

КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ  
КАФЕДРА КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ  
И ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСАМ  
«КВАНТОВАЯ РАДИОФИЗИКА»  
И «ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОПТИЧЕСКИХ  
КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРАХ»

## **ОПТИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР**

Павлов В.В.  
Семашко В.В.

2014 г.

УДК 533.1; 533.17; 533.5; 533.59; 533.56; 533.57

Учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму по курсам «Квантовая радиофизика» и «Основы физических процессов в ОКГ» для бакалавров по направлению 511500 – «Радиофизика», для специалистов по специальности 013800 – «Радиофизика и электроника» физического факультета (под редакцией д.ф.-м.н., доц. Семашко В.В.)

Составители: Павлов В.В.

Семашко В.В.

Рецензент: д.ф.-м.н., в.н.с. Казанского физико-технического института им. Е.К.Завойского КНЦ РАН,  
Калачев А.А..

Институт Физики Казанского (Приволжского) федерального университета,  
2014 г.

## **Содержание**

1. Введение. Основные понятия и терминология.....	4
2. Теория и практическая реализация параметрических усилителей и генераторов электромагнитного излучения.....	8
2.1. Радиочастотные параметрические генераторы и усилители.....	9
2.2. Параметрическая генерация света.....	14
2.3. Оптические схемы, реализующие параметрическую генерацию света.....	17
2.4. Перестройка частоты при параметрической генерации света.....	24
2.5. Параметрическая генерация света при использовании непрерывной и импульсной оптической накачки.....	29
2.6. Нелинейные кристаллы для параметрической генерации света....	33
3. Практическая часть.....	34
3.1. Описание экспериментальной установки.....	34
3.2. Техника безопасности при работе с лазерными источниками излучения.....,,	51
3.3. Порядок выполнения лабораторных работ.....	55
Контрольные вопросы.....	67
Список литературы.....	68

## **1. Введение. Основные понятия и терминология.**

Появление такого раздела физики как «нелинейная оптика» непосредственно связано с изобретением оптических квантовых генераторов (лазеров). До изобретения лазеров в экспериментах использовались световыми пучками, напряженность электрического поля которых была пренебрежимо мала по сравнению с внутриатомными и внутримолекулярными полями. Интенсивность же современных мощных лазеров достигает величины  $10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup> и более и оказывается сопоставимой с напряженностью электрического поля внутри атомов. Использование лазерных источников света с такой интенсивностью приводит к новым нелинейным оптическим эффектам. *Нелинейными оптическими эффектами* называют эффекты, характер протекания которых зависит от интенсивности излучения, а раздел физической оптики их изучающий называется нелинейной оптикой.

Классические (линейные) законы распространения света и его взаимодействия со средой, а именно прямолинейное распространение света в однородной среде, невзаимодействие световых пучков при их пересечении, линейное поглощение света в оптически прозрачных средах и др., оказываются несправедливы в случае больших интенсивностей излучения. В качестве критерия использования классических или нелинейных законов оптики может использоваться безразмерный параметр

$$\bar{E} = \frac{E}{E_{\text{ат}}}, \quad (1)$$

определенный как отношение напряженности внешнего светового поля к характерной напряженности внутриатомного поля. В случае использования слабых световых полей параметр нелинейности  $\bar{E} \ll 1$ , что соответствует приближению линейной оптики. Однако, когда внешнее световое поле  $E$ ,

оставаясь меньше  $E_{\text{ат}}$ , приближается к нему по величине ( $\bar{E} < 1$ ), законы классической оптики перестают выполняться.

Основной причиной экспериментально наблюдаемых отклонений от законов классической оптики является возникновение и проявление *эффекта самовоздействия света*. *Самовоздействие света* - эффекты изменения характера распространения света в нелинейной среде, обусловленные зависимостью свойств среды от интенсивности излучения. Различают два типа самовоздействия света. Первый тип связан с явлением нелинейной рефракции (искривления) лучей, приводящего к самофокусировке или самодефокусировке света. Для второго типа самовоздействия света определяющую роль играют нелинейное поглощение и многофотонные процессы.

В результате возникновения эффекта самовоздействия света при распространении в среде достаточно интенсивного излучения можно наблюдать следующие нелинейно-оптические явления:

- *Оптическое детектирование* – возникновение в нелинейной среде постоянной электрической поляризации;
- *Генерация гармоник* – генерация света с частотами, кратными частоте колебаний исходного излучения;
- *Параметрическая генерация света* – генерация излучения с плавно перестраиваемой частотой, где перестройка частоты осуществляется на основе параметрического взаимодействия световых волн в нелинейном кристалле;
- *Самофокусировка и дефокусировка света* – явление нелинейной рефракции (искривления) лучей.
- *Вынужденное рассеяние света* – появление в оптической среде волны рассеянного стимулированного излучения на смещенных

(комбинационных) частотах, характеристики которого имеют нелинейную зависимость от характеристик вынуждающего излучения;

- *Исчезновение красной границы фотоэффекта.* Ионизация атомов оптическим излучением в результате многофотонного поглощения может приводить к исчезновению красной границы фотоэффекта.
- *Просветление или затемнение среды.* В первом случае непрозрачная среда обратимо просветляется при воздействии на нее интенсивного светового импульса; во втором — наоборот, первоначально прозрачная среда становится непрозрачной при облучении светом;
- *Эффект насыщения* — выравнивание населённостей двух уровней энергии квантовой системы (молекулы, атома) под действием резонансного электромагнитного излучения. При увеличении интенсивности падающего излучения возрастает вероятность индуцированных квантовых переходов с верхнего уровня на нижний (вынужденное излучение) и обратно (поглощение), что приводит к выравниванию населённости этих уровней.
- *Самокомпрессия световых импульсов* — явление сочетающее перестройку частоты и значительное временное сжатие световых импульсов;
- *Оптические солитоны* — образование структурно устойчивой уединённой волны, распространяющейся в нелинейной среде;
- *Обращение волнового фронта* — явление формирования обращённого пучка волн (в частности, светового пучка), который в той или иной мере соответствует обращённой во времени картине распространения падающего (входного) пучка излучения;
- *Эффекты оптических бистабильности и мультистабильности* — явление в нелинейных системах с обратной связью, при котором

определенной интенсивности и поляризации падающего излучения соответствуют два (или несколько) возможных устойчивых стационарных состояния поля прошедшей волны, отличающихся амплитудой и (или) параметрами поляризации.

Необходимым условием наблюдения нелинейных эффектов является наличие нелинейной восприимчивости оптической среды. Более подробно о нелинейной поляризации среды можно прочесть в литературе, используемой при написании данного пособия (см. список литературы [1]-[16]). В данном методическом руководстве рассматривается такой нелинейно-оптический эффект как параметрическая генерация света.

## **2. Теория и практическая реализация параметрических усилителей и генераторов электромагнитного излучения**

Явление параметрического усиления света было теоретически предсказано в 1962 г. Кроллом [1], Ахмановым и Хохловым [2], Кингстоном [3] и др. Экспериментально его наблюдали в 1965 г. Ванг и Рейсетт [4], Ахманов и др. [5], Джордмейн и Миллер [6] и др.

В основе этого явления лежит воздействие оптической среды с нелинейными свойствами (например, кристаллов KDP или  $\text{LiNbO}_3$ ), которая возбуждается мощной световой волной, называемой волной накачки, на две или большее число световых волн при их распространении в этой среде [2]. При параметрическом возбуждении интенсивный световой пучок вызывает модуляцию параметров, определяющих развитие других связанных колебаний в системе. В этом процессе правило суперпозиции колебаний не выполняется. Чтобы объяснить механизм параметрического возбуждения, который был известен ранее в других областях физики и электроники, вначале рассмотрим вкратце эффект параметрического возбуждения и усиления электромагнитных радиочастотных колебаний.

## 2.1. Радиочастотные параметрические генераторы и усилители

Параметрические генераторы радиодиапазона представляют собой резонансную колебательную систему, в котором один из энергоёмких (реактивных) параметров  $L$  или  $C$  зависит от приложенного напряжения или протекающего тока.

Рассмотрим принцип параметрического усиления и генерации на примере простейшей системы — колебательного контура, состоящего из постоянных сопротивления  $R$ , индуктивности  $L$  и ёмкости  $C$ , которая периодически изменяется во времени. Собственная частота  $\omega_0$  такой колебательной системы определяется как:

$$\omega_0 = \sqrt{1/LC}. \quad (1)$$

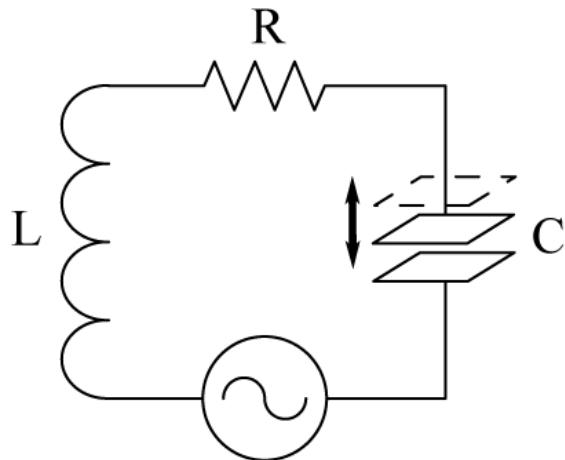


Рис.1 Колебательный контур, емкость которого периодически меняется во времени

При модуляции емкости происходит обмен энергией между источником сигнала и энергоемким параметрическим элементом. Наглядным примером обмена энергией при изменении емкости является хорошо известная модель с механическим раздвижением пластин заряженного конденсатора. Пондеромоторная сила электрического поля конденсатора стремится сблизить пластины (независимо от полярности напряжения);

следовательно, для их раздвижения, т. е. для уменьшения ёмкости, необходимо произвести работу, которая увеличивает запас энергии конденсатора. При сближении пластин, наоборот, часть энергии поля конденсатора преобразуется в механическую энергию.

Проследим, как изменяется электростатическая энергия  $W$ , запасенная в конденсаторе, при изменении его ёмкости. В случае, когда колебательный контур находится в резонансе, заряд  $q$  на обкладках конденсатора изменяется по закону:

$$q = q_0 \sin \omega_0 t = C Q E_0 \sin \omega_0 t, \quad (2)$$

где  $E_0$  – амплитуда сигнала,  $Q$  – добротность контура. При этом изменения электростатической энергии  $W$ , запасаемая в конденсаторе, будет изменяться со временем с частотой, равной удвоенной частоте сигнала.

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{q_0^2}{4C} (1 - \cos 2\omega_0 t) \quad (3)$$

Если в момент, когда  $q = q_0$ , раздвинуть пластины конденсатора, то есть изменить скачком ёмкость конденсатора  $C$  на величину  $\Delta C$ , то заряд  $q$  не успеет измениться, а энергия  $W$  изменится на величину (если  $\Delta C/C \ll 1$ ):

$$\Delta W = - \frac{W \Delta C}{C} \quad (4)$$

Из этого можно сделать вывод, что можно увеличить энергию в контуре периодически изменяя ёмкость конденсатора с определённой фазой и с частотой  $\omega_h = 2\omega_0$ . То есть если уменьшать ёмкость в моменты, когда  $q$  максимально, а возвращать величину ёмкости к исходному значению при  $q = 0$ , то устройство, изменяющее ёмкость конденсатора  $C$ , как бы «накачивает энергию» в контур дважды за период колебаний. В простейшем одноконтурном параметрическом усилителе в качестве устройства, изменяющего ёмкость колебательной системы, обычно применяется полупроводниковый параметрический диод, ёмкость которого зависит от

величины приложенного к нему гармонического напряжения генератора накачки.

Коэффициент усиления по мощности приближённо равен:

$$K = \frac{1}{1-Qm/2} \quad (5)$$

где  $m = (C_{\max} - C_{\min})/(C_{\max} + C_{\min})$  называется глубиной изменения ёмкости. При  $(m/2)Q \rightarrow 1$  коэффициент усиления неограниченно растет, при  $(m/2)Q > 1$  система превращается в параметрический генератор. Основной недостаток одноконтурного параметрического усилителя – зависимость  $K$  от соотношения между фазами усиливаемого сигнала и сигнала накачки.

Этого недостатка нет у параметрических усилителей, содержащих два контура и больше. Принципиальная схема двухконтурного усилителя представлена на рисунке 2.

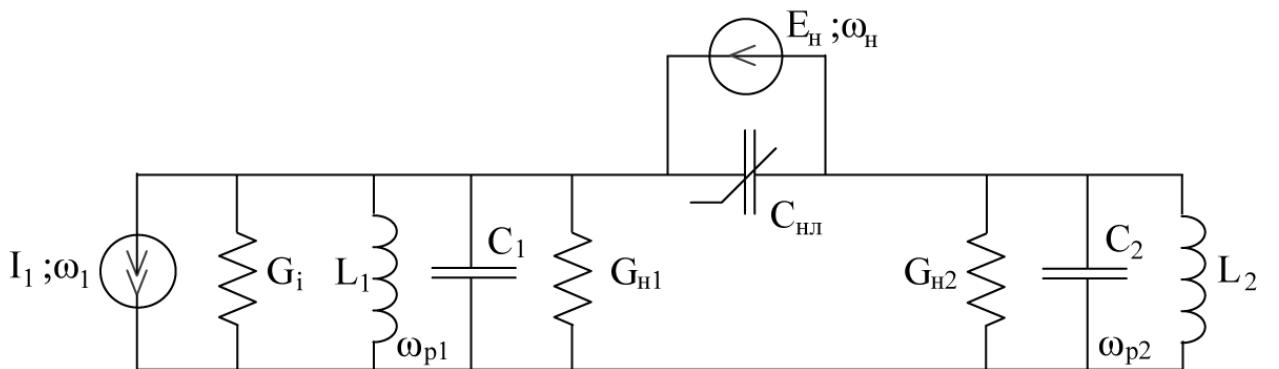


Рис. 2 Эквивалентная схема двухчастотного параметрического усилителя

Двухчастотный параметрический усилитель состоит из двух контуров (сигнального и холостого), а также из нелинейной ёмкости  $C_{\text{нл}}$  и генератора накачки. Сигнальный контур образуют элементы  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $G_{h1}$ , а элементы  $L_2$ ,  $C_2$ ,  $G_{h2}$  формируют холостой контур. Периодические изменения величины нелинейной ёмкости  $C_{\text{нл}}$  достигаются прикладыванием к ней управляющего напряжения накачки  $E_h$ .

Сигнальный контур настраивается на резонансную частоту  $\omega_{p1}$ , равную частоте усиливаемого сигнала, представленного на рис.2 в виде генератора тока  $I_L$ . Холостой контур при этом настраивается на резонансную частоту  $\omega_{p2}$ , сильно отличающуюся от  $\omega_{p1}$ . На резонансные частоты сигнального и холостого контура необходимо наложить условия, при выполнении которых на сигнальном контуре будет существовать лишь сигнал частоты  $\omega_1$ , а на вспомогательном контуре — частоты  $\omega_2$ . Для этого при выборе частоты  $\omega_{p2}$  необходимо чтобы частота сигнала  $\omega_1$  находилась вне полосы пропускания вспомогательного (холостого) контура. С другой стороны, комбинационная частота  $\omega_2$  должна находиться вне рабочей полосы сигнального контура.

В зависимости от того как настроен холостой контур данная схема может являться регенеративным или нерегенеративным усилителем. Если холостой контур настроен на частоту  $\omega_2 = \omega_n - \omega_1$ , то энергия накачки расходуется на усиление колебаний в обоих контурах. Такой усилитель называется регенеративным. При  $\omega_2 = \omega_n + \omega_1$  вся энергия накачки и энергия, накопленная в сигнальном контуре, переходят в энергию колебаний суммарной частоты  $\omega_n + \omega_1$ . Такой параметрический усилитель называется нерегенеративным усилителем-преобразователем.

Описанные принципы работы параметрических генераторов и усилителей радиодиапазона используются и для возбуждения колебаний оптического диапазона. Однако следует отметить существенные отличия нелинейных явлений в оптическом диапазоне по сравнению с радиодиапазоном. Так, например:

- интуитивно ясно, что в радиодиапазоне обмен энергией между разными частотами происходит на «уровне токов», а при параметрической генерации производится перестройка частоты тока источника накачки  $\omega_n$  в токи заданных частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Это, естественно, происходит в соответствующей двухконтурной

схеме посредством изменения одного из реактивного элемента схемы. В оптическом же диапазоне происходит параметрическое взаимодействие самих световых волн, распространяющихся в нелинейной среде;

- в случае радиодиапазона понятие «нелинейная среда» отсутствует и для наблюдения нелинейных явлений используют полупроводниковые приборы, электронные лампы или другие устройства, обладающие нелинейностью характеристик, тогда как в оптическом диапазоне нелинейно-оптические явления происходят непосредственно в нелинейных средах;
- в радиодиапазоне также нет аналогов нелинейных явлений возникающие в оптическом диапазоне в результате квантовых свойств излучения.

## 2.2. Параметрическая генерация света

Параметрическую генерацию света можно рассматривать по аналогии с генерацией гармоник в нелинейных кристаллах (см., например, [14-15]). Для этого, например, можно распространить явление генерации второй гармоники на случай двух падающих волн с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , суммирующихся в волну с частотой  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$  (генерация суммарной частоты). Генерацию суммарной частоты можно представить как возникновение биений между волной с частотой  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , которые приведут к образованию компоненты поляризации с частотой  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$  и, соответственно, к излучению электромагнитной волны с частотой  $\omega_3$ .

Оптическая параметрическая генерация представляет собой процесс, обратный генерации на суммарной частоте. Эффект параметрической генерации света заключается в передаче энергии от световой волны накачки в две волны с частотами, смещенными в стоксову область относительно частоты излучения накачки так, чтобы сумма их частот была равна частоте накачки. Эти волны часто называют сигнальной и холостой волнами, заимствуя терминологию из физики СВЧ. В корпускулярном представлении явление параметрической генерации света можно описать, как процесс исчезновения фотона с  $\omega_3$ , в то время как образуется фотоны с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . При этом полные энергия и импульс сохраняются, т.е. должно выполняться условие так называемого «фазового синхронизма»:

$$\hbar\omega_3 = \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 \quad (5)$$

$$\mathbf{k}_3 = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 \quad (6)$$

В изотропных кристаллах в области нормальной дисперсии удовлетворить одновременно обоим условиям невозможно. Для того чтобы показать это, предположим, что все три волны распространяются в одном направлении. Тогда выражение (6) перепишется следующим образом:

$$\omega_3 n_3 = \omega_1 n_1 + \omega_2 n_2, \quad (7)$$

где  $n_1, n_2, n_3$  – показатели преломления среды для соответствующих частот. С учетом (5) выражением (7) можно записать в виде:

$$(n_3 - n_1)\omega_1 - (n_3 - n_2)\omega_2 = 0 \quad (8)$$

Однако, для изотропных кристаллов соотношение (8) ни при каких условиях не может быть выполнено. Дело в том, что в случае нормальной дисперсии показатель преломления на более высокой частоте всегда больше аналогичного показателя для меньшей частоты излучения или:

$$(n_3 - n_1) > 0 \quad (n_3 - n_2) > 0. \quad (9)$$

Невыполнения равенства (6) означает, что в независимости от направления распространения пучков волновое число  $k_3$  всегда больше суммы волновых чисел  $k_1$  и  $k_2$ . Поэтому условие фазового синхронизма нельзя удовлетворить для изотропных кристаллов в области нормальной дисперсии даже в случае различных направлений векторов  $\mathbf{k}_1$ ,  $\mathbf{k}_2$  и  $\mathbf{k}_3$ .

Однако в анизотропных кристаллах условие фазового синхронизма можно удовлетворить между обыкновенной и необыкновенной волнами. В общем случае синхронизм может осуществляться при четырех типах взаимодействия, где индексам «о» и «е» при волновых векторах соответствуют обыкновенный и необыкновенный лучи:

$$\mathbf{k}_3^e = \mathbf{k}_1^o + \mathbf{k}_2^e \quad \mathbf{k}_3^e = \mathbf{k}_1^o + \mathbf{k}_2^o$$

$$\mathbf{k}_3^o = \mathbf{k}_1^o + \mathbf{k}_2^e \quad \mathbf{k}_3^o = \mathbf{k}_1^e + \mathbf{k}_2^e$$

Например, для кристалла ВВО ( $\beta$ -бората бария), который будет исследоваться в работе, синхронизм реализуется следующий тип взаимодействия:

$$\mathbf{k}_3^e = \mathbf{k}_1^o + \mathbf{k}_2^e \quad (10)$$

Также различают скалярный и векторный синхронизм. Если направления излучения накачки, сигнальной и холостой волн являются коллинеарными, то говорят о скалярном (коллинеарном) варианте фазового синхронизма. В случае неколлинеарности взаимодействующих волн используют понятие векторного фазового синхронизма. Схемы реализации скалярного и векторного синхронизма существенно отличаются и будут рассмотрены ниже.

Для описания процесса параметрической генерации света рассмотрим интенсивную световую волну с частотой  $\omega_p$  (излучение накачки) и слабую волну с частотой  $\omega_s$ , распространяющиеся в нелинейном кристалле. В результате нелинейной поляризации среды волна с частотой  $\omega_p$  образует биения с волной, имеющей частоту  $\omega_s$ , что приводит к возникновению компоненты поляризации с частотой  $\omega_i = \omega_p - \omega_s$ . При выполнении условия фазового синхронизма интенсивность световой волны с частотой  $\omega_i$  будет возрастать по мере своего прохождения через кристалл. В дальнейшем между волнами с частотой  $\omega_i$  и  $\omega_p$  также возникают биения, которые приводят к появлению компоненты поляризации с частотой  $\omega_s = \omega_p - \omega_i$ . Эта поляризация вызовет нарастание волны  $\omega_s$ . Следовательно, от волны с частотой  $\omega_p$  энергия будет передаваться волнам с частотами  $\omega_s$  и  $\omega_i$ .

## 2.3. Оптические схемы, реализующие параметрическую генерацию света

Одна из первых оптических схем по параметрической генерации света была разработана Вангом и Рейсеттом [4]. Схема их экспериментов приведена на рисунке 3. Рубиновый лазер работал в режиме модуляции добротности. Он генерировал световые импульсы мощностью 30 МВт длительностью 30 нс. Для генерации второй гармоники ( $2\omega$ ) использовался

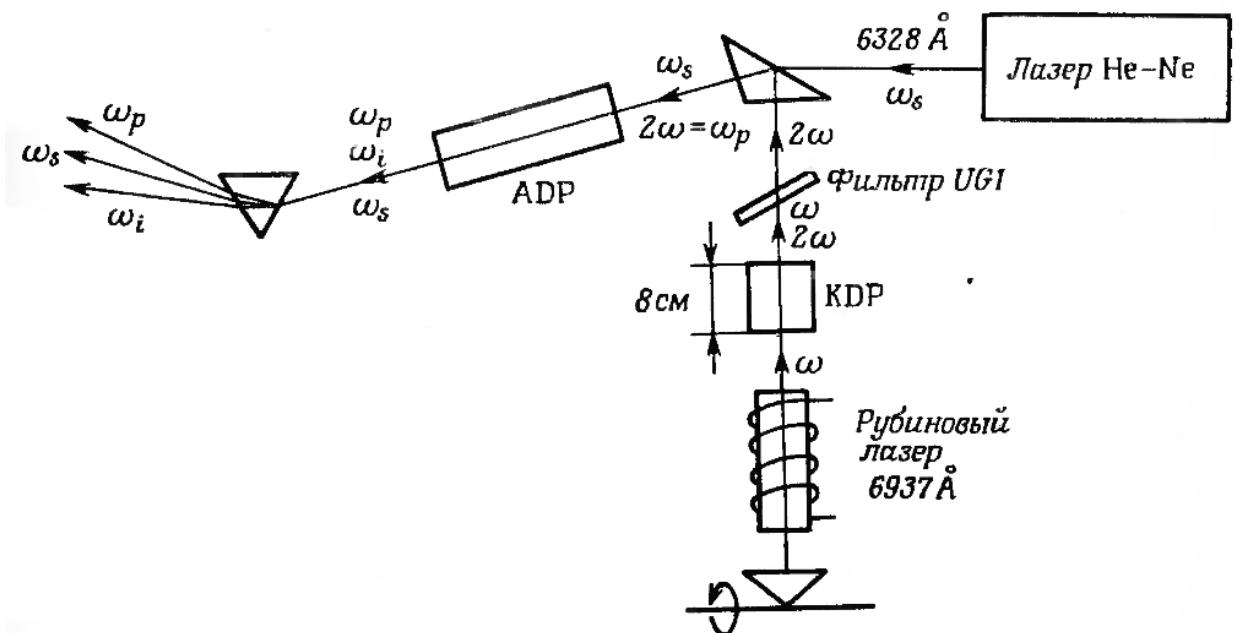


Рис. 3 Схема эксперимента по параметрическому усилению света Ванга и Рейсетта [4]

кристалл KDP, установленный под углом фазового синхронизма. Излучение второй гармоники играло роль волны накачки для параметрической генерации света ( $\omega_p = 2\omega$ ). В качестве сигнальной волны использовалось излучение He-Ne – лазера мощностью 10 мВт ( $\omega_s$  – частота сигнальной волны). С помощью призмы из кальцита сигнальная волна и волна накачки совмещались в кристалле ADP. Мощность второй гармоники ( $\lambda = 3469 \text{ \AA}$ ) в этом кристалле была равна 2 МВт. В результате нелинейного взаимодействия в кристалле ADP возбуждалась новая световая волна с разностной частотой  $\omega_i = \omega_p - \omega_s$  соответствующей длине волны  $\lambda = 7676 \text{ \AA}$ .

В эксперименте по параметрическому преобразованию света Ванга и Рейсетта использовались интенсивный световой пучок накачки на частоте  $\omega_p$ , а также слабый пучок излучения с частотой  $\omega_s$ . Однако для параметрической генерации света нет необходимости вводить дополнительно слабый пучок излучения с частотой  $\omega_s$  от внешнего источника, поскольку излучение на частоте  $\omega_s$  генерируется внутри кристалла из-за всегда присутствующего шума (так называемого «параметрического шума») или тепловых флуктуаций. Использование многопроходовой схемы оптического резонатора при соблюдении условий фазового синхронизма для желаемых частот  $\omega_s$  и  $\omega_i$  позволяет из этого шума выделить и усилить излучение именно этих частот. Эти излучения будут обладать всеми характеристиками, присущими лазерному излучению. Более того, если коэффициент усиления, обусловленное параметрическим эффектом, достаточно велик, то можно обойтись и вообще без оптического резонатора, а интенсивное излучение на частотах  $\omega_s$  и  $\omega_i$ , происходящее от параметрического шума, можно получить за один проход через кристалл.

Условием самовозбуждения параметрической генерации в резонаторной схеме является преобладание параметрического усиления над пассивными и излучательными потерями в резонаторе, что совпадает с аналогичным условием в теории традиционных лазеров.

На практике различают одно- и двухрезонаторные схемы параметрической генерации света. Если резонатор высокодобротен на частотах  $\omega_s$  и  $\omega_i$ , то говорят о двухрезонаторном параметрическом генераторе света (ДПГС). Если же добротность резонатора высока только на одной из двух частот, например,  $\omega_s$ , а на другой частоте резонатор фактически отсутствует, то говорят об однорезонаторном параметрическом генераторе (ОПГС).

Отметим, что именно резонатор позволяет выделить всякий раз те конкретные частоты  $\omega_s$  и  $\omega_i$ , на которые «расщепляется» частота  $\omega_p$  волны накачки. Число пар волн, сумма частот которых равна  $\omega_p$  может быть, очевидно, сколь угодно большим. Однако генерируется всякий раз именно та пара волн, для которой направление синхронизма совпадает с осью резонатора (рассматривая синхронизм, надо, очевидно, принимать во внимание все три волны, т. е. учитывать также волну накачки).

В 1962 г. была предложена схема двухрезонаторной параметрической генерации света, использующая явление параметрического шума (рисунок 4). Эта схема работает на основе принципа векторного синхронизма. Как видно из рисунка, оптическая схема имеет два резонатора: для волны на частоте  $\omega_s$  и для волны на частоте  $\omega_i$ . Перестройка частоты осуществляется синхронным вращением пар зеркал навстречу друг другу в соответствии с условиями векторного синхронизма.

Коллинеарный вариант предыдущей схемы представлен на рисунке 5. В данной схеме нелинейный кристалл помещается между двумя дихроическими зеркалами и накачивается соответствующим сфокусированным пучком накачки с частотой  $\omega_p$ . В зависимости от величины пропускания дихроических зеркал оптического резонатора различают двухрезонаторные и однорезонаторные схемы параметрических генераторов света в коллинеарных пучках.

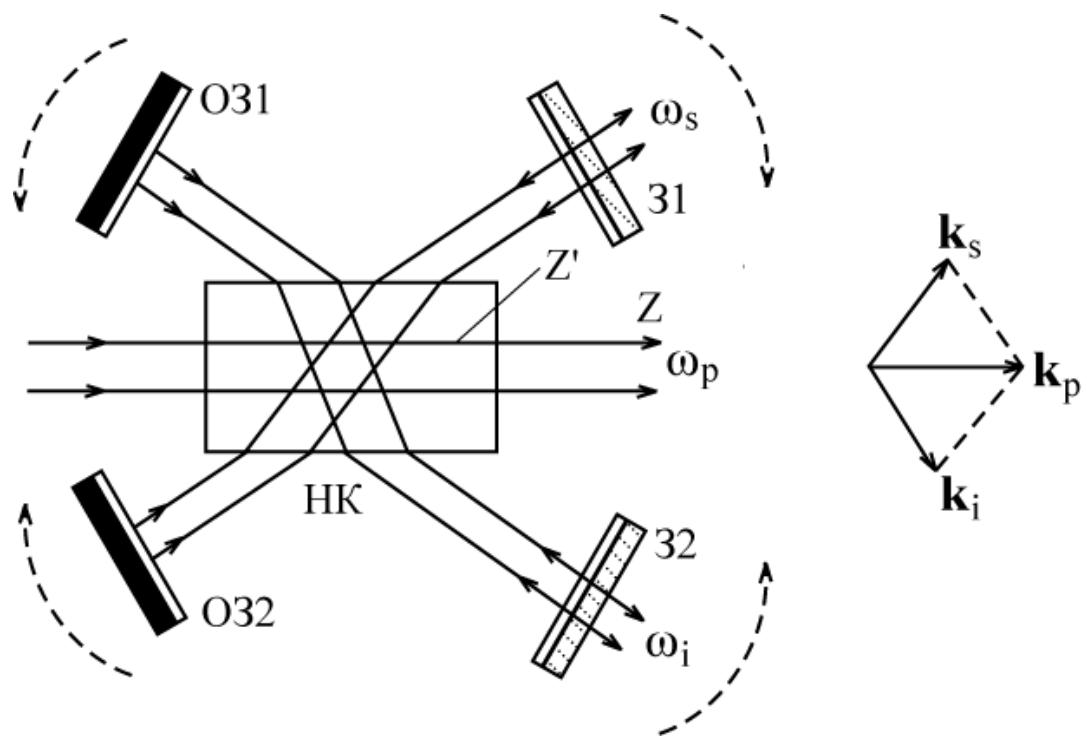


Рис. 4 Схема двухрезонаторной параметрической генерации света. ОЗ1 – зеркало, полностью отражающее излучение на частоте  $\omega_i$ ; ОЗ2 – зеркало, полностью отражающее излучение на частоте  $\omega_s$ ; НК – нелинейный кристалл; 31 и 32 – выходные зеркала резонаторов;  $Z'$  – оптическая ось нелинейного кристалла.

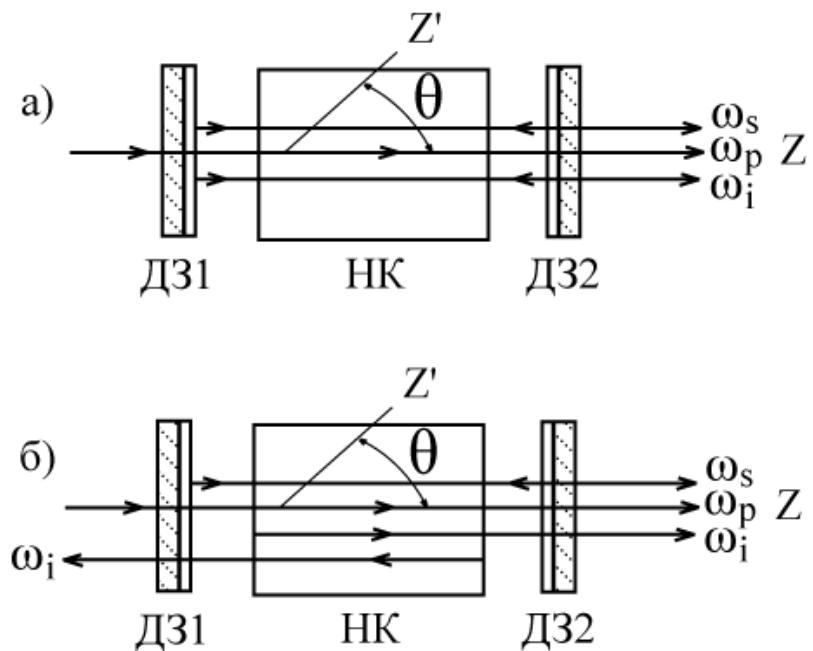


Рис. 5 Коллинеарные схемы параметрической генерации света. (а) – двухрезонаторная схема; (б) – однорезонаторная схема. НК – нелинейный кристалл; ДЗ1 и ДЗ2 – дихроичные зеркала;  $Z'$  – оптическая ось нелинейного кристалла;  $\theta$  – угол синхронизма.

Если зеркало  $D31$  отражает полностью частоты  $\omega_s$  и  $\omega_i$  и свободно пропускает частоту  $\omega_p$ , а зеркало  $D32$  также пропускает частоту  $\omega_p$ , и частично отражает  $\omega_s$  и  $\omega_i$ , то эта схема является двухрезонаторным параметрическим генератором света (рисунок 5а). Если же сделать зеркала  $D31$  и  $D32$  оптического резонатора прозрачными для частоты  $\omega_i$ , то схемы станет однорезонаторной (рисунок 5б).

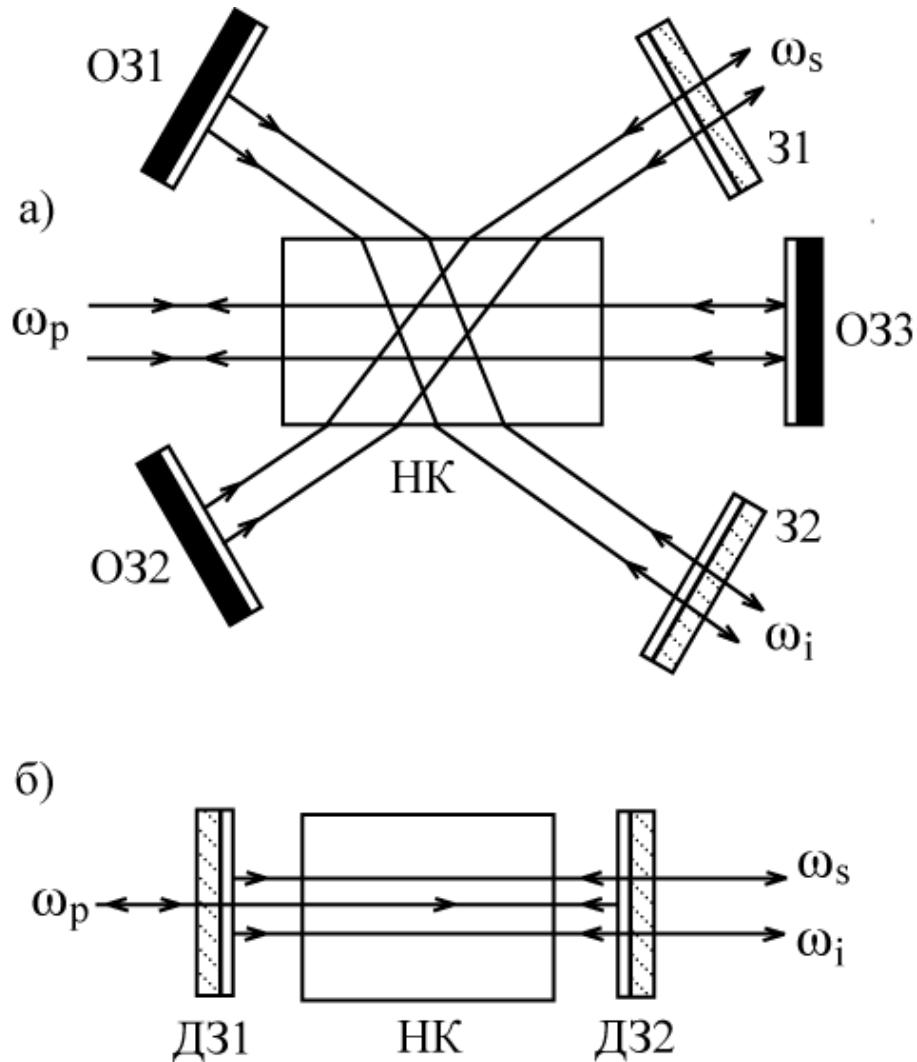


Рис. 6 Схемы параметрической генерации света с возвратным зеркалом. (а) – неколлинеарная схема; (б) – коллинеарная схема.

Однорезонаторная схема характеризуется более высоким порогом по мощности накачки (примерно на два порядка величины), чем в случае двухрезонаторной параметрической генерации. Поэтому однорезонаторная

параметрическая генерация была осуществлена лишь при накачке от импульсных лазеров. Важными преимуществами схем однорезонаторной параметрической генерации является более высокая стабильность генерируемых частот.

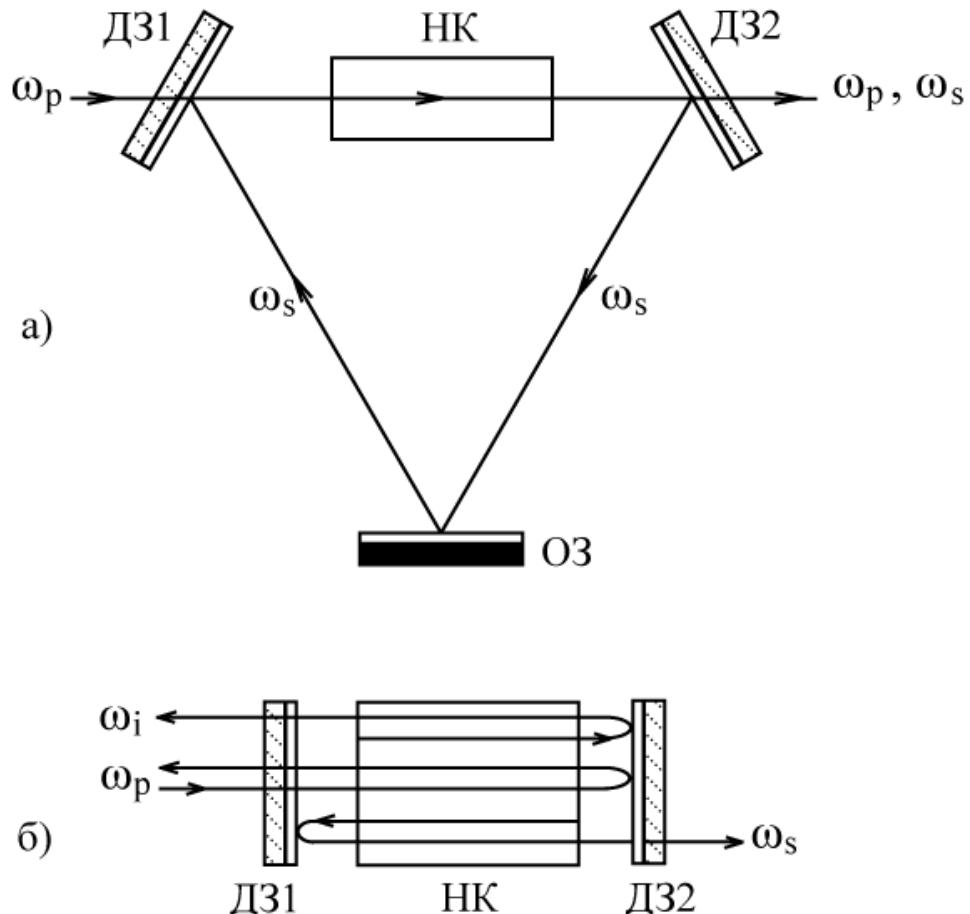


Рис. 7 (а) – Схема кольцевого параметрического генератора света; (б) – безрезонаторная схема параметрической генерации света.

Рассмотрим, как возбуждается генерация в безрезонаторном параметрическом генераторе. Волна накачки и флюктуации поля на частотах  $\omega_p$ ,  $\omega_i$ , взаимодействуя на прямом проходе, порождают прямые волны на частотах  $\omega_s$ ,  $\omega_i$ . Дойдя до правого зеркала, волна  $\omega_i$  покидает резонатор, а волна  $\omega_s$  и волна накачки отражаются и совершают обратный проход, на котором порождается обратная волна  $\omega_i$ . В следующем прямом проходе будет участвовать наряду с волной накачки уже не флюктуация поля на

частоте  $\omega_i$ , а отраженная от левого зеркала волна  $\omega_s$ . В результате произойдет усиление волны  $\omega_s$ , и т.д. Таким образом, происходит последовательное усиление параметрических волн от цикла к циклу.

Пороговую интенсивность накачки двухрезонаторного параметрического генератора можно в несколько раз снизить, если в оптическую схему добавить возвратное зеркало, отражающее (частично или полностью) волну накачки обратно в резонатор. При этом необходимо специально подбирать фазу отраженной волны накачки; в противном случае на обратном проходе вместо параметрического усиления может происходить перекачка энергии из параметрических волн в волну накачки (регенерация волны накачки). Схемы с возвратным зеркалом для векторного и коллинеарного синхронизма представлены на рисунке 6. Возвращение волны накачки в резонатор позволяет осуществлять параметрическое взаимодействие как на прямом, так и на обратном проходах.

Нелинейные потери на регенерацию волны накачки могут быть устранены с использованием схемы кольцевой параметрической генерации, в которой параметрические волны распространяются только в направлении волны накачки (рисунок 7а). В кольцевых схемах волны совершают только прямой проход по нелинейному кристаллу; поэтому в них заведомо исключена регенерация волны накачки, происходящая в обычных схемах на обратном проходе.

Также стоит отметить, что существуют и безрезонаторные схемы параметрической генерации света (БПГС). В коллинеарном варианте параметрической генерации зеркало Д31 делается прозрачным для частот  $\omega_s$  и  $\omega_p$  и непрозрачным для частоты  $\omega_i$ , а зеркало Д32, наоборот, прозрачным для  $\omega_i$  и непрозрачным для  $\omega_s$  и  $\omega_p$  (рисунок 7б). Легко видеть, что в данной схеме нет резонатора ни на частоте  $\omega_s$ , ни на частоте  $\omega_i$ .

## 2.4. Перестройка частоты при параметрической генерации света

В большинстве случаев при реализации параметрической генерации схему генератора делают такой, чтобы осуществлять перестройку лазерного излучения в широком диапазоне частот. Выше отмечалось, что в параметрической генерации света генерируются именно те волны (те частоты), для которых направление синхронизма совпадает с осью резонатора. Ясно, что за счет воздействия тем или иным образом на оптическую индикатрису кристалла (иначе говоря, за счет изменения дисперсионных свойств кристалла) можно плавно менять частоты генерируемых волн.

Для коллинеарных схем параметрической генерации можно выделить четыре способа перестройки частоты:

1. *Поворот нелинейного кристалла.* В данном случае изменяется угол между оптической осью кристалла и направлением пучка накачки (направлением оси резонатора). Если при одной ориентации кристалла резонатор «выделяет» направление синхронизма для волн с частотами  $\omega_s$ ,  $\omega_i$  и  $\omega_p$  ( $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ ), то при другой ориентации окажется «выделенным» направление синхронизма для волн с иным набором частот:  $\omega'_s$ ,  $\omega'_i$  и  $\omega_p$  ( $\omega_p = \omega'_s + \omega'_i$ ). Перестройка частот поворотом кристалла относительно пучка накачки называется угловой перестройкой.
2. *Варьирование температуры кристалла.* Перестройка частоты связана с тем, что показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн зависят от температуры, и, следовательно, угол синхронизма также зависит от температуры (температурная перестройка).

3. *Прикладывание внешнего постоянного электрического поля.* Под воздействием внешнего электрического поля происходит изменение оптической индикатрисы кристалла (электрооптическая перестройка частоты).
4. *Изменение частоты волны накачки*  $\omega_p$ .

С практической точки зрения наибольший интерес представляют угловая и температурная способы перестройки частоты. Перестройка электрическим полем малоэффективна и используется лишь для стабилизации длины волны генерации или для высокочастотной модуляции излучения параметрического генератора света. Перестройка изменением длины волны накачки реализуется, когда лазер накачки является перестраиваемым, но на практике такой способ перестройки используется редко.

К преимуществам угловой перестройки необходимо отнести сравнительную простоту метода, быстроту перестройки по сравнению с температурным методом. Температурная перестройка, как правило, применяется при  $90^\circ$ -м синхронизме, т. е. когда угол двулучепреломления равен нулю. Этот метод используется в основном в кристаллах с резкой зависимостью угла синхронизма от температуры: в ADP ( $\lambda_h = 266$  нм), LiNbO<sub>3</sub> ( $\lambda_h = 530$  нм), Ba<sub>2</sub>NaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub> ( $\lambda_h = 530$  нм), KNbO<sub>3</sub> ( $\lambda_h = 532$  нм), а также в кристаллах DKDP с  $\lambda_h = 266$  нм.

Использование описанных выше способов позволяет осуществить с помощью параметрического генератора света перестройку частоты лазерного излучения в широком диапазоне оптических частот, какой не может быть реализован с помощью лазеров в традиционном их понимании. В настоящее время хорошо зарекомендовали себя оптические параметрические генераторы, излучающие в диапазоне длин волн от видимого до инфракрасного (0,5—3,5 мкм).

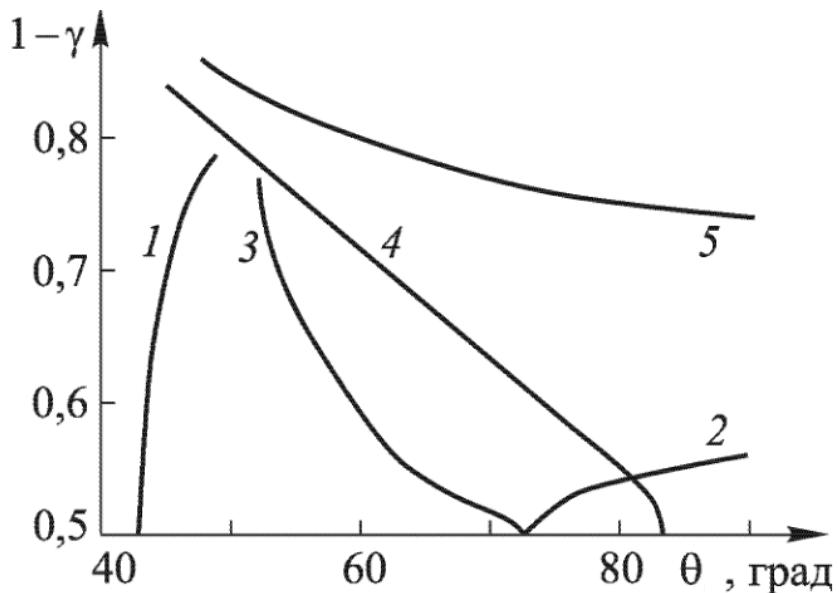


Рис. 8 Перестроечная характеристика параметрического генератора света на кристалле  $\text{LiNbO}_3$  при угловой перестройке частоты. 1 —  $ooe$  ( $\lambda_p = 1,06$  мкм); 2 —  $oee$  (1,06 мкм); 3 —  $eoē$  (1,06 мкм); 4 —  $ooe$  (0,53 мкм); 5 —  $eoē$  (0,53 мкм) [7].

Ниже представлены типичные характеристики перестройки частоты излучения параметрических генераторов света, реализованные на различных кристаллах и при различных способах перестройки. Например, на рисунке 8 представлены перестроочные характеристики для коллинеарного взаимодействия, полученные для кристалла  $\text{LiNbO}_3$  при разных видах синхронизма и разных длинах волны накачки [7]. Данные характеристики приведены в виде зависимости между углом синхронизма  $\theta$  и параметром  $\gamma = \omega_{i,s}/\omega_p$  и относятся к методу перестройки частоты путем поворота кристалла (угловая перестройка).

На рисунке 9 представлена температурная перестроечная кривая, полученная для кристалла  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  при  $90^\circ$ -ном синхронизме и длине волны накачки  $\lambda_p = 0,488$  мкм [8]. Перестроечная характеристика имеет вид зависимости длин волн  $\lambda_i$  и  $\lambda_s$  (отвечающих соответственно частотам  $\omega_i$  и  $\omega_s$ ) от температуры кристалла.

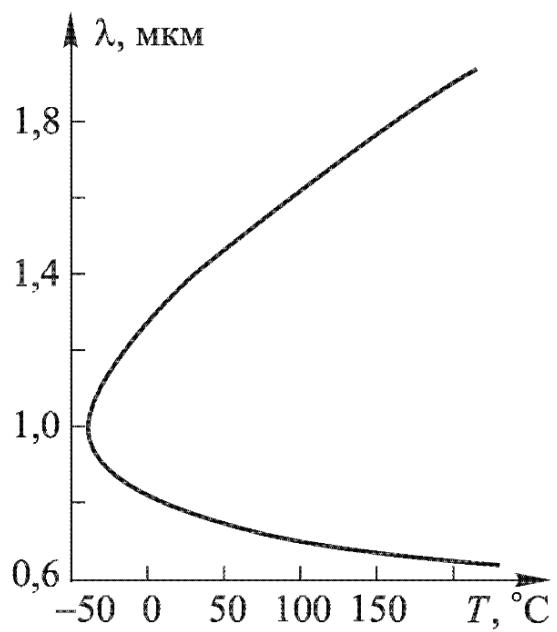


Рис. 9 Перестроечная характеристика параметрического генератора света на кристалле  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  при температурной перестройке частоты [8].

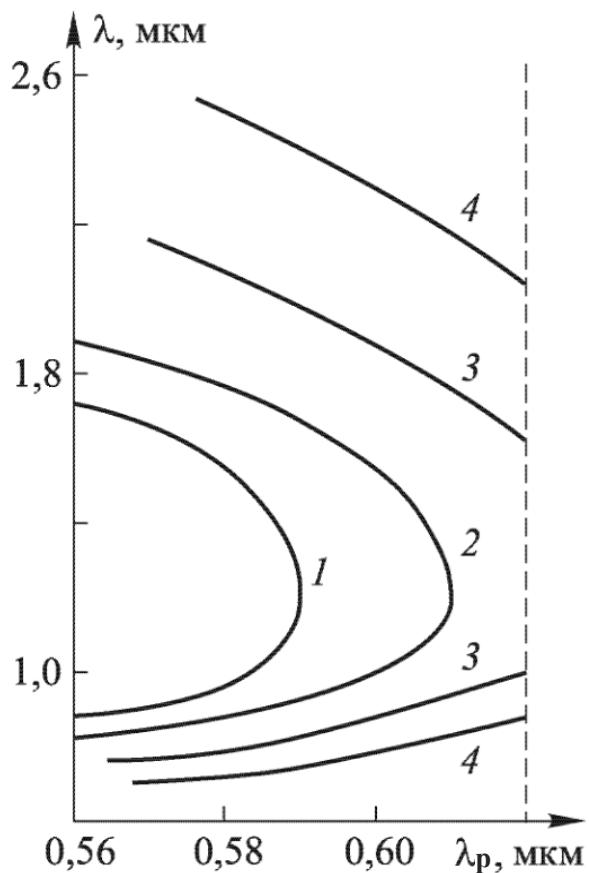


Рис. 10 Перестроечная характеристика параметрического генератора света на кристалле  $\text{LiNbO}_3$  при перестройке за счет изменения длины волны накачки [9].

На рисунке 10 показаны перестроочные кривые для кристалла  $\text{LiNbO}_3$ , представленные в виде зависимости  $\lambda_i$  и  $\lambda_s$  от  $\lambda_p$  (перестройка за счет изменения длины волны накачки) [9]. Представленные на рисунке 10 кривые получены для  $90^\circ$ -ного синхронизма при разных температурах кристалла:  $225^\circ\text{C}$  (кривая 1),  $275^\circ\text{C}$  (2),  $325^\circ\text{C}$  (3),  $375^\circ\text{C}$  (4).

## **2.5. Параметрическая генерация света при использовании непрерывной и импульсной оптической накачки**

В зависимости от источника накачки различают параметрическую генерацию света при непрерывной и импульсной накачке. Ввиду того, что для возбуждения параметрической генерации необходимы достаточно большие интенсивности излучения, для накачки используются преимущественно импульсные источники (nano- и пикосекундной длительности).

Рассмотрим параметрическую генерацию света *при непрерывной накачке*. В этом режиме генерации можно выделить два последовательных процесса. Сначала (при включении накачки) происходит переходный процесс развития генерации, начинающийся от уровня шумов. Этот процесс завершается установлением стационарной генерации. Как уже отмечалось выше, условием самовозбуждения параметрической генерации в резонаторной схеме является преобладание параметрического усиления над пассивными и излучательными потерями в резонаторе. Однако коэффициент параметрического усиления изменяется со временем. Динамика поведения среднего по длине коэффициента параметрического усиления представлена на рисунке 11. Из рисунка 11 видно, что после включения накачки (момент включения  $t = 0$ ) коэффициент усиления уменьшается от начального значения  $\sigma_0$  до стационарного значения  $\sigma_{\text{ст}} = \sigma_{\text{пор}}$ . За это время интенсивность параметрического излучения  $S$  возрастает от флюктуационного значения до стационарного значения  $S_{\text{ст}}$ . Иными словами, за это время происходит завершение процесса развития параметрических колебаний и устанавливается стационарный режим генерации. Таким образом, для развития процесса усиления параметрического шума необходимо, чтобы  $\sigma_0 > \sigma_{\text{пор}}$ , в противном параметрическая генерация света невозможна.

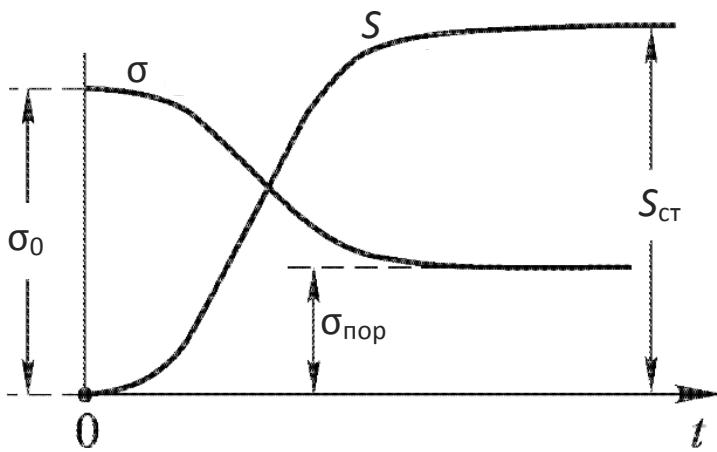


Рис. 11 Динамика поведения среднего по длине коэффициента параметрического усиления  $\sigma$  и интенсивности параметрического излучения  $S$

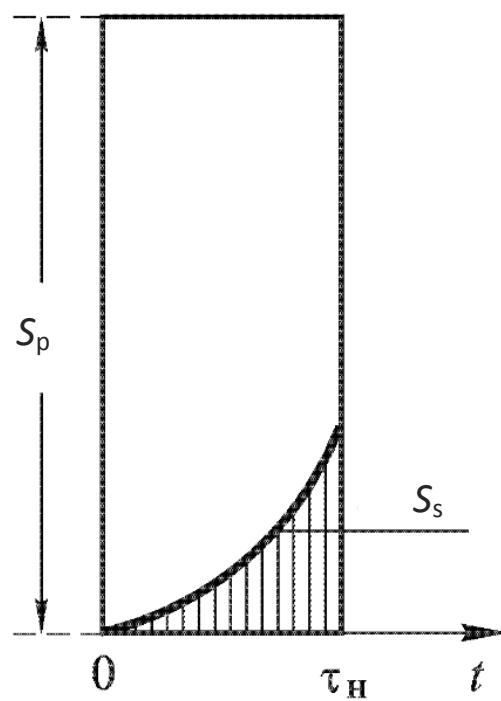


Рис. 12 Сопоставление интенсивностей накачки  $S_p$  и импульса параметрической генерации  $S_s$  в случае прямоугольного импульса накачки при  $\tau_h < \tau_{\text{разв}}$

Рассмотрим параметрическую генерацию *при импульсной накачке*. Процесс параметрической генерации при импульсной накачке может иметь нестационарный характер, связанный с тем, что время развития импульса параметрической генерации (время установления параметрических колебаний)  $\tau_{\text{разв}}$  может быть порядка длительности импульса накачки  $\tau_h$  или

даже больше. В этом случае из-за относительно малой длительности импульса накачки стационарные параметрические волны могут не успеть установиться, и коэффициент преобразования по энергии окажется весьма малым.

Нестационарный режим параметрической генерации в случае прямоугольного импульса накачки, длительность которого удовлетворяет соотношению  $\tau_h < \tau_{разв}$ , изображен на рисунке 12. Если же  $\tau_h > \tau_{разв}$ , то после установления параметрических колебаний начинается генерация импульса параметрического излучения в квазистационарном режиме. Это означает, что, несмотря на изменение интенсивности накачки во времени, интенсивность параметрически генерируемых волн строго соответствует интенсивности накачки в каждый момент времени. Итак, сразу после начала генерации от уровня шумов процесс всегда нестационарен, но затем по истечении времени  $\tau_{разв}$  (при  $\tau_h > \tau_{разв}$ ) устанавливается квазистационарный режим генерации.

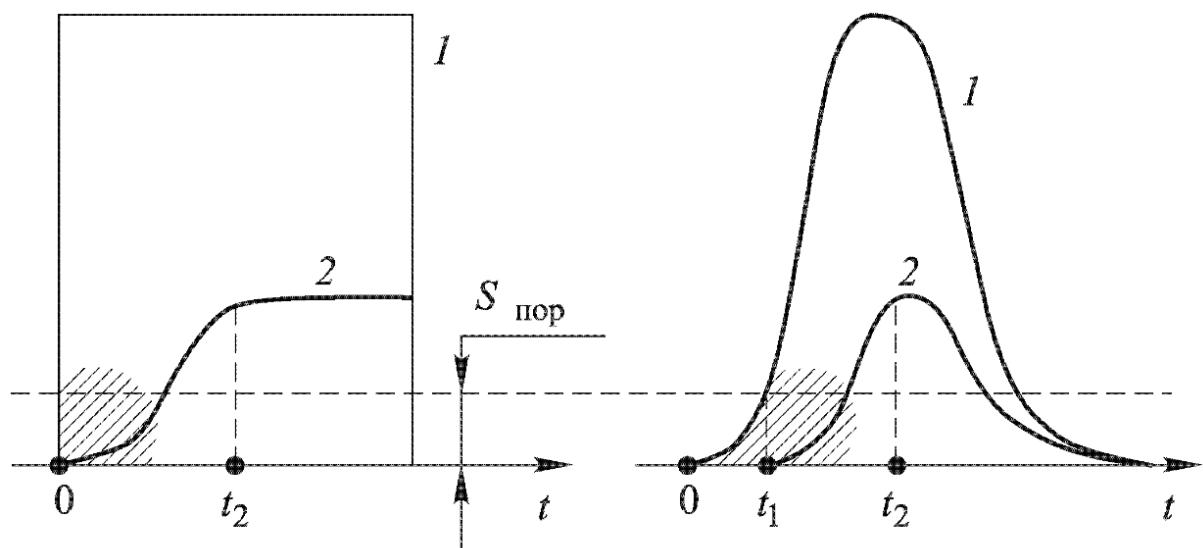


Рис. 13 Сопоставление интенсивности излучения импульса накачки (кривая 1) и импульса параметрической генерации (кривая 2) при  $\tau_h > \tau_{разв}$ . Заштрихованы области, в которых параметрическая генерация еще не оказывает обратное воздействие на волну накачки

На рисунке 13 представлено сопоставление интенсивности излучения импульса накачки (кривая 1) и импульса параметрической генерации (кривая 2) для двух случаев: а — импульс накачки имеет прямоугольную форму; б— импульс накачки имеет гауссову форму. В обоих случаях длительность импульса накачки больше времени развития импульса параметрической генерации. В качестве  $t = 0$  выбран момент включения импульса накачки. Развитие импульса параметрической генерации начинается в случае (а) в момент  $t = 0$ , а в случае (б) в момент времени  $t_1$ , когда плотность мощности накачки достигает порогового значения. Через  $t_2$  обозначен условный момент времени, когда развитие импульса параметрической генерации можно считать завершившимся. Начиная с момента  $t=t_2$ , реализуется квазистационарный режим параметрической генерации. На рисунке 13 штриховкой показаны области, в пределах которых параметрическая генерация не оказывает обратное воздействие на волну накачки.

## 2.6. Нелинейные кристаллы для параметрической генерации света

В качестве нелинейных материалов для параметрической генерации света в диапазоне длин волн  $0,3 \div 5$  мкм используются кристаллы дигидрофосфата калия  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (KDP), дейтерированный гидрофосфат калия  $\text{KD}_2\text{PO}_4$  (DKDP), аммония дигидрофосфат  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (ADP),  $\text{CsH}_2\text{AsO}_4$  (CDA),  $\text{LiIO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{KNbO}_3$ , а также органический кристалл мочевины  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ . В таблице 1 указаны длина волны накачки и угол синхронизма ( $\theta$ ), диапазон перестройки параметрической генерации света, длительность импульса генерируемого излучения, коэффициент преобразования ( $\eta$ ). В примечании приводятся сведения о типе параметрического генератора (безрезонаторные, одно- и двухрезонаторные).

Табл. 1 Кристаллы для параметрической генерации света [10]

Кристаллы	$\theta$	$\lambda_{\text{n}}$ , мкс	$\lambda_{\text{ПГС}}$ , мкс	$\tau_{\text{i}}$	$\eta$ , %	Примечание
KDP	<i>eoe</i>	0,527	$0,8 \div 1,5$	0,5 пс	2	ОПГС, L = 4 см
ADP	$90^\circ$ ( <i>ooe</i> )	0,266	$0,44 \div 0,68$	-	10	БПГС, T = $50 \div 110$ °C
$\text{LiNbO}_3$	$84^\circ$ ( <i>ooe</i> )	0,532	$0,66 \div 2,7$	40 пс	17	БПГС, T = $46 \div 360$ °C
$\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$	<i>ooe</i>	0,355	$0,45 \div 1,68$	8 нс	9,4	ОПГС, L = 11,5 мм
$\text{KNbO}_3$	<i>eeo</i>	0,532	$0,86 \div 1,4$	5 нс	32	ДПГС, T = $180 \div 100$ °C

Кристалл ниобата калия ( $\text{KNbO}_3$ ) имеет максимальную нелинейность  $a$ , значит, минимальный порог параметрической генерации ( $3,5 \text{ МВт/см}^2$  в работе [11]). Этот кристалл негигроскопичен и позволяет реализовать некритичный ( $90^\circ$ -й) синхронизм с температурной перестройкой. Вместе с тем, он является нестойким к излучению и его невозможно выращивать до достаточно больших размеров. Кристалл  $\text{LiNbO}_3$  эффективен в видимом и ИК-диапазонах (до 5 мкм), кристалл KDP — в УФ и видимом диапазонах при накачке второй или четвертой гармоникой неодимового лазера. Благодаря высокой оптической прочности кристаллы KDP, ADP можно использовать при больших интенсивностях накачки — до  $10 \text{ ГВт/см}^2$ .

### **3. Практическая часть**

#### **3.1. Описание экспериментальной установки**

При проведении лабораторной работы используется следующее оборудование:

1. лазер YAG:Nd с модуляцией добротности производства фирмы JV LOTIS (модель LS-2134), который используется в качестве лазера накачки параметрического генератора света;
2. параметрическая приставка-преобразователь производства фирмы JV LOTIS (модель LT-2215);
3. измеритель мощности оптического излучения Thorlabs PM100D;
4. спектрометр-радиометр StellarNet;
5. оптические элементы (линзы, фильтры, оптический анализатор, призма Глана-Тейлора).

Ниже приведены краткие описания принципов работы используемого оборудования и их органов управления.

#### **Лазер накачки YAG:Nd**

Лазер состоит из блока излучателя, блока питания, пульта управления и системы охлаждения.

*Блок излучателя* – важнейшая часть лазера, в которой проходит преобразование электрической энергии накачки в световую энергию лазерного излучения. Фотографии излучателя и оптическая схема лазера YAG:Nd с соответствующими пояснениями приведены на рисунках 14, 15.

В качестве активного элемента лазера используется кристалл YAG:Nd<sup>3+</sup>. Оптическая накачка активного элемента осуществляется широкополосным и ненаправленным излучением импульсной ксеноновой лампой.

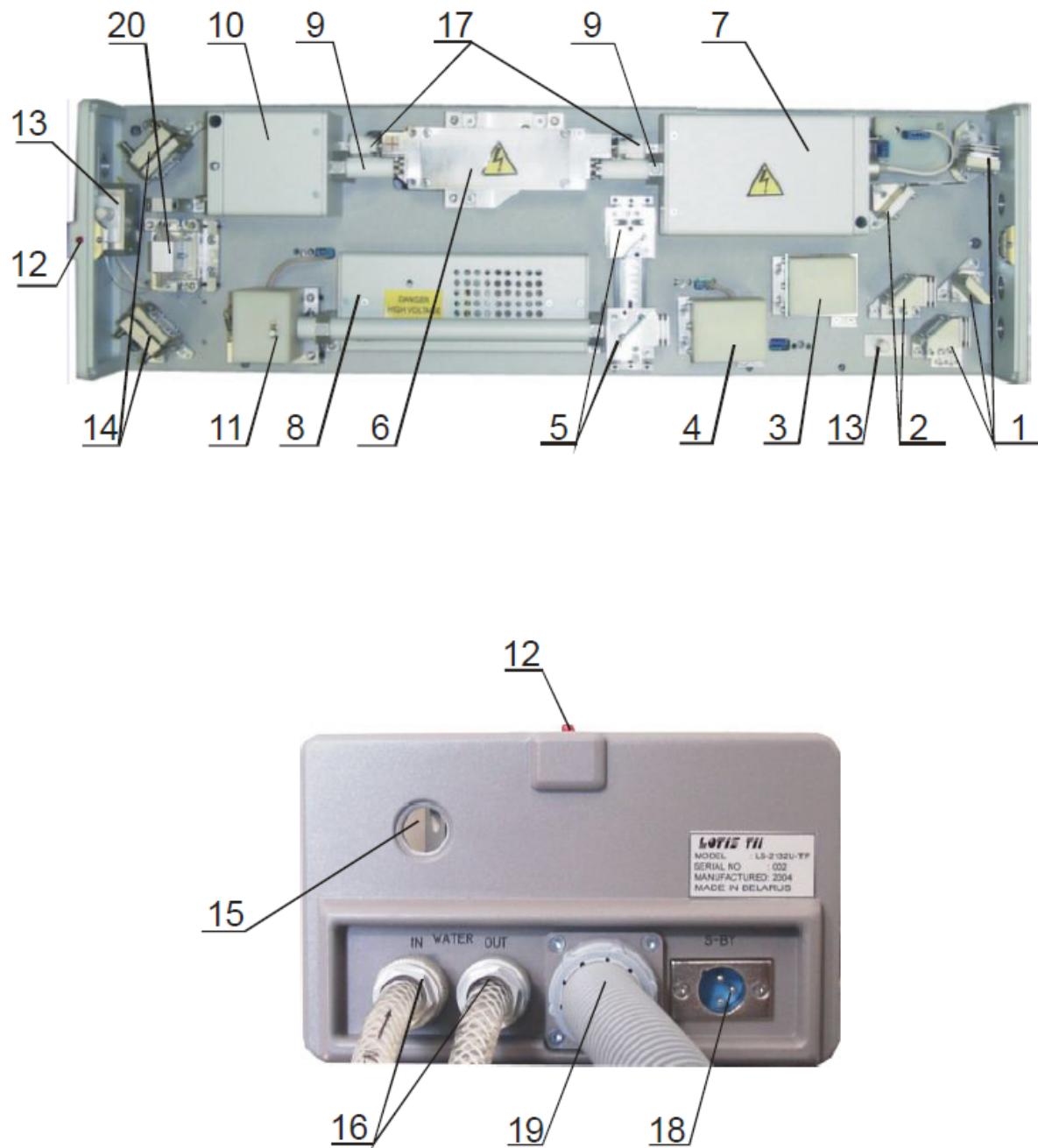


Рис. 14 Блок излучателя лазера YAG:Nd. 1 – спектроподелители 355/532,1064нм; 2 – спектроподелители 266/532нм; 3,4 – термостаты ТГ и ЧГ; 4 – коробка с поворотными зеркалами, телескопом усилителя, вращателем поляризации $45^0$ ; 5 – спектроподелители 532/1064нм; 6 – квантрон; 7 – коробка с "глухим" зеркалом, затвором, поляризатором; 8 – защитная крышка модуля поджига; 9 – канализирующие защитные трубы; 10 – коробка с выходным зеркалом, внутрирезонаторной шторкой; ; 11 – узел ВГ; 12 – красный индикатор работы лазера; 13 – кнопки блокировки; 14 – поворотные зеркала; 15 – окно технологическое; 16 – штуцера для подсоединения водяных шлангов; 17 – наконечники лампы накачки; 18 – разъем дежурного питания терmostатов микровинты регулировки ТГ и ЧГ; 19 – кабель электропитания "питон"; 20 – призма Дове (съемная).

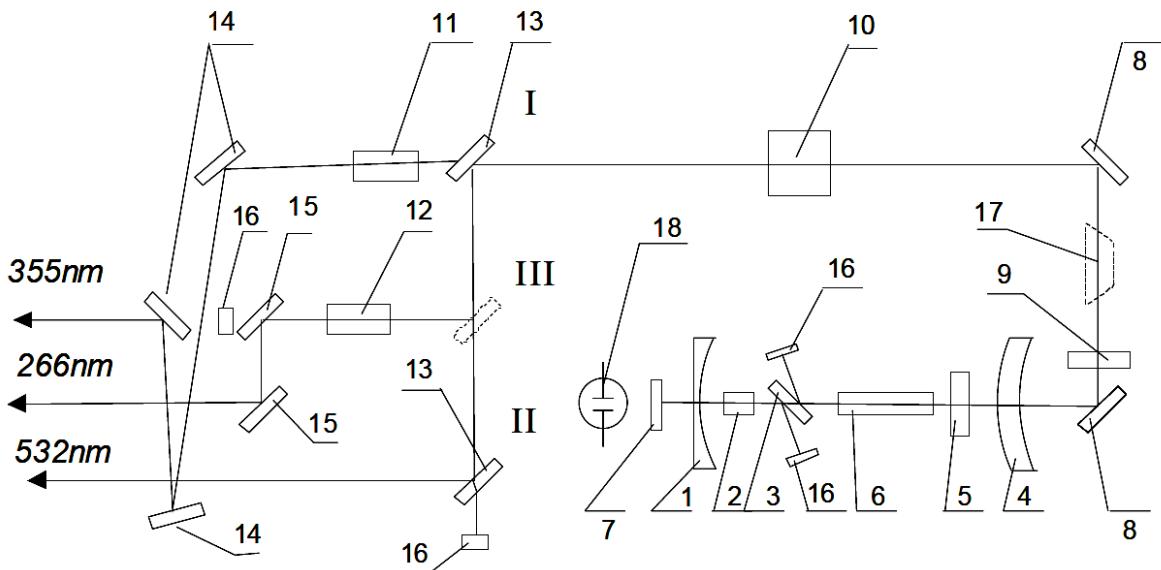


Рис. 15 Оптическая схема лазера YAG:Nd<sup>3+</sup>. 1 – «глухое» зеркало R > 99%; 2 – электрооптический затвор; 3 – поляризатор; 4 – выходное VRM зеркало (зеркало с переменным пропусканием); 5 – внутрирезонаторная шторка; 6 – активный элемент; 7 – светофильтр; 8 – поворотное зеркало; 9 – вращатель поляризации 45°; 10 – кристалл KTP; 11 – кристалл третьей гармоники; 12 – кристалл четвертой гармоники; 13 – спектролители 532/1064нм; 14 – спектролители 355/1064,532нм; 15 – спектролители 266/532нм; 16 – фильтры поглотители; 17 – призма Дове (съемная); 18 – ловушка для поглощения излучения.

Лампа и активный элемент (6) размещены в диффузном отражателе и охлаждаются потоком воды. Отражатель обеспечивает однородную засветку активного элемента и фильтрацию УФ части излучения лампы накачки, которое приводит к деградации оптических и лазерных характеристик кристалла Nd:YAG.

Резонатор лазера – телескопический, неустойчивый и образован "глухим" зеркалом (1), и выходным VRM (variable reflectivity mirror) зеркалом (4) с переменным пропусканием. Такое устройство резонатора, обеспечивает малую расходимость и короткую длительность импульсов генерации.

Модуляция добротности лазерного резонатора производится электрооптическим затвором ( $\lambda/4$ )<sup>1</sup>, состоящим из электрооптического кристалла KD\*P (2) и тонкопленочного поляризатора (3). Поляризатор устанавливается под углом Брюстера к генерируемому излучению (угол  $\sim 54\text{--}58^\circ$ ). При этом достигаются минимальное значение потерь для  $\pi$ -поляризации оптического излучения, соответствующей направлению вектора  $E$  генерируемого излучения, лежащего в плоскости рисунка. Электрооптический кристалл располагается так, что бы его оптическая ось совпадала с осью резонатора, а кристаллографические оси  $X$  и  $Z$  были направлены по направлениям  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризации, определяемым поляризатором.

Работа затвора происходит следующим образом: к кристаллу KD\*P прикладывается постоянное четвертьвольновое напряжение ( $U_{\lambda/4}$ ), обеспечивающее за счет электрооптического эффекта в кристалле превращение линейно-поляризованного излучения ( $\pi$ -поляризация), падающего на KD\*P, в циркулярно-поляризованное после прохождения кристалла. Отразившись от зеркала (1) и вторично пройдя через KD\*P, излучение становится линейно-поляризованным с  $\sigma$ -поляризацией.  $\sigma$ -поляризованное излучение отражается от поляризатора (3) и не возвращается в резонатор. Таким образом, потери в резонаторе велики и генерация отсутствует. В момент достижения в активном элементе наибольшей инверсии на затвор подается импульсное напряжение равное по величине, но противоположное по полярности постоянному  $U_{\lambda/4}$ , при этом изменение поляризации излучения в затворе не происходит; добротность резонатора резко возрастает и лазер генерирует "гигантский" импульс.

---

<sup>1</sup> Подробнее о методах реализации данного режима работы лазеры вы можете прочесть в других методических пособиях практикума

Преобразование излучения основной частоты в излучение второй гармоники осуществляется в кристалле КТР. Для получения третьей и четвертой гармоник используются кристаллы KD\*P.

*Блок питания* предназначен для питания импульсной лампы накачки и управления электрооптическим затвором. Изменение режимов работы лазера осуществляется при помощи *пульта управления*. Общий вид блока питания и пульта управления представлены на рисунке 16. Обозначения и функции органов управления приведены в таблице 2.

Автономная система охлаждения с теплообменником вода-воздух предназначена для охлаждения импульсной лампы и активного элемента. Система охлаждения состоит из центробежного насоса, бака, теплообменника с вентилятором, устройства питания, датчиков протока, уровня и температуры (рисунок 17). Хладагентом внутреннего контура является деионизованная вода. Хладагентом внешнего контура является воздух.

Вентилятор, осуществляющий обдув теплообменника, включается при температуре воды в баке  $\sim 30\text{-}35^{\circ}\text{C}$ . Максимальная температура охлаждающей жидкости  $48\text{-}49^{\circ}\text{C}$ . Если вода нагревается до  $48\text{-}49^{\circ}\text{C}$  загорается индикатор "Ready" на блоке охлаждения и приводится в действие система блокировки, выключающая лазер.

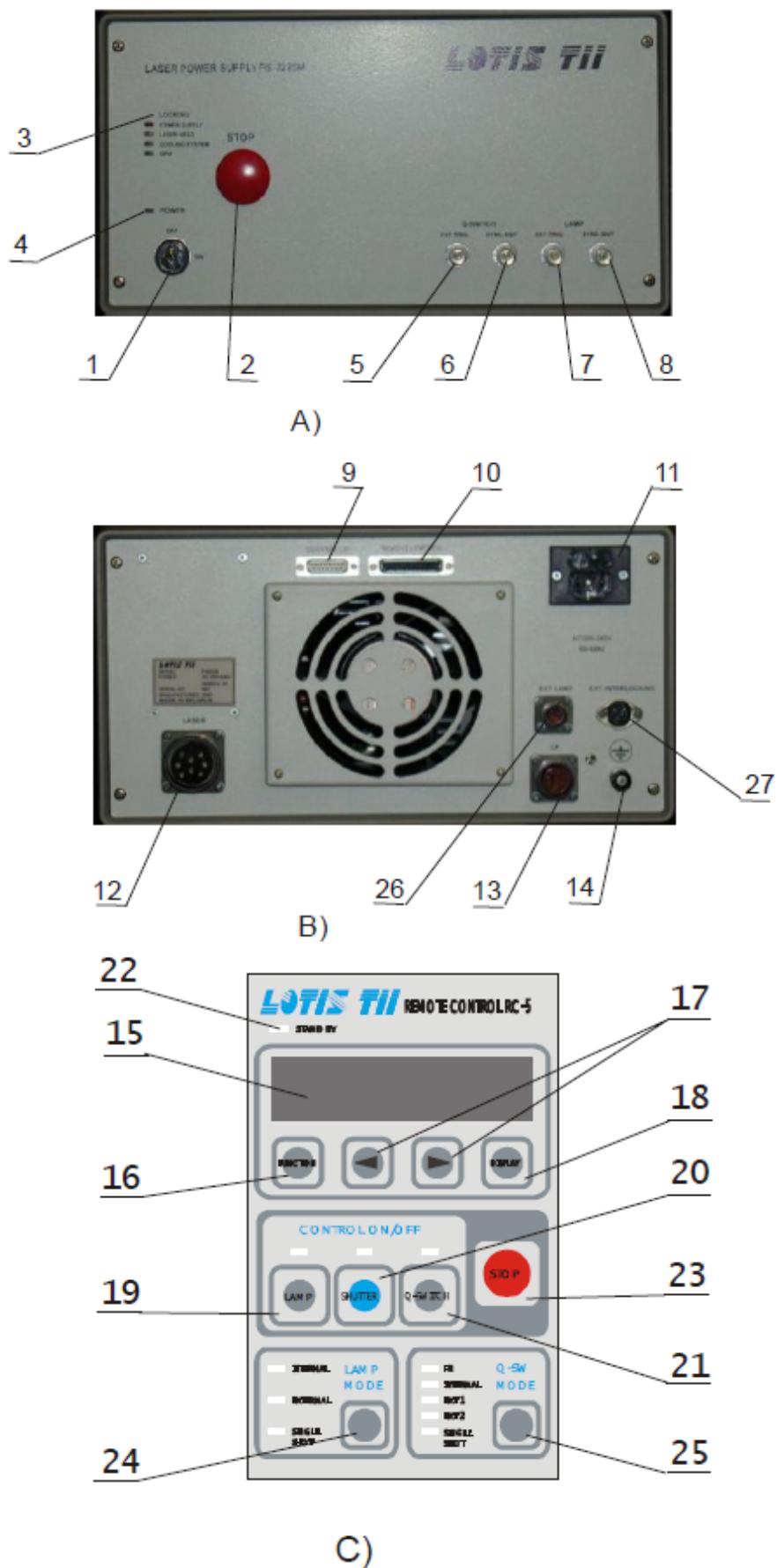


Рис. 16 Передняя (а) и задняя (б) панели блока питания и пульт управления (с) лазера YAG:Nd  
39

Табл. 2 Функции органов управления лазером YAG:Nd

Номер позиции на рисунке 6	Обозначение	Функция
1	Power ON/OFF	Ключ включения-выключения блока питания
2	STOP	Кнопка аварийного выключения лазера
3	Locking PS, LH, CP, CPU	Индикаторы нарушения функционирования или защиты блока питания, блока излучателя, системы охлаждения и управления, соответственно
4	Power	Индикатор питания блока питания
5	Lamp Ext. trig.	Разъем внешнего запуска лампы
6	Lamp Sync. out	Разъем синхроимпульса лампы
7	Q-Switch Ext. trig.	Разъем внешнего запуска электрооптического затвора
8	Q-Switch Sync. Out	Разъем синхроимпульса электрооптического затвора
9	Control LH	Разъем для соединения кабеля управления блока излучателя
10	Remote Control	Разъем для подключения пульта управления или компьютера
11	PC 200,240 V 50-60 Hz	Разъем для шнура сетевого питания
12	Laser	Разъем для подключения блока излучателя
13	CP	Разъем для подключения системы охлаждения
14		Клемма заземления
15		Табло режимов работы лазера
16	Function	Кнопка переключения параметров, высвечиваемых табло 15
17		Кнопки управления параметрами, высвечиваемыми табло 15
18	Display	Кнопка переключения параметров, отображаемых на табло 15
19	Lamp	Кнопка и индикатор поджига и работы

		лампы
20	Shutter	Кнопка и индикатор открытия-закрытия шторки
21	Q-Switch	Кнопка и индикатор открытия-закрытия затвора
22	Stand BY	Индикатор Stand BY
23	Stop	Кнопка выключения лазера
24	Lamp Mode	Кнопка и индикаторы управления режимами работы лампы накачки
25	Q-SW Mode	Кнопка и индикаторы управления режимами работы электрооптическим затвором
26		Разъем для подключения внешней сигнализации (световое табло)
27		Разъем блокировки (входа в помещение)

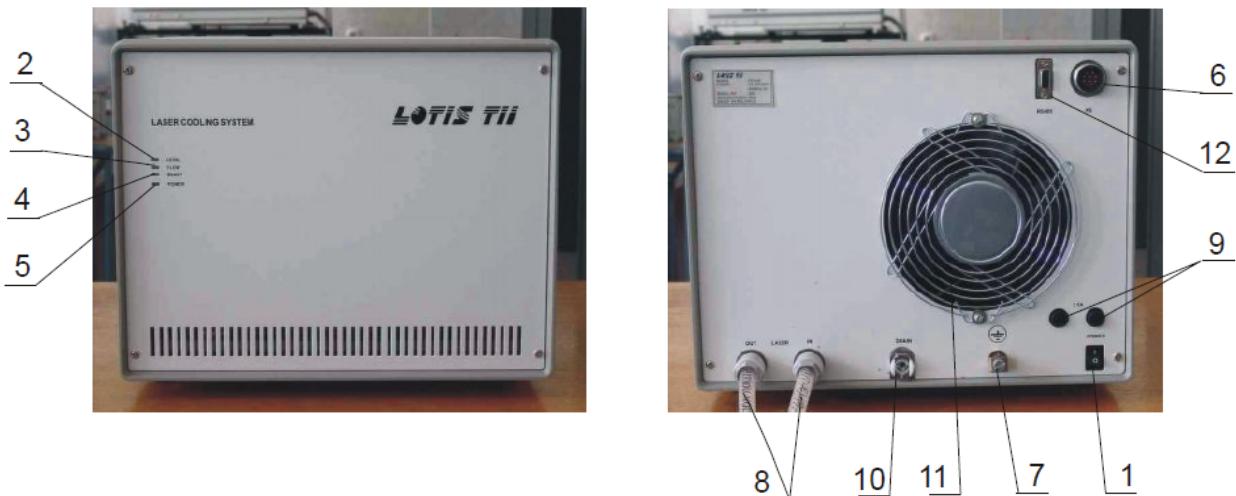


Рис. 17 Передняя и задняя панели системы охлаждения. 1 – тумблер включения / выключения сетевого питания; 2 – индикатор уровня жидкости в баке; 3 – индикатор протока жидкости; 4 – индикатор готовности системы охлаждения к работе; 5 – индикатор подключения системы охлаждения к сети; 6 – разъем для питания системы охлаждения и блокировки блока питания; 7 – клемма заземления; 8 – штуцера для подключения водяных шлангов внутреннего контура; 9 – предохранители; 10 – штуцер слива; 11 – вентиляторы; 12 – Разъем RS-485 используется только изготовителем.

## Параметрическая приставка-преобразователь

Параметрическая приставка-преобразователь представляет собой параметрический генератор света и предназначена для преобразования излучения третьей гармоники (355 нм) лазера YAG:Nd<sup>3+</sup> с модулированной добротностью в перестраиваемое излучение ближней ИК и видимой областей спектра. В качестве «активного» элемента используется нелинейный кристалл ВВО, вырезанный для преобразования по II типу (*oee*) коллинеарного синхронизма. Оптическая схема и расположение элементов приставки-преобразователя представлены на рисунках 18, 19.

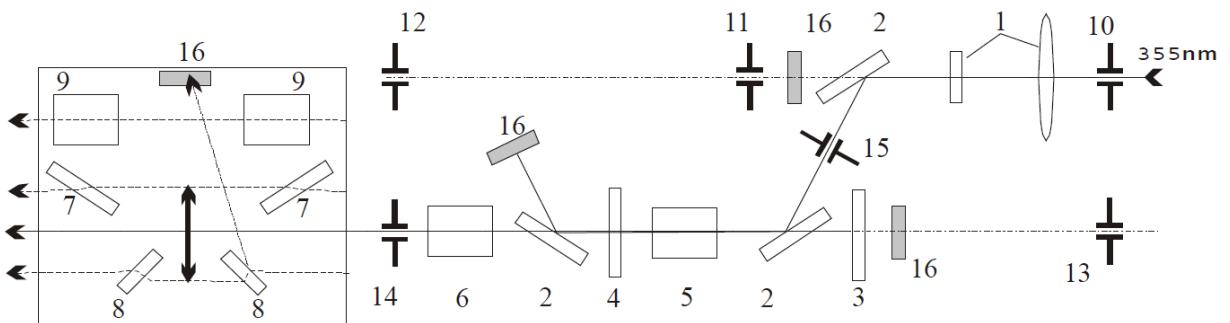


Рис. 18 Оптическая схема ОРО. 1 – фокусирующий телескоп; 2 – поворотные «глухие» зеркала для излучения накачки; 3 – «глухое» зеркало резонатора для сигнальной волны; 4 – выходное зеркало резонатора; 5 – кристалл ВВО; 6 – компенсатор; 7 – спектропределители для диапазона 414 – 560 нм (SW); 8 – спектропределители для диапазона 560 – 709 нм (IW); 9 – спектропределители для диапазона 710 – 2300 нм (IW); 10-15 – диафрагмы юстировочные; 16 – поглощающие фильтры.

Резонатор образован «глухим» зеркалом (3) и выходным зеркалом (4). Излучение накачки проходит через телескоп Галилея (1) и вводится в резонатор с помощью поворотного зеркала (2). Телескоп обеспечивает необходимую плотность и расходимость возбуждающего излучения. Перестройка производится наклоном кристалла ВВО в вертикальной плоскости с помощью микровинта. Специальная диафрагма (15) из кварцевого стекла отрезает отраженные от кристалла блики. Специальный компенсатор (6) из стекла КУ-1 разворачивается одновременно с кристаллом

BBO, компенсируя параллельный снос пучка генерации ОРО при наклонах активного элемента.

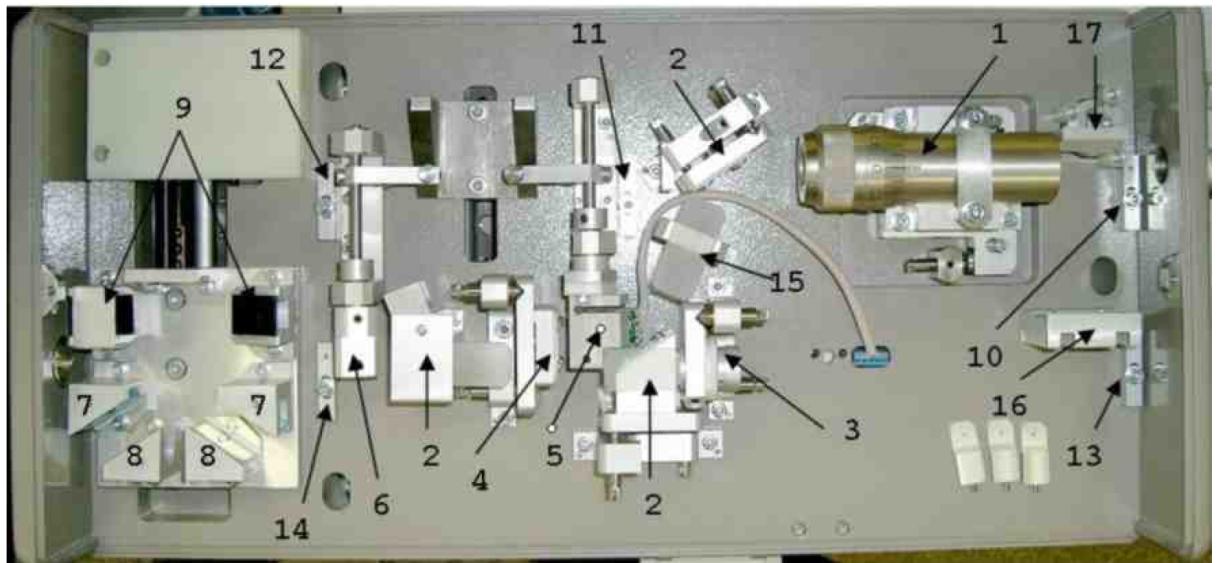


Рис. 19 Расположение оптических элементов параметрической приставке-преобразователе. 1 – фокусирующий телескоп; 2 – поворотные «глухие» зеркала для излучения накачки (PW); 3 - «глухое» зеркало резонатора для сигнальной волны (SW); 4 – выходное зеркало резонатора; 5 – кристалл ВВО; 6 – компенсатор; 7 – спектрорделители для диапазона 415-560 нм (SW); 8 – спектрорделители для диапазона 560-709 нм (SW); 9 - спектрорделители для диапазона 710-2300 нм (IW); 10-15 – диафрагмы юстировочные; 16 – ловушка блика PW; 17 - поворотное глухое зеркало PW.

Выходное излучение состоит из коллинеарных пучков сигнальной, холостой волн и остаточного (непреобразованного) излучения накачки. Остаточное излучение накачки отрезается поворотным зеркалом (2). Излучение сигнальной и холостой волн разделяются спектрорделительными зеркалами (7-9). Спектрорделительные зеркала имеют несколько фиксированных положений, обеспечивающих выделение следующих спектральных диапазонов: S1 (415 – 560 нм), S2 (560 – 709 нм), S+I (на выходе одновременно излучение сигнальной и холостой волн, режим «No WS»), I (710 – 2300 нм).

## Спектрометр-радиометр

Для определения длины волны параметрического излучения в данной работе используется спектрометр StellarNet со встроенной ПЗС матрицей и волоконно-оптическим вводом исследуемого излучения. Внешний вид спектрометра представлен на рисунке 20. Спектрометр позволяет регистрировать оптическое излучение в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм. Спектральное разрешение данного прибора оставляет 0,5 нм. Минимальное время интегрирование сигнала составляет 3 мс.



Рис. 20 Внешний вид спектрометра StellarNet.

Вводить излучение лазера непосредственно в волоконно-оптический кабель категорически запрещается, так как мощное излучение лазера может его повредить. Поэтому спектрометром можно регистрировать только излучение лазера, рассеянное от матовой пластинки, как это показано на рисунке 21.

Регистрация спектров производится на компьютере с помощью программного обеспечения SpectraWiz Shortcut. Окно Windows для программы и ее панель инструментов представлена на рисунке 22. Функции каждой кнопки на панели инструментов представлены в таблице 3.

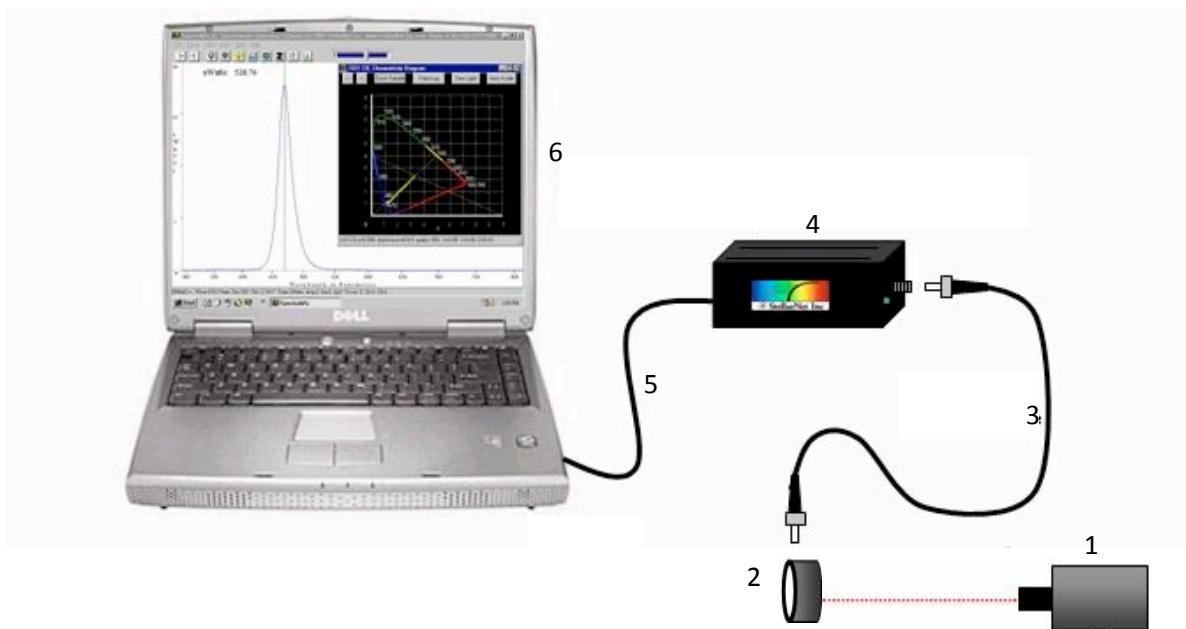


Рис. 21 Схема регистрации длины волны излучения лазера. 1 – лазер; 2 – матовая пластинка; 3 – волоконно-оптический кабель; 4 – спектрометр StellarNet; 5 – USB кабель; 6 – ПК.

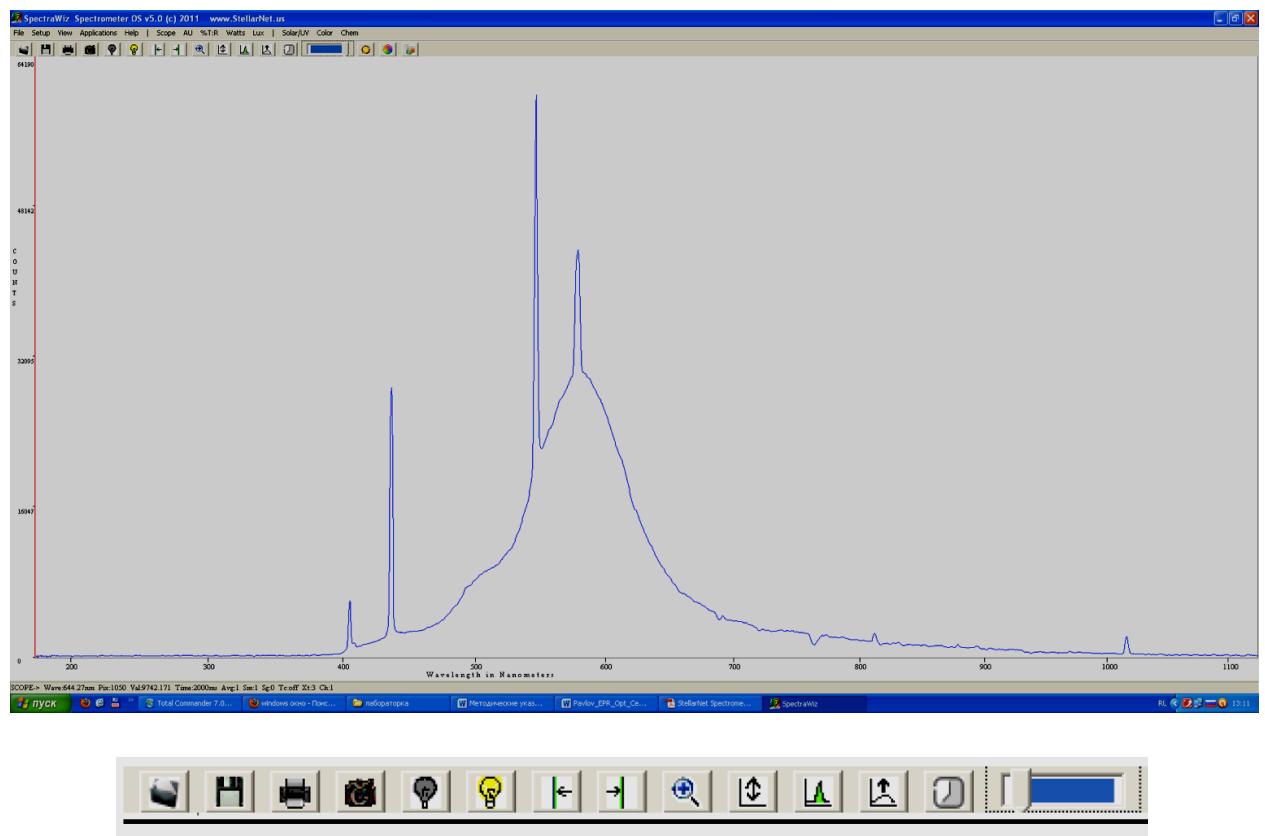


Рис. 22 Окно Windows программы SpectraWiz Shortcut и ее панель инструментов.

Табл. 3 Функции кнопок на панели управления программы SpectraWiz Shortcut.

Вид кнопки	Функция
	Открытие ранее записанного файла
	Запись зарегистрированного спектра в текстовый файл
	Печать зарегистрированного спектра
	Запись спектра в буфер обмена
	Вычитание «темнового» спектра (dark spectrum) при выключенном лазере
	Запись эталонного спектра (reference spectrum)
	Передвижение курсора влево
	Передвижение курсора вправо
	Увеличение изображения спектра в необходимом диапазоне длин волн
	Масштабирование изображения спектра (увеличение на весь экран)
	Определение положение пика и ширины спектральной линии (Peak Tool)
	Автоматическая установка времени интегрирования сигнала, используется для того чтобы задействовать весь динамический диапазон АЦП
	Ручная установка времени интегрирования сигнала
	Индикатор времени интегрирования

Для более точного определения длины волны излучения необходимо произвести вычитание «темнового» фона при выключенном лазере и увеличить время интегрирования сигнала, используя ручную настройку, для того чтобы задействовать весь динамический диапазон АЦП. Однако необходимо помнить, что чрезмерное увеличение времени интегрирования приведет к искажению детектируемого сигнала и неправильному определению длины волны излучения. Для определения положения пика

зарегистрированной спектральной линии (а именно, для определения длины волны излучения лазера) используется кнопка Peak Tool. При ее нажатии появляется вспомогательное окно, изображенное на рисунке 23. Кнопки > и <, расположенные во вспомогательном окне Peak Tool, позволяют перемещать курсор и определять положение пиков нескольких спектральных линий в зарегистрированном спектре.

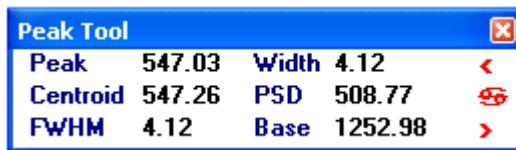


Рис. 23 Вспомогательное окно Peak Tool в программе SpectraWiz Shortcut.

Для определения амплитуды спектральной линии в зарегистрированном спектре используется строка текущего состояния, представленная на рисунке 24.



Рис. 24 Стока текущего состояния в программе SpectraWiz Shortcut.

В строке текущего состояния отображается значение длины волны (Wave:) и амплитуда сигнала (Val:) в месте расположения курсора, время интегрирования сигнала в миллисекундах (Time:) и число усреднений спектра (Avg:).

## Измеритель мощности лазерного излучения

В лабораторной работе используется пироэлектрический измеритель мощности лазерного излучения производства фирмы Thorlabs. Внешний вид

пульта управления и сенсорной пироэлектрической головки представлен на рисунке 25.



Рис. 25 Пироэлектрический измеритель мощности лазерного излучения фирмы Thorlabs.

Сенсорная пироэлектрическая головка позволяет измерять энергию лазерного излучения от 100 мкДж до 500 мДж и диапазоне длин волн от 0,185 до 25 мкм.

В данном типе измерителях используются кристаллы пироэлектриков, на поверхности которых происходит появление электрических зарядов при их нагревании под воздействием энергии лазерного излучения. При попадании излучения (1) на поглощающее покрытие (2) (рисунок 26) происходит нагрев пироэлектрического материала, изменяется его поляризация и на поверхности кристалла появляются электрические заряды (3). Величина заряда на поверхности пироэлектрика в первом приближении прямо пропорциональна температуре кристалла, которая, в свою очередь, пропорциональна поглощенной энергии лазерного излучения. При использовании пироэлектрических кристаллов в качестве датчиков мощности и поглощенной энергии оптического излучения их включают в цепь, содержащую высокоомное сопротивление нагрузки, на котором выделяется измеряемый сигнал. Как следует из закона Ома, напряжение сигнала оказывается прямо пропорциональным сопротивлению нагрузки. Поэтому в пироэлектрических приемниках сопротивление нагрузки выбирается не

меньшим, чем 1 ГОм и используются дифференциальные усилители (5) с большим входным сопротивлением на полевых транзисторах.

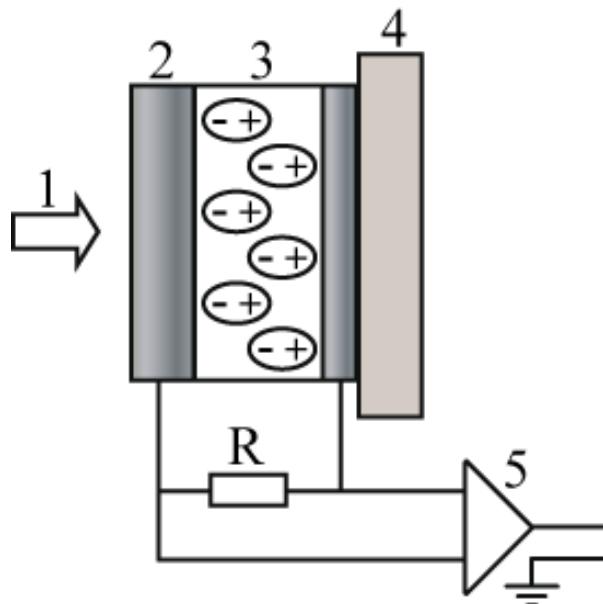


Рис. 26 Схема пироэлектрического приемника. 1 – лазерное излучение; 2 – поглощающее покрытие; 3 – сегнетоэлектрик; 4 – подложка; 5 – дифференциальный усилитель.

Постоянная времени пироэлектрического приемника может достигать значения  $\sim 10^{-7}$  с. Для уменьшения постоянной времени всех типов тепловых приемников необходимо добиваться минимальной теплоемкости рабочего тела приемника (снижать его массу) и его минимальной теплопроводности. При работе с тепловыми приемниками целесообразно применять модуляцию светового потока.

## Призма Глана-Тейлора

Призма Глана-Тейлора предназначена для выделения линейно поляризованной компоненты падающего оптического излучения с произвольной поляризацией. Она представляет собой две одинаковые призмы, выполненные из сильно двупреломляющего материала (исландского шпата) и соединенные через тонкий плоскопараллельный воздушный зазор.

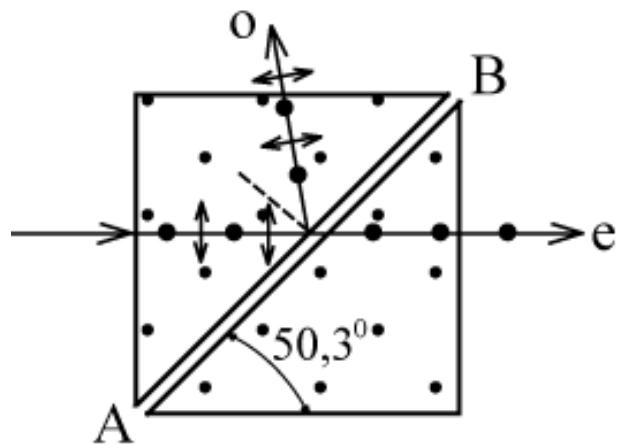


Рис. 27 Поляризационная призма Глана-Тейлора. АВ — воздушный промежуток. Точки на обеих трёхгранных призмах указывают, что их оптические оси перпендикулярны плоскости рисунка.

Угол при вершине призмы выбирается таким образом, чтобы при нормальном падении излучения на входную грань призмы обыкновенная (о) поляризационная компонента падающего пучка испытывала полное внутреннее отражение от наклонной грани. При этом необыкновенная (е) поляризационная компонента проходит через призму в исходном направлении, не испытывая полного внутреннего отражения от наклонной грани. Поэтому независимо от состояния поляризации падающего пучка, прошедший пучок будет иметь строго линейную поляризацию, соответствующую необыкновенной волне (е). При этом отраженный от наклонной грани пучок имеет обе поляризационные компоненты - он содержит всю обычно поларизованную компоненту исходного пучка, а также часть необыкновенной, отраженной наклонной грани.

### **3.2. Техника безопасности при работе с лазерными источниками излучения**

Почти сразу после появления лазеров появились сообщения об опасностях, которым подвергает себя человек при работе с ними. Излучение, генерируемое лазерами, занимает довольно широкий спектр электромагнитных колебаний. Разные длины волн по-разному воздействуют на живые ткани.

*Ультрафиолетовое излучение.* Энергия квантов ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн от 350 до 50 нм меняется в пределах от 3,5 до 25 эВ соответственно. Фотоны с энергией более 10 эВ способны вызвать ионизацию различных атомов и молекул, составляющих основу живой ткани. Степень поражения кожи ультрафиолетовым излучением зависит от поглощенной энергии излучения.

*Инфракрасное излучение.* Низкая энергия фотонов инфракрасного излучения (менее 1,5 эВ) недостаточна для изменения электронных состояний атомов, входящих в состав живой ткани. Главным эффектом воздействия является нагрев ткани при поглощении инфракрасного излучения. Ввиду того что вода хорошо поглощает в инфракрасном диапазоне, большинство биологических материалов для этих длин волн непрозрачны. Глубина проникновения зависит от длины волны падающего излучения. Так, например, существует участок высокой прозрачности на длинах волн от 0,75 до 1,3 мкм при максимуме прозрачности в районе 1,1 мкм. На этой длине волны около 20 % энергии, падающей на поверхностный слой кожи, проникает на глубину до 5 мм. Кожа человека достаточно хорошо противодействует инфракрасному облучению, так как она способна рассеивать тепло благодаря кровообращению и понижать температуру ткани вследствие испарения влаги с поверхности. Значительно труднее от инфракрасного облучения защитить глаза, в них тепло практически не

рассеивается, и хрусталик, фокусирующий излучение на сетчатке, усиливает эффект биологического воздействия. Все это заставляет при работе с лазерами обращать особое внимание на защиту глаз от инфракрасного облучения.

*Видимая область.* На пути к сетчатке глаза световое излучение видимой области не испытывает заметного поглощения в тканях и веществах глазной камеры. Энергия световых фотонов сравнительно невелика (3,5–1,5 эВ). При обычном дневном освещении видимое световое излучение вызывает цепную фотохимическую реакцию в светочувствительном веществе – родопсине, входящем в состав клеток сетчатки. Конечным результатом этого процесса и является ощущение световых зрительных образов. «Вспышечная слепота» человека – явление, обусловленное слепящим действием света, под которым понимается действие излучения с уровнем плотности, превышающим величину, достаточную для отчетливой видимости предметов. Слепящим считается любое световое излучение, которое вместо помощи зрению затрудняет его.

По выходе из резонатора лазерное излучение сталкивается с молекулами воздуха, углекислого газа, мельчайшими частицами пыли, аэрозолями и другими частицами, взвешенными в воздухе. Эти частицы рассеивают лазерное излучение, которое может создать уровни энергии, опасные для зрения человека. Наиболее опасным является отраженное лазерное излучение. Величина отраженной энергии зависит от свойств поверхности объектов, расположенных в зоне облучения.

Таким образом, при работе человека с лазерами надо рассматривать три случая поражения лазерным излучением: 1) человек находится под прямым воздействием излучения, 2) человек попадает в зону зеркально отраженного луча, 3) человек находится под воздействием диффузно рассеянного излучения.

Самым опасным для глаз и незащищенных поверхностей кожи человека является воздействие прямого лазерного излучения, при этом уровни плотности энергии, вызывающие тяжелые последствия, сравнительно невелики. Не менее опасным для органа зрения человека является зеркально отраженное лазерное излучение, уровень которого определяется коэффициентом отражения поверхности, мощностью и длительностью лазерного излучения. Представляет опасность для глаз также и диффузно рассеянное отражение от стен, приборов и др. Опасность воздействия излучения лазеров может быть значительно уменьшена путем экранирования рабочих зон, рациональным расположением рабочих мест, а также мерами личной безопасности.

Кроме лазерного излучения на работающий персонал может воздействовать также ряд неблагоприятных факторов, например, в состав оборудования импульсных лазеров входит аппаратура, работающая при высоких напряжениях (накопительные конденсаторы, лампы-вспышки). Меры защиты от лазерного облучения определяются типом лазера и способом его использования. К работе на лазерных установках следует допускать лиц, сдавших зачет по технике безопасности.

**Меры предосторожности.** Запрещается прямо смотреть на луч лазера или на его зеркальное отражение. Не следует наводить луч лазера, глядя на него невооруженным глазом, так как наблюдение вдоль оси лазерного луча значительно увеличивает опасность поражения органа зрения в результате отражения. Необходимо принимать меры, исключающие возможность приближения персонала к предполагаемой траектории пучка. Точки фокусировки пучка должны быть защищены диафрагмами; в конце пучка устанавливается ловушка для поглощения излучения. Для уменьшения рассеяния света на кювете, линзе, призме и других элементах, стоящих на пути распространения светового пучка, каждый из них снабжается блендами.

На конечном участке лазерного пучка рекомендуется устанавливать поглотитель.

Индивидуальная защита глаз достигается применением специальных светофильтров, оптическая плотность которых на всех длинах волн, излучаемых лазером, должна быть достаточно большой для того, чтобы снизить интенсивность облучения глаз до безопасной величины. Нужно всегда помнить, что защитные очки обеспечивают лишь частичную защиту. Необходимо использовать только те очки, которые рассчитаны на защиту от излучения данного лазера, при этом должна быть исключена возможность ошибочного применения очков, рассчитанных на другую длину волны. Работы с лазерами рекомендуется проводить при ярком общем освещении. В этом случае размеры зрачков наименьшие, что способствует уменьшению энергии излучения, которая может случайно попасть в глаза. Защита от ультрафиолетовых и инфракрасных лучей наиболее ответственна, так как глаза человека не восприимчивы к ним. При работе с такими лазерами мишень должна тщательно экранироваться, а руки и одежду следует держать как можно дальше от нее.

Запрещается работать без заземления, со снятыми крышками излучателя, в режимах, превышающих технические данные лазера. Аварийное выключение лазера производится кнопкой “STOP” на передней панели блока питания.

На дверях помещения, в котором расположены особо мощные лазерные установки, вывешиваются предупредительные знаки лазерной опасности. При работе с лазерами следует всегда соблюдать правила пожарной и особенно электробезопасности. Даже при работе с маломощными лазерами существует опасность поражения электрическим током.

### **3.3. Порядок выполнения лабораторных работ**

Целью лабораторных упражнений является получение практических навыков работы с лазерными системами, использующими в своем составе нелинейные преобразователи частоты излучения, а также в исследовании спектральных и энергетических характеристиками параметрического генератора света.

***ВНИМАНИЕ! Перед началом работы обязательно ознакомьтесь с требованиями техники безопасности, а также изучите назначение, особенности функционирования, управления и безопасные приемы работы с лазером YAG:Nd, параметрической приставки-преобразователем и другими используемыми приборами.***

#### **Упражнение 1. Исследование излучения накачки параметрического генератора света**

Целью настоящего упражнения является определение порога генерации третьей гармоники лазера YAG:Nd (355 нм), которая будет в дальнейшем использоваться для накачки параметрического генератора света.

***ВНИМАНИЕ! Перед включением блока излучателя лазера необходимо надеть защитные очки. Лазерное излучение опасно для глаз!***

- 1.1. Включить лазер YAG:Nd, повернув ключ на передней панели блока питания.
- 1.2. На пульте управления лазера нажать кнопку “LAMP” и дать прогреться лазеру в течение 10 минут. О готовности лазера к работе свидетельствует непрерывное свечение зеленого индикатора над кнопкой “LAMP” на пульте управления лазера.

- 1.3. Снять заглушку с отверстия для выхода излучения третьей гармоники (355 нм) на передней панели блока излучателя.
- 1.4. Переключить работу лазера YAG:Nd в режим модуляции добротности, выбрав пункт “INTERNAL” при помощи кнопки “Q-SW MODE” в нижней части пульта управления лазера.
- 1.5. Включить управление электрооптическим затвором лазера с помощью кнопки “Q-SWITCH” пульта управления лазера.
- 1.6. Открыть шторку кнопкой “SHUTTER”.
- 1.7. Установить минимальное значение энергии лампы, при котором выходящее излучение (355 нм) можно детектировать при помощи визуализатора. Энергия лампы регулируется кнопками 17 (рисунок 16), находящимися на пульте управления лазера непосредственно под табло 15 (рисунок 16). Текущее значение энергии лампы указано на табло (при включении лазера оно по умолчанию равно 5,0 Дж).
- 1.8. Подсоединить пироэлектрическую головку измерителя мощности к блоку управления измерителя мощности Thorlabs.
- 1.9. Установить пироэлектрическую головку измерителя мощности напротив выходного отверстия лазера YAG:Nd на расстоянии 10 – 15 см так, чтобы « пятно » лазерного излучения не выходило за пределы чувствительной части головки измерителя (рисунок 28).

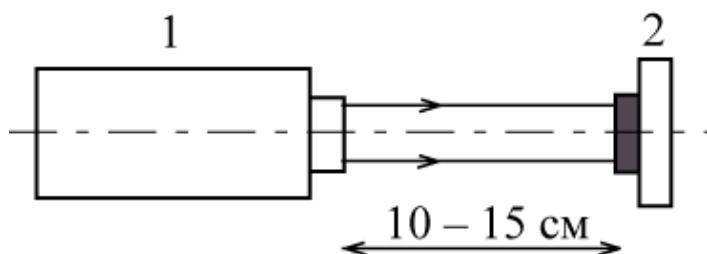


Рис. 28 Схема экспериментальной установки для выполнения упражнения 1. 1 – лазер YAG:Nd; 2 – измерителя мощности оптического излучения Thorlabs.

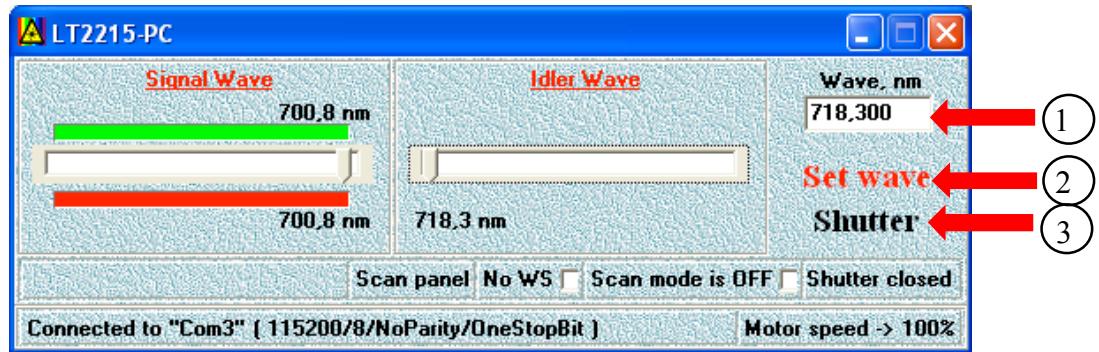
- 1.10. Используя измеритель мощности лазерного излучения Thorlabs измерить энергию излучения лазера YAG:Nd на 355 нм при различной мощности накачки активного элемента лазера YAG:Nd (указанной преподавателем).
- 1.11. Завершив измерения, выключить лазер YAG:Nd. Для этого уменьшить значение энергии лампы до 5 Дж, закрыть шторку и затвор лазера, используя кнопки “SHUTTER” и “Q-SWITCH” на пульте управления лазера.
- 1.12. Построить соответствующую зависимость на графике. Оценить значение пороговой энергии накачки.
- 1.13. Оформить полученный результат для сдачи работы преподавателю.

## **Упражнение 2. Определение энергетических характеристик параметрической генерации света**

Целью второго упражнения является изучение зависимостей энергии параметрической генерации света от энергии накачки и определение энергетического порога возникновения параметрической генерации.

- 1.1. Подключить блок управления лазера к персональному компьютеру (ПК) через USB кабель.
- 1.2. На компьютере запустить программу «LT-22XX\_PC.exe».
- 1.3. В случае если лазер YAG:Nd выключен, повторить пункты 1.1. - 1.6. упражнения 1.
- 1.4. Установить длину волны параметрической генерации, указанную преподавателем. Установка длины волны параметрического излучения производится в окончании “Wave, nm” программы “LT-22XX\_PC” (1). После ввода значения длины волны нажать кнопку

“ENTER” на клавиатуре и кнопку “SET WAVE” (2). Затем открыть шторку в параметрической приставке-преобразователе, нажав кнопку “SHUTTER” (3).



- 1.5. Установить минимальное значение энергии лампы накачки лазера YAG:Nd, при котором выходящее излучение параметрического генератора можно детектировать при помощи визуализатора. При установке энергии лампы следуйте пункту 1.7. упражнения 1.
- 1.6. Установить пироэлектрическую головку измерителя мощности Thorlabs напротив выходного отверстия параметрического генератора на расстоянии 10 – 15 см так, чтобы « пятно » параметрического излучения не выходило за пределы чувствительной части головки измерителя (рисунок 29).

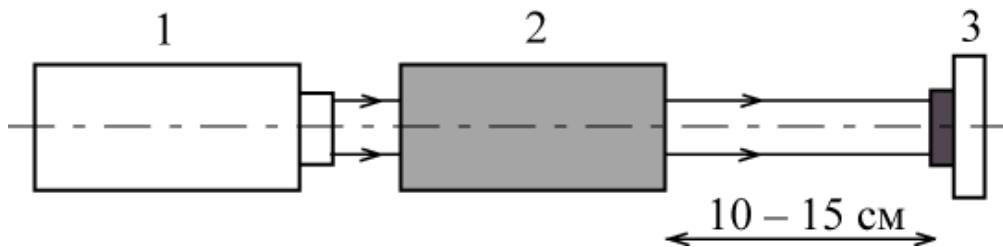


Рис. 29 Схема экспериментальной установки для выполнения упражнения 2. 1 – лазер YAG:Nd; 2 – параметрическая приставка-преобразователь; 3 – измерителя мощности оптического излучения Thorlabs.

- 1.7. Измерить энергию параметрического излучения при различной мощности накачки активного элемента лазера YAG:Nd (указанной преподавателем).

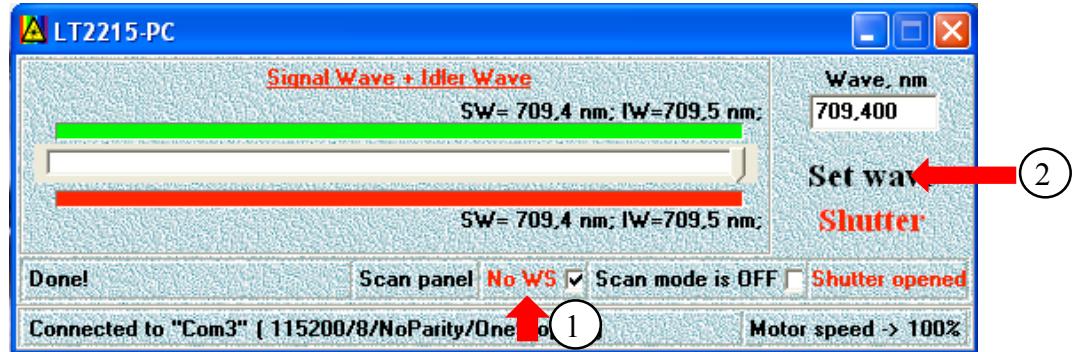
- 1.8. Завершив измерения, выключить лазер. Для этого уменьшить значение энергии лампы до 5 Дж, закрыть шторку и затвор лазера YAG:Nd, используя кнопки “SHUTTER” и “Q-SWITCH” на пульте управления лазера. Закрыть шторку в параметрической приставке-преобразователе, нажав кнопку “SHUTTER” в программе “LT-22XX\_PC”.
- 1.9. Используя экспериментальные данные, полученные при выполнении упражнения 1, построить в виде графика зависимость энергии параметрического излучения от энергии накачки. Оценить порог возникновения параметрической генерации света.
- 1.10. Оформить полученный результат для сдачи работы преподавателю.

### **Упражнение 3. Исследование спектральных характеристик параметрического генератора света**

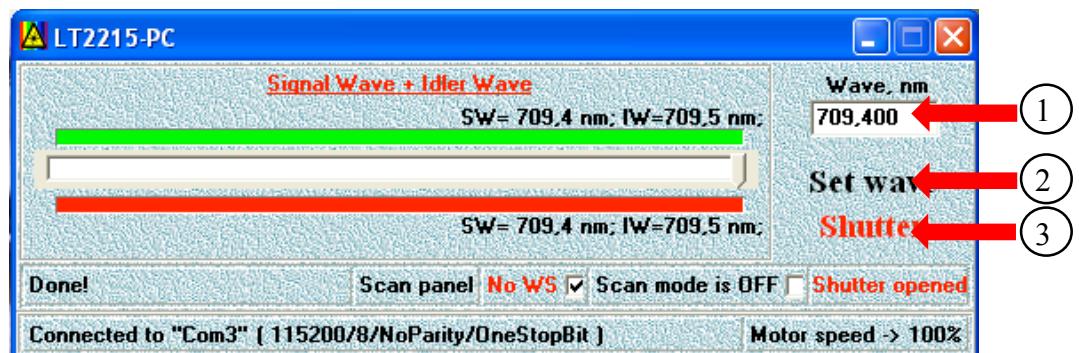
Целью данного упражнения является исследование диапазона перестройки параметрического генератора и определение погрешности при установке длины волны генерации с помощью программы “LT-22XX\_PC”.

- 1.1. В случае, если перед началом выполнения этого упражнения установка выключена, необходимо повторить пункты 1.1.-1.3 упражнения 2.
- 1.2. Подключить спектрометр StellarNet к ПК через USB кабель. На компьютере запустить программу “SpectraWiz Shortcut”.
- 1.3. В данном упражнении исследуется диапазон перестройки сигнальной и холостой волн параметрического генератора. Для одновременного получения на выходе сигнальной и холостой волн

установить в программе “LT-22XX\_PC” флагок “NO WS” (1). Дальнейшее нажатие кнопки “SET WAVE” (2) приведет в действие подвижной механизм, который уберет спектрорделительные зеркала 7 – 9 (рисунки 18, 19), расположенные на выходе параметрического генератора.



- 1.4. Установить длины волн сигнального и холостого параметрического излучения в видимом диапазоне спектра. Установка длины волны для Signal Wave производится в оконке “Wave, nm” программы “LT-22XX\_PC” (1). Расчет длины волны для Idler Wave происходит автоматически. После ввода значения длины волны нажать кнопку “ENTER” на клавиатуре и кнопку “SET WAVE” (2). Затем открыть шторку в параметрической приставке-преобразователе, нажав кнопку “SHUTTER” (3).



- 1.5. Установить минимальное значение энергии лампы лазера YAG:Nd, при котором выходящее излучение параметрического генератора можно детектировать при помощи визуализатора. При установке энергии лампы следуйте пункту 1.7. упражнения 1.

1.6. Расположить матовую пластинку напротив выходного отверстия параметрического преобразователя на расстоянии 10 – 15 см, так чтобы пятно» параметрического излучения не выходило за ее пределы.

1.7. Подсоединить один конец волоконно-оптического кабеля к спектрометру. Второй конец расположить за матовой пластинкой, так чтобы в волоконно-оптический кабель заходило только рассеянное излучение от параметрического генератора. Способ расположения волоконно-оптического кабеля представлен на рисунке 30.

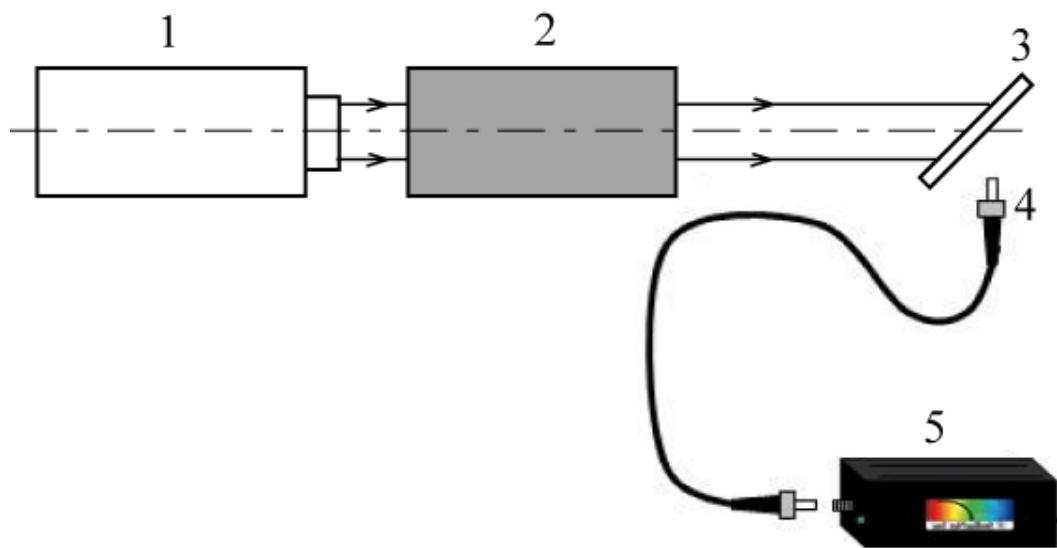


Рис. 30 Схема экспериментальной установки для выполнения упражнения 3. 1 – лазер YAG:Nd; 2 – параметрическая приставка-преобразователь; 3 – матовая пластинка; 4 – волоконно-оптический кабель; 5 – спектрометр StellarNet.

1.8. В программе “SpectraWiz Shortcut” произвести вычитание «темнового» фона при закрытой шторке лазера накачки YAG:Nd.

1.9. Установить длины волн сигнального и холостого параметрического излучения в начало диапазона перестройки. Выставить необходимую энергию лампы накачки лазера YAG:Nd. Диапазон и шаг перестройки, энергия лампы накачки лазера YAG:Nd задаются

преподавателем. При установке длины волны параметрической генерации и энергии лампы необходимо следовать пункту 1.4. упражнения 3 и пункту 1.7. упражнения 1, соответственно.

- 1.10. Изменяя длину волны параметрической генерации с помощью программы “LT-22XX\_PC” произвести измерения амплитуды и длины волны сигнального и холостого параметрического излучения. Длины волн параметрического излучения, зарегистрированные с помощью вспомогательного окна Peak Tool в программе “SpectraWiz Shortcut”, будут отличаться от значений, выставленных в программе “LT-22XX\_PC”. Для измерения амплитуды спектральных линий сигнального и холостого параметрического излучения используйте строку текущего состояния программы “SpectraWiz Shortcut”.
- 1.11. Завершив измерения, выключить лазер. Для этого уменьшить значение энергии лампы до 5 Дж, закрыть шторку и затвор лазера YAG:Nd, используя кнопки “SHUTTER” и “Q-SWITCH” на пульте управления лазера. Закрыть шторку в параметрической приставке-преобразователе, нажав кнопку “SHUTTER” в программе “LT-22XX\_PC”.
- 1.12. Построить зависимость амплитуды параметрической генерации от длины волны для сигнального и холостого излучения.
- 1.13. Оценить погрешность установки длины волны параметрической генерации с помощью программы “LT-22XX\_PC”.
- 1.14. Оформить полученные результаты для сдачи работы преподавателю.

## **Упражнение 4. Измерение расходимости лазерного пучка**

Целью упражнения является определение угла расходимости сигнальной волны параметрического генератора, измеряя сечение пучка на различных расстояниях от выходного зеркала параметрического генератора.

- 1.1. В случае если перед началом выполнения этого упражнения установка выключена, необходимо повторить пункт 1.1. упражнения 2.
- 1.2. В данном упражнении будет исследоваться только расходимость сигнальной волны параметрического генератора, поэтому необходимо снять флагок “NO WS” в программе “LT-22XX\_PC”.
- 1.15. Установить длину волны параметрической генерации, указанную преподавателем, следуя пункту 1.2. упражнения 2. Открыть шторку в параметрической приставке-преобразователе, нажав кнопку “SHUTTER” в программе “LT-22XX\_PC”.
- 1.3. Установить минимальное значение энергии лампы накачки лазера YAG:Nd, при котором выходящее излучение параметрического генератора можно детектировать при помощи визуализатора. При установке энергии лампы следуйте пункту 1.7. упражнения 1.
- 1.4. Расположить экран напротив выходного отверстия параметрического преобразователя на расстоянии  $L_1 = 1 - 1,5$  м и измерить диаметр пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях.
- 1.5. Передвинуть экран от лазера на расстояние  $L_2 = 3 - 4$  м и вновь измерить диаметр пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

- 1.6. Завершив измерения, выключить лазер. Для этого уменьшить значение энергии лампы до 5 Дж, закрыть шторку и затвор лазера YAG:Nd, используя кнопки “SHUTTER” и “Q-SWITCH” на пульте управления лазера. Закрыть шторку в параметрической приставке-преобразователе, нажав кнопку “SHUTTER” в программе “LT-22XX\_PC”.
- 1.7. Определить расходимость параметрического излучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Результаты выразить в угловых минутах.
- 1.8. Оформить полученный результат для сдачи работы преподавателю.

#### **Упражнение 5. Определение типа взаимодействия, при котором осуществляется фазовый синхронизм**

В данном упражнении исследуется поляризация излучения накачки, а также выходного излучения параметрического генератора (сигнальной и холостой волн) с целью определения типа взаимодействия, при котором осуществляется фазовый синхронизм в исследуемом нелинейном кристалле ВВО.

- 1.1. В случае если перед началом выполнения этого упражнения установка выключена, необходимо повторить пункт 1.1. упражнения 2.
- 1.2. Установить минимальное значение энергии лампы, при котором выходящее излучение лазера YAG:Nd (355 нм) можно детектировать при помощи визуализатора. При установке энергии лампы следуйте пункту 1.7. упражнения 1.

- 1.3. Установить призму Глана-Тейлора напротив выходного отверстия лазера YAG:Nd на расстоянии 10 – 15 см. За призмой Глана-Тейлора расположить экран (рисунок 31).

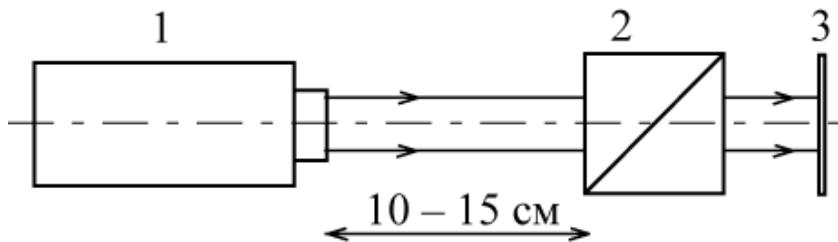


Рис. 31 Схема экспериментальной установки для выполнения упражнения 5. 1 – лазер YAG:Nd; 2 – призма Глана-Тейлора; 3 – экран.

- 1.4. Зная физический принцип работы призмы Глана-Тейлора, определить поляризацию излучения накачки параметрического генератора.
- 1.5. Уменьшить энергию лампы накачки лазера YAG:Nd до 5 Дж и убрать с выхода лазера призму Глана-Тейлора и экран.
- 1.6. В данном упражнении необходимо исследовать поляризацию сигнальной и холостой волн параметрического генератора. Для одновременного получения на выходе сигнальной и холостой волн следуйте пункту 1.3. упражнения 3.
- 1.7. Установить необходимые длины волн сигнального и холостого параметрического излучения (задается преподавателем). При установке длины волны параметрической генерации необходимо следовать пункту 1.4. упражнения 3.
- 1.8. Выставить минимальное значение энергии лампы накачки лазера YAG:Nd, при котором выходящее излучение параметрического генератора можно детектировать при помощи визуализатора. При установке энергии лампы следуйте пункту 1.7. упражнения 1.

1.9. Расположить призму Глана-Тейлора напротив выходного отверстия лазера YAG:Nd на расстоянии 10 – 15 см. За призмой Глана-Тейлора расположить экран (рисунок 32).

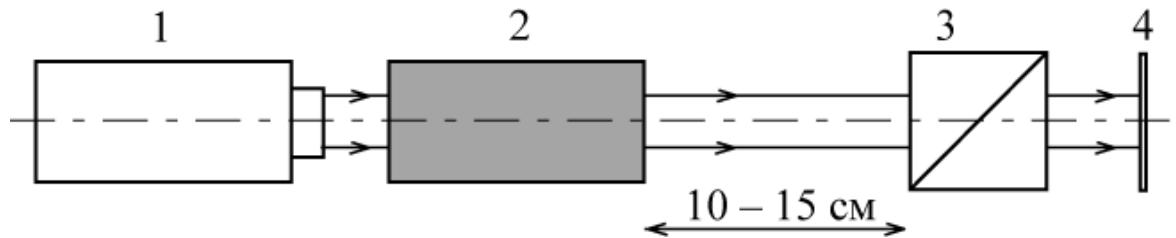


Рис. 32 Схема экспериментальной установки для выполнения упражнения 5. 1 – лазер YAG:Nd; 2 – параметрическая приставка-преобразователь; 3 – призма Глана-Тейлора; 4 – экран.

1.10. Используя призму Глана-Тейлора, определить поляризацию сигнальной и холостой волн параметрического генератора.

1.11. Используя полученные экспериментальные данные, определить тип взаимодействия, при котором осуществляется фазовый синхронизм в исследуемом нелинейном кристалле ВВО.

1.12. Оформить полученный результат для сдачи работы преподавателю.

## **Контрольные вопросы**

1. Нелинейная поляризация света. Основные соотношения.
2. Сходства и различия параметрического усиления электрических колебаний и оптического параметрического усиления.
3. Принцип работы двухчастотного параметрического усилителя электрических колебаний.
4. Принцип работы параметрического генератора света.
5. Реализация параметрической генерации света. Первые эксперименты и современное состояние.
6. Перестройка частоты при параметрической генерации.
7. Принцип работы используемого в лабораторной работе лазера YAG:Nd.
8. Принцип работы используемой в лабораторной работе параметрической приставки-преобразователя.

## Список литературы

1. N. R. Kroll, Phys. Rev. **127**, 1207 (1962).
2. С. А. Ахманов, Р. В. Хохлов, Проблемы нелинейной оптики. М.: “Наука”, 1964.
3. R. H. Kingston, Proc. IRE **50**, 472 (1962).
4. C. C. Wang, C. W. Racette, Appl. Phys. Letters **8**, 169 (1965).
5. С. А. Ахманов, А. И. Ковригин, А. С. Пискарская, В. В. Фадеев, Р. В. Хохлов, Письма ЖЭТФ **2**, 300 (1965).
6. J. A. Giordmaine, R. C. Miller, Phys. Rev. Letters **14**, 973 (1965).
7. Н. Бломберген, Нелинейная оптика. М.: Мир, 1966.
8. В. Г. Дмитриев, Нелинейная оптика и обращение волнового фронта. М.: Физматлит, 2000.
9. В.С. Бутылкин, А.Е. Каплан, Ю.Г. Хронопуло, Е.И. Якубович, Резонансные взаимодействия света с веществом. М.: Наука, 1977.
10. Г. Гурзадян, В.Г. Дмитриев, Д.Н. Никогосян, Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в электронике. М.: “Радио и связь”, 1991.
11. K. Kato, IEEE J. QE. **18**, 451 (1982).
12. Г.С. Ладсберг, Оптика. М.: “Физматлит”, 2003.
13. Д.В. Сивухин, Общий курс физики. Т. IV. М.: “Физматлит”, 2005.
14. Ф. Кацмарек, Введение в физику лазеров. М.: “Мир”, 1981.
15. В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов, Прикладная нелинейная оптика. М.: “Физматлит”, 2004.
16. И.С. Гоноровский, Радиотехнические цепи и сигналы. М.: “Радио и связь”, 1986.