не пришлось. Так же для тепловой линзы полезная такая функция, как

«GRIN Lens Assessment», которая позволяет сделать пересчёт между постоянной градиента n_2 и фокусным расстоянием тепловой линзы.

4.3 РАСЧЁТ РЕЗОНАТОРОВ

Теперь перейдём непосредственно к самому расчёту резонатора. Есть входные данные: мощность накачки, радиус входного пучка и кристаллы ZGP длиной по 3 и 2 см. В программе «reZonator» строится сначала кольцевой резонатор по этим данным. Нажимая на кнопку «Append», добавляется пустое пространство, зеркало и среда с квадратичным профилем показателя преломления (GRIN Lens). Сразу надо учесть все потери, которые были указаны в главе «МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА СВЕТА». Расчёт линзы в ZGP проводился при следующих параметрах указанных в Таблице 1.

У параметра термооптический коэффициент ZGP есть небольшой разброс. При расчёте тепловой линзы этот разброс не оказал большого значения, поэтому было выбрано значение $15,88 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Далее, используя инструмент «GRIN Lens Assessment» или считая по формуле (2.22), можно найти постоянную градиента n_2 .

Так как в кристалле присутствуют потери с расстоянием, то мы уменьшение n_2 должно быть таким образом, чтобы общие потери составляли 18-20% на всей длине кристалла. В вышерезализованном резонаторе достаточно было поделить кристалл на 10 частей, в каждом котором параметр n_2 был меньше предыдущего на 2%. Подставив эти значения в схему программы, программа считает, какие моды устанавливаются в кольцевом резонаторе.

Параметр	Значение, ссылка
Термооптический коэффициент ZGP (на длине волны накачки λ_p), dn_p/dT	$15,88 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [4] $15,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [24] $15,6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [25] $14,7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [23]
Термооптический коэффициент ZGP (на λ_s), dn_p/dT	$162,47 \times 10^{-6} \text{ K}$ [4]
Термооптический коэффициент ZGP (на λ_i), dn_i/dT	$160,88 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [4]
Коэффициент теплопроводности ZGP, К	$0,36 \text{ Вт}/(\text{см} \times \text{К})$ [4,25]
Коэффициент поглощения (на λ_p) α_p	$0,04 \text{ см}^{-1}$
Коэффициент поглощения (на λ_s) α_s	$0,01 \text{ см}^{-1}$
Коэффициент поглощения (на λ_i) α_i	$0,01 \text{ см}^{-1}$
Длина волны накачки α_p	2097 нм
Длина сигнальной волны α_s	3800 нм
Длина холостой волны α_i	4679 нм

Таблица 1. Параметры кристалла ZGP и излучения ПГС

Данный шаг изображён на рисунке 5. Для примера здесь приведена конфигурация: длина резонатора 13 см, длина волны – 4,679 мкм, мощность накачки – 32 Вт, радиус накачки – 325 мкм, наведенная линза с фокусным расстоянием для длины волны 4,679 мкм – 3,17 см, что является очень короткой на удивление, это связано с тем что возможно присутствует неточное определение доли излучения, перешедшего в тепло, так как точно этот параметр не выведен. Перетяжка пучка накачки находится в центре кристалла ZGP.

Далее можно узнать, как меняется мода при изменении тех или иных параметров: длина резонатора, фокуса тепловой линзы, изменение радиуса накачки. Задача – посмотреть, как будет меняться радиус (диаметр) пучка в

кольцевом резонаторе с нелинейным активным элементом ZGP, в котором реализуется тепловая линза, с целью не пробить активный элемент.

Был задан диапазон параметров: общая длина резонатора 8-20 см, фокусное расстояние тепловой линзы (которая в общем случае зависит и от мощности накачки) 2-170 см, и условие, что параметр n_2 уменьшается на выходе активного элемента на 20%, а вследствие этого увеличивается

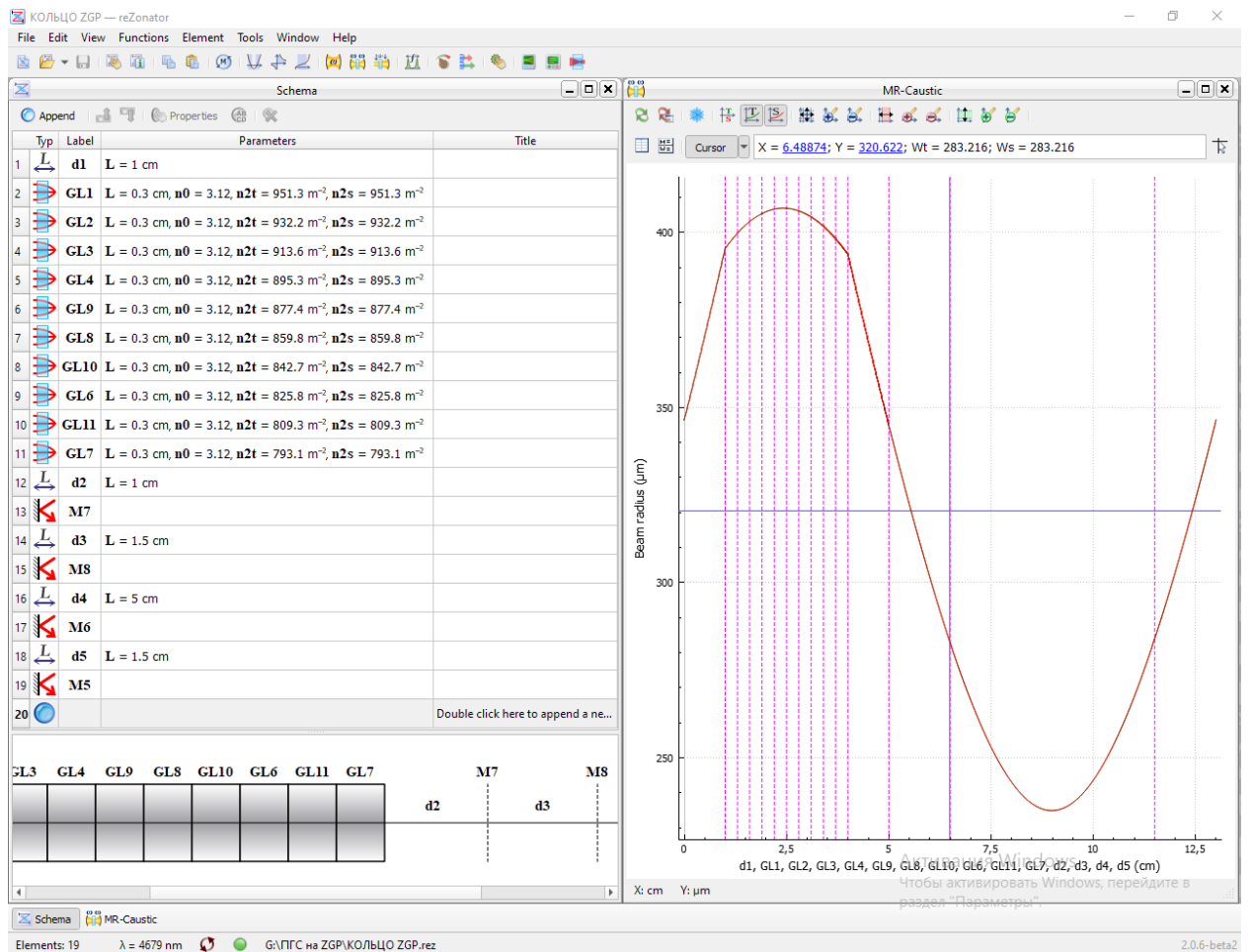


Рисунок 5. Расчет моды в кольцевом резонаторе с конфигурацией 1

фокусное расстояние тепловой линзы, тем более что фокусное расстояние этой линзы мы не знаем.

Сначала была зафиксирована общая физическая длина резонатора равная 110 мм и проведены измерения радиусов пучка от фокусного расстояния без 20% потерь n_2 . График изменения радиуса моды от фокусного расстояния тепловой линзы изображён на рисунке 6.

В итоге получилось, что пучок на входе и выходе один и тот же в районе 400 мкм радиуса накачки, но если мы учтём 20% уменьшение n_2 на всём элементе, то видим, что пучок увеличивается на 2%, но характер кривой тот же.

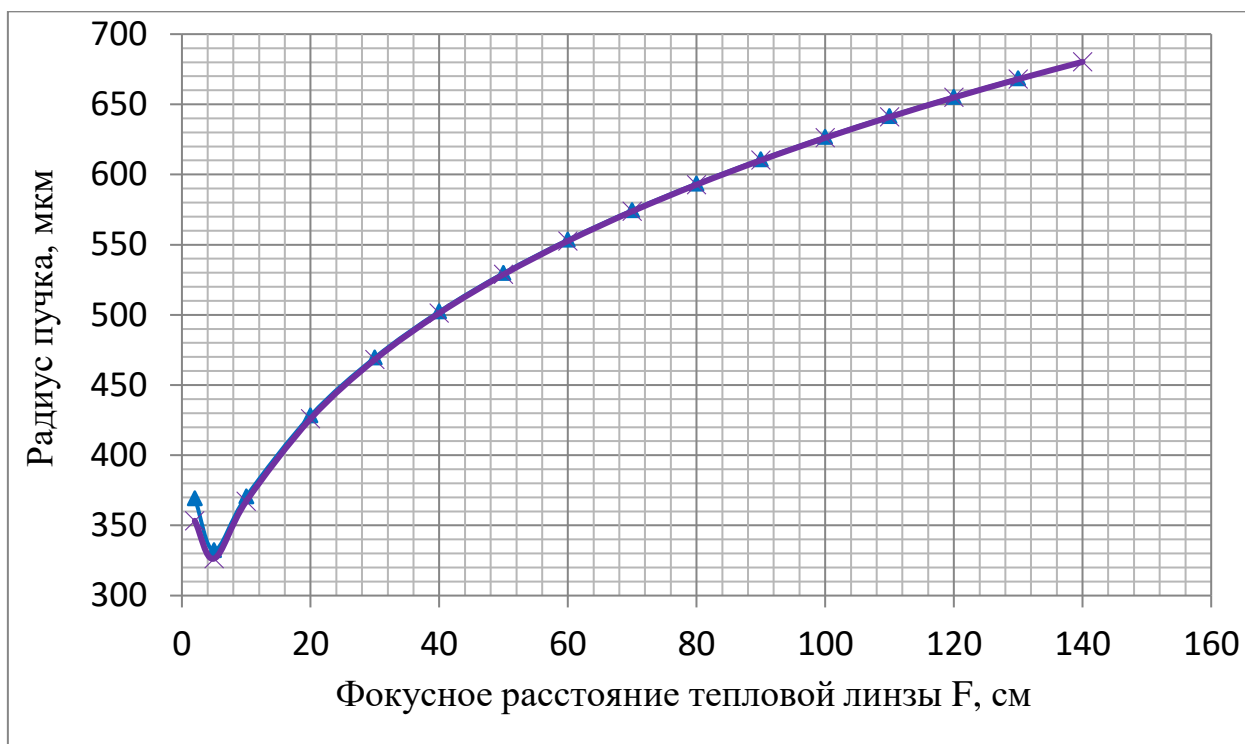


Рисунок 6. Изменение радиуса моды от фокусного расстояния тепловой линзы

Также видно, что при дальнейшем уменьшении предполагаемого фокусного расстояния тепловой линзы до 5 см, он даёт минимум радиуса пучка, но при дальнейшем уменьшении фокусного расстояния – радиус пучка опять растёт. Следующая зависимость, которую интересно узнать, это изменение радиуса пучка от общей длины резонатора, результаты представлены на рисунке 7.

По результатам измерений в программе «reZonator» видно, что с уменьшением общей физической длины резонатора уменьшается и сам радиус пучка излучения.

Тем более уменьшение пучка связано еще и с уменьшением фокусного расстояния при фиксированной длине резонатора. Учёт 20% уменьшения n_2 на всём элементе даёт увеличение пучка на 2% с таким же характером кривой. Ещё изменяются радиусы пучков на входе и выходе, но это изменение не превышает 0,1%.

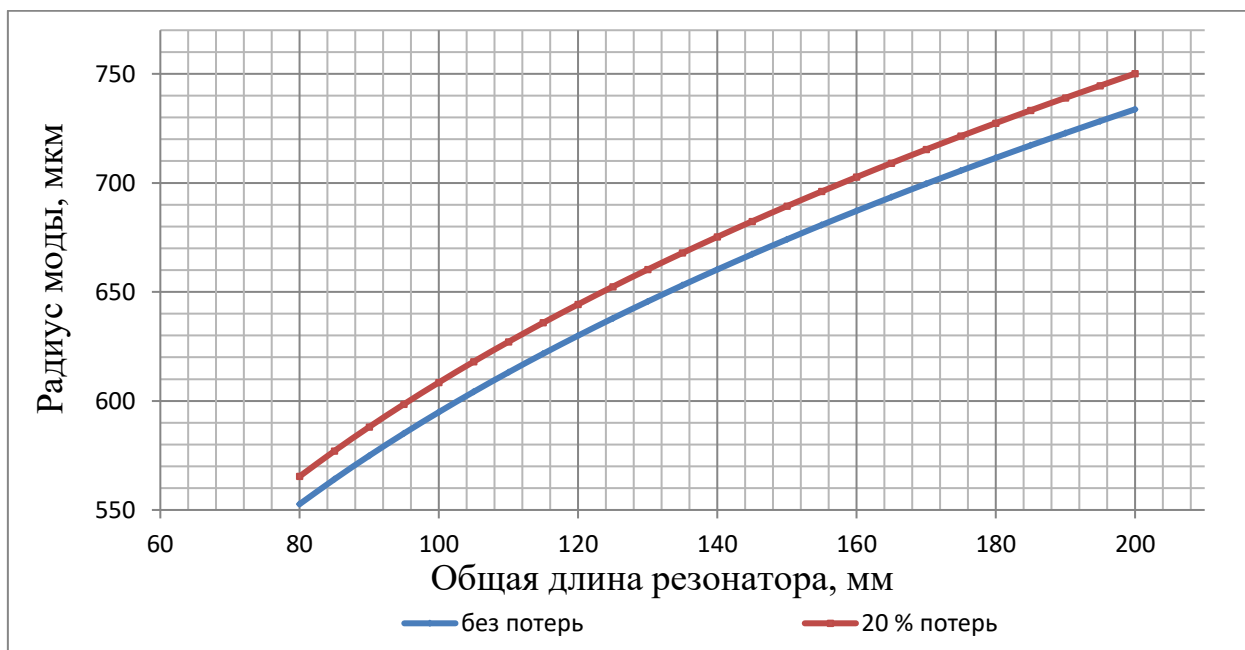


Рисунок 7. Изменение радиуса пучка от общей длины резонатора

То же самое можно сделать с линейным резонатором, имеющего 2 кристалла ZGP. Меняя положение кристаллов относительно друг друга и относительно зеркал были произведены расчёты установившихся мод в резонаторе. Всё это изображено на рисунках 8 и рисунке 9.

Как видно, при изменении расстояния между зеркалом и ZGP пучок меняется резко, чем при изменении расстояния между кристаллами. Фокус 4.5 см не соответствовал реальности, поэтому был проведен замер диаметра пучка от фокусного расстояния обеих кристаллов, $d_1=0.5$ см, $d_2=0.3$ см, $d_3=0.5$ см. Результаты представлены на рисунке 10. Рассмотрено изменение радиуса моды для разных длин волн: накачки, холостой и сигнальной. Кольцевой резонатор с параметрами накачки: мощность накачки от 10 до 30

Вт, радиус накачки от 178 мкм (при 300 кГц повторения импульсов) до 500 мкм.

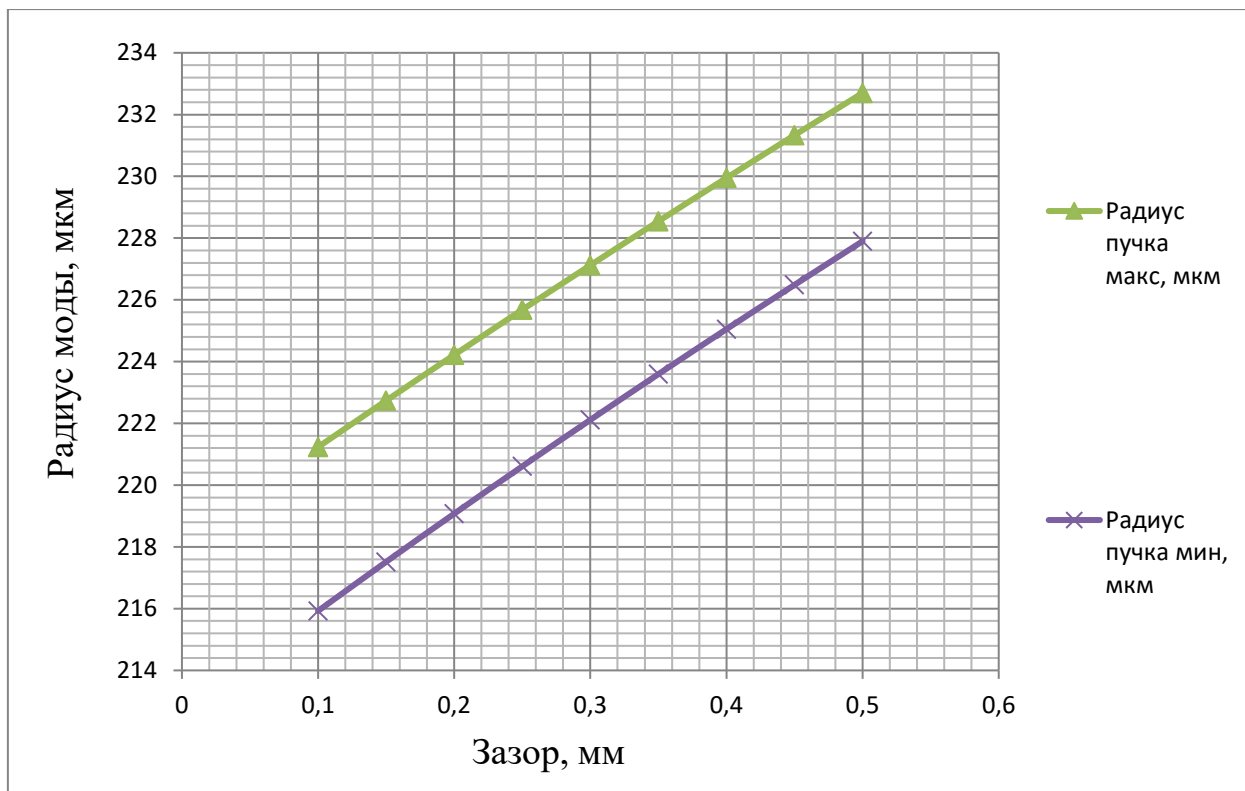


Рисунок 8. Изменение радиуса моды от изменения зазора между кристаллами ZGP.

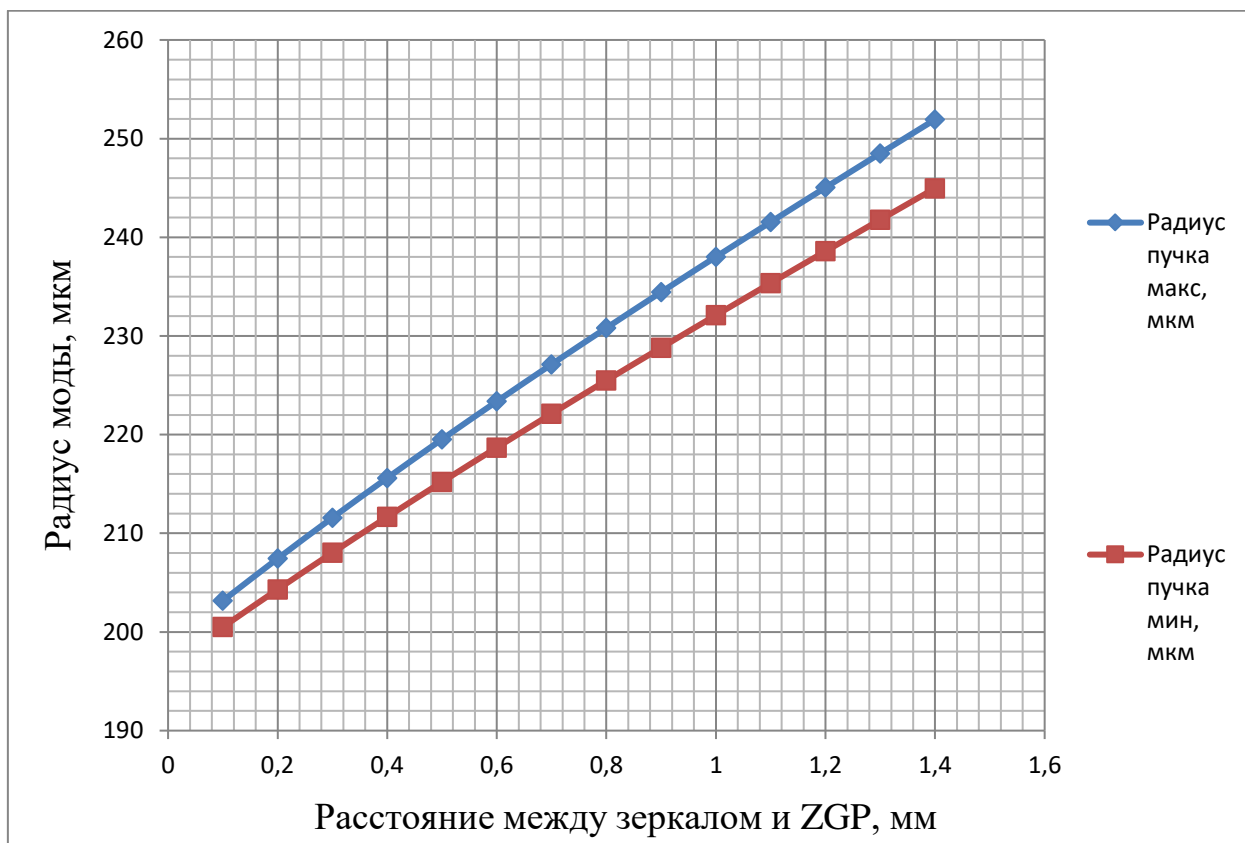


Рисунок 9. Изменение радиуса моды от изменения расстояния между зеркалом и ZGP.

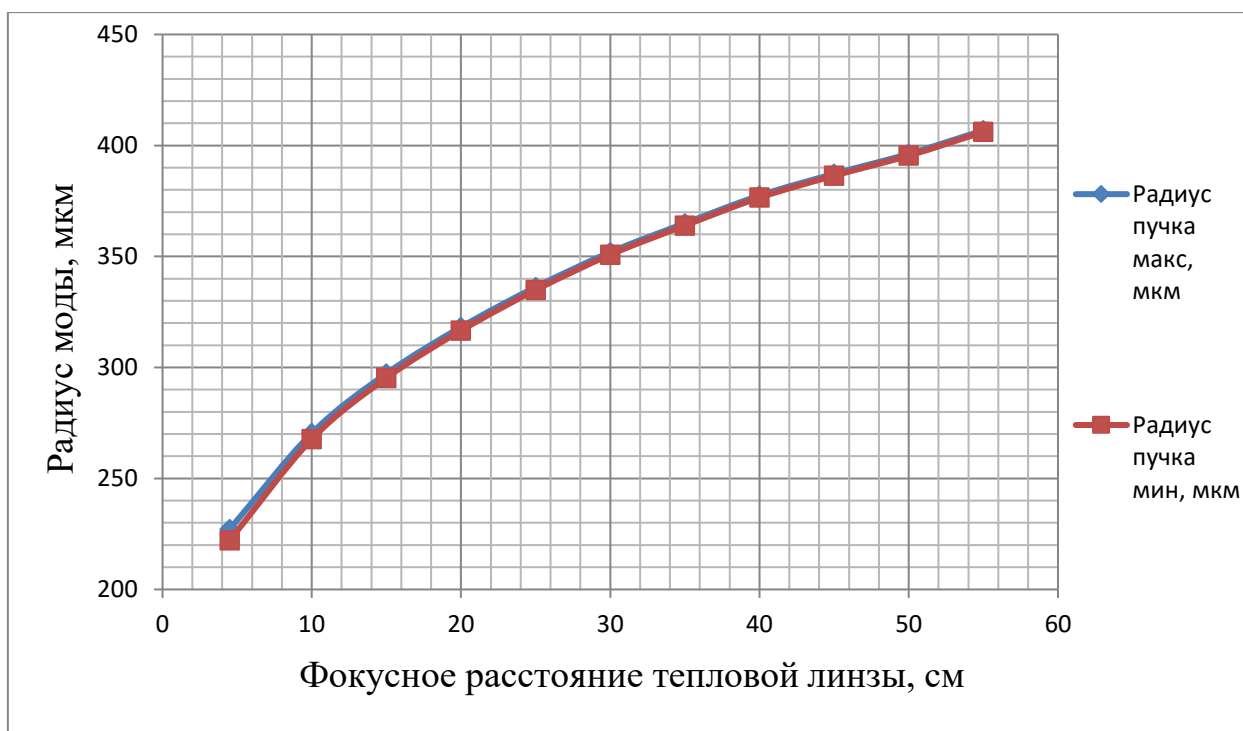


Рисунок 10. Изменение радиуса моды от фокусного расстояния ZGP.

Интересные результаты получены и проиллюстрированы на рисунке 11. Как видно из графика, сигнальная волна расположена в середине ансамблей графиков, холостая – верхний график, а волна накачки находится внизу. Как видно из графика, локальный минимум виден в районе фокусного расстояния равного 3 см, меньше которого пучок увеличивается быстрее, в отличие от большего фокусного расстояния. Для кольцевого резонатора условие перекрытия выполняется при радиусе накачки 400 мкм, 20 Вт (делать мощность ниже, не желательно): 3,8 мкм – 330 мкм в максимуме и 324 в минимуме, 4,679 мкм – 366 мкм и 360,6 мкм соответственно. Справа изображены радиус накачки и соответствующая длина волны в мкм.

Радиус моды при разной накачки имеет интересную зависимость, изображенную на рисунке 11. На этом графике видно, что оптимальные параметры перекрытия мод – это пересечение точечной черной прямой со

сплошными прямыми: 360 мкм для сигнальной волны, 400 мкм для холостой волны.

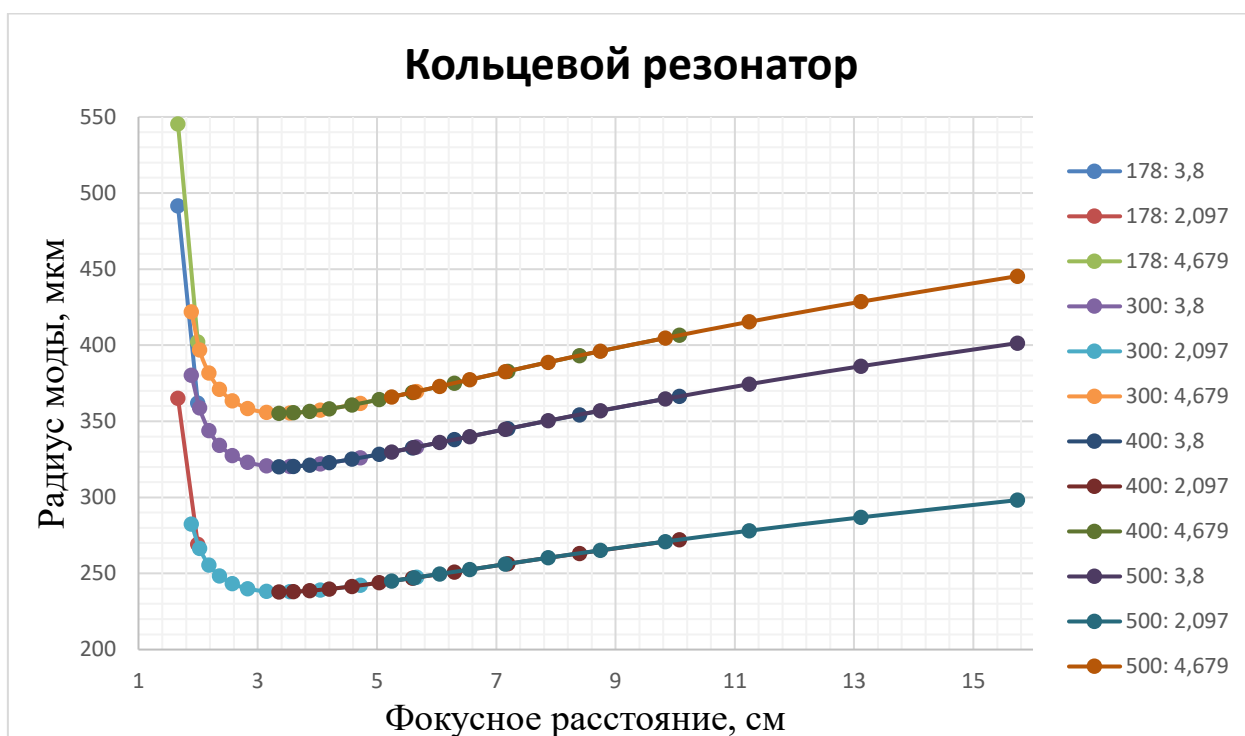


Рисунок 10. Изменение радиуса моды от фокусного расстояния ZGP для разных длин волн.

Эти параметры достигнуты при условиях: мощность накачки 33 Вт, кристалл ZGP 3 см, длина резонатора 13 см, коэффициент поглощения кристалла $0,05 \text{ см}^{-1}$, η был выбран =0,5.

Можно отметить интересную особенность, что при большей мощности накачки, выше 33 вт., радиус моды резонатора увеличивался при уменьшении радиуса накачки. Это показано на рисунке 12.

В данной схеме был рассмотрен вариант, когда считалась постоянная градиента n_2 в каждом сечении кристалла за счёт потери мощности накачки, переходящую в мощность холостой и сигнальной волны. Были опробованы другие способы построения схемы. Если строить схему с элементом «Thermal Lens», то должным образом надо учесть поглощение мощности по закону Бугера, где мощность будет уменьшаться по экспоненте. Так как поглощение

кристалла равно 0.05 см^{-1} , то на расстоянии 3 см, экспоненту можно аппроксимировать прямой, и подставив в формулу для тепловой линзы (1.9) усреднённую мощность накачки в кристалле на всей длине.

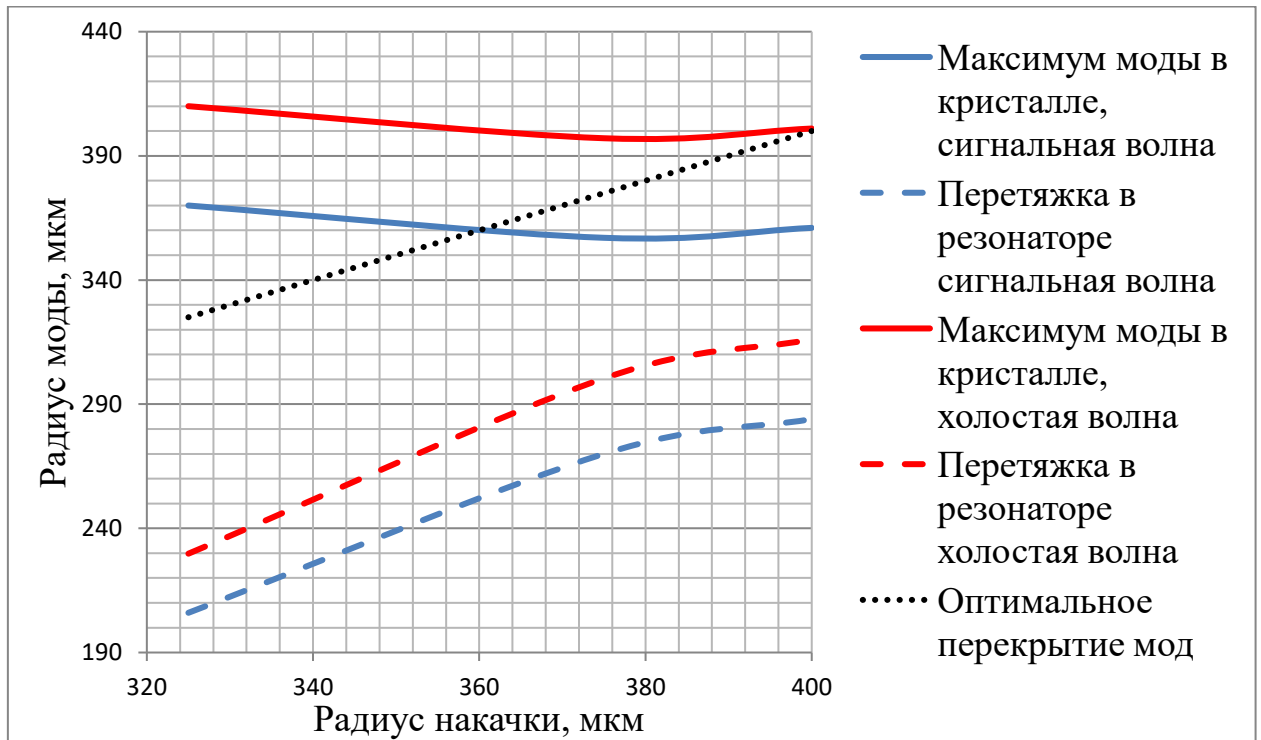


Рисунок 11. Зависимость моды резонатора от моды накачки.

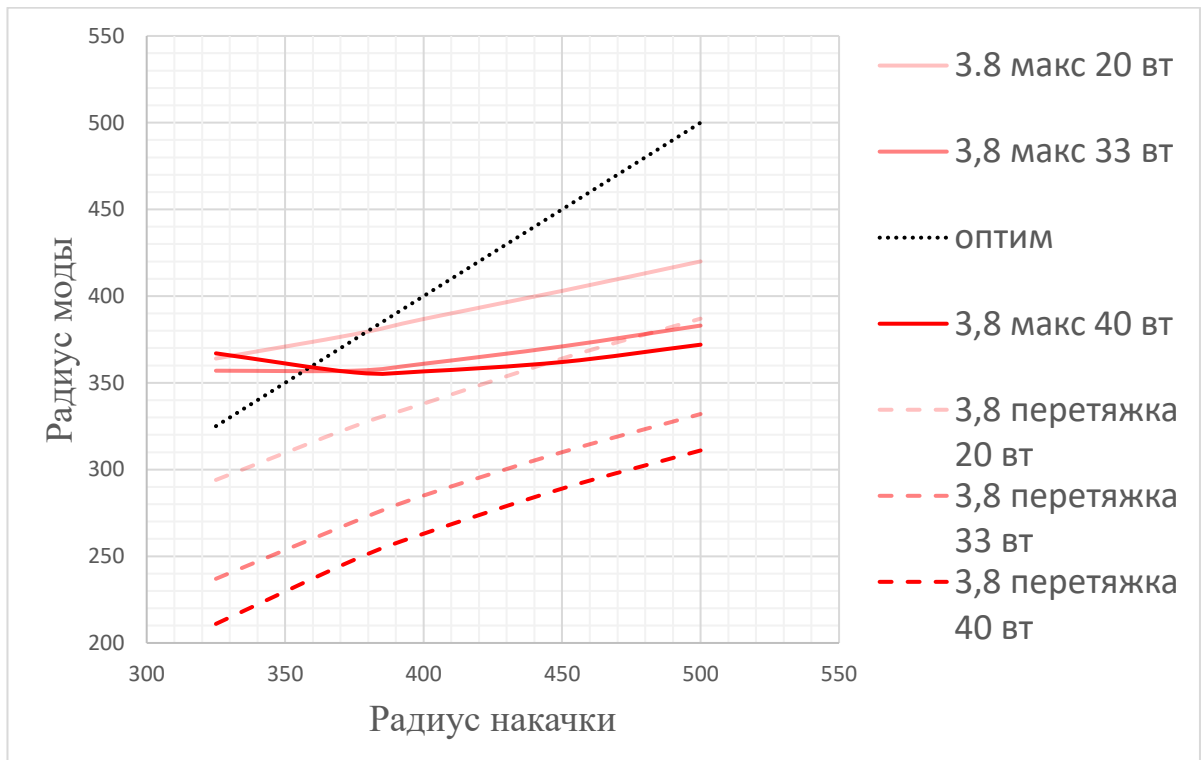


Рисунок 12. Зависимость радиуса моды от радиуса накачки при разных мощностях накачки.

Если элемент будет разделён на несколько сечений и в каждом сечении будет произведён расчёт тепловой линзы, то разница значений не превышает 5%. Можно сделать вывод, что таким приближением и элементом «Thermal Lens» пользоваться можно для грубой оценки моды в резонаторе. Вообще говоря, если представить кристалл в виде среды, в центре которой расположена тонкая линза, то методом подбора параметров (расположение тепловой линзы), мы обнаружится что тепловая линза находится, грубо говоря, почти в центре кристалла. Значит и таким приближением можно пользоваться при расчёте резонатора в программе «reZonator». Но в силу богатой библиотеки программы, можно обойтись элементом «Thermal Lens» для расчёта моды в резонаторе.

5. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Из теоретических расчётов, изображенных на рисунке 11, 12 видно, что согласование мод накачки и резонатора реализуется в районе 700-720 мкм для сигнальной волны. В эксперименте, проведенном в ИПФРАН, при диаметре накачки 700 мкм получена максимальная выходная мощность генерации с гауссовым пучком дифракционного качества. Параметр ПГС, исследуемого в эксперименте, соответствовал параметрам в численных расчётах. Наибольшая мощность генерации в экспериментальном ПГС должна соответствовать наилучшему согласованию моды резонатора и пучка накачки. На основании этого можно сделать вывод, что рассчитанное оптимальное значение пучка накачки хорошо согласуется с экспериментальными данными. Исходя из экспериментальных данных, полученных в результате тестирования параметрического генератора света, можно сделать вывод об успешном численном моделировании резонаторов в программах «reZonator» и «Zemax».

Сравнивая со статьей «High repetition rate 102 W middle infrared ZnGeP₂ master oscillator power amplifier system with thermal lens compensation» можно судить о том, что коэффициент η не превышает 40%. Причем расчёт по формуле (1.9) хорошо согласуется с результатами эксперимента: компенсирующая линза с фокусом -24.3 см формировала моду в резонаторе с кристаллом ZGP примерно равную моде накачки. Так как компенсация была оптимальной (максимальная мощность на выходе), то можно сделать вывод, что тепловая линза была с фокусом примерно 23 см.

В статье «161 W middle infrared ZnGeP₂ MOPA system pumped by 300 W-class Ho:YAG MOPA system» также были проверены экспериментальные данные. Для параметров системы (радиус накачки 950 мкм, мощность накачки 140 Вт, длина кристалла 30 мм, длина кристалла 180 мм, коэффициент поглощения 0.03 см⁻¹) фокусное расстояние наведённой тепловой линзы составило примерно 21 см. При моделировании резонатора в

программе «reZonator» результаты хорошо согласовались с экспериментом с разницей примерно 10%.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен численный расчёт резонатора мощного параметрического генератора света с тепловой линзой, наведенной в кристалле ZGP, изучены теоретические основы параметрической генерации света. Изучены программы для моделирования оптических систем «Zemax» и «reZonator». Был разобран метод матричной оптики, позволяющий узнать моду в каждом сечении резонатора, а также радиус кривизны моды. Был проверен этот метод в программе «reZonator»,

Удалось смоделировать моды, формирующиеся в резонаторе, и сравнивая с экспериментальными результатами, можно сделать вывод, что данные подходы и теория для проектирования резонатора и исследования пучка генерации ПГС на выходе достаточно справедливы. Теоретические расчёты показывают, что тепловая линза имеет короткое фокусное расстояние в районе от 5 до 25 см в зависимости от параметров пучка накачки. В экспериментальной установке удалось добиться перекрытия мод, которые были изначально рассчитаны в программе.

7. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ярив А. Квантовая электроника. - 2-е изд. - М.: Советское радио, 1980. - 488 с.
2. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. – М.: Наука, 1988.
3. E. Anashkina and O. Antipov. Electronic (population) lensing versus thermal lensing in Yb:YAG and Nd:YAG laser rods and disks // J. Opt. Soc. Am. B Vol. 27, 2010
4. О. Л. Антипов, И. Д. Еранов, Р. И. Косицын. Параметрические генераторы света среднего ИК диапазона мощностью 10 Вт на основе элементов ZnGeP₂, накачиваемых излучением Ho³⁺:YAG-лазера с волоконно-лазерной накачкой. Экспериментальное и численное исследование // Квантовая электроника, 2017, том 47, номер 7, 601–606
5. Ben-Rui Zhao, Bao-Quan Yao, Chuan-Peng Qian, Gao-You Liu, Yi Chen, Rui-Xue Wang, Tong-Yu Dai, and Xiao-Ming Duan. 231 W dual-end-pumped Ho³⁺:YAG MOPA system and its application to a mid-infrared ZGP OPO // Optic Letters, vol. 43, 2018
6. Chuan-Peng Qian, Bao-Quan Yao, Ben-Rui Zhao, Gao-You Liu, Xiao-Ming Duan, Tong-Yu Dai, You-Lun Ju, and Yue-Zhu Wang. High repetition rate 102 W middle infrared ZnGeP₂ master oscillator power amplifier system with thermal lens compensation // Optic Letters, vol. 44, 2019.
7. Bao-Quan Yao, Ying-Jie Shen, Xiao-Ming Duan, Tong-Yu Dai, You-Lun Ju, and Yue-Zhu Wang. A 41-W ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a Q-switched Ho³⁺:YAG laser // Optic Letters, vol. 39, 2014.
8. K. L. Vodopyanov, F. Ganikhanov, J. P. Maffetone, I. Zwieback, and W. Ruderman. ZnGeP₂ optical parametric oscillator with 3.8–12.4-mm tunability // Optic Letters, vol. 25, 2000
9. Martin Schellhorn, Gerhard Spindler, and Marc Eichhorn. Improvement of the beam quality of a high-pulse-energy mid-infrared fractional image-rotation-enhancement ZnGeP₂ optical parametric oscillator // Optic Letters, vol. 42, 2017

10. Zhu Guo-Li, Ju You-Lun, Wang Tian-Heng, Wang Yue-Zhu. A Mid-IR 14.1 W ZnGeP₂ Optical Parametric Oscillator Pumped by a Tm,Ho:GdVO₄ Laser // Chin. Phys. Lett., vol. 26, 2009
11. Chuanpeng Qian, Xiaoming Duan, Bao-Quan Yao, Yingjie Shen. 11.4 W long-wave infrared source based on ZnGeP₂ optical parametric amplifier // Optics Express, vol. 26, 2018
12. David H. Titterton, Mark A. Richardson. Progress with OPO-based systems for mid-IR generation // Proc. of SPIE, vol. 8187, 2015
13. Ian Elder, SELEX Galileo, Crewe Toll House. Thulium fibre laser pumped mid-IR source // Proc. of SPIE, Vol. 7325, 2009
14. Alexander Hemming, Jim Richards, Alan Davidson, Neil Carmody, Shayne Bennetts, Nikita Simakov, and John Haub. 99 W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25% duty cycle // Optic Express, vol. 21, 2013
15. Bao Quan Yao, Ying Jie Shen, Xiao Ming Duan, Wei Wang, You Lun Ju, and Yue Zhu Wang. An Ho:YAG Laser with double-pass pumping and the ZnGeP₂ OPO pumped by the Ho:YAG laser // Journal of Russian Laser Research, Vol. 34, 2013
16. Marc Eichhorn, Martin Schellhorn, Magnus W. Haakestad, Helge Fonnum, and Espen Lippert. High-pulse-energy mid-infrared fractional-image-rotation-enhancement ZnGeP₂ optical parametric oscillator // Optics Letters, vol. 41, 2016
17. Martin Schellhorn, Gerhard Spindler, and Marc Eichhorn. Mid-infrared ZGP OPO with divergence compensation and high beam quality // Optic Express, vol. 26, 2018
18. Yi Chen, Gaoyou Liu, Baoquan Yao, Ruixue Wang, Chao Yang, Xiaoming Duan Tongyu Dai, and Yuezhu Wang. Comparison of mid-infrared ZnGeP₂ rectangle ring optical parametric oscillators of three types of resonant regimes // Applied Optics, vol. 58, 2019
19. Henriksson, Markus, Sjöqvist, Lars, Strömquist, Gustav, Pasiskevicius, Valdas, Laurell, Fredrik. Tandem PPKTP and ZGP OPO for mid-infrared generation // Proc. of SPIE, vol. 7115, 2008

20. G. Stoepler, M. Eichhorn, M. Schellhorn, S. L. Been, and R. M. Verdaasdonk. ZGP RISTRA OPO operating at 6.45 μm and application in surgery // Lasers, Sources, and Related Photonic Devices Technical Digest, 2012
21. Gaoyou Liu, Shuyi Mi, Ke Yang, Disheng Wei, Junhui Li, Baoquan Yao, Chao Yang, Tongyu Dai, Xiaoming Duan, Lixin Tian, Youlun Ju. 161 W middle infrared ZnGeP₂ MOPA system pumped by 300 W-class Ho:YAG MOPA system // Optics Letters vol. 46, 2020
22. Marcin Piotrowski, Manuel Aleksandro Medina, Martin Schellhorn, Gerhard Spindler, and Anne Ildenbrand-Dhollande. Effects of pump pulse energy and repetition rate on beam quality in a high-power mid-infrared ZnGeP₂ OPO // Optics Express, vol. 29, 2021
23. J. E. Tucker, C. L. Marquardt, S. R. Bowman, and B. J. Feldman. Transient thermal lens in a ZnGeP₂ crystal // Applied Optics, vol. 34, 1995.
24. K. Kato, Eiko Takaoka, and N. Umemura. New Sellmeier and Thermo-Optic dispersion formulas for ZnGeP₂ // Optical Society of America, CLEO, 2003
25. QinetiQ, Malvern Technology Centre, St Andrews Road, Great Malvern. Modelling of thermal effects within a 2 μm pumped ZGP optical parametric oscillator operating in the mid-infrared // Proceedings of SPIE, Vol. 5620, 2004

8. ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РАСЧЁТ РЕЗОНАТОРОВ МАТРИЧНЫМ СПОСОБОМ

Составляем матрицу:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ -\frac{1}{F_1} & -\frac{L_2}{F_1} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{L_2}{F_2} & L_2 \\ -\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right) & -\frac{L_2}{F_1} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{L_2}{F_2} & L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) + L_2 \\ -\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right) & L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right)\right) - \frac{L_2}{F_1} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{L_2}{F_2} + \left(L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) + L_2\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right) & L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) + L_2 \\ -\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right) + \left(L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right)\right) - \frac{L_2}{F_1} + 1\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right) & L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right)\right) - \frac{L_2}{F_1} + 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} a = 1 - \frac{L_2}{F_2} + \left(L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) + L_2\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right) \\ b = L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) + L_2 \\ c = -\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right) + \left(L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right)\right) - \frac{L_2}{F_1} + 1\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right) \\ d = L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right)\right) - \frac{L_2}{F_1} + 1 \end{pmatrix} = \\
 \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a & aL_2 + b \\ c & cL_2 + d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a - \frac{1}{F_1}(aL_2 + b) & aL_2 + b \\ c - \frac{1}{F_1}(cL_2 + d) & cL_2 + d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 \begin{bmatrix} a - \frac{1}{F_1}(aL_2 + b) & \left(a - \frac{1}{F_1}(aL_2 + b)\right)L_1 + aL_2 + b \\ c - \frac{1}{F_1}(cL_2 + d) & \left(c - \frac{1}{F_1}(cL_2 + d)\right)L_1 + cL_2 + d \end{bmatrix} &
 \end{aligned}$$

Подставляя в формулы:

$$R_0 = \frac{2B}{D-A}, \quad \rho_0 = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi n} \frac{|B|^{\frac{1}{2}}}{\left(1 - \left(\frac{D+A}{2}\right)^2\right)^{\frac{1}{4}}}}$$

Учитывая, что:

$$A = \left(1 - \frac{L_2}{F_2} + \left(L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) + L_2\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right)\right) - \frac{1}{F_1} \left(\left(1 - \frac{L_2}{F_2} + \left(L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) + L_2\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right)\right)L_2 + \left(L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) + L_2\right)\right)$$

$$B = \left(\left(1 - \frac{L_2}{F_2} + \left(L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) + L_2\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right)\right) - \frac{1}{F_1} \left(\left(1 - \frac{L_2}{F_2} + \left(L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) + L_2\right) \left(-\frac{1}{F_2}\right)\right)L_2 + \left(L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2}\right) + L_2\right)\right)\right)L_1 + aL_2 + b$$

$$\begin{aligned}
& \left(L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2} \right) + L_2 \right) \Big) \Big) L_1 + \left(1 - \frac{L_2}{F_2} + \left(L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2} \right) + L_2 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) L_2 + \left(L_3 \left(1 - \frac{L_2}{F_2} \right) + L_2 \right) \\
C = & \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) + \left(L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) - \frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) - \frac{1}{F_1} \left(\left(-\frac{1}{F_1} + \right. \right. \\
& \left. \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) + \left(L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) - \frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) L_2 + \left(L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \right. \right. \\
& \left. \left. \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) - \frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \Big) \Big) \\
D = & \left(\left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) + \left(L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) - \frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) - \frac{1}{F_1} \left(\left(-\frac{1}{F_1} + \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) + \left(L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) - \frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) L_2 + \left(L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) - \frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \Big) \Big) \Big) L_1 + \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) + \left(L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) - \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) L_2 + \left(L_3 \left(-\frac{1}{F_1} + \left(-\frac{L_2}{F_1} + 1 \right) \left(-\frac{1}{F_2} \right) \right) - \frac{L_2}{F_1} + 1 \right)
\end{aligned}$$

9. ПРИЛОЖЕНИЕ 2. РАСЧЁТ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЛИНЗЫ.

Для тепловой линзы есть перерасчёт фокусного расстояния из постоянной градиента n_2 :

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} L_2\right) & \sqrt{\frac{n_0}{n_2}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} L_2\right) \\ -\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} L_2\right) & \cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} L_2\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \alpha_1 \end{bmatrix}$$

$$\alpha_1 = 0 \quad x_2 = x_1 \cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} L_2\right) \quad \alpha_2 = -x_1 \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} L_2\right)$$

Аналогично если мы выразим этот параметр на выходе из элемента через фокусное расстояние:

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}$$

$$x_3 = x_2 + F\alpha_2 \quad \alpha_3 = \alpha_2$$

Затем, объединив эти выражения и решив относительно F , можно получить формулу пересчета тепловой линзы:

$$F = \frac{1}{\sqrt{n_0 n_2}} \frac{\cos\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} L\right)}{\sin\left(\sqrt{\frac{n_2}{n_0}} L_2\right)}$$

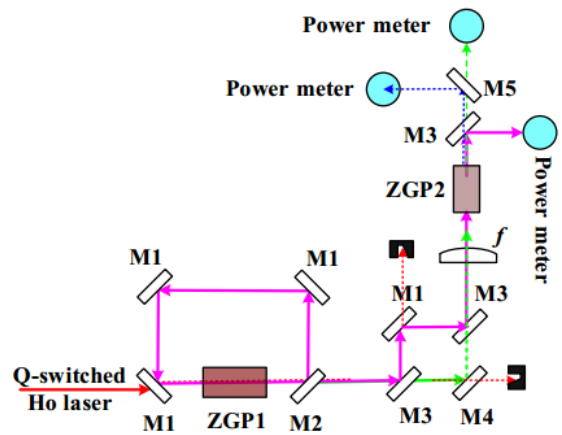
10. ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО МОЩНЫМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРАМ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА ZGP

W long-wave infrared source based on ZnGeP₂ optical parametric amplifier (длинноволновый инфракрасный источник на основе оптического параметрического усилителя ZnGeP₂)

Авторы: CHUANPENG QIAN, XIAOMING DUAN

Журнал: Optic Express.

Vol. 26, No. 23 | 12 Nov 2018 | OPTICS EXPRESS 30195



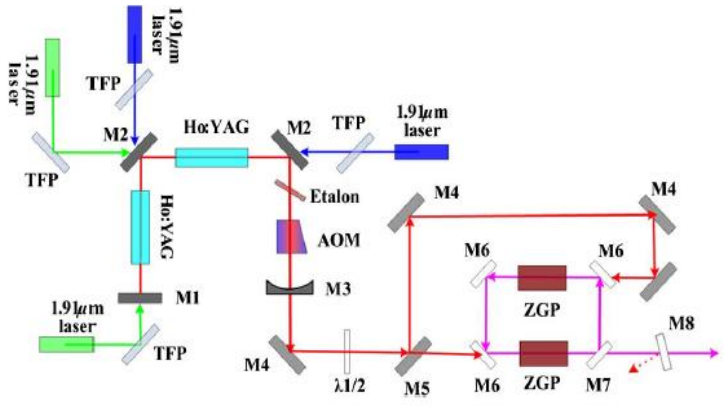
Использовалась кольцевая 4 зеркальная схема с последующими 4-мя зеркалами. Есть выпуклая линза (∞ и $R>0$) с фокусом 50 мм для обоих пучков. Оптическая длина резонатора 102 мм. Входной пучок на ZGP2 $D_s=0,4-0,6$ мм $D_{id}=0,4-0,5$ мм. На ZGP1 падал пучок диаметром 1 мм. Размеры ZGP1: $6*6*25$ мм, вырезан под углом $\Theta=51,5$ и $\phi=90$ градусов по отношению к оптической оси кристалла, коэффициент потерь $0,03 \text{ см}^{-1}$. Размеры кристалла ZGP2: $6*6*25$ мм, вырезан под углом $\Theta=68,4$ и $\phi=45$ градусов по отношению к оптической оси кристалла.

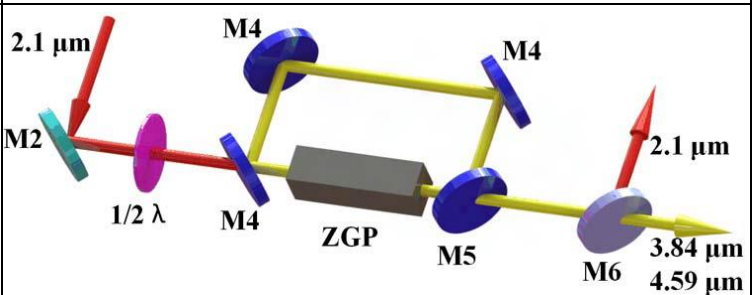
Система зеркал:

M1: AR для p-поляризации, HR для s-поляризации пучка накачки;

M2: $T>27\%$ 8 мкм AR p-поляризации пучка накачки;

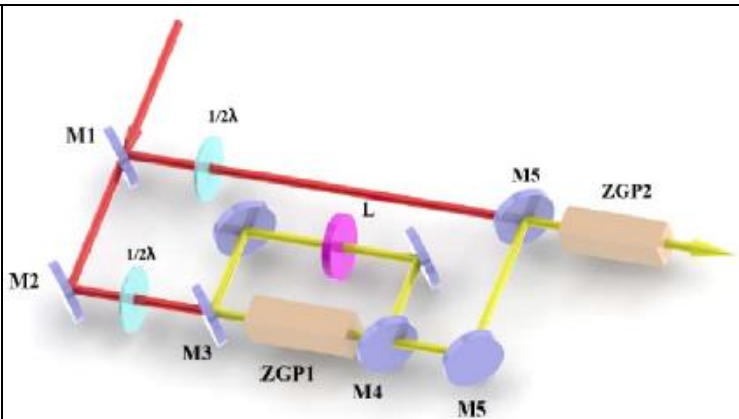
M3: HT для сигнальной волны (80%) и HR

	<p>для холостой волны</p> <p>M4: HR для сигнальной волны</p> <p>M5: HR для 4,3 мкм, НТ 2,8 мкм.</p> <p>Все кристаллы поддерживались температуре 16°C.</p>
<p>A 41-W ZnGeP2 optical parametric oscillator pumped by a Q-switched Ho:YAG laser (41-Вт оптический параметрический генератор ZnGeP2 с накачкой Q-переключаемым лазером Ho:YAG)</p> <p>Публикация: December 1, 2014 / Vol. 39, No. 23 / OPTICS LETTERS 6589</p>	 <p>Использовалась V-образный 3-зеркальный кольцевой резонатор с 4-мя зеркалами. Есть вогнутая линза (∞ и $R=300$ мм). Размер пятна накачки Ho:YAG приблизительно равен 1 мм в диаметре. Физическая длина кольцевой полости было около 108 мм. Качество пучка по сравнению с прошлыми статьями (1,2) много хуже (в 2 раза) $M^2=3\sim 4$ (против $M^2=1\sim 2$). Геометрические размеры ZGP: 6*6*23 мм, вырезан под углом $\Theta=55$ и $\phi=0$ градусов по отношению к оптической оси кристалла, коэффициент потерь 0.05, 0.03 см^{-1}. Система зеркал:</p> <p>M1: $T>99.8\%$ для 1,9 мкм и $R>99.5\%$ для 2,1 мкм.</p> <p>M2: $T>97.7\%$ для 1,9 мкм и $R>99.8\%$ для 2,1 мкм.</p>

	<p>M3: радиус кривизны 300 мм, $T > 68.4\%$ для 2,1 мкм</p> <p>M4: нет данных</p> <p>M5: $R \approx 50\%$ для 2.1 мкм для р-поляризации,</p> <p>M6: $T > 96\%$ для 2,1 мкм для р-поляризации и $R > 99.8\%$ для 3-5 мкм для s-поляризации.</p> <p>M7: $T > 95\%$ для 3-5 мкм для р-поляризации и $R > 50\%$ для 2,1 мкм для s-поляризации.</p> <p>M8: $R > 99.9\%$ для волны накачки и $T > 99.9\%$ для ИК-диапазона.</p>
<p>231 W dual-end-pumped Ho:YAG MOPA system and its application to a mid-infrared ZGP OPO (231 Вт двойной конечной-накачки Ho:YAG MOPA и его применение для среднего ИК-диапазона ZGP OPO)</p> <p>Авторы: BEN-RUI ZHAO, BAO-QUAN YAO</p> <p>Публикация: Vol. 43, No. 24 / 15 December 2018 / Optics Letters 5989</p>	 <p>Физическая длина полости ZPG ОПО составляла около 140 мм. На уровне интенсивности e^{-2} диаметр пучка составляет 2.9 мм. Система зеркал:</p> <p>M4: $T > 93\%$ 2.1 мкм (р-поляризация), $R > 99.8\%$ 3-5 мкм (s-поляризация)</p> <p>M5: $T > 97\%$ 2.1 мкм (р-поляризация), $T > 50\%$ 3.7-5 мкм (s-поляризация)</p> <p>M6: $R > 99.9\%$ 2.1 мкм, $T > 99.8\%$ 3-5 мкм</p> <p>Коэффициент поглощения для ZGP: 0.03 cm^{-1}.</p> <p>Геометрические размеры ZGP: 6*6*30 мм. 0.65 Дж/см². (231 ватт, 2,9 мм 10000 Гц)</p>

High repetition rate 102 W middle infrared ZnGeP2 master oscillator power amplifier system with thermal lens compensation (Высокая частота повторения 102 Вт средняя инфракрасная система усилителя мощности задающего генератора ZnGeP2 с компенсацией тепловых линз)

Публикация: Vol. 44, No. 3 / 1 February 2019 / Optics Letters 715

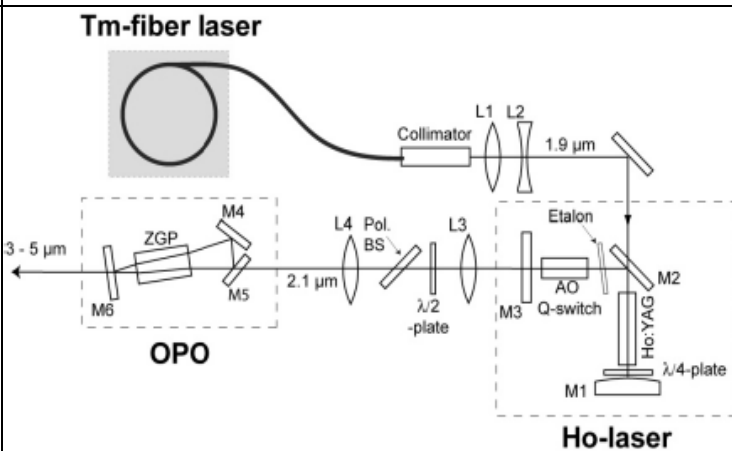


Весь ОПО полость имеет физическую длину приблизительно 140 мм. Кристалл ZPG1 имеет размер 6*6*30 мм, коэффициент поглощения $0,03 \text{ см}^{-1}$. Поддерживаемая температура $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Радиус пятна накачки составлял 730 мкм. Длина резонатора 14 см. Частота повторения импульса 10 кГц. 0.65 Дж/см^2 .

Progress with OPO-based systems for mid-IR generation (Прогресс в разработке систем на основе ОПО для среднего ИК-Излучения)

Автор: Technologies for Optical Countermeasures VIII, edited by David H. Titterton, Mark A. Richardson.

Публикация: Специальный документ Espen Lippert Norwegian Defence Research Establishment (FFI), PO Box 25, NO-2027 Kjeller, Norway, Proc. of SPIE Vol. 8187



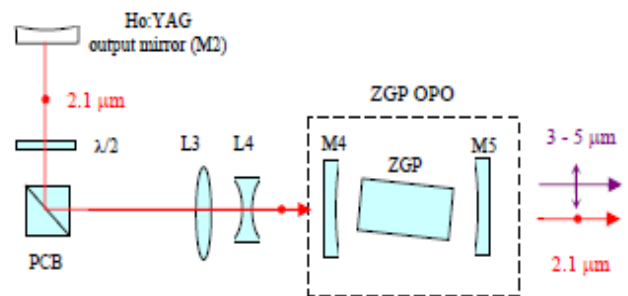
Выход от волоконного лазера фокусируется через 45° -зеркало (M2) в пятно диаметром 700 мкм. HR-зеркало (M1) имеет выпуклый радиус кривизны 100 мм. $\lambda/4$, чтобы уменьшить потери резонатора от индуцированного напряжением двулучепреломления в лазерном стержне. Физическая длина резонатора 63 мм.

81870F-9

Резонатор представляет собой трехзеркальное кольцо. Выход Но-лазера фокусировался в пятно размером 600 мкм на кристалле ZGP. Размеры кристалла 8,5*8*6 мм, поддерживаемая температура 15°C. Длина короткого плеча резонатора была 6 мм, а плечо длинного 25 мм. Входной пучок в ZPG равен 600 мкм. Зеркало M4 и M5 имеет R=98% для сигнальной волны s-поляризации и холостой и T=98% для волны накачки p-поляризации, M6 имеет R=99% для волны накачки и R=50% для волны сигнала и холостой волны.

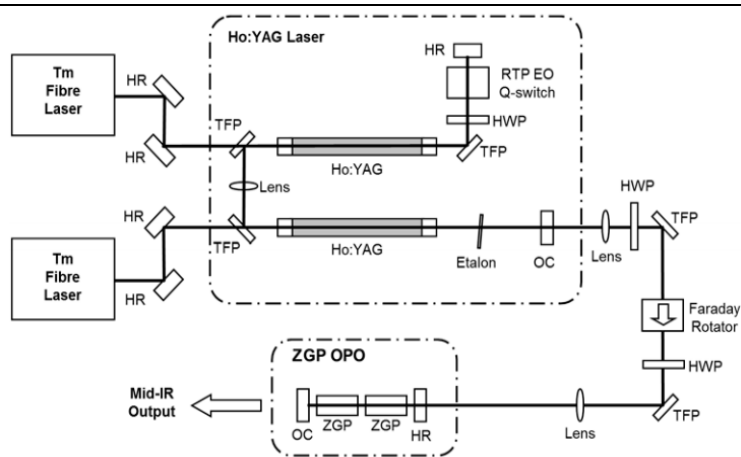
Thulium fibre laser pumped mid-IR source (Источник среднего ИК-излучения с накачкой тулиевым волоконным азером)
Автор: Ian Elder, SELEX Galileo, Crewe Toll House, 2 Crewe Road North, Edinburgh EH5 2XS, UK

Публикация: Laser Technology for Defense and Security V, edited by Mark Dubinskii, Stephen G. Post, Proc. of SPIE Vol. 7325, 73250I · © 2009 SPIE · CCC code: 0277-786X/09/\$18 · doi: 10.1117/12.818553 Proc. of SPIE Vol. 7325 73250I-1



Линейная система резонатора. Диаметр пучка в ZPG на уровне e^{-2} равен 660 мкм. Коэффициент потерь в кристалле $<0.1 \text{ см}^{-1}$. Длина кристалла равна 15 мм. M4 и M5: T=92% для волны накачки. Холостая волна 4,57 мкм а сигнальная 3,85 мкм.

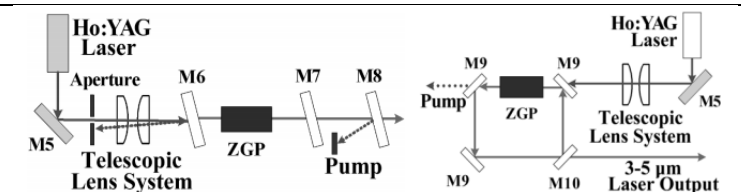
99 W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25% duty cycle (99 Вт средний ИК-диапазона ZPG ОПО на 25% рабочего цикла)
 Автор: Alexander Hemming, Jim Richards
 Публикация: Received 28 Jan 2013; revised 24 Mar 2013; accepted 28 Mar 2013; published 16 Apr 2013 (C) 2013 OSA 22 April 2013 | Vol. 21, No. 8 | DOI:10.1364/OE.21.010062 | OPTICS EXPRESS 10069



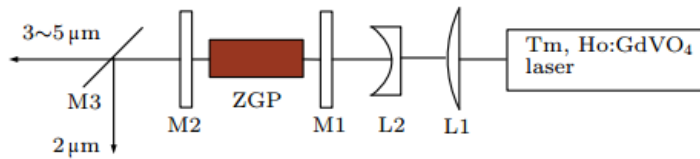
Качество пучка на выходе $M^2=4.0$ и эффективность преобразования 62%. В ZPG входит пучок диаметром 180 мкм на уровне e^{-2} . 2 кристалла ZGP покрыты антибликовым покрытием. $T > 95\%$ для 2,09 мкм, $T > 98\%$ для 3,5-5,2 мкм. Поглощение на длине волны 2.09 мкм было для каждого кристалла 0.04 и 0.08 $см^{-1}$. Физическая длина резонатора равна 36 мм.

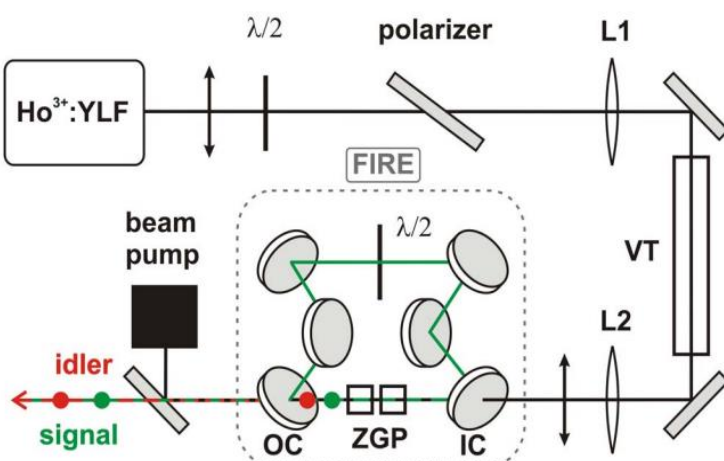
AN Ho:YAG LASER WITH DOUBLE-PASS PUMPING AND THE ZnGeP2 OPO PUMPED BY THE Ho:YAG LASER (Лазер на HO:YAG и накачка ZGP HO:YAG лазером)

Авторы: Bao Quan Yao, Ying Jie Shen
 Публикация: Journal of Russian Laser Research Volume 34, Number 5, September, 2013



Лазер на длине волны 2.1 мкм использовался в качестве накачки ПГС на ZGP с кристаллом $6*8*18$ мм³ и вырезанным под углом 55° к главной оси. Входное дихроичное зеркало M6 покрыто HR покрытием на 2,1 мкм и в диапазоне 3-5 мкм. Выходное дихроичное зеркало M7 покрыто HR покрытием на 2,1 мкм и 50% отражательную способность в диапазоне 3-5 мкм. Физическая длина резонатора 30 мм.

	<p>Кольцевой резонатор состоит из 3 зеркал M9 и одного M10. M10 имеет $T > 95\%$ для волны накачки и $R \approx 50\%$ для сигнальной и холостой волны. M9 имеет $T > 95\%$ для волны накачки и $R > 99\%$ для осциллирующих сигнальной и холостой волны. На вход ZGP кристалла подавался пучок диаметром 800 мкм. $0,33 \text{ Дж./см}^2$, 17 W 20 кГц.</p>
<p>A Mid-IR 14.1 W ZnGeP2 Optical Parametric Oscillator Pumped by a Tm, Ho:GdVO4 Laser (Оптический параметрический генератор среднего ИК-диапазона 14,1 Вт ZnGeP2 с накачкой Tm, Ho: Лазер GdVO4) Авторы: ZHU Guo-Li, JU You-Lun Публикация: CHIN. PHYS. LETT. Vol. 26, No. 3 (2009) 034208.</p>	 <p>Длина волны накачки равна 2.049 мкм. Диаметр пучка накачки подбирается линзами L1 и L2 таким образом чтобы плотность пучка накачки была не больше 0.6 Дж/см^2. Зеркало M1 имеет $T \approx 98\%$ для волны накачки и высокое отражение для 3-5 мкм волн. M2 имеет $T \approx 96,7\%$ для волны накачки и $R \approx 50\%$ для 3-5 мкм волны. M3 имеет $T \approx 83,6\%$ для волны 3-5 мкм и $R \approx 99,9\%$ для 2 мкм волны. Размер ZGP кристалла $6 \times 8 \times 15 \text{ мм}^3$. Разрезан под углом 55° к главной оси и имеет антибликовое покрытие для волны накачки, холостой и сигнальной волны. Для мощности накачки 28,7 ватт имеем длину волны сигнала 3,8 мкм и холостую волну 4,45 мкм, при этом мощность на выходе составляла 14,1 ватт</p>

<p>High-pulse-energy mid-infrared fractional image-rotation-enhancement ZnGeP₂ optical parametric oscillator (Высокий пульс-энергия средней инфракрасной области частичного изображения-вращение-улучшение оптических кристаллах ZnGeP₂ параметрический генератор) Авторы: MARC EICHHORN, MARTIN SCHELLHORN</p> <p>Публикация: Vol. 41, No. 11 / June 1 2016 / Optics Letters 2598</p>	<p>при длине резонатора 23 мм.</p>  <p>Длина волны накачки составляла 2,05 мкм. Лазер Ho:YLF криогенно охлаждался. Тип резонатора: кольцевой. Качество пучка на входе была $M^2=1.5$ и диаметр пучка подбирался 2.6, 5.5 и 8.6 мм. Полуволновая пластинка позволяла ослаблять энергию накачки кристалла без изменения профиля. Размер ZGP кристалла 14*12*6 мм, вырезанный под углом 54° к главной оси. На выходе получили холостую волну с длиной 4,6 мкм и 3,7 мкм. Выходное зеркало имеет $R>95\%$ для сигнальной волны, и $T>95\%$ и $T>98\%$ для волны накачки и холостой соответственно. Входное зеркало и остальные 4 имеют $T>86.7\%$ для волны накачки и $T>94\%$ для холостой волны, и $R>99\%$ для сигнальной волны. Общая длина резонатора равна 222 мм. Зеркало, которое стоит после резонатора имеет $R>99\%$ для волны накачки и $T=93\%$ для остальных волн.</p>
--	--

Mid-infrared ZGP OPO with divergence compensation and high beam quality (Средний ИК-диапазон ZGP OPO с

компенсацией дивергенции и высоким качеством луча)

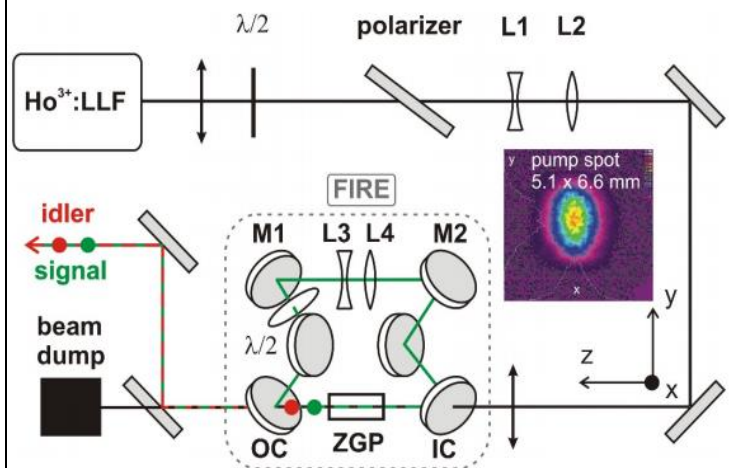
Авторы: MARTIN SCHELLHORN, GERHARD SPINDLER, MARC

EICHHORN

Публикация: Vol. 26, No. 2 | 22

Jan 2018 | OPTICS EXPRESS

1402



Накачка производилась с пучком, параметры которой: длина волны равна 2.053 мкм, длительность импульса 30 нс, энергией 180 мДж, и качеством пучка $M^2=1.1$. Размеры кристалла ZGP равна $9*9*16$ мм³, и вырезанный под углом 56° относительно главной оси. В результате на выходе был получен пучок, у которого было 2 волны: сигнальная 3,85 мкм и холостая 4,45 мкм. Длина резонатора составляла 222 мм. В самом резонаторе выходное зеркало имеет $R>50\%$ для сигнальной и холостой волн, $T>95\%$ для волны накачки и $T>95\%$ для холостой волны. Входное зеркало в резонаторе имеет $T=83.6\%$ для волны накачки и $T>94\%$ для холостой волны, и $R>99\%$ для сигнальной волны. L3 имеет фокус -25 мм, а L4 – 40 мм. Зеркало, которое стоит после резонатора имеет $T>96\%$ для волны накачки и $R>99\%$ для сигнальной и холостой волны.

Improvement of the beam quality of a high-pulse-energy mid-infrared fractional image-rotation-enhancement ZnGeP2 optical

parametric oscillator

(Улучшение качества пучка высокоимпульсного средне-инфракрасного фракционного изображения-вращение-усиление оптического параметрического генератора ZnGeP2)

Авторы: MARTIN

SCHELLHORN, GERHARD

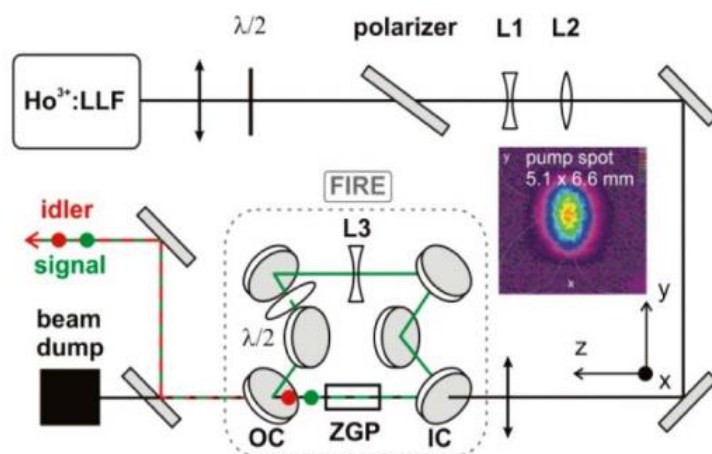
SPINDLER, MARC

EICHHORN

Публикация:

Vol. 42, No. 6 / March 15 2017 /

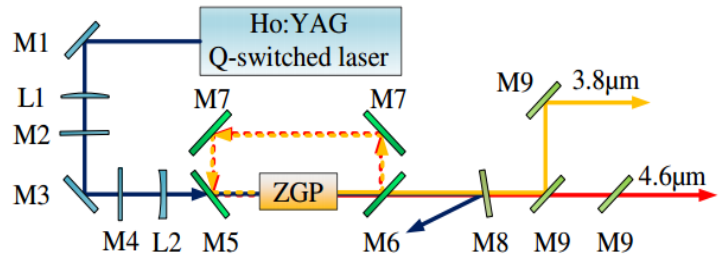
Optics Letters 1185



Накачка производилась с пучком, параметры которой: длина волны равна 2.053 мкм, длительность импульса 30 нс, энергией 180 мДж, и качеством пучка $M^2=1.1$. Размеры кристалла ZGP равна $9*9*16$ мм³, и вырезанный под углом 56° относительно главной оси. В результате на выходе был получен пучок, у которого было 2 волны: сигнальная 3,85 мкм и холостая 4,45 мкм. Длина резонатора составляла 222 мм. В самом резонаторе выходное зеркало имеет $R>50\%$ для сигнальной и холостой волн, $T>95\%$ для волны накачки и $T>95\%$ для холостой волны. Входное зеркало в резонаторе имеет $T=83.6\%$ для волны накачки и $T>94\%$ для холостой волны, и $R>99\%$ для сигнальной волны. Фокусное расстояние линзы L3 равно -10 и -9 мм. Зеркало, которое стоит после резонатора имеет $T>96\%$ для волны накачки и $R>99\%$ для сигнальной и холостой волны.

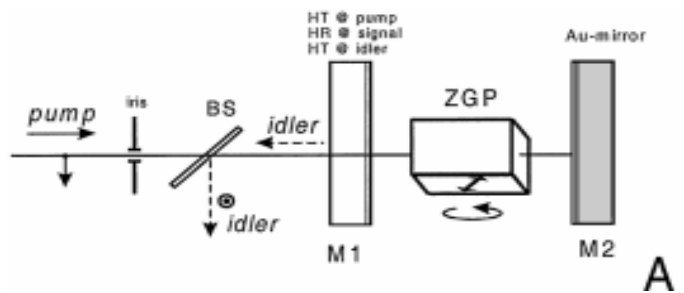
Comparison of mid-infrared ZnGeP₂ rectangle ring optical parametric oscillators of three types of resonant regimes

(Сравнение среднеквадратических прямоугольных кольцевых оптических параметрических генераторов ZnGeP₂ трех типов резонансных режимов)
 Публикация: Vol. 58, No. 15 / 20 May 2019 / Applied Optics/ Research Article 4169



Пучок накачки имел параметры: мощность 18,5 ватт, длину волны 2,0906 мкм, частота повторения 1 кГц, качество пучка $M^2_x=1.12$, $M^2_y=1.19$. Зеркало M1 имеет $R>99\%$ для 2,09 мкм, зеркала M2 и M3 могут изменять входную мощность. Резонатор имеет кольцевой тип. На M4 был зафиксированный угол поворота полуволновой пластинки, которая крутилась на S-поляризованной 2.09 мкм лазера на P-поляризованного 2.09 мкм лазера. M5 зеркало имеет $T>97\%$ для p-pol 2.09 мкм, $R>99.7\%$ для s-pol для 3.7-4.7 мкм. M7 зеркало имеет $R>97\%$ для s-pol 3-5 мкм. Размеры ZGP: 6*6*20 мм. В кристалл входил пучок диаметром на уровне e^{-2} равным по $x = 2.6$ мм, по $y = 3.6$ мм. M8 зеркало повернуто на 5° и имеет $R>99.9\%$ для 2.09 мкм и $T>99.9\%$ для 3-5 мкм. M9 повернуто на 45° и также имеет $R>99.7\%$ для s-pol 3.7-4.0 мкм и $R<2\%$ для s-pol 4.4-4.7 мкм.

ZnGeP2 optical parametric oscillator with 3.8–12.4-mm tenability (ZnGeP2 оптический параметрический осциллятор 3.8–12.4-мм перестройкой)
 Авторы: K. L. Vodopyanov, F. Ganikhanov, J. P. Maffetone, I. Zwieback, and W. Ruderman.
 Публикация: June 1, 2000 / Vol. 25, No. 11 / OPTICS LETTERS 841

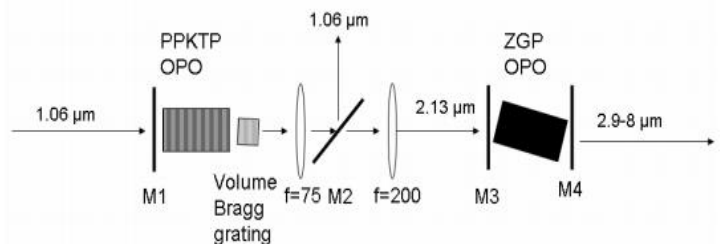


Кристалл имеет размеры 7*10*20 мм и вырезан под углом 49.5° к главной оси. Накачка имеет длину волны 2,93 мкм, и плотность потока энергии не больше 0,37 Дж/см². Длина резонатора равна 2,7 см. Зеркало M1 имеет T>75% для накачки и R>98% для сигнала, M2 имеет R>98% для всех волн: сигнала, накачки и холостой. Диаметр пучка накачки на уровне e⁻² равен 820 мкм.

Tandem PPKTP and ZGP OPO for mid-infrared generation (Тандем PPKTP и ZGP OPO для генерации среднего

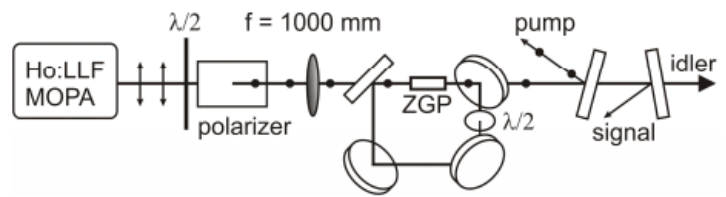
инфракрасного излучения)
 Авторы: Henriksson, Markus, Sjöqvist, Lars, Strömqvist, Gustav, Pasiskevicius, Valdas, Laurell, Fredrik.

Публикация:
 Technologies for Optical Countermeasures V, edited by David H. Titterton, Mark A. Richardson Proc. of SPIE Vol.



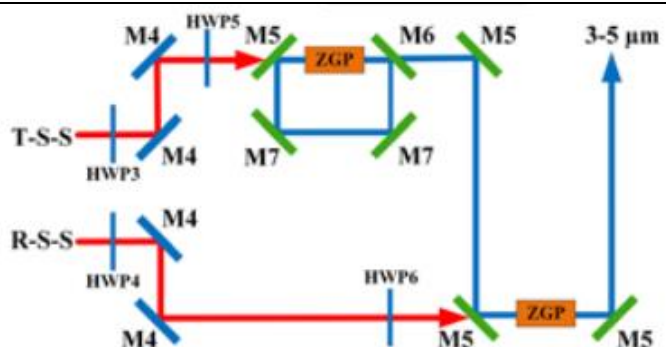
Диаметр падающего пучка на ZGP равен 500 мкм. Зеркало M3 имеет HR для 3-5 мкм и AR для 2.1 мкм (91%). Кристалл имеет размеры 6*6*14 мм и вырезан под углом 60° относительно главной оси. M4 зеркало имеет HR для 2.1 мкм, R≈85% для 3-4.4 мкм и 10-40% диапазона. Общая длина резонатора 20 мм.

ZGP RISTRA OPO operating at 6.45 μm and application in surgery (ZGP RISTRA ОПО, работающие на 6,45 мкм и применение в хирургии)
 Авторы: G. Stoepler, M. Eichhorn, M. Schellhorn, S. L. Been, R. M. Verdaasdonk
 Публикация: Lasers, Sources, and Related Photonic Devices Technical Digest © 2012 OSA



Качество пучка на входе $M^2_x=1.01$ и $M^2_y=1.03$, длина волны пучка 2,053 мкм, а диаметр пучка равен 3,85 и 3,65 мм по осям, формируя максимум потока 0,86 Дж/см².
 Физическая длина резонатора 130 мм. Выходное зеркало имеет $R \approx 65\%$ для выходного сигнала, $HT > 95\%$ для накачки и $HT > 98\%$ для холостой волны. Остальные 3 зеркала имеют $HT > 98\%$ для накачки и $HT > 94\%$ для холостой волны, и $HR > 99\%$ для сигнальной волны. Размеры кристалла ZGP 7*7*16мм³ и вырезанный под углом 56° отн. главной оси. Охлаждение было водным, проведенную через медную подложку. Относительная влажность 40% и температура 28°C.

161 W middle infrared ZnGeP₂ MOPA system pumped by 300 W-class Ho:YAG MOPA system (161 Вт средняя инфракрасная система ZnGeP₂ MOPA накачиваемая 300 Ваттным Ho:YAG MOPA системы) (C2F9CC83-0571-FF76-B10FE0F7D26A716C_ads41375



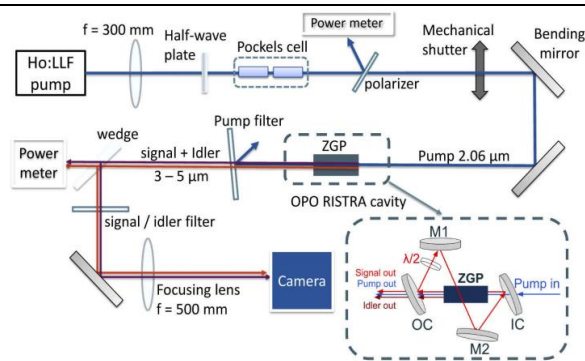
Резонатор ZGP имеет физическую длину 180 мм. Зеркало M5 имеет высокое отражение для s-поляризации 3.7-4.7 мкм и высокую

<p>5)</p> <p>Авторы: GAOYOU LIU, SHUYI MI, KE YANG, DISHENG WEI, JUNHUI LI, BAOQUAN YAO, CHAO YANG, TONGYU DAI, XIAOMING DUAN, LIXIN TIAN, YOULUN JU</p> <p>Публикация: Превью (© 2020 Optical Society of America)</p>	<p>проходимость для р-поляризации 2.1 мкм волн. Зеркало М6 отражает 50% s-поляризацию 3.7-4.7 мкм и имеет высокую проходимость для s-поляризации 4.3-4.7 мкм, причём лучше, чем р-поляризацию 2.1 мкм. М7 имеет высокое отражение для s-поляризации 3.7-4.7 мкм и высокое прохождение для р-поляризации 4.3-4.7 мкм. Размеры ZGP кристаллов: 6*6*30 мм³ и вырезаны под углом 54.7° к главной оси. Эти кристаллы охлаждались водой при температуре 270К. Через прохождение через кристаллы на выходе получались длины волн 2.1 и 3-5 мкм. Диаметр пучка на уровне e^{-2} при входе в ZGP равен 1.9 мм для ОРО системы. Частота повторения импульсов 20 кГц, мощность на выходе была 78 Вт при мощности накачки 140 Вт. Эффективность преобразования равна 66.3 и 55.7%. Качество пучка M_x^2 2.84 и M_y^2 3.12. Для системы ОРА диаметр пучка составлял от 2.2 до 2.4 мкм на уровне e^{-2}. Коэффициент поглощения для 2.1 мкм составлял 0,035 см⁻¹ и 0,024 см⁻¹, для 3-5 мкм 0,017 см⁻¹ и 0,01 см⁻¹ методами VB ZGP и HGF-UG ZGP соответственно.</p>
--	---

Effects of pump pulse energy and repetition rate on beam quality in a high-power mid-infrared ZnGeP₂ OPO (Влияние энергии импульса накачки и частоты повторения на качество пучка в мощном средне-инфракрасном ОПО ZnGeP₂)

Авторы: MARCIN PIOTROWSKI, MANUEL ALESSANDRO MEDINA, MARTIN SCHELLHORN, GERHARD SPINDLER, AND ANNE ILDENBRAND-DHOLLANDE

Публикация: Vol. 29, No. 2 / 18 January 2021 / Optics Express 2577



Конфигурация системы была составлена из линзы с фокусом 300 мм, которая фокусировала пучок лазера диаметром 1.1 мм в кристалл ZGP без его повреждения (его импульс был не более 1 Дж/см²). С помощью полуволновой пластинки можно регулировать мощность и поляризацию пучка без изменений его пространственных и временных характеристик. Система накачивалась импульсами с частотой 0.1, 0.5, 1, 2.5, 5 и 10 кГц. Кристалл ZGP имеет размеры: 6*6*20 мм, и был разрезан под углом 55° к главной оси. Коэффициент поглощения для длины волны 2.065 мкм составил 0.044 см⁻¹. Максимум излучения на выходе был определён для холостой волны 3.85 мкм и для сигнальной волны 4.45 мкм. Охлаждения водой не было. В составе резонатора на ZGP было зеркало ОС с R≈50% и T>95% для сигнальной и волны накачки, IC и зеркала M1 и M2 имеют T=86,3% для накачки и T>94% для холостой волны, а так же R>99% для сигнальной волны. Так же там стоит

	<p>полуволновая пластинка, которая компенсирует поляризационное вращение и сохраняет его неизменным после кругового обхода. Физическая длина резонатора составляет 130 мм, что соответствует оптическому пути прохождения сигнального луча в оба конца около 172 мм.</p>
--	--

11. ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ ЗА КОМПЬЮТЕРОМ И ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ.

Работа за компьютером оказывает негативное влияние на здоровье человека и при некотором стечении обстоятельств способна даже привести к ЧС и несчастным случаям. При работе за ПК на человека воздействуют следующие негативные факторы:

- инфракрасное и электромагнитное излучение
- шумовой фон, создаваемый работающим ПК
- риск поражения электрическим током при замыкании
- возможность возгорания

Прежде чем приступить к работе за компьютером, необходимо проверить электропроводки, розеток и вилок, заземление ПК.

При работе за ПК запрещается:

- курить и употреблять пищу в непосредственной близости с компьютером
- располагать рядом с компьютером жидкости, а также работать с мокрыми руками
- прикасаться к другим металлическим конструкциям (например, батареям)
- заниматься очисткой компьютера, когда тот находится под напряжением
- самостоятельно осуществлять ремонт техники в случае отсутствия специальных навыков

В случае возникновения аварийной ситуации:

- необходимо сразу отсоединить ПК от сети
- при обнаружении оголенного провода незамедлительно отвести всех работников и исключить контакт с проводом
- в случае возникновения пожара принять меры по его ликвидации с использованием огнетушителей
- в случае поражения человека током оказать первую помощь и вызвать скорую медицинскую помощь

По окончании работы: выключить компьютер и отключить электропитание

Постоянная работа за компьютером негативно сказывается на здоровье человека, в частности: нагрузка на зрение приводит к его ухудшению, покраснениям глаз, возникновению «синдрома сухого глаза»; несоблюдение нормативов организации рабочего места может привести к искривлению позвоночника, заболеваниям суставов и болям различного характера. Порядок организации работы с компьютером определяется СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 от 03.06.2003.

Так как при проведении эксперимента использовалась установка с применением лазеров видимого и ИК диапазона, перед ней следует ознакомиться с техникой безопасности:

1. К работе на установке с лазером допускаются лица старше 18-ти лет с законченным высшим или средним образованием, изучившие техническую документацию к приборам установки, инструкцию по правилам эксплуатации, охране труда и техники безопасности при работе установки, также прошедшие инструктаж на рабочем месте и ознакомленные с инструкцией по оказанию первой помощи при несчастных случаях

2. В помещениях с лазерными установками должны соблюдаться правила пожарной безопасности. Наличие посторонних предметов в проходах и в лабораторных помещениях не допускается.

3. О каждом несчастном случае на работе нужно незамедлительно оповестить соответствующего руководителя. Руководитель оказывает первую помощь пострадавшему, организывает его транспортировку в лечебное учреждение.

4. В помещении где находятся лазерные установки запрещено использовать предметы с зеркальной поверхностью.

5. При работе с лазерным излучением запрещается: смотреть навстречу отраженному и первичному лазерному лучу; оставлять пространство, где проводятся манипуляции с лазером без присмотра; работать без защитных очков; проводить отладочные работы или работы по ремонту установки при включенном лазере.

6. При эксплуатации установки запрещается: работать на неисправной установке; производить замену элементов установки, соединений и кабелей при включении ее в сеть; во включенном состоянии оставлять установку без присмотра; применять кабеля с поврежденной изоляцией.