

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники

А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель

**ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ
В ТВЕРДОТЕЛЬНОМ YAG:Nd-ЛАЗЕРЕ**

Методические указания к лабораторной работе
для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2025

УДК 535:530.145
ББК 22.343
Б–39

Рецензент:

Хатьков Н.Д., доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
ТУСУР, канд. техн. наук

Авторы:

А. Д. Безпалый, А. Е. Мандель

Безпалый, Александр Дмитриевич

Б-39 Генерация второй гармоники излучения в твердотельном YAG:Nd-лазере: методические указания к лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки и специальностей / А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 15 с.

В методических указаниях изложено устройство твердотельного YAG:Nd-лазера с внутрирезонаторной генерацией второй гармоники излучения. Описана экспериментальная установка и методика проведения лабораторной работы. В ходе выполнения работы студенты закрепляют теоретические знания об устройстве твердотельных лазеров и методах управления параметрами излучения лазеров.

Методические указания предназначены для студентов технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено на заседании каф. СВЧиКР протокол № 6 от 14.02.2025 г.

УДК 535:530.145
ББК 22.343

© Безпалый А. Д., Мандель А. Е., 2025
© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	5
1.1 Устройство и принцип действия твердотельного лазера на YAG:Nd ³⁺	5
1.2 Генерация второй гармоники.....	6
1.2.1 Оптическая нелинейность среды.....	6
1.2.2 Генерация второй гармоники.....	7
1.2.3 Условия фазового синхронизма при генерации второй гармоники	8
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	10
3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	11
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	12
5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	13
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	14
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	15

Введение

Активная среда твердотельного лазера содержит активные ионы примеси в твердотельной матрице. Именно в ионах примесей и создается инверсная заселенность. В качестве примесных ионов обычно используют ионы переходных металлов (марганец (Mn), хром (Cr), никель (Ni) и кобальт (Co)) или редкоземельных элементов. В настоящее время инверсная заселенность получена на большом числе ионов (например, на Cr, Nd, Sm, Ni, Er и др.). В качестве матриц твердотельных активных сред используются такие кристаллические или аморфные диэлектрические материалы как корунд (Al_2O_3), иттрий-алюминиевый гранат ($Y_3Al_5O_{12}$), стекло. Концентрация примесных ионов в матрице, как правило, невелика и составляет доли процента. Рабочий активный элемент лазера должен удовлетворять большому числу требований. Он должен обеспечивать большой коэффициент усиления, быть оптически однородным, механически прочным; термостойким, технологичным, прозрачным для излучения накачки, а также допускать механическую и оптическую обработку, допускать изготовление образцов больших размеров и иметь высокую теплопроводность.

Основной способ создания инверсии населенностей в твердотельных лазерах – оптическая накачка. Для реализации оптической накачки необходимы мощные источники света, у которых основная доля энергии должна попадать в полосы поглощения активного вещества. Наиболее подходящими до недавнего времени являлись газоразрядные лампы (например, ксеноновые или криптоновые). Они обладают достаточно высоким КПД (до 50%). В последнее время для оптической накачки наряду с газоразрядными лампами все шире используются мощные светодиодные линейки или матрицы.

Одним из важных и наиболее интересных направлений использования лазеров является исследование зависимости характера оптических эффектов в различных средах от интенсивности света. Эти исследования привели к возникновению новой области физики – нелинейной оптики. Одним из важнейших процессов в нелинейной оптике является генерация высших гармоник светового излучения, в частности, второй гармоники (ГВГ).

Целью данной работы является ознакомление с конструкцией твердотельного лазера на кристалле $YAG:Nd^{3+}$ и исследование режима генерации второй гармоники излучения таким лазером.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Устройство и принцип действия твердотельного лазера на YAG:Nd³⁺

Неодимовые лазеры являются самыми популярными из твердотельных лазеров. В этих лазерах активной средой обычно является кристалл Y₃Al₅O₁₂ (иттрий-алюминиевый гранат), в котором часть ионов Y³⁺ замещена ионами Nd³⁺. Типичная атомарная концентрация неодима составляет 0,05-1,3 %.

Упрощенная схема энергетических уровней кристалла YAG:Nd³⁺ приведена на рисунке 1.1.

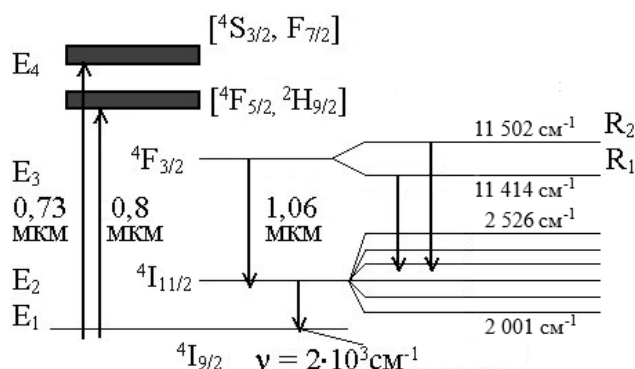


Рисунок 1.1 – Схема энергетических уровней кристалла YAG:Nd³⁺

Две основные полосы накачки расположены на длинах волн 0,73 и 0,8 мкм, соответственно. В кристалле YAG:Nd³⁺ переход $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ хорошо подходит для получения лазерной генерации в четырехуровневой схеме. Этот переход имеет длину волны $\lambda = 1,064$ мкм (ближний ИК диапазон).

YAG:Nd-лазеры могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Активные элементы выполняются в виде стержней диаметром до 0,5-1 см и длиной до 10 см. Они отличаются высоким оптическим качеством и хорошо поддаются полировке. Обычно лазеры на иттрий-алюминиевом гранате (ИАГ) используются в режиме импульсно-периодического или непрерывного возбуждения. При этом в режиме импульсно-периодического возбуждения создают достаточно длинные (0,5-10 мс) импульсы с частотой повторения до 100 Гц. Мощность непрерывной генерации современных лазеров на ИАГ достигает 400 Вт.

Оптическая накачка YAG:Nd-лазеров осуществляется либо с помощью излучения газоразрядных ламп, либо с помощью светодиодов или лазерных диодов.

YAG:Nd-лазеры могут работать в непрерывном и импульсном режиме. В первом случае используются криптоновые лампы накачки, во втором — ксеноновые. И основная проблема в обоих случаях – низкая эффективность поглощения излучения накачки. Это приводит к высокому энергопотреблению и большому тепловыделению. Поэтому для подобных систем требуется водяное охлаждение.

Вторым существенным недостатком твердотельных лазеров с ламповой накачкой является непродолжительный срок службы ламп – несколько сотен часов. А их регулярная замена ведет к существенному увеличению эксплуатационных расходов.

Тем не менее, твердотельные лазеры с ламповой накачкой имеют и ряд преимуществ: большая энергия импульса; высокое качество излучения; возможность получения пятна обработки меньшего размера; лучшее поглощение металлами; более простая эксплуатация; надежность.

Другой способ оптической накачки YAG:Nd-лазера – накачка лазерными диодами или линейками лазерных диодов с длиной волны излучения 808 нм, идеально

попадающей в полосу поглощения активной среды YAG:Nd-лазера. Схема YAG:Nd-лазера с диодной накачкой приведена на рисунке 1.2.

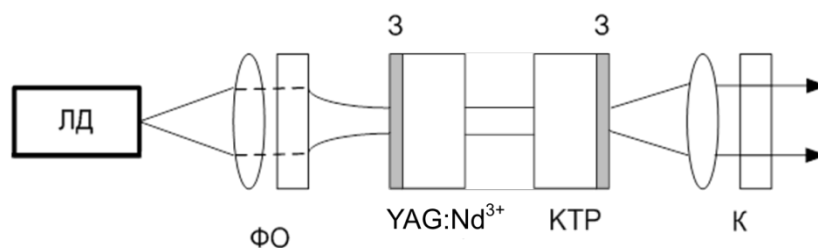


Рисунок 1.2 – Схема YAG:Nd³⁺-лазера с диодной накачкой: ЛД – лазерный диод; ФО – фокусирующая оптическая система; З – входное и выходное зеркала; YAG:Nd³⁺ – накачиваемый кристалл ИАГ; КТР – удвоитель частоты; К – коллиматор

В современных твердотельных лазерах в качестве активных сред применяются Nd:YAG (иттрий-алюминиевый гранат), Nd:YVO₄ (ванадат иттрия), Nd:LSB (скандоборат лантана). Представленная на рисунке 1.2 схема показывает типичную конструкцию лазера с диодной накачкой, генерирующего излучение с длиной волны 0,53 мкм. Излучение лазерного диода (ЛД) с длиной волны 0,81 мкм с помощью фокусирующей оптической системы (ФО) вводится через торец в активный кристалл (YVO₄). Зеркало (З) прозрачно для излучения накачки, но обладает высоким коэффициентом отражения для излучения с длиной волны 1,06 мкм. В оптический резонатор, образованный двумя зеркалами (З), помещен нелинейный кристалл КТР (титанил-фосфат калия), осуществляющий удвоение частоты. Эффект удвоения частоты или генерации второй гармоники рассматривается в [1] (Глава 8). Второе зеркало резонатора является прозрачным для излучения с $\lambda = 532$ нм и хорошо отражает на основной гармонике. Выведенное из резонатора излучение с удвоенной частотой коллимируется оптической системой (К).

Основными характеристиками YAG:Nd-лазера с диодной накачкой является высокий КПД и возможность генерации импульсов с периодичностью 0,1...100 кГц. Более эффективное поглощение излучения накачки позволяет существенно снизить энергопотребление лазера. Кроме того, меньше энергии уходит в тепловые потери, поэтому лазерам с диодной накачкой достаточно воздушного охлаждения. Это упрощает эксплуатацию и позволяет уменьшить габариты. Еще одним преимуществом таких лазеров является большой срок службы лазерных диодов. Он составляет более 10000 часов. К недостаткам лазеров с диодной накачкой можно отнести чувствительность к температуре окружающей среды в жаркое время.

1.2 Генерация второй гармоники

1.2.1 Оптическая нелинейность среды

Рассмотрим диэлектрическую восприимчивость среды χ . Из курса электродинамики известно, что она связывает величину поляризации среды, индуцированной полем электромагнитной волны, с величиной напряженности этого поля. В случае изотропного материала эта связь определяется соотношением:

$$\bar{P} = \chi \cdot \bar{E} , \quad (1.1)$$

где χ – постоянная скалярная величина.

В реальной среде увеличение напряженности светового поля приводит к нелинейной связи с наведенной им электрической поляризацией. Такая нелинейная связь во многих случаях может быть представлена в виде:

$$P_i = \varepsilon_0 (\chi_{ij} E_j + 2d_{ijk} E_j E_k + 4\chi_{ijkl} E_j E_k E_l + \dots) \quad (1.2)$$

где P_i – компонента мгновенной поляризации; E_j – компонента электрической напряженности мгновенного светового поля; χ_{ij} – линейная восприимчивость среды; d_{ijk} и χ_{ijkl} – нелинейные оптические восприимчивости второго и третьего порядков соответственно.

Нелинейный оптический отклик, характеризуемый параметрами d_{ijk} и χ_{ijkl} , приводит к многочисленным нелинейным явлениям. Нелинейность второго порядка $P_i = 2\varepsilon_0 d_{ijk} E_j E_k$ ответственна за генерацию второй гармоники, суммарных и разностных частот, член третьего порядка связан с описанием различных явлений, таких как генерация третьей гармоники, комбинационное рассеяние света.

Таким образом, при сильных световых полях отклик среды (величина P) на поле световой волны (E) оказывается нелинейным. Коэффициенты d_{ijk} и χ_{ijkl} называют квадратичной и кубической восприимчивостями, а среды, для которых соответствующие слагаемые в (1.2) доминируют, называют средами с квадратичной или кубической оптической нелинейностью.

1.2.2 Генерация второй гармоники

Пусть в кристалле вдоль некоторого направления Z , перпендикулярно его входной грани, распространяется волна накачки:

$$\vec{E}^\omega(z, t) = \frac{1}{2} \vec{e}^\omega \dot{E}^\omega \cdot \exp[i(\omega t - k_\omega z)] + \text{к.с.}, \quad (1.3)$$

с комплексной амплитудой $\dot{E}^\omega$, единичным вектором поляризации $\vec{e}^\omega$ и волновым числом k^ω и коллинеарной с ней волны на удвоенной частоте 2ω :

$$\vec{E}^{2\omega}(z, t) = \frac{1}{2} \vec{e}^{2\omega} \dot{E}^{2\omega} \cdot \exp[i(2\omega t - k_{2\omega} z)] + \text{к.с.}, \quad (1.4)$$

с параметрами $\dot{E}^{2\omega}$, $\vec{e}^{2\omega}$, $k_{2\omega}$.

Найдем далее нелинейную поляризацию среды P_{nl} на частотах 2ω и ω , используя соотношение (2.2), в которое необходимо подставить суперпозицию полей $\vec{E}^\omega(z, t)$ и $\vec{E}^{2\omega}(z, t)$. Подставляя P_{nl} , как и суперпозицию полей в волновое уравнение

$$\text{rot rot } E + \mu_0 \frac{\partial^2 (\varepsilon E)}{dt^2} = -\mu_0 \frac{\partial^2 P_{nl}}{dt^2}. \quad (1.5)$$

После использования стандартной процедуры метода медленно меняющихся амплитуд и в приближении неистоимой накачки получим выражение для амплитуды поля второй гармоники $\vec{E}^{2\omega}(z, t)$:

$$\vec{E}_m^{2\omega}(z, t) = -i \frac{\omega}{cn^{2\omega}} d_{eff} (\dot{E}_m^{2\omega})^2 \frac{\exp(i\Delta kz - 1)}{i\Delta k}. \quad (1.6)$$

Интенсивность второй гармоники и интенсивность волны накачки можно получить, используя соотношения:

$$I^{2\omega} = \frac{1}{2} n^{2\omega} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} |\dot{E}_m^{2\omega}|^2, \quad I^\omega = \frac{1}{2} n^\omega \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} |\dot{E}_m^\omega|^2. \quad (1.7)$$

В результате получаем следующее выражение для интенсивности второй гармоники на выходной грани кристалла $z = L$

$$I^{2\omega}(L) = 2 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{\omega d_{\text{eff}} L^2}{c^2 (n^\omega)^2 n^{2\omega}} (I^\omega) \frac{\sin^2(\Delta k L / 2)}{(\Delta k L / 2)^2} \quad (1.8)$$

Таким образом, интенсивность второй гармоники пропорциональна квадрату интенсивности основного излучения.

1.2.3 Условия фазового синхронизма при генерации второй гармоники

Из (1.8) вытекает, что эффективная генерация второй гармоники требует выполнения условия фазового синхронизма $\Delta k = 0$. Требование $\Delta k = 0$ эквивалентно условию $k^{(2\omega)} = 2k^{(\omega)}$. Действительно, причиной возникновения излучения с удвоенной частотой является нелинейная поляризация, наводимая в среде световой волной с частотой ω . Волна наведенной поляризации распространяется в среде со скоростью распространения индуцирующего излучения. Если $k^{(2\omega)} \neq 2k^{(\omega)}$, то между излучением с удвоенной частотой и наводимой поляризацией возникает фазовый сдвиг, нарастающий с расстоянием, так что в некоторой точке он может достигать величины π . Расстояние, на котором фазовый сдвиг изменяется от нуля до π , называется "когерентной длиной":

$$l_c = \frac{2\pi}{\Delta k} = \frac{2\pi}{k^{(2\omega)} - 2k^{(\omega)}}. \quad (1.9)$$

Ее величина служит оценкой максимальной длины кристалла, которую можно эффективно использовать для генерации второй гармоники. В области нормальной дисперсии показатель преломления растет с увеличением частоты, поэтому:

$$\Delta k = k^{(2\omega)} - 2k^{(\omega)} = \frac{2\omega}{c} (n^{(2\omega)} - n^{(\omega)}). \quad (1.10)$$

Здесь использовано соотношение $k = \omega n / c$. Тогда когерентная длина может быть выражена в форме:

$$l_c = \frac{\pi c}{\omega \cdot (n^{(2\omega)} - n^{(\omega)})} = \frac{\lambda}{2(n^{(2\omega)} - n^{(\omega)})}. \quad (1.11)$$

где λ – длина волны падающего света.

Для обеспечения условий фазового синхронизма используется оптическая анизотропия кристаллов. Для этого необходимо выполнить условие $n^{(2\omega)} = n^{(\omega)}$, т.е. условие равенства показателей преломления среды на основной частоте и на частоте второй гармоники. В области нормальной дисперсии показатели преломления как обыкновенной, так и необыкновенной волн, распространяющихся в заданном направлении, увеличиваются с ростом частоты. Таким образом, выполнить условие равенства показателей преломления невозможно, если волны с частотами ω и 2ω относятся к одному типу (обыкновенные или необыкновенные). Однако условие фазового синхронизма может быть выполнено при использовании волн разных типов.

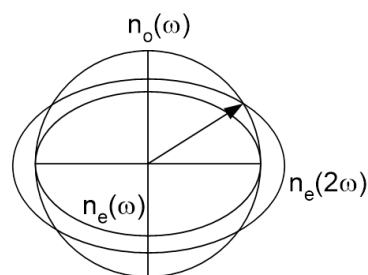


Рисунок 1.3 – К определению условия фазового синхронизма

В качестве примера рассмотрим зависимости величин показателей преломления необыкновенной и обыкновенной волн в одноосном, отрицательном кристалле (пример такого кристалла – кристалл ниобата лития), от угла между направлением распространения и оптической осью (осью Z). Эти зависимости схематично изображены на рисунке 1.3. Очевидно, что для обыкновенной волны основной частоты и необыкновенной волны с удвоенной частотой имеются направления распространения света, удовлетворяющие условию фазового синхронизма (одно из них отмечено стрелкой).

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка для генерации второй гармоники излучения твердотельного лазера на YAG:Nd приведена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Лабораторный стенд для исследования генерации второй гармоники

В состав установки входят следующие элементы: 1 – лазерный диод ($P \approx 1$ Вт, $\lambda = 808$ нм); 2 – терминал управления диодным лазером; 3 – коллимирующая линза; 4 – фокусирующая линза; 5 – входное плоское зеркало; 6 – активный элемент из кристалла $Y_3Al_5O_{12}:Nd$; 7 – нелинейный элемент из кристалла КТР; 8 – выходное сферическое зеркало; 9 – светофильтр; 10 – диафрагма для настройки лазера; 11 – юстировочный лазер; 12 – цифровой мультиметр; 13 – цифровой осциллограф.

Лазерный диод 1 используется для оптической накачки активного элемента 4 из кристалла $Y_3Al_5O_{12}:Nd$. Линзы 3 и 4 необходимы для расширения и фокусировки излучения на активный элемент 4. Зеркала 5 и 8 образуют резонатор лазера. Нелинейный элемент 7 реализует генерацию второй гармоники ($\lambda = 532$ нм). Лазер на активном элементе 6 $Y_3Al_5O_{12}:Nd$ генерирует излучение с длиной волны 1,064 мкм. Поэтому для настройки всех элементов установки используется юстировочный диодный лазер 11 с излучением из красной области спектра. Светофильтр 9 необходим для фильтрации излучения, вышедшего из резонатора. Мощность оптического излучения регистрируется фотодетектором, затем измеряется с помощью цифрового мультиметра 13.

3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

3.1 Настройка твердотельного YAG:Nd-лазера с нелинейно-оптическим внутрирезонаторным элементом.

3.2 Получение генерации второй гармоники излучения YAG:Nd-лазера.

3.3 Исследование зависимости тока фотодиода $I_{\text{ф}}$ от тока накачки $I_{\text{н}}$ при генерации лазерного излучения на основной гармонике.

3.4 Исследование зависимости тока фотодиода $I_{\text{ф}}$ от тока накачки $I_{\text{н}}$ при генерации лазерного излучения на второй гармонике.

3.5 Исследование эффективности преобразования η лазерного излучения во вторую гармонику.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с целью работы, теоретическим материалом, описанием экспериментальной установки и пройти инструктаж по технике безопасности.

Лабораторную работу необходимо выполнять в защитных очках!

1. Включить юстировочный диодный лазер.
2. Убедиться в наличии генерации. В случае неисправной работы устройства сообщить преподавателю!
3. Используя юстировочный диодный лазер настроить положение лазерного диода, входного и выходного зеркал, активного элемента, нелинейного элемента и фотодетектора.
4. Снять с рельса юстировочный диодный лазер.
5. Подключить лазерный диод, используемый для оптической накачки активного элемента к терминалу управления.
6. Установить минимальную мощность генерации лазера YAG:Nd, изменяя ток диода накачки.
7. Подключить фотодетектор к мультиметру.
8. Изменяя ток лазерного диода измерить ток фотодиода при генерации лазерного излучения на второй гармонике.
9. Изменяя ток лазерного диода измерить ток фотодиода при генерации лазерного излучения на основной гармонике. Результаты занести в таблицу 4.1.
10. Рассчитать эффективность преобразования излучения во вторую гармонику. Результаты занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений

Ток накачки I_n , мА	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Ток фотодиода при генерации второй гармоники I_{ϕ} , мА						
Ток фотодиода при генерации основной гармоники I_{ϕ} , мА						
Эффективность преобразования излучения во вторую гармонику η , %						

11. Используя полученные данные, построить зависимости I_{ϕ} от тока накачки I_n при генерации лазерного излучения на основной и второй гармониках.
12. Рассчитать эффективность преобразования η излучения во вторую гармонику.

5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать следующие пункты:

- Цель работы.
- Теоретические сведения.
- Описание установки.
- Ход работы.
- Результаты проделанной работы и выводы.

Требования к оформлению отчета приведены в образовательном стандарте вуза ОС ТУСУР 01-2021 [4].

После оформления отчет сдать на проверку преподавателю и приступить к защите работы. Перед защитой необходимо повторно изучить рекомендуемую литературу.

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что означает инверсия населенностей?
2. Опишите схему энергетических уровней кристалла $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$.
3. Опишите работу неодимового лазера.
4. Опишите методы создания инверсии населенностей в твердотельных лазерах.
5. Какой из членов поляризации среды отвечает за процесс генерации второй гармоники?
6. В чем заключается условие фазового синхронизма? Что такое отрицательный одноосный кристалл?
7. Какие параметры имеет угловая ширина направления фазового синхронизма?
8. Как меняется интенсивность второй гармоники в случае фазового синхронизма с увеличением длины кристалла?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шандаров, С. М. Введение в нелинейную оптику: Учебное пособие [Электронный ресурс] / С. М. Шандаров. — Томск: ТУСУР, 2012. — 41 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/2059> (дата обращения: 10.02.2025)
2. Шандаров, В. М. Основы физической и квантовой оптики: Учебное пособие [Электронный ресурс] / В. М. Шандаров. — Томск: ТУСУР, 2012. — 197 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/750> (дата обращения: 10.02.2025)
3. Пихтин А. Н. Квантовая и оптическая электроника: учеб. для вузов / А. Н. Пихтин. — М.: Абрис, 2012. — 656 с.
4. Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2021. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления от 25.11.2021 [Электронный ресурс]. — Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021. — 52 с. — Режим доступа: <https://regulations.tusur.ru/#/documents/87> (дата обращения: 10.02.2025)