

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Ф.А. Губарев

**ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И ПАРАМЕТРОВ
ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА С ДИОДНОЙ
НАКАЧКОЙ**

*Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Оптические методы в биологии и медицине» для
студентов магистратуры по направлению 12.04.04
«Биотехнические системы и технологии»*

2017

Цель работы:

Ознакомиться с принципом действия твердотельного Nd:YAG лазера и эффектом генерации второй гармоники..

Предварительное задание

1. Изучить принцип действия и способ создания инверсии в Nd:YAG лазере.
2. Вычислить угол фазового синхронизма при удвоении частоты излучения Nd:YAG лазера в кристалле KDP, если известно, что для KDP $n_o(1,06 \text{ мкм}) = 1,507$, $n_o(532 \text{ нм}) = 1,528$, а $n_e(532 \text{ нм}) = 1,482$.

Теоретические сведения

Термин «твердотельный лазер» относится в основном к лазерам, активными центрами которых являются примесные ионы, введенные в прозрачную матрицу (кристалл или стекло). Полупроводниковые лазеры, поскольку они имеют другие механизмы накачки и генерации, как правило, относят к отдельному классу лазеров.

Примесные ионы, которые используются в твердотельных лазерах, относятся к одной из групп переходных элементов периодической таблицы, особенно это касается ионов редкоземельных или переходных металлов. В качестве матричных кристаллов используются либо оксиды, например Al_2O_3 , либо фториды, например YLiF_4 (сокращенно YLF). Узел Al^{3+} кристаллической решетки очень мал для того, чтобы в нем мог разместиться ион редкоземельного элемента, и этот узел в основном используется для ионов переходных металлов. Для получения синтетических гранатов, таких как $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} = (1/2)(3\text{Y}_2\text{O}_3 + 5\text{Al}_2\text{O}_3)$, зачастую используются подходящие комбинации оксидов, и в этом случае узел Al^{3+} может вместить ионы переходных металлов, тогда как узел Y^{3+} может использоваться для ионов редкоземельных элементов. К другим оксидам можно отнести кристалл YVO_4 для ионов Nd^{3+} и алмаз для ионов Cr^{3+} . Среди фторидов в качестве матричных кристаллов для ионов редкоземельных элементов используется материал YLF, тогда как для переходных элементов (в основном для ионов Cr^{3+}) наиболее популярными являются материалы LiSrAlF_6 (сокращенно LiSAF) или LiCaAlF_6 (сокращенно LiCAF).

Сравнивая между собой оксиды и фториды, можно отметить, что первые, будучи более твердыми, имеют некоторые преимущества. В частности, они более предпочтительны в плане механических и термомеханических свойств (например, более высокий температурный порог разрушения). С другой стороны, фториды обладают лучшими термооптическими свойствами (например, менее выраженные наведенные тепловые линзы или наведенное двулучепреломление).

Среди твердотельных лазеров наиболее известными являются рубиновый лазер (первый действующий лазер), неодимовые лазеры, лазер на титан-сапфире, эрбиевый и иттербиевый лазеры. В последнее время большое развитие получили волоконные и дисковые лазеры, особенно в части получения высокой мощности в ИК-диапазоне.

Nd:YAG лазер

Активной средой в Nd:YAG лазерах является кристалл $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (обычно называемый YAG или алюмо-иттриевый гранат), в котором часть ионов Y^{3+} замещена ионами Nd^{3+} . Типичные уровни легирования для кристалла Nd:YAG составляют порядка ~1 ат. %. Более высокие уровни легирования ведут к тушению флюоресценции, а также к внутренним напряжениям в кристалле, поскольку радиус иона Nd^{3+} примерно на 14% превышает радиус иона Y^{3+} . Нелегированные исходные материалы обычно прозрачны, а после легирования кристалл YAG приобретает бледно-пурпурную окраску, поскольку линии поглощения Nd^{3+} лежат в красной области.

Накачка активной среды лазера осуществляется с помощью лазерных диодов с длиной волны излучения, попадающей в полосу поглощения кристалла YAG. На рис. 1 представлена упрощенная схема энергетических уровней кристалла Nd:YAG. Две основные полосы накачки для Nd:YAG соответствуют длинам волн 730 и 800 нм, хотя другие, более высоко лежащие полосы поглощения (рис. 2.2) также играют важную роль, особенно при использовании импульсных ламп накачки. Полосы поглощения связаны быстрой безызлучательной релаксацией с уровнем ${}^4F_{3/2}$, откуда идет релаксация за счет излучения на нижние уровни (${}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{11/2}$, ${}^4I_{13/2}$ и др.). Однако скорость такой релаксации намного меньше, поскольку переход в изолированном ионе запрещен, но становится слабо разрешенным благодаря взаимодействию с полем кристаллической решетки. Безызлучательная релаксация при этом не является существенной вследствие экранирования обоих состояний $5s^2$ и $5p^6$, а также большого энергетического зазора между уровнем ${}^4F_{3/2}$ и близлежащим к нему нижним уровнем. Таким образом, уровень ${}^4F_{3/2}$ запасает большую долю энергии накачки и поэтому хорошо подходит на роль верхнего лазерного уровня. Время жизни этого уровня составляет 230 мкс.

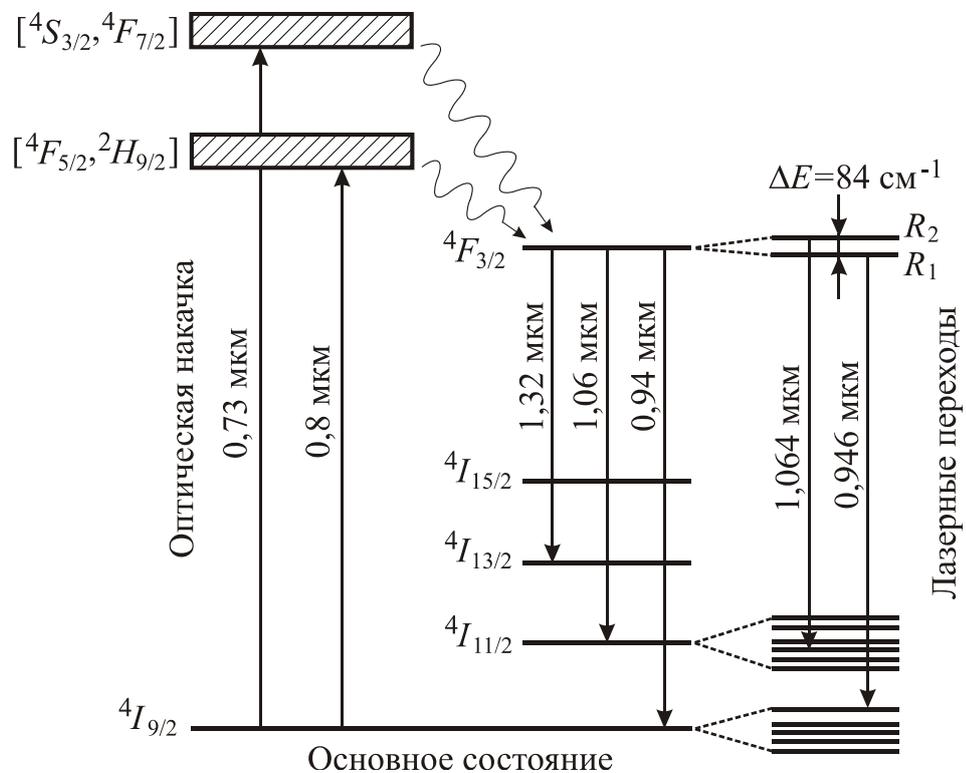


Рис. 1. Схема энергетических уровней кристалла Nd:YAG

Из возможных переходов с уровня ${}^4F_{3/2}$ на нижележащие I уровни наиболее интенсивным является переход ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$. Кроме того, уровень ${}^4I_{11/2}$ связан быстрой (порядка наносекунд) безызлучательной релаксацией в основное состояние ${}^4I_{9/2}$, поэтому тепловое равновесие между этими двумя уровнями устанавливается очень быстро. Таким образом, генерация лазера на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ соответствует четырехуровневой схеме. Уровень ${}^4F_{3/2}$ расщеплен за счет эффекта Штарка на два подуровня (R_1 и R_2 на рис. 1), тогда как уровень ${}^4I_{11/2}$ расщеплен на шесть подуровней. Лазерная генерация обычно происходит с верхнего подуровня R_2 на определенный подуровень уровня ${}^4I_{11/2}$ поскольку этот переход обладает наибольшим сечением перехода вынужденного излучения. Этот переход осуществляется на длине волны $\lambda = 1,064 \text{ мкм}$ – наиболее распространенная длина волны генерации для Nd:YAG лазеров. Лазерную генерацию можно также получить и на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ с длиной волны $\lambda = 1,319 \text{ мкм}$, реализуя

многослойное диэлектрическое покрытие на зеркалах резонатора. При использовании лазерных диодов в качестве накачки лазерная генерация может эффективно осуществляться и на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ ($\lambda = 946$ нм).

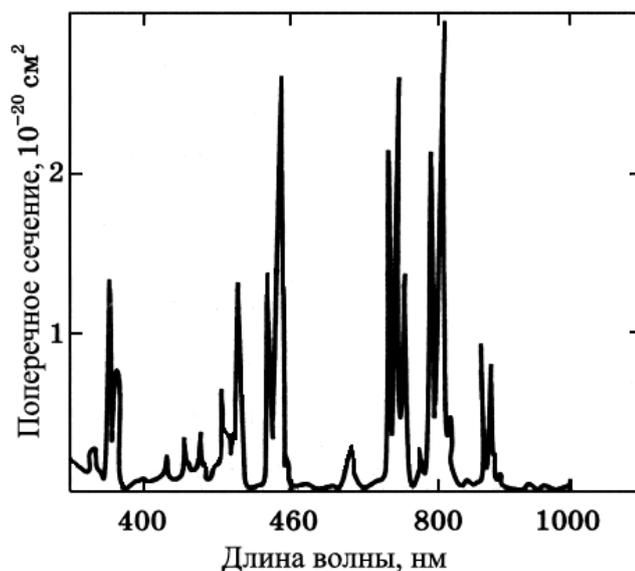


Рис. 2. Поперечное сечение поглощения ионов Nd^{3+} в кристалле YAG

Nd:YAG лазеры имеют достаточно узкую спектральную линию — $\Delta\nu = 4,2 \text{ см}^{-1} = 126$ ГГц при комнатной температуре. Чаще всего активная среды выполняется в форме стержня, диаметр которого обычно составляет от 3 до 6 мм и длина от 5 до 15 см. Они могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме, при этом накачка может осуществляться как лампой, так и полупроводниковым AlGaAs лазером. В качестве источника излучения при ламповой накачке используются ксеноновые лампы среднего давления при работе в импульсном режиме и криптоновые лампы высокого давления при непрерывной накачке. Как правило, используются линейные лампы с близким расположением лампы и кристалла. Как в импульсном, так и в непрерывном режиме дифференциальный КПД лазера (отношение энергии генерации лазера к поглощённой энергии накачки) при ламповой накачке составляет около 3%, средняя выходная мощность достигает нескольких киловатт.

При работе с лазерной диодной накачкой излучение заводится либо с торца кристалла по оси генерации лазера (продольная накачка, рис. 3а), либо вдоль боковой поверхности кристалла (поперечная накачка, рис. 3б). Для обеспечения высокой мощности накачки и удобства ввода излучения в кристалл часто используют сопряженные с оптоволоком диодные лазеры. Непрерывные Nd:YAG лазеры с продольной накачкой лазерными диодами обеспечивают выходную мощность до 15 Вт. В случае поперечной накачки выходная мощность таких лазеров на сегодняшний день достигает 100 Вт и выше. Дифференциальный КПД при использовании диодной накачки оказывается значительно выше по сравнению с ламповой и может превышать 10 %.

Nd:YAG лазеры находят широкое применение в различных областях науки и техники, в частности:

1. Обработка материалов (сверление, сварка и пр.).
2. Применение в лазерной дальнометрии для военных задач, особенно для лазерных видеоискателей и указателей цели.
3. В медицине применяется для коагуляции и для разреза тканей, для разрушения незаметных мембран патологических образований (например, вторичная катаракта), при лечении иридоэктомии и др.
4. Научные исследования.

5. Генерация второй гармоники в нелинейных кристаллах. Nd:YAG лазеры с диодной накачкой и встроенным внутрирезонаторным устройством для генерации второй гармоники позволяют в непрерывном режиме получать на выходе излучение с длиной волны $\lambda = 532$ нм и мощностью до ~ 10 Вт, и являются достойной альтернативой Аг лазеру во многих сферах применения.

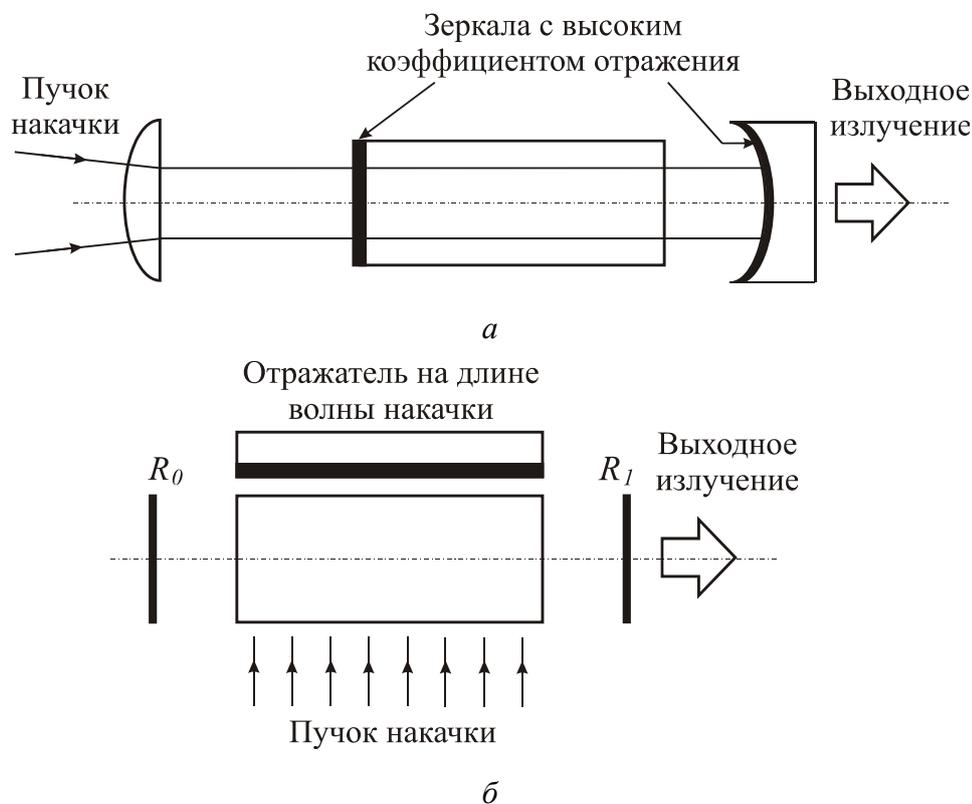


Рис. 3. Схемы продольной (а) и поперечной (б) накачки Nd:YAG лазера

Генерация второй гармоники

В классической линейной оптике предполагается, что индуцированная электрическая поляризация среды линейно зависит от приложенного электрического поля, т.е.

$$P = \epsilon_0 \chi E, \quad (1)$$

где χ – линейная диэлектрическая восприимчивость среды. При сильных электрических полях, характерных для лазерных пучков, соотношение (1) уже не является хорошим приближением и следует учитывать последующие члены разложения, в которых векторы P должны рассматриваться как функции более высоких степеней величины E , например:

$$P = \epsilon_0 \chi E (1 + \alpha_1 E), \quad (2)$$

где коэффициент α_1 описывает нелинейную зависимость поляризации P от E .

С нелинейным членом поляризации

$$P^{NL} = \epsilon_0 \chi \alpha_1 E^2 \quad (3)$$

связаны два основных эффекта:

1. Генерация второй гармоники (ГВГ), при которой лазерный пучок с частотой ω частично преобразуется нелинейной средой в когерентный пучок с частотой 2ω .

2. Оптическая параметрическая генерация (ОПГ), при которой лазерный пучок с частотой ω_3 вызывает в нелинейном материале одновременное излучение двух когерентных пучков с частотами ω_1 и ω_2 , причем $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$.

При сильных электрических полях, имеющих место в лазерных пучках, эффективность преобразования в обоих этих процессах может быть весьма высокой

(приближается к 100% в случае ГВГ). Поэтому в настоящее время эти методы используются для генерации новых когерентных волн с различными частотами, отличающимися от частоты падающей волны.

Для выполнения данной лабораторной работы используется Nd:YAG лазер с преобразованием частоты, которое основано на эффекте ГВГ. Поэтому остановимся более подробно на этом эффекте.

Рассмотрим монохроматическую плоскую волну с частотой ω , распространяющуюся в направлении z через нелинейный кристалл. При этом полагается, что начало оси z совпадает с входным торцом кристалла. Для электрического поля $E_\omega(z, t)$ плоской электромагнитной волны можно записать следующее выражение:

$$E_\omega(z, t) = E(z, \omega) \exp[i(\omega t - k_\omega z)], \quad (4)$$

где $k_\omega = 2\pi/\lambda = \omega/c_\omega = n_\omega\omega/c$ – волновое число на основной частоте, n_ω – показатель преломления на частоте ω , c – скорость света в вакууме.

В соответствии с (2.3) распространяющаяся в среде световая волна вызывает волну нелинейной поляризации кристалла

$$P_{2\omega}^{NL} = \epsilon_0 \chi \alpha_1 E^2(z, \omega) \exp[i(2\omega t - 2k_\omega z)]. \quad (5)$$

Это выражение описывает поляризацию, осциллирующую на частоте 2ω и распространяющуюся в пространстве в виде волны с волновым числом $2k_\omega$. Электрическое поле этой электромагнитной волны запишется в виде:

$$E_{2\omega}(z, t) = E(z, 2\omega) \exp[i(2\omega t - k_{2\omega} z)], \quad (6)$$

где $k_{2\omega} = 2n_{2\omega}\omega/c$ – волновое число на частоте второй гармоники, $n_{2\omega}$ – показатель преломления на частоте 2ω .

Физический смысл ГВГ можно понять как результат биений электромагнитной волны на основной частоте ω с самой собой, что приводит к поляризации, осциллирующей с частотой 2ω . Из выражений (5) и (6) можно получить условие, которое должно выполняться, чтобы процесс ГВГ протекал эффективно. А именно, фазовая скорость волны поляризации ($v_p = 2\omega/2k_\omega$) должна быть равна фазовой скорости генерируемой электромагнитной волны ($v_E = 2\omega/k_{2\omega}$). Это условие можно записать в виде:

$$k_{2\omega} = 2k_\omega. \quad (7)$$

Если это условие не удовлетворяется, то на некотором расстоянии l внутри кристалла фаза волны поляризации ($2k_\omega l$) будет отличаться от фазы ($k_{2\omega} l$) генерируемой волны, которая пришла от точки $z = 0$ в точку $z = l$. Эта увеличивающаяся с расстоянием l разность фаз $(2k_\omega - k_{2\omega})l$ означает, что генерируемая волна не будет кумулятивно расти с расстоянием l , поскольку она не поддерживается поляризацией с соответствующей фазой. Поэтому условие (2.7) называется *условием фазового синхронизма*. Его можно записать также через показатели преломления кристалла:

$$n_{2\omega} = 2n_\omega. \quad (8)$$

Рассмотрим далее особенности распространения волн в анизотропных кристаллах, которые используются для ГВГ. В таких кристаллах в заданном направлении могут распространяться две различные линейно-поляризованные плоские волны с разными фазовыми скоростями. Этим двум различным поляризациям соответствуют два различных показателя преломления. Такое различие в значениях показателей преломления называется *двулучепреломлением*. Для описания этого явления обычно используют так называемый эллипсоид показателей преломления, который в случае одноосного кристалла представляет собой эллипсоид вращения вокруг оптической оси (ось z на рис. 4а). Два разрешенных направления поляризации и соответствующие им показатели преломления

определяются следующим образом. Через центр эллипсоида проводится прямая в направлении распространения пучка (прямая OP на рис. 4а) и плоскость, перпендикулярная этой прямой. Пересечение этой плоскости с эллипсоидом образует эллипс. Две оси эллипса параллельны двум направлениям поляризации, а длина каждой из полуосей равна значению показателя преломления для данного направления поляризации. Одно из этих направлений обязательно перпендикулярно оптической оси, и волна, имеющая такое направление поляризации, называется *обыкновенной*. Из рисунка видно, что ее показатель преломления n_0 не зависит от направления распространения. Волна с другим направлением поляризации называется *необыкновенной волной*, и значение соответствующего показателя преломления $n_e(\theta)$ зависит от угла θ и изменяется от значения показателя преломления обыкновенной волны n_0 (когда OP параллельна оси z) до значения n_e , называемого показателем преломления необыкновенной волны (когда OP перпендикулярна оси z). Положительный одноосный кристалл соответствует случаю $n_e > n_0$ (рис. 4а), а отрицательный одноосный кристалл – $n_e < n_0$ (рис. 4б).

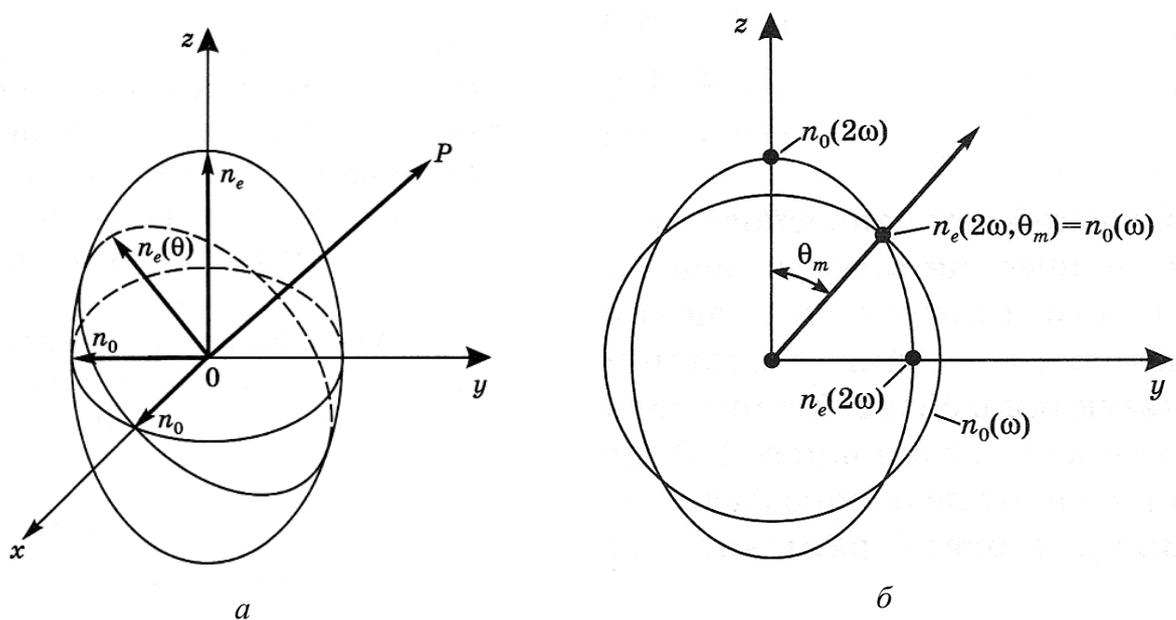


Рис. 4. Эллипсоид показателей преломления (а), угол фазового синхронизма θ_m в случае генерации второй гармоники (б)

Чтобы удовлетворить условию фазового синхронизма, основную волну можно пустить под углом θ_m к оптической оси так, чтобы

$$n_e(2\omega, \theta_m) = n_0(\omega). \quad (9)$$

На рис. 4б показаны пересечения поверхностей нормалей $n_0(\omega)$ и $n_e(2\omega, \theta)$ с плоскостью, содержащей ось z и направление распространения. Вследствие нормальной дисперсии кристалла имеет место неравенство $n_0(\omega) < n_0(2\omega)$, тогда как для отрицательного одноосного кристалла имеем $n_e(2\omega) < n_0(2\omega)$. Согласно рис. 4, можно записать $n_e(2\omega) = n_e(2\omega, 90^\circ)$ и $n_0(2\omega) = n_e(2\omega, 0)$. Отсюда следует, что «обыкновенная» окружность для частоты ω пересекает «необыкновенный» эллипс для частоты 2ω при некотором значении угла θ_m . Для всех лучей, лежащих на поверхности конуса вращения вокруг оси z с углом θ_m при вершине, условие (9) удовлетворяется и, следовательно, выполняется условие фазового синхронизма.

Если ввести декартовы координаты z и y для произвольной точки эллипса, описывающего показатель преломления $n_e(2\omega, \theta)$ необыкновенной волны, то можно записать:

$$\frac{z^2}{[n_o(2\omega)]^2} + \frac{y^2}{[n_e(2\omega)]^2} = 1. \quad (10)$$

Если координаты z и y выразить через величину $n_e(2\omega, \theta)$ и угол θ соответственно, то (10) примет вид:

$$\frac{[n_e(2\omega, \theta)]^2}{[n_o(2\omega)]^2} \cos^2 \theta + \frac{[n_e(2\omega, \theta)]^2}{[n_e(2\omega)]^2} \sin^2 \theta = 1. \quad (11)$$

При $\theta = \theta_m$ и подстановки выражения (9) в (11) получим следующее:

$$\left[\frac{n_o(\omega)}{n_o(2\omega)} \right]^2 (1 - \sin^2 \theta_m) + \left[\frac{n_o(\omega)}{n_e(2\omega)} \right]^2 \sin^2 \theta_m = 1. \quad (12)$$

Решая последнее уравнение, для переменной $\sin^2 \theta_m$ получаем выражение для угла фазового синхронизма:

$$\sin^2 \theta_m = \left(\left[\frac{n_o(2\omega)}{n_o(\omega)} \right]^2 - 1 \right) / \left(\left[\frac{n_o(2\omega)}{n_e(2\omega)} \right]^2 - 1 \right). \quad (13)$$

Отметим, что в некоторых условиях (например, при изменении температуры кристалла) сферическая поверхность показателя преломления для обыкновенной основной волны не пересекает эллипсоидальной поверхности второй гармоники необыкновенной волны, а лишь касается ее. Тогда угол θ_m составляет 90° и фазовый синхронизм становится значительно менее критичным (по углу). Такой тип фазового синхронизма называется девяностиградусным фазовым синхронизмом.

К нелинейным кристаллам, наиболее часто применяемым в качестве удвоителей частоты излучения Nd:YAG лазера, можно отнести кристаллы КТР (калий-титанилфосфат) и ВВО (бета-борат бария). Также применяются кристаллы KDP (дигидрофосфат калия), DKDP (дидейрофосфат калия), ADP (фосфат аммония) и др.

Функциональная схема Nd:YAG лазера с ГВГ

Функциональная схема Nd:YAG лазера, рассматриваемого в данной лабораторной работе представлена на рис. 5. В лазере происходит внутриврезонаторное преобразование во вторую гармонику излучения с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм. Излучение от массива лазерных диодов через согласующую оптику фокусируется на стержне Nd:YAG. В качестве преобразователя частоты используется нелинейный кристалл КТР (KTiOPO_4), не требующий термостатирования. Преобразователь частоты включает в себя специальное выходное зеркало («глухое» на основной длине волны $\lambda = 1,06$ мкм и пропускающее на длине волны гармоники $\lambda = 532$ нм), нелинейный кристалл и оптический фильтр. Оптический фильтр является третьим внутриврезонаторным зеркалом, предназначенным для однонаправленного вывода излучения второй гармоники. Излучатель и преобразователь выполнены в виде отдельных блоков и юстируются непосредственно в корпусе лазера. БП – импульсный блок питания для лазерных диодов.

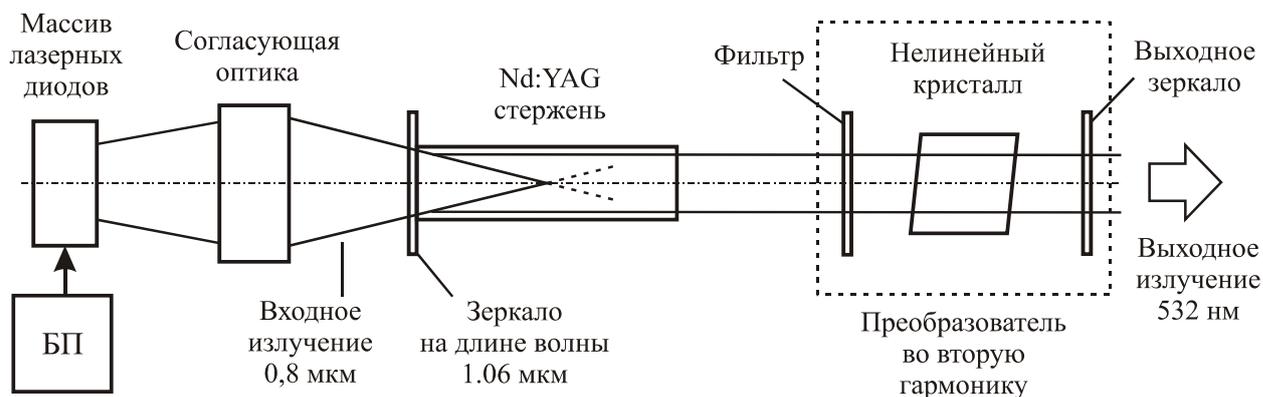


Рис. 5. Функциональная схема лабораторного Nd:YAG лазера

Программа работы

1. Изучить функциональную схему и принцип работы неодимового лазера.
2. Измерить выходную мощность излучения лазеров ЛТ-01 и LS-1-LN-532-200 (с использованием приемника Ophir PD-300).
3. Визуально определить длину волны излучения.
4. С помощью фотодиода DET10A и осциллографа измерить длительность импульса генерации и частоту следования импульсов излучения лазера ЛТ-01.
5. Рассчитать энергию в импульсе генерации.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип формирования инверсии в четырехуровневой схеме и ее отличие от трехуровневой схемы.
2. Каков квантовый КПД Nd:YAG лазера?
3. В каких режимах может работать Nd:YAG лазер?
4. Какие длины волн можно получить от Nd:YAG лазера?
5. Какой тип накачки применяется в Nd:YAG лазерах?
6. В каких областях спектра находятся основные полосы поглощения иона Nd^{3+} ?
7. Для чего применяется эффект генерации второй гармоники?
8. Почему должно выполняться условие фазового синхронизма?
9. Назовите основные типы нелинейных кристаллов, применяемых для ГВГ.
10. В чем заключается отличие положительного и отрицательного одноосного кристалла?
11. Поясните отличия эффектов ГВГ и ОПГ.