

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ФИЗТЕХ-ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ, ФОТОНИКИ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

ПРАКТИКУМ КАФЕДРЫ ФОТОНИКИ

**Измерение малых коэффициентов оптического
поглощения нелинейно-оптических кристаллов
методом пьезорезонансной лазерной
калориметрии**

выполнили студенты 654а группы ФЭФМ

Агафонов Владислав
Карпова Татьяна

Фрязино, 2019 г.

Содержание

| | |
|--|-----------|
| 1 Цель работы | 2 |
| 2 Приборы, используемые в работе | 2 |
| 3 Теоретические положения | 2 |
| 3.1 Методы измерения малых коэффициентов оптического поглощения. Лазерная калориметрия | 2 |
| 3.2 Пьезоэлектрический эффект | 3 |
| 3.3 Импедансная спектроскопия | 4 |
| 3.4 Синхронное детектирование | 4 |
| 3.5 Понятие эквивалентной температуры | 4 |
| 4 Экспериментальная установка | 5 |
| 5 Результаты измерений | 5 |
| 5.1 Температурная калибровка | 5 |
| 5.2 Определение пьезорезонансных термических коэффициентов резонансов кристалла LBO | 7 |
| 5.3 Определение пьезорезонансных оптических коэффициентов кристалла LBO | 9 |
| 5.4 Определение оптотермических коэффициентов кристалла LBO | 9 |
| 5.5 Мощность в кристалле | 10 |
| 5.6 Измерение полной кинетики разогрева кристалла | 10 |
| 5.7 Измерение короткой кинетики разогрева кристалла | 13 |
| 6 Вывод | 14 |

1 Цель работы

Ознакомление с методом пьезорезонансной лазерной калориметрии для измерения малых коэффициентов поглощения диэлектрических материалов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами.

2 Приборы, используемые в работе

- Генератор сигналов DS345 (SRS)
- Синхронный детектор SR865 (SRS)
- Резистор $R = 50\Omega$
- Контроллер температуры PTC-10 (SRS)
- Измеритель оптической мощности
- Кристалл трибората лития LBO
- Волоконный лазер YLM-25 (НТО «ИРЭ-ПОЛЮС») с параметрами:
 - Длина волны: 1070,1 нм;
 - Номинальная выходная мощность: 26,4 Вт;
 - FWHM: 1,7 нм;
 - Пороговая мощность: 0,3 Вт;
 - Диаметр выходного пучка ($1/e^2$): 166 мм;

3 Теоретические положения

3.1 Методы измерения малых коэффициентов оптического поглощения. Лазерная калориметрия

Разогрев и оптическое разрушение кристаллов лазерным излучением обусловлены коэффициентом поглощения света $\alpha(\lambda)$, где λ – длина волны света. Современные кристаллы, используемые для преобразования лазерного излучения имеют чрезвычайно малые коэффициенты поглощения света. Для определения различных термических характеристик материалов и измерения малых коэффициентов поглощения оптического излучения используют высоко чувствительные фототермические методы, включающие методы фотоакустики и лазерной калориметрии. В данной работе исследуется метод лазерной калориметрии.

Лазерная калориметрия является стандартизованным и одним из наиболее распространенных методов измерения малых коэффициентов оптического поглощения кристаллов. В основе лазерной калориметрии лежит поиск соответствия экспериментально измеренной кинетики разогрева исследуемого оптического материала лазерным излучением и решения нестационарного уравнения теплопроводности.

В методе лазерной калориметрии температура образца обычно измеряется с помощью внешних термодатчиков. Основной недостаток такого подхода заключается в том, что в большинстве случаев измеряется не температура исследуемого кристалла, а температура окружающего его воздуха или температура контакта термодатчик-образец, то есть измерения производятся в режиме теплового потока, а не теплового равновесия. К тому же, точность эксперимента зависит от правильного учёта потерь тепла, обусловленных теплопроводностью окружающих кристалл элементов и учёта разогрева датчика за счёт поглощения рассеянного излучения.

В приближении несжимаемой среды и отсутствии внутренней конвекции нестационарное уравнение теплопроводности для трехмерного случая имеет вид:

$$\rho c_{sp} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T) + f, \quad (1)$$

где ρ – теплопроводность кристалла, c_{sp} – теплоёмкость кристалла, T – температура, κ – теплопроводность, функция f описывает распределение источников тепла. Для решения уравнения теплопроводности используют один из четырёх видов граничных условий (1-4 рода).

При решении уравнения теплопроводности обычно используются следующие предположения:

- разогрев, обусловленный поглощением излучения, мал по сравнению с температурой окружающей среды
- градиенты температуры в объёме образца пренебрежимо малы (при воздействии лазерного излучения малой интенсивности и хорошей теплопроводности исследуемого материала)
- в начальный момент времени кристалл находится в тепловом равновесии с окружающей средой

Исходя из перечисленных допущений, можно переписать уравнение теплопроводности (1) для цилиндрического образца в следующем виде:

$$\dot{T} = \frac{\alpha l P}{mc_{sp}} - \gamma(T - T_{ext}), \quad (2)$$

где α – коэффициент оптического поглощения, P – мощность лазерного излучения, m – масса образца, γ – коэффициент температурных потерь l - длина образца.

$$\gamma = \frac{h^T S}{mc_{sp}}. \quad (3)$$

Здесь S – полная площадь поверхности образца, h^T – коэффициент теплообмена.

При воздействии ступеньки лазерного излучения решением данного уравнения будет:

$$T = \begin{cases} 0, & t \leq t_1; \\ \frac{\alpha l P}{mc_{sp}} (1 - e^{-\gamma(t-t_1)}), & t_1 < t < t_2; \\ \frac{\alpha l P}{mc_{sp}} (e^{-\gamma(t-t_2)} - e^{-\gamma(t-t_1)}), & t \geq t_2, \end{cases} \quad (4)$$

где t_1 - время начала облучения, t_2 - время выключения излучения. Измерив экспериментально кинетику разогрева исследуемого кристалла лазерным излучением и аппроксимируя её, используя последнее выражение, можно определить коэффициенты оптического поглощения α и теплообмена h^T .

На начальном участке экспоненту можно разложить в ряд Тейлора с учётом малости экспоненциального показателя (измерение кинетики кристалла до достижения термодинамического равновесия может достигать двух часов), и для измерения коэффициента оптического поглощения вполне достаточно использовать начальный участок (20-30 секунд) кинетики температуры кристалла. При этом на начальном участке температура разогрева кристалла должна линейно зависеть от времени с наклоном прямо пропорциональным коэффициенту оптического поглощения и мощности, воздействующего излучения:

$$T = \frac{\alpha l P}{mc_{sp}}(t - t_1) \quad (5)$$

3.2 Пьезоэлектрический эффект

В случае прямого пьезоэффекта диэлектрик поляризуется под действием механического напряжения, при обратном пьезоэффекте воздействие электрического поля приводит к механической деформации диэлектрика. Прямой пьезоэффект наблюдается только в кристаллах без центра симметрии.

Любой пьезоэлектрический кристалл имеет характерный набор пьезоэлектрических резонансов – собственных мод колебаний кристалла, которым соответствует набор частот, определяемых геометрией образца, его материальными константами и внешними условиями, в которые помещён образец. Амплитуда колебаний пьезоэлектрического резонанса будет наибольшей, когда частота электрического поля соответствует собственной частоте механических колебаний пьезоэлектрика. На рисунке 1 представлен характерный вид спектральной зависимости амплитуды и фазы адmittанса кристалла Y вблизи резонанса.

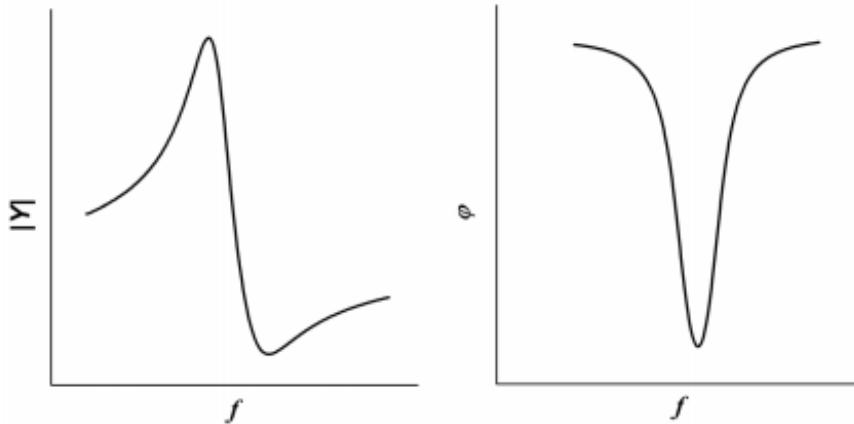


Рис. 1: Характерный вид зависимости от частоты электрического поля модуля $|Y|$ и фазы φ адmittанса вблизи резонанса кристалла.

3.3 Импедансная спектроскопия

Общий метод импедансной спектроскопии широко применяется для исследования объёмных и поверхностных электрических свойств различных диэлектриков и определения зависимости этих свойств от температуры, давления и других внешних воздействий, в том числе и лазерного излучения. В основе метода импедансной спектроскопии лежит измерение комплексного электрического импеданса исследуемого объекта в широком радиочастотном диапазоне от 10^{-4} до 10^9 Гц. Импеданс вычисляется по измеренным значениям амплитуды и фазы переменного тока, протекающего через объект, при воздействии переменного электрического напряжения.

Наиболее часто используемый подход заключается в определении в интересующем РЧ диапазоне отклика образца, помещённого между электродами конденсатора, на воздействие электрического напряжения фиксированной частоты f вида $U(f,t) = U_0 \exp(2i\pi ft)$. В общем случае результирующий ток $I(f,t) = I_0 \exp(2i\pi ft + i\varphi)$ будет сдвинут по фазе относительно напряжения на некоторую величину φ . Комплексный импеданс $Z = Re(Z) + iIm(Z)$ системы на частоте f вычисляется по формуле:

$$Z(f) = \frac{U(f,t)}{I(f,t)} = \frac{U_0}{I_0} \exp(-i\varphi) \quad (6)$$

Действительная часть импеданса называется резистанс (соответствует активному сопротивлению), мнимая часть – реактанс (соответствует реактивному сопротивлению). При описании электрических систем также используют понятие адmittанса $Y = Z^{-1}$ – обратной величины импеданса. Экспериментальное измерение импеданса может производиться разными способами; в данной работе используется метод синхронного детектирования.

3.4 Синхронное детектирование

В синхронном детекторе для выделения полезного сигнала переменного тока используется метод фазочувствительного синхронного детектирования на частоте опорного сигнала. Исследуемый объект возбуждается сигналом фиксированной частоты, а его реакция анализируется синхронным усилителем с использованием опорного сигнала той же самой частоты. В основе метода лежит операция перемножения этих сигналов.

3.5 Понятие эквивалентной температуры

Все нелинейно-оптические кристаллы обладают пьезоэлектрическими свойствами. Частоты возбуждаемых пьезоэлектрических резонансов сильно изменяются с температурой, прежде всего вследствие зависимости от температуры упругих свойств материала. В условиях однородного разогрева частоты исследуемых резонансов в первом приближении линейно зависят от температуры:

$$Rf_n(T) = Rf_n(T_a) + K_n^{prt} \Delta T, \quad (7)$$

где $K_n^{prt} = \frac{dRf}{dT}$ – пьезорезонансный термический коэффициент. Частота $Rf_n(T_a)$ соответствует начальной температуре T_a , частота $Rf_n(T)$ соответствует температуре T , n – индекс моды.

При воздействии на кристалл лазерного излучения фиксированной средней мощности P , частота резонансная частота Rf_n зависит от P . Аналогично случаю однородного разогрева в случае линейного взаимодействия можно ввести пьезорезонансный оптический коэффициент $K_n^{pro} = \frac{dRf}{dP}$. В общем случае эквивалентная температура разогрева кристалла при воздействии лазерного излучения определяется выражением:

$$\Delta\Theta_{eq}(P) = \frac{\Delta Rf_n(P)}{K_n^{prt}}. \quad (8)$$

В линейном случае:

$$\Delta\Theta_{eq}(P) = \frac{K_n^{pro}}{K_n^{prt}} P = \beta_n P, \quad (9)$$

где β_n – оптотермический коэффициент. При этом величина $\Theta_{eq}(P)$ в данном случае не зависит от выбора моды. Истинное распределение температуры кристалла, разогреваемого лазерным излучением:

$$T_{cr}(x,y,z,P) = T_a + \Theta_{eq}(P) + \Delta T(x,y,z,P). \quad (10)$$

На практике, за счёт большого значения теплопроводности кристаллов, выполняется условие $\Delta T(x,y,z,P) \ll \Theta_{eq}(P)$. Тогда термодинамическая температура кристалла, разогреваемого лазерным излучением, может характеризоваться эквивалентной температурой:

$$T_{cr}(x,y,z,P) = T_a + \Theta_{eq}(P). \quad (11)$$

Значение эквивалентной температуры лежит между минимальным и максимальным значением термодинамической температуры кристалла.

4 Экспериментальная установка

Общая идея измерения коэффициента оптического поглощения методом пьезорезонансной лазерной калориметрии заключается в замене термодинамической температуры кристалла, разогреваемого лазерным излучением, на его эквивалентную температуру по формуле (11). Напряжение от РЧ-генератора подаётся в цепь, содержащую малое нагрузочное сопротивление R и конденсатор, между обкладками которого находится исследуемый кристалл. С нагрузочного сопротивления R сигнал подается на измерительный вход синхронного детектора. На опорный вход синхронного детектора с синхронного выхода генератора подается РЧ сигнал той же частоты. Для каждого значения частоты f регистрируются амплитуда $|U_R|$ и фаза φ напряжения $|U_R|$ на входе синхронного детектора, что позволяет определять ток в цепи и вычислять комплексный импеданс $Z(f)$ или адmittанс конденсатора с кристаллом.

Блок-схема экспериментальной установки для измерения кинетики лазерного разогрева кристаллов представлена на рисунке 2. Пьезоэлектрический резонанс наблюдается при совпадении частоты собственной колебательной моды кристалла и частоты f переменного напряжения генератора, подаваемого в цепь, содержащую конденсатор с кристаллом.

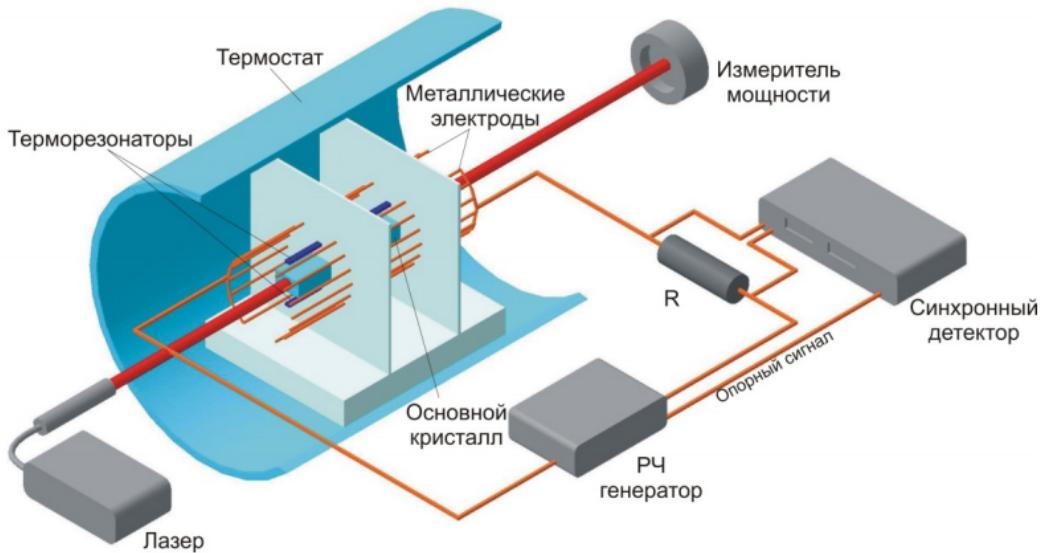


Рис. 2: Блок-схема экспериментальной установки для измерения эквивалентной температуры кристалла, взаимодействующего с лазерным излучением

Конденсатор с кристаллами помещается в специальный термостат. Трехмерная модель термостата представлена на рисунке 3. Термостат представляет собой кварцевую полую трубку, которая снаружи обмотана никромовой проволокой, являющейся резистивным нагревателем с общим сопротивлением 50 Ом. С двух торцов кварцевая труба плотно закрывается заглушками, в которых сделаны окна для прохождения лазерного излучения. При температурной калибровке для установления и точного измерения температуры окружения кристалла использовался программируемый термоконтроллер (см. Приборы, используемые в работе)

Для повышения точности измерений и получения большого объёма данных проведена автоматизация эксперимента, которая заключается в синхронизации работы генератора и синхронного детектора при помощи компьютера. Синхронный детектор и генератор подключались к компьютеру через интерфейс RS232 (COM-порт компьютера).

5 Результаты измерений

5.1 Температурная калибровка

Для того, чтобы определить резонансные частоты, которые будут использоваться для температурной калибровки, было проведено измерение спектральной зависимости отклика конденсатора с кристаллом в частотном диапазоне 200 кГц – 1.5 МГц с шагом 50 Гц. Графики зависимостей (АЧХ и ФЧХ на входе синхронного детектора) представлены на рис.4 и 5 соответственно.

Для проведения температурной калибровки были выбраны пьезоэлектрические резонансы кристалла, удовлетворяющие следующим условиям:

- сравнительно небольшая полуширина резонансной кривой
- средняя высота резонансной кривой (относительно остальных резонансных кривых)
- отсутствие вблизи других резонансов

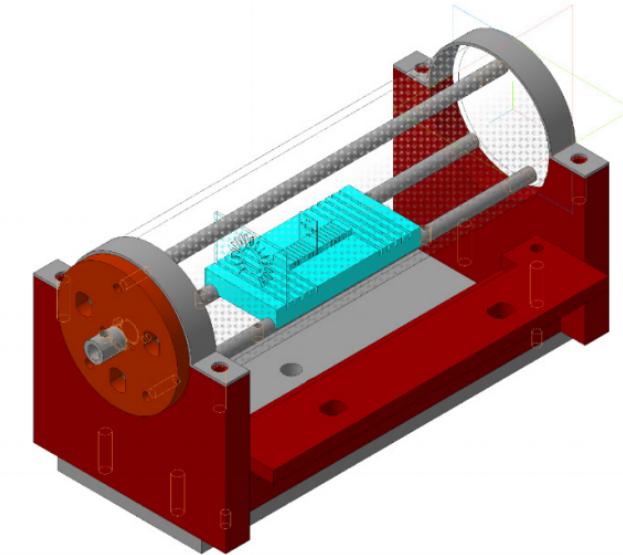


Рис. 3: Модель разработанного термостата с устройством для закрепления электродов конденсатора и кристалла

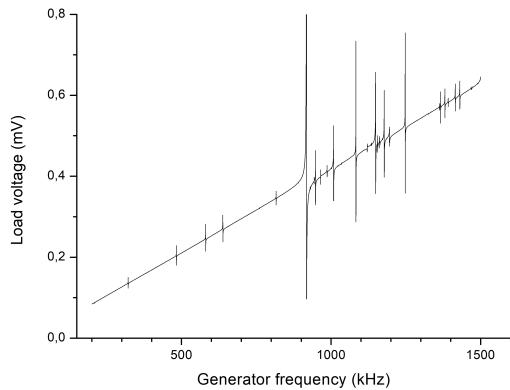


Рис. 4: АЧХ на входе синхронного детектора в широком диапазоне частот

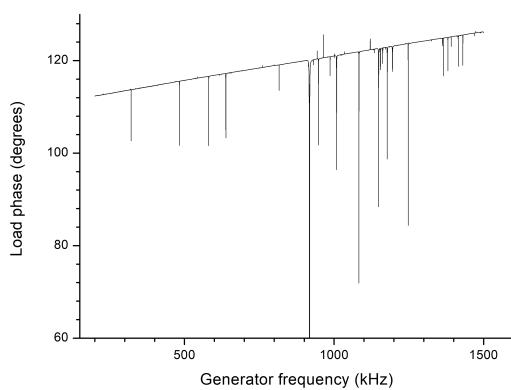


Рис. 5: ФЧХ на входе синхронного детектора в широком диапазоне частот

Далее была проведена температурная калибровка: были измерены зависимости частот исследуемых резонансов от температуры в диапазоне 25°C - 50°C с шагом 5°C при однородном разогреве в термостате. Измерения проводились после установления в термостате температурного равновесия (температура, регистрируемая датчиком, не изменялась в течение около получаса). Соответственные АЧХ и ФЧХ приведены на рис. 6-13.

Положения частот различных резонансов при различных температурах для удобства занесены в сводную таблицу 1.

Таблица 1: Сводная таблица зависимостей положения резонансов от температуры

| $T, ^\circ\text{C}$ | Rf_1, kHz | Rf_2, kHz | Rf_3, kHz | Rf_4, kHz |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 25 | 321.368 | 482.920 | 581.002 | 987.144 |
| 30 | 319.412 | 480.120 | 577.747 | 982.851 |
| 35 | 317.518 | 477.250 | 574.673 | 978.669 |
| 40 | 315.430 | 474.277 | 571.361 | 974.398 |
| 45 | 313.390 | 471.411 | 568.107 | 970.331 |
| 50 | 311.373 | 468.370 | 564.771 | 966.365 |

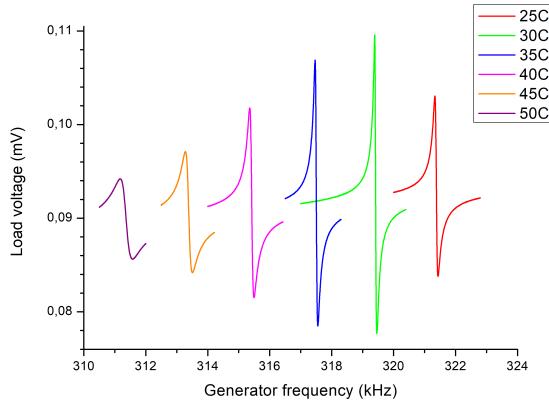


Рис. 6: Зависимость резонансной частоты от температуры ($Rf_1 = 321.368$ kHz, АЧХ)

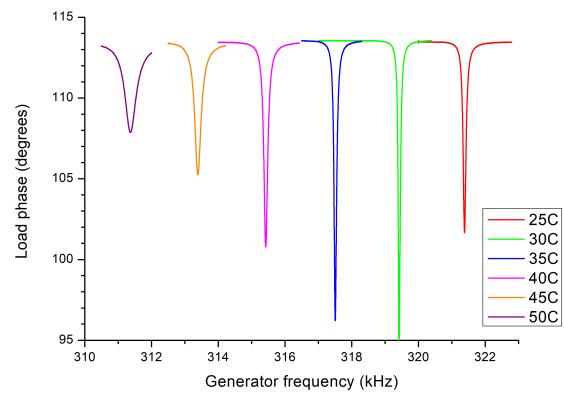


Рис. 7: Зависимость резонансной частоты от температуры ($Rf_1 = 321.368$ kHz, ФЧХ)

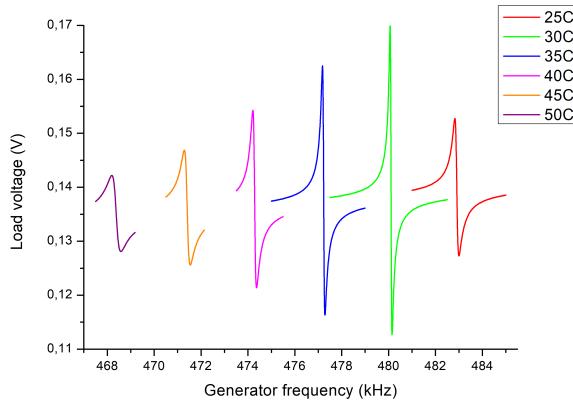


Рис. 8: Зависимость резонансной частоты от температуры ($Rf_2 = 482.920$ kHz, АЧХ)

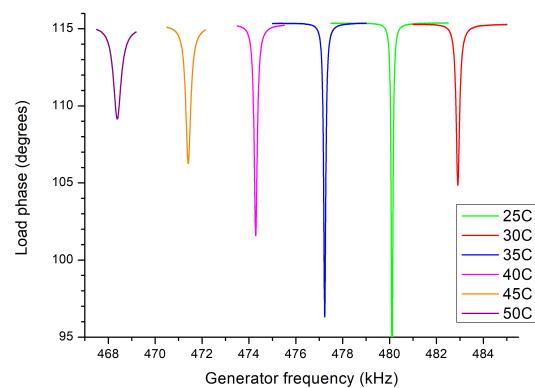


Рис. 9: Зависимость резонансной частоты от температуры ($Rf_2 = 482.920$ kHz, ФЧХ)

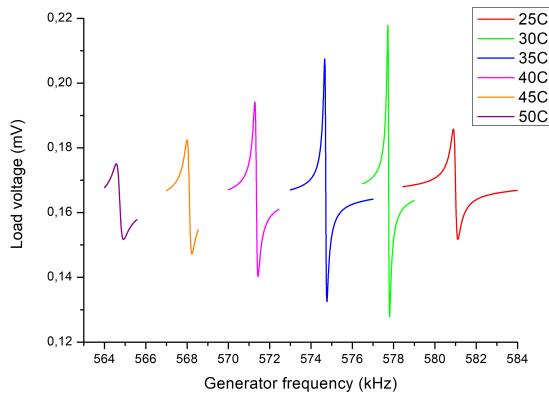


Рис. 10: Зависимость резонансной частоты от температуры ($Rf_3 = 581.002$ kHz, АЧХ)

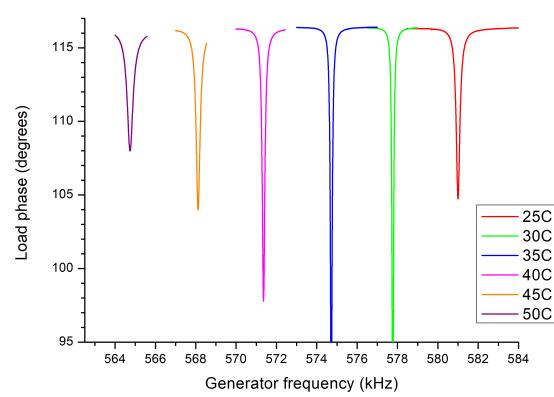


Рис. 11: Зависимость резонансной частоты от температуры ($Rf_3 = 581.002$ kHz, ФЧХ)

5.2 Определение пьезорезонансных термических коэффициентов резонансов кристалла LBO

Для определения пьезорезонансных термических коэффициентов исследуемых резонансов были построены графики зависимости положения резонансных частот от температуры $Rf_n(T)$ (рис.14-17), произведена линей-

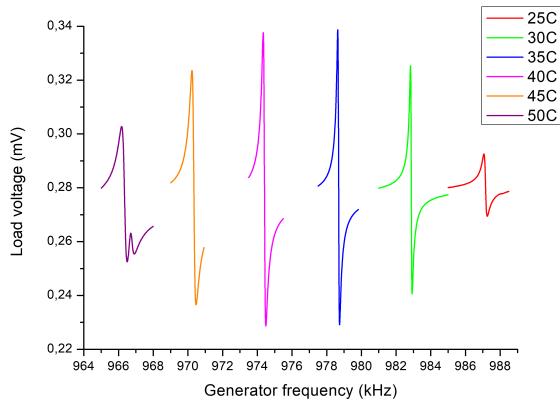


Рис. 12: Зависимость резонансной частоты от температуры ($Rf_4 = 987.144$ kHz, АЧХ)

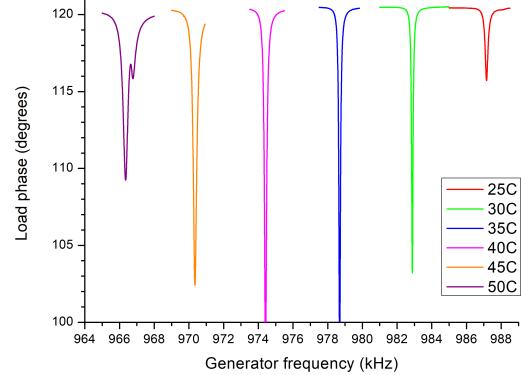


Рис. 13: Зависимость резонансной частоты от температуры ($Rf_4 = 987.144$ kHz, ФЧХ)

ная аппроксимация данных. Коэффициент определяется как наклон аппроксимирующей прямой $K_n^{prt} = \frac{dRf}{dT}$.

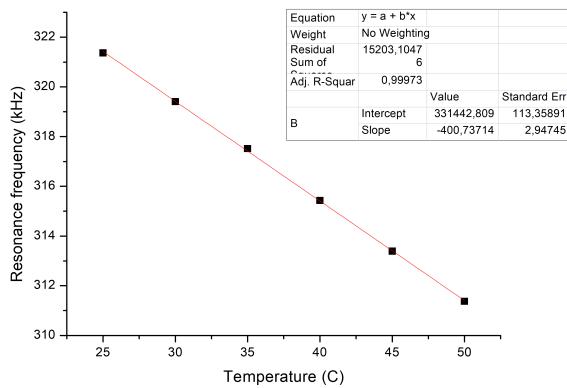


Рис. 14: Зависимость положения резонансной частоты от температуры (1 резонанс, $Rf_1 = 321.368$ kHz)

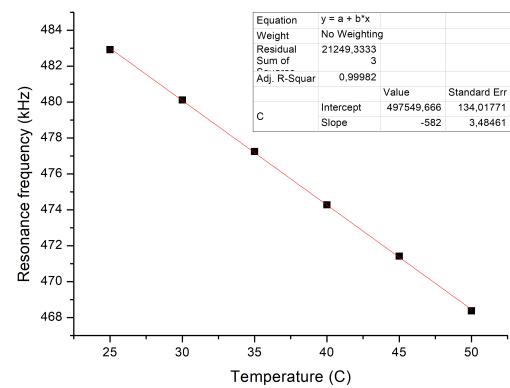


Рис. 15: Зависимость положения резонансной частоты от температуры (2 резонанс, $Rf_2 = 482.920$ kHz)

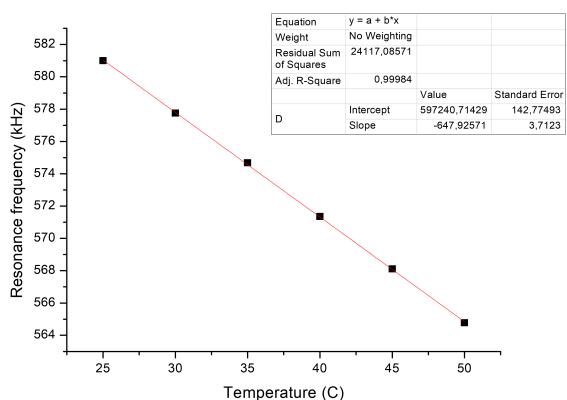


Рис. 16: Зависимость положения резонансной частоты от температуры (3 резонанс, $Rf_3 = 581.002$ kHz)

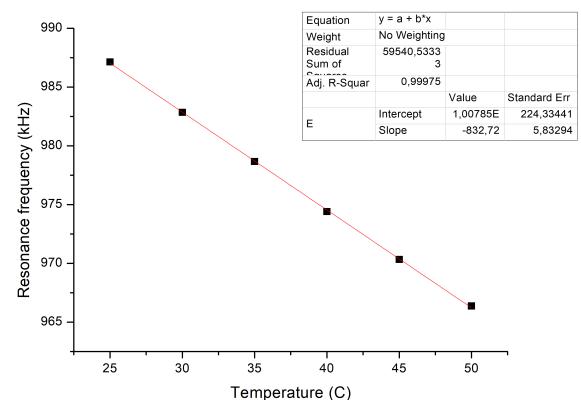


Рис. 17: Зависимость положения резонансной частоты от температуры (4 резонанс, $Rf_4 = 987.144$ kHz)

Таблица 2: Сводная таблица пьезорезонансных температурных коэффициентов для различных резонансов

| | Rf ₁ | Rf ₂ | Rf ₃ | Rf ₄ |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rf _n , kHz | 321.368 | 482.920 | 581.002 | 987.144 |
| K _n ^{prt} , Hz/°C | -400 ± 3 | -582 ± 3 | -648 ± 4 | -833 ± 6 |

5.3 Определение пьезорезонансных оптических коэффициентов кристалла LBO

Из исследуемых резонансов для дальнейшего исследования было выбрано три:

Таблица 3: Номера резонансов, используемые в п.5.3 и далее

| № резонанса | 1 | 2 | 3 |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| Rf _n , kHz | 321.368 | 987.144 | 581.002 |

Для определения пьезорезонансных оптических коэффициентов были измерены зависимости смещения положений резонансных частот от мощности лазерного излучения (Rf(T)) после достижения стационарного состояния по температуре (рис. 18-20). Измерения проводились для трёх значений мощности лазерного излучения следующим образом: на контроллере лазера выставлялось некоторое значение мощности (предварительно лазер был прокалиброван с помощью болометра) и достигалось термодинамическое равновесие, которое выражалось в отсутствии смещения положения резонансного пика. Далее полученные данные аппроксимировались линейной зависимостью, искомый коэффициент определяется по углу наклона аппроксимирующей прямой $K_n^{pro} = \frac{dRf}{dP}$.

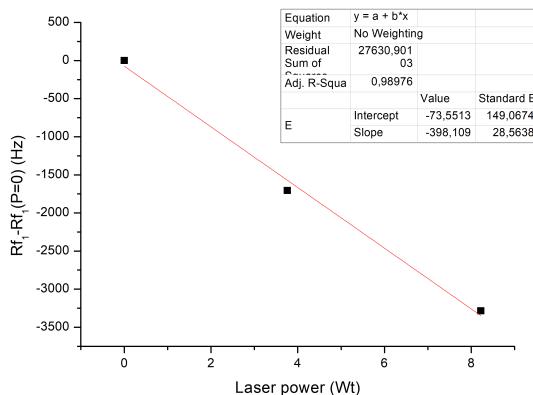


Рис. 18: Зависимость смещения положения резонансной частоты от мощности лазерного излучения (1 резонанс, Rf₁ = 321.368 kHz)

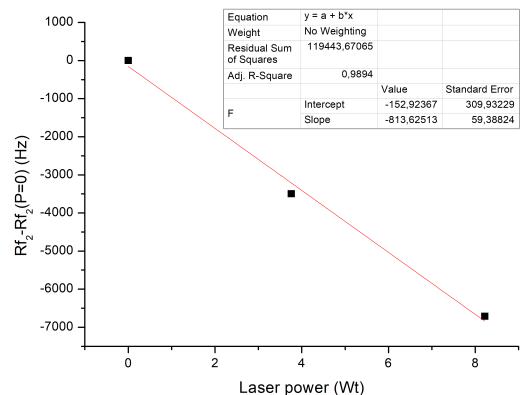


Рис. 19: Зависимость смещения положения резонансной частоты от температуры (2 резонанс, Rf₂ = 987.144 kHz)

Таблица 4: Сводная таблица пьезорезонансных оптических коэффициентов для различных резонансов

| Rf _n , kHz | 321.368 | 987.144 | 581.002 |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| K _n ^{pro} , Hz/Wt | -398 ± 28 | -814 ± 60 | -623 ± 38 |

5.4 Определение оптотермических коэффициентов кристалла LBO

Оптотермический коэффициент β_n определяется как отношение оптического и термического пьезорезонансных коэффициентов: $\beta_n = \frac{K_n^{pro}}{K_n^{prt}}$. Используя данные из таблиц 3 и 4, можно определить величины оптотермических коэффициентов для исследуемых пьезоэлектрических резонансов кристалла LBO (таблица 5)

Таблица 5: Сводная таблица оптотермических коэффициентов для различных резонансов

| Rf _n , kHz | 321.368 | 987.144 | 581.002 |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| β_n , °C/Wt | 0.944 | 1.256 | 0.74 |

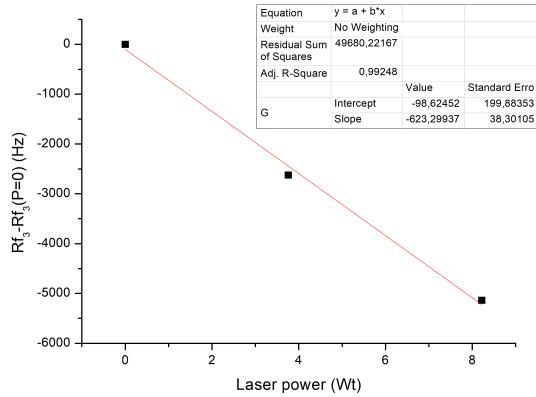


Рис. 20: Зависимость смещения положения резонансной частоты от температуры (3 резонанса, $Rf_3 = 581.002$ kHz)

5.5 Мощность в кристалле

В силу наличия у торцов кристалла отражательной способности, в кристалле будет находиться мощность, в общем случае не равная падающей. Принимая во внимание, что от торца отражается 4% излучения, получим:

$$P_{cr} = 0,96P_0 \cdot 0,96 \cdot 0,96 \cdot \dots = \frac{0,96P_0}{1 - 0,04} = P_0$$

Таким образом, мощность в кристалле равна падающей на кристалл мощности без учёта поглощения.

5.6 Измерение полной кинетики разогрева кристалла

Для определения коэффициентов оптического поглощения кристалла и теплообмена кристалла с воздухом для исследуемых резонансов были произведены измерения полной кинетики эквивалентной температуры при разогреве кристалла лазерным излучением фиксированной мощности и последующем охлаждении после выключения лазерного излучения. Измерения проводились для выходной мощности лазерного излучения 3.76 и 8.22 W. Графики зависимостей изменения температуры кристалла при нагревании и остывании представлены на рис.21, 22, 23, 24.

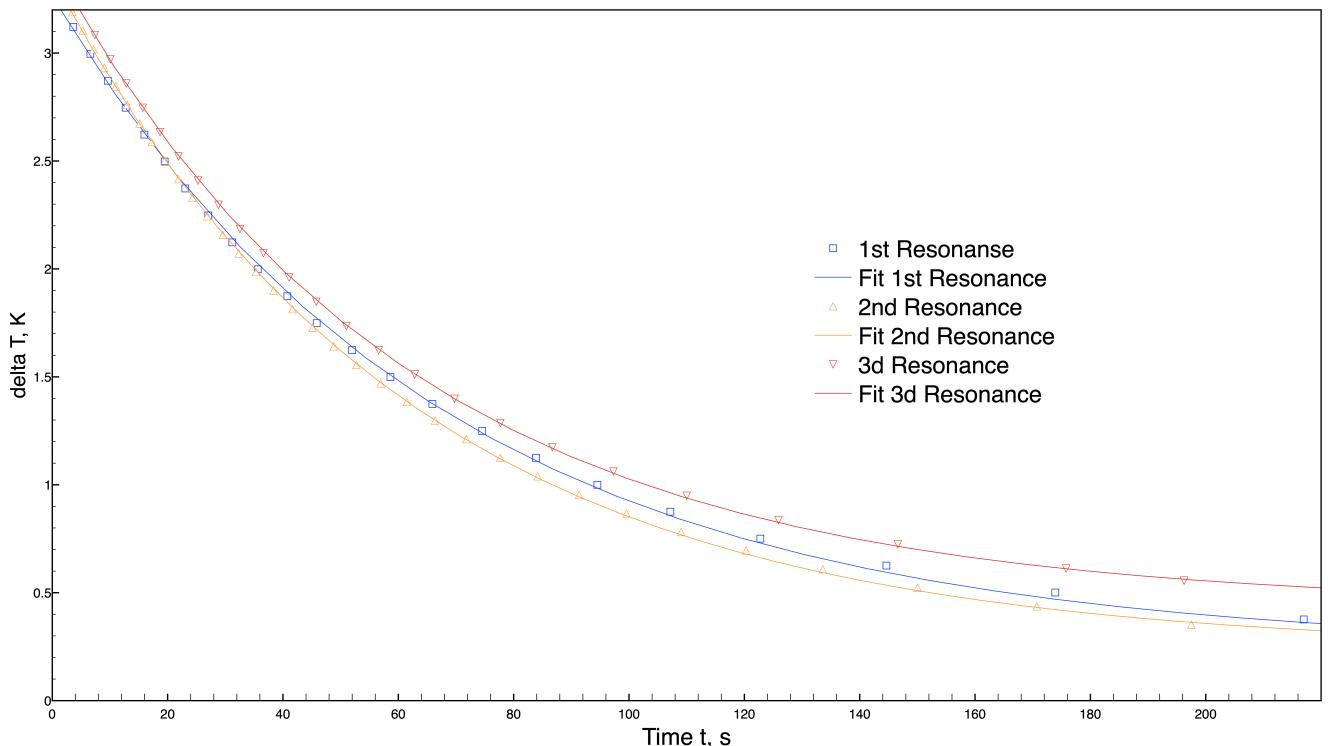


Рис. 21: Зависимость изменения температуры от времени при охлаждении. Мощность лазера: 3,76W

Полученные значения аппроксимируются экспоненциальными функциями следующего вида:

$$\text{Нагрев: } y = \frac{A}{B}(1 - \exp[-B(x - C)])$$

$$\text{Остывание: } y = \frac{A}{B}[\exp(-B(x - C))] + D$$

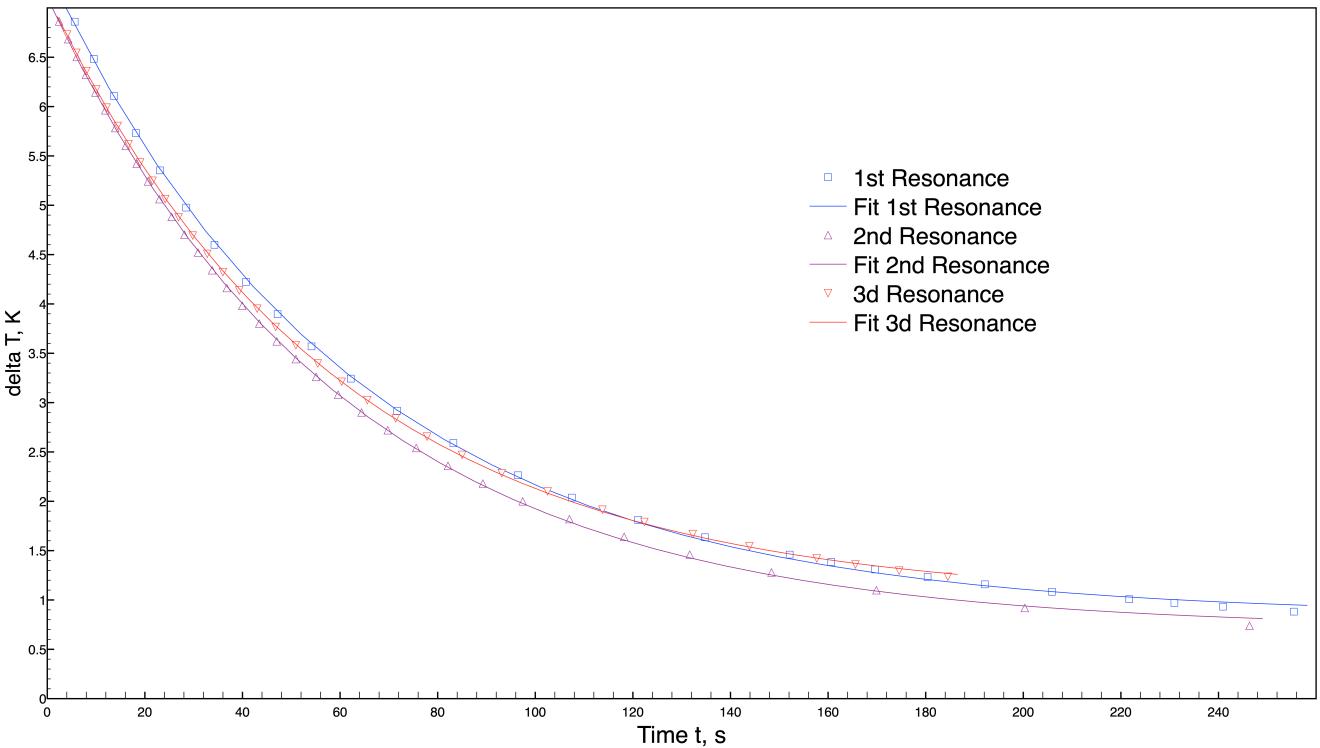


Рис. 22: Зависимость изменения температуры от времени при охлаждении. Мощность лазера: 8,22W

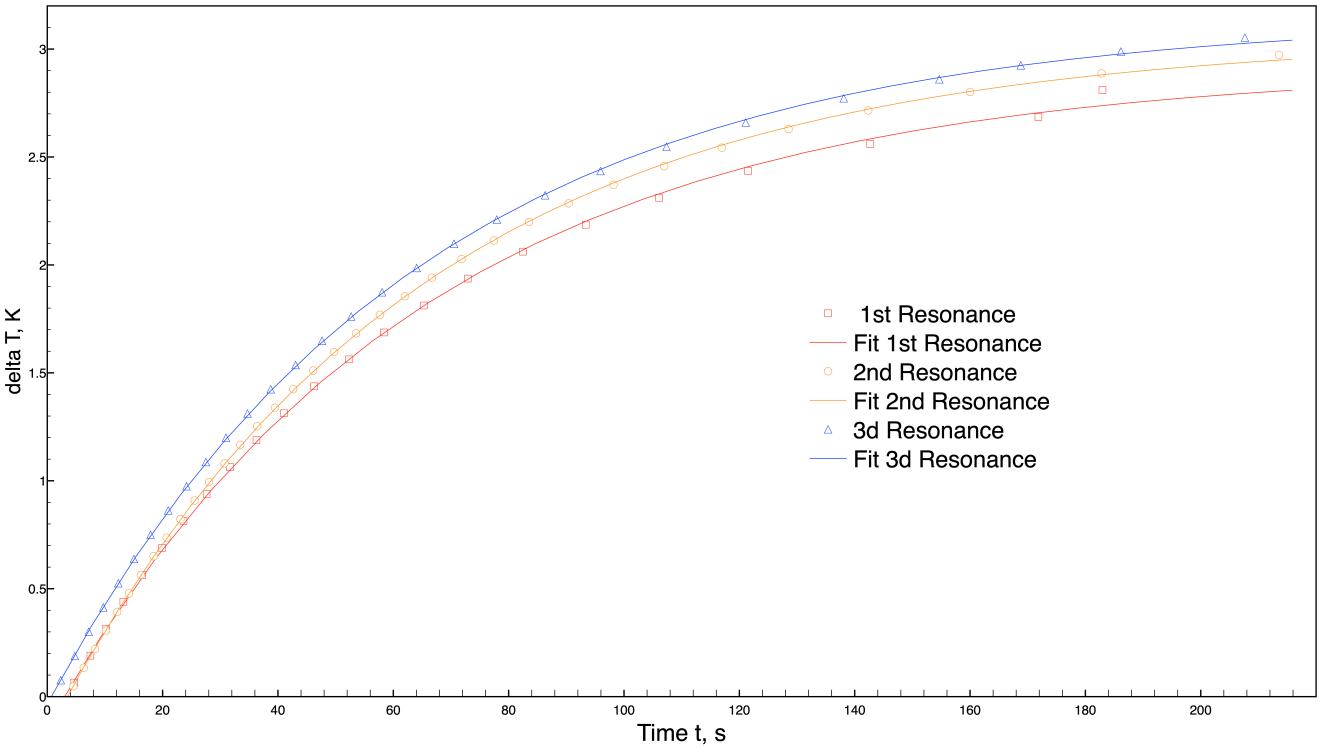


Рис. 23: Зависимость изменения температуры от времени при нагреве. Мощность лазера: 3,76W

Вид функций определён в ходе решения дифференциального уравнения (2); $A = \frac{\alpha l P}{mc_{sp}}$, $B = \gamma = \frac{h^T S}{mc_{sp}}$.

Значения коэффициентов в аппроксимирующих функциях приведены в таблицах 7 и 8. Параметры кристалла LBO сведены в таблицу 6 [1]. Усредним аппроксимационные коэффициенты по всем резонансам, используем значения параметров исследуемого кристалла и получим значения коэффициентов оптического поглощения и теплообмена в следующем виде:

$$\alpha = 21,4 \cdot 10^{-3} \frac{A}{P} \Rightarrow \alpha_h \approx 17 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1} \text{ and } \alpha_c \approx 14 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$$

$$\beta = 1,7 \cdot B \Rightarrow \beta \approx 31 \left[\frac{Wt}{m^2 \cdot K} \right]$$

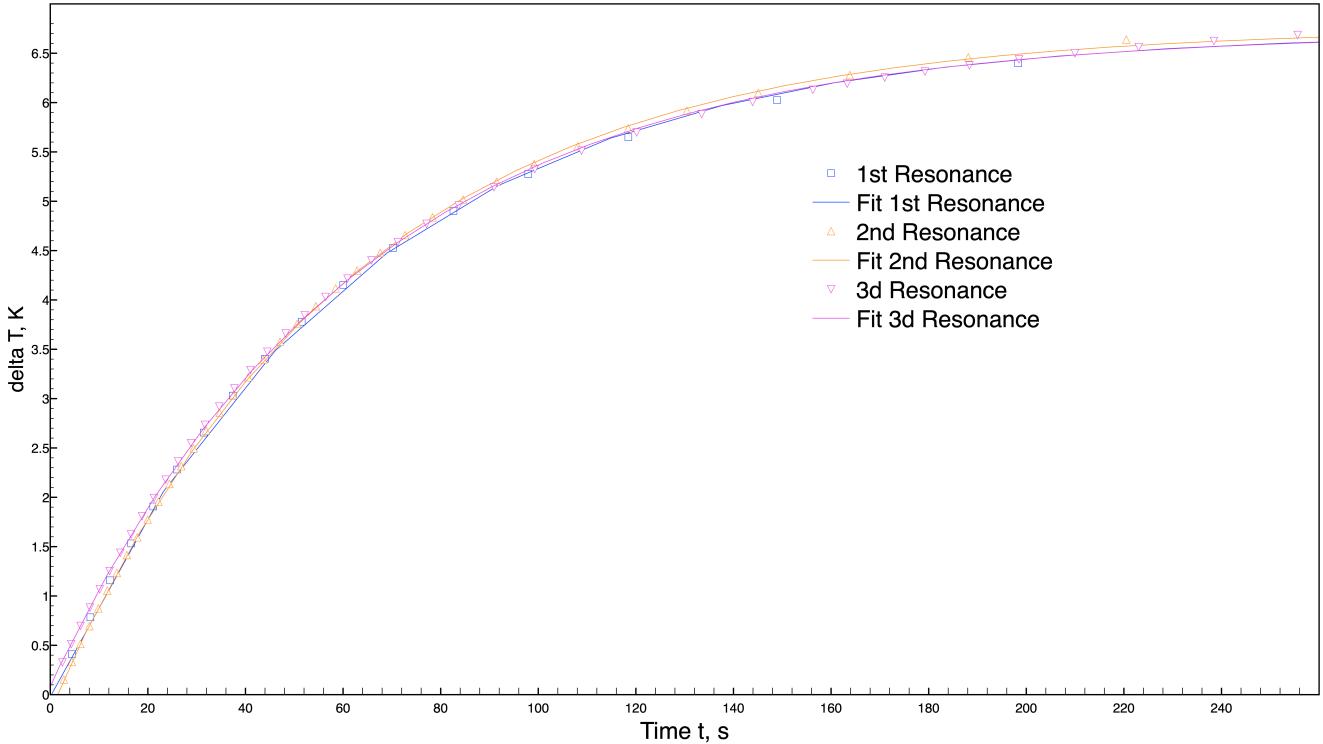


Рис. 24: Зависимость изменения температуры от времени при охлаждении. Мощность лазера: 8,22W

Таблица 6: Параметры исследуемого образца кристалла LBO)

| Удельная теплоёмкость c_{sp} | Плотность ρ | Площадь сечения S | Длина L |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------|
| 1022 Дж/кг · К (при Т=300К) | 2,47 г/см ³ | 3 × 3,1 мм ² | 20 мм |

Заметим, что коэффициент оптического поглощения получается больше при измерениях в режиме нагрева. Данный коэффициент, полученный в режиме нагрева, представляется более точным в силу пренебрежений, используемых в выводе аппроксимационной формулы для зависимости температуры от времени в режиме охлаждения. Отметим, что в выводе аппроксимации зависимости температуры от времени в режиме нагрева пренебрежений не производилось, т.е. используется точное аналитическое решение уравнения теплопроводности.

Таблица 7: Значения коэффициентов в аппроксимирующих функциях (мощность лазера 3.76 Wt)

| | A | B | C | D |
|-----------------------------|-------|-------|-------|------|
| 1 резонанс, остывание | 0.047 | 0.019 | -2.3 | 0.24 |
| 1 резонанс, нагрев | 0.061 | 0.016 | -16.1 | |
| 2 резонанс, остывание | 0.051 | 0.016 | -0.99 | 0.24 |
| 2 резонанс, нагрев | 0.064 | 0.016 | -14.3 | |
| 3 резонанс, остывание | 0.049 | 0.016 | -1.94 | 0.44 |
| 3 резонанс, нагрев | 0.065 | 0.016 | -16.9 | |
| Среднее значение, нагрев | 0,063 | 0,16 | | |
| Среднее значение, остывание | 0,049 | 0,16 | | |

Таблица 8: Значения коэффициентов в аппроксимирующих функциях (мощность лазера 8.22 Wt)

| | A | B | C | D |
|-----------------------------|-------|-------|-------|------|
| 1 резонанс, остывание | 0.11 | 0.016 | -3.29 | 0.84 |
| 1 резонанс, нагрев | 0.123 | 0.016 | -8.46 | |
| 2 резонанс, остывание | 0.111 | 0.016 | -2.67 | 0.71 |
| 2 резонанс, нагрев | 0.125 | 0.016 | -6.34 | |
| 3 резонанс, остывание | 0.110 | 0.017 | -3.68 | 0.99 |
| 3 резонанс, нагрев | 0.123 | 0.016 | -9.57 | |
| Среднее значение, нагрев | 0,124 | 0,16 | | |
| Среднее значение, остывание | 0,110 | 0,16 | | |

5.7 Измерение короткой кинетики разогрева кристалла

Для измерения начального участка кинетики снимается форма линии выбранного резонанса по фазе и аппроксимируется функцией Лоренца:

$$\Theta = \Theta_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{w}{4(f - Rf)^2 + w^2}$$

Характерный вид кривой и аппроксимации приведен на рисунке 40. Определяются 4 параметра аппроксимации: Θ_0 , A , Rf , w . Далее, для обработки измеренной зависимости $\Theta(t)$ и нахождения зависимости $Rf(t)$, применяется функция, обратная предыдущей:

$$Rf(t) = f^s \pm \sqrt{\frac{Aw}{2\pi(\Theta(t) - \Theta_0)} - \frac{w^2}{4}}$$

Из аппроксимации найденной зависимости $Rf(t)$ прямой с наклоном k , на основе 5 и 7 определяется коэффициент оптического поглощения:

$$\alpha = \frac{mc_{sp}k}{lPK_n^{prt}}$$

Были проведены исследования быстрых кинетик, результаты представлены на графиках 25 – 39 и сведены в таблицу 9. В соответствии в таблицей 6, упростим формулу вычисления коэффициента поглощения, подставив значения параметров кристалла:

$$\alpha = 21,4 \cdot 10^{-3} \frac{k}{PK_n^{prt}}$$

Далее определим коэффициенты поглощения для разных мощностей, усредняя по 3 резонансам. Такой подход корректен в предположении, что коэффициент поглощения не зависит от используемой в измерениях резонансной кривой, которым мы и пользуемся в данной части работы. Более того, при таком подходе мы сможем получить зависимость коэффициента поглощения от падающей на кристалл мощности. Результаты приведены в таблице 9. Данная таблица показала, что снять зависимость коэффициента поглощения от мощности падающего излучения не представилось возможным (нет явной зависимости коэффициентов от мощности). Было принято решение усреднить коэффициент поглощения по всем мощностям:

$$\alpha_{FK} \approx 14 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$$

Таблица 9: Результаты обработки коротких кинетик

| | 1,99W | 3,76W | 6,42W | 8,22W | 9,56W |
|---|--------|--------|--------|--------|---------|
| 1 резонанс | -10,82 | -19,74 | -37,4 | -41,33 | -46,83 |
| 2 резонанс | -21,69 | -40,26 | -74,68 | -97,84 | -113,81 |
| 3 резонанс | -15,68 | -29,52 | -54,8 | -69,98 | -91,7 |
| Коэффициент поглощения, 10^{-5} cm^{-1} | 27,7 | 27,2 | 29,7 | 28,5 | 29,4 |

6 Вывод

В данной работе мы ознакомились с методикой лазерной калориметрии и провели исследования температурных зависимостей кристалла LBO. Также для данного кристалла получили значения коэффициента поглощения двумя разными методами (измерением полной и короткой кинетики разогрева), результаты совпали по порядку величины:

$$\alpha_{SK} \approx 14 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1} \quad \alpha_{FK}^{heat} \approx 17 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1} \quad \alpha_{FK}^{cool} \approx 14 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$$

Также измерением полной кинетики получена оценка коэффициента теплообмена с окружающей средой:

$$\beta \approx 31 \left[\frac{Wt}{m^2 \cdot K} \right]$$

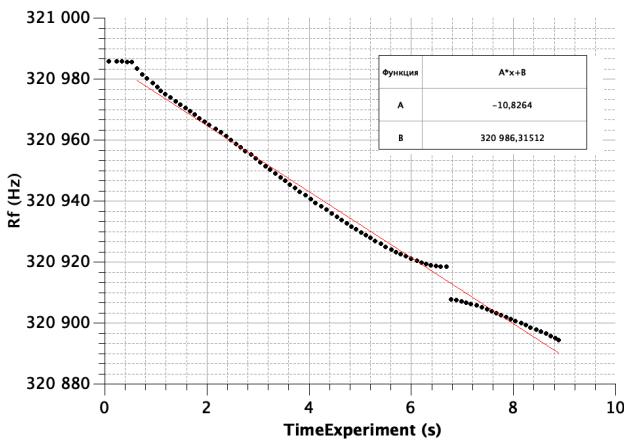


Рис. 25: Зависимость резонансной частоты от времени: 1 резонанс, 1,99W излучения

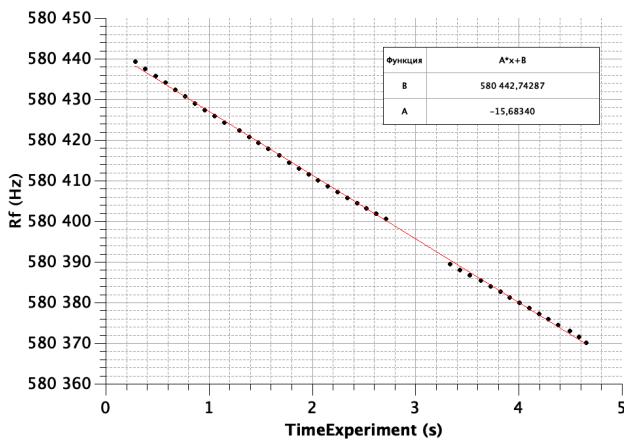


Рис. 27: Зависимость резонансной частоты от времени: 3 резонанс, 1,99W излучения

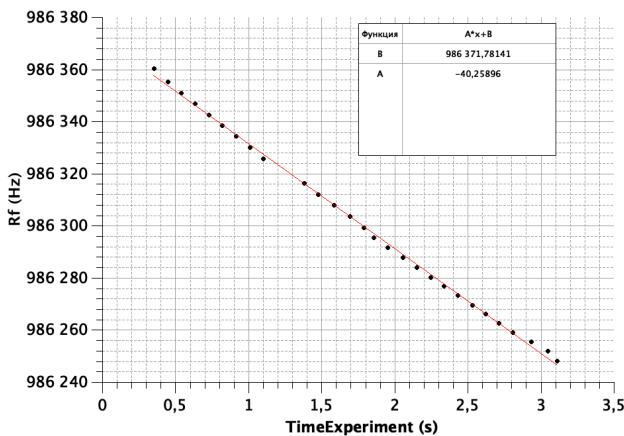


Рис. 29: Зависимость резонансной частоты от времени: 2 резонанс, 3,76W излучения

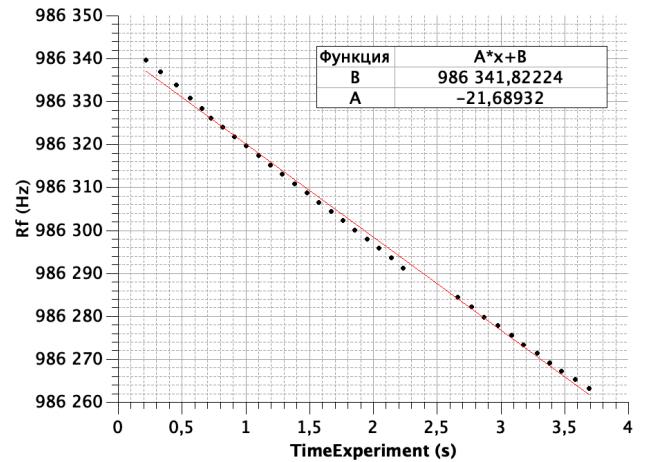


Рис. 26: Зависимость резонансной частоты от времени: 2 резонанс, 1,99W излучения

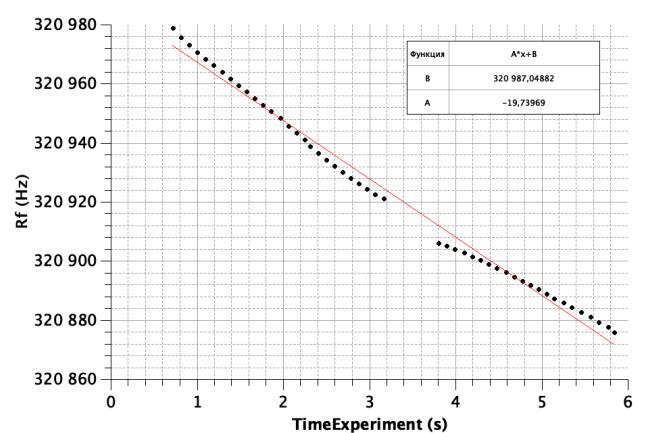


Рис. 28: Зависимость резонансной частоты от времени: 1 резонанс, 3,76W излучения

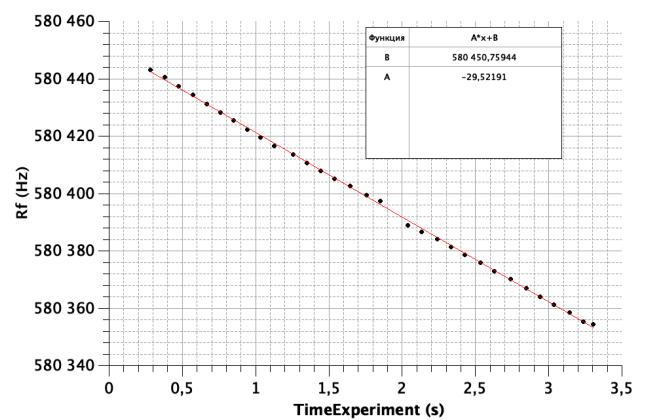


Рис. 30: Зависимость резонансной частоты от времени: 3 резонанс, 3,76W излучения

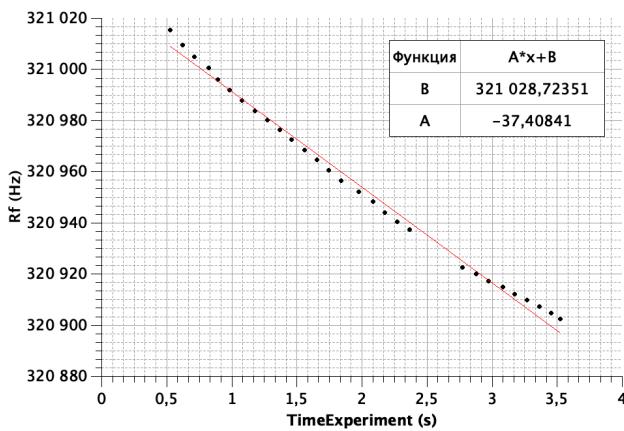


Рис. 31: Зависимость резонансной частоты от времени : 1 резонанс, 6,42W излучения

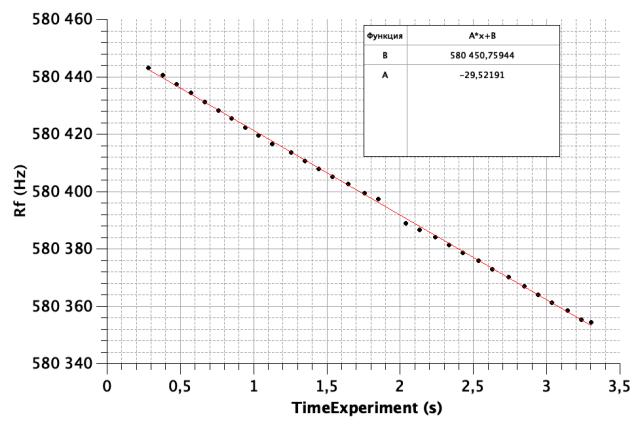


Рис. 32: Зависимость резонансной частоты от времени: 2 резонанс, 6,42W излучения

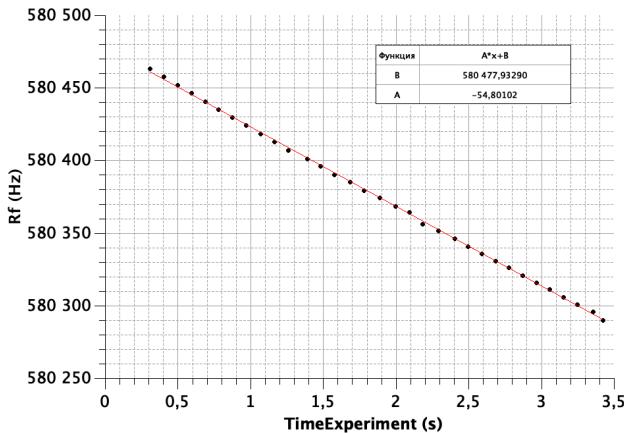


Рис. 33: Эволюция резонансной частоты во времени : 3 резонанс, 6,42W излучения

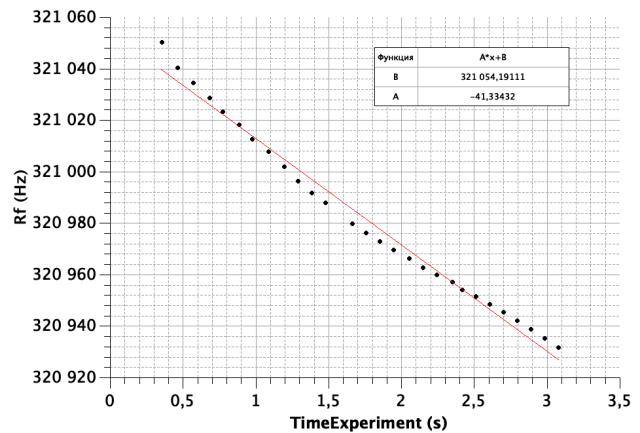


Рис. 34: Зависимость резонансной частоты от времени: 1 резонанс, 8,22W излучения

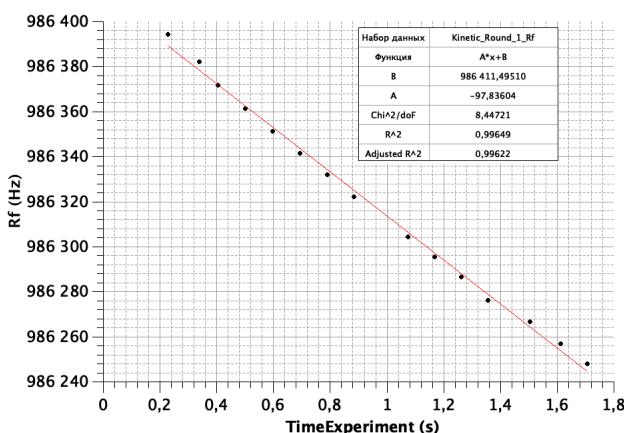


Рис. 35: Зависимость резонансной частоты от времени : 2 резонанс, 8,22W излучения

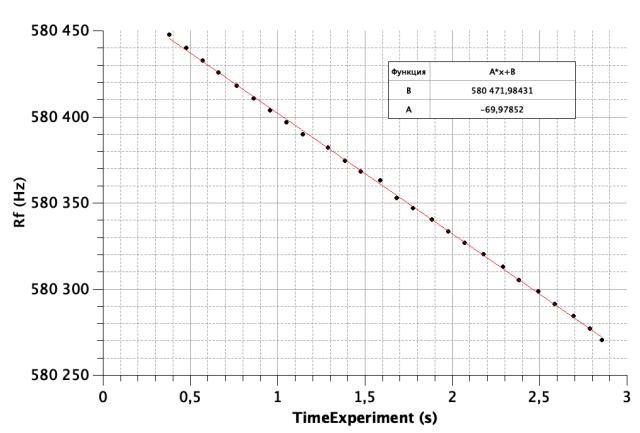


Рис. 36: Зависимость резонансной частоты от времени: 3 резонанс, 8,22W излучения

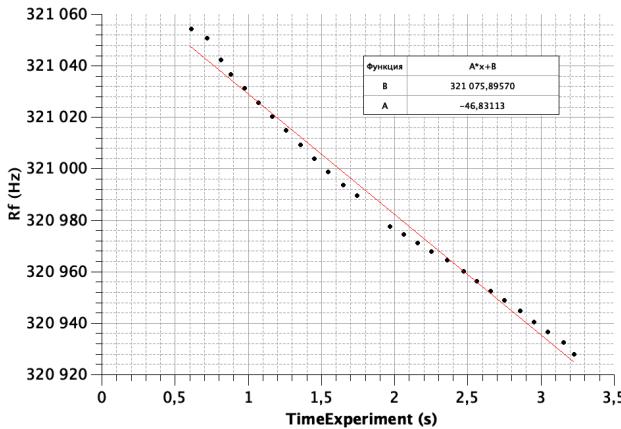


Рис. 37: Зависимость резонансной частоты от времени : 1 резонанс, 9,56W излучения

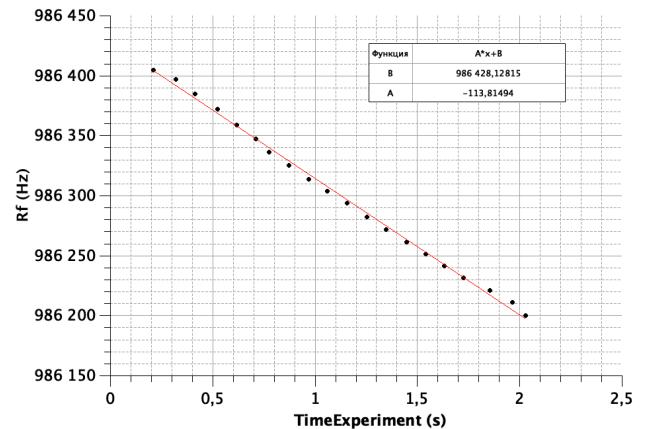


Рис. 38: Зависимость резонансной частоты от времени : 2 резонанс, 9,56W излучения

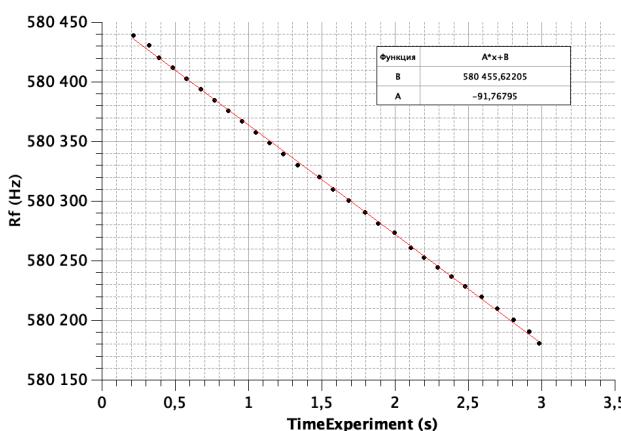


Рис. 39: Зависимость резонансной частоты от времени : 3 резонанс, 9,56W излучения

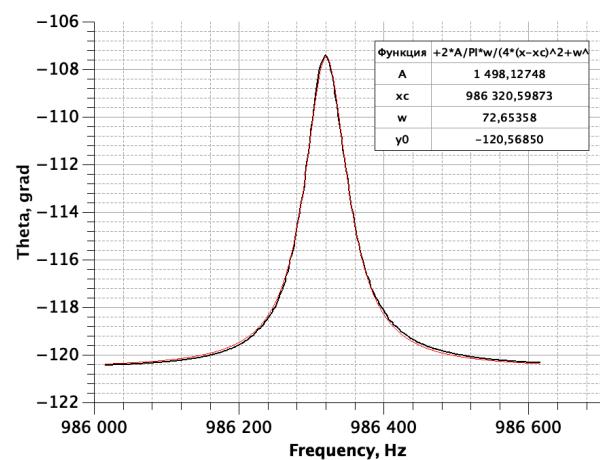


Рис. 40: Форма резонансной линии и ее аппроксимация функцией Лоренца: 2 резонанс, 3,76W излучения