

УДК 53.05

Исследование люминесценции кристалла рубина при возбуждении зелёной и красной линиями спектров излучения

Хусаинов Н.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства»*

Борде А.С., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства»*

Хаппи Д., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства»*

Научные руководители: Горелик В. С., д.ф.м.н.

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,

Скуйбин Б. Г., к.ф.м.н., доцент

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

bauman@bmstu.ru

Обзор

Люминесцентные свойства многих веществ, в особенности минералов, рассматриваются как источники обещающих применений[1-3]. В данной работе исследуются люминесцентные свойства кристалла рубина. На его основе в 1961 году Т. Мейманом был создан первый квантовый генератор света[1]. С этого момента рубин используется в качестве активного элемента квантовых генераторов и усилителей оптического диапазона. В 2006 году группой исследователей было предложено использовать его люминесцентные свойства в качестве экспресс метода определения собственных и примесных точечных дефектов в кристаллах рубина и сапфировых подложках[4].

Люминесценция кристалла рубина подробно исследовалась при возбуждении синим - зеленым излучением. В связи с отсутствием детальных работ по изучению люминесценции в красной области спектра возбуждения, было решено провести дополнительное исследование на данную тему.

Рубин особенно интересен в связи с тем, что в последние годы он стал объектом проведения ряда экспериментов, в которых сообщалось о наблюдении в нём эффекта задержки светового импульса. Авторы данных работ связывают полученный результат с «замедлением» скорости света[5].

Постановка задачи

Исследования, проделанные на данную тему, говорят о том, что спектральный коэффициент поглощения рубина в красной области существенно уменьшается[1]. (Спектр поглощения рубина представлен на рис.1). В связи с этим перед нами была поставлена задача: получить люминесценцию рубина при накачке длиной волны 633 нм и сравнить её с люминесценцией от длины волны 532 нм.

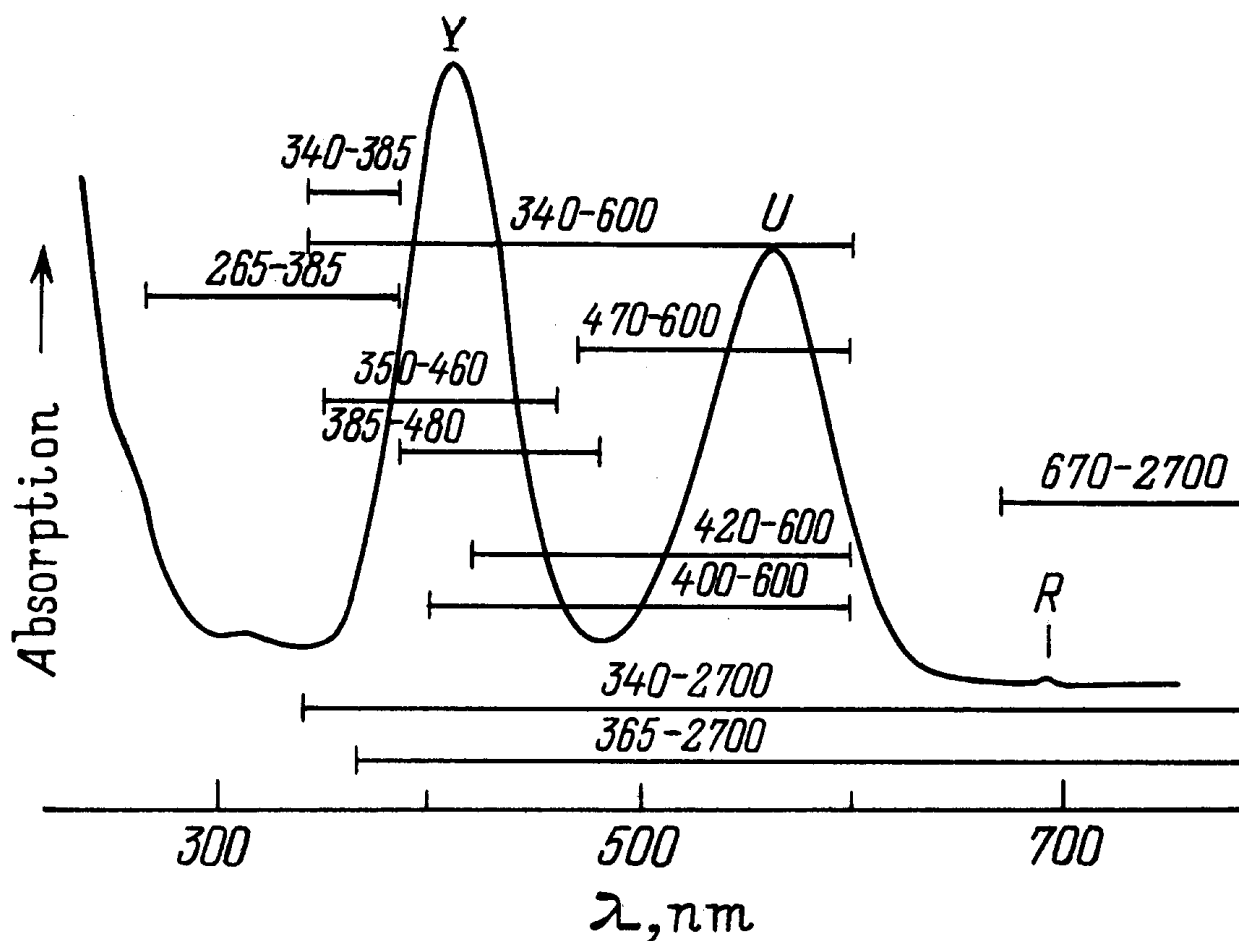


Рис. 1. Спектр поглощения рубина. Источник: Laser Systems, Part 2, Landolt-Börnstein - Group VIII Advanced Materials and Technologies Volume 12, 2008, pp 3-96

Введение

Люминесценция. Фотолюминесценция

Люминесценцией, по определению Вавилова, называют свечение, избыточное над тепловым излучением тела и продолжающееся в течение времени, значительно превышающего период световых колебаний. Она может наблюдаться при любой температуре тела, поэтому люминесценцию иногда называют холодным свечением. Люминесценция соответствует спонтанным оптическим переходам, в то время как генерация и усиление света – вынужденным. Таким образом, при переходе вещества в возбуждённое состояние, например, при накачке его светом видимого диапазона, возникает оптическое излучение возбуждаемого вещества – люминесценция[2].

Процесс люминесценции в кристалле рубина схематически изображён на рис.2. Поглощая фотон, электрон с основного уровня 1 переходит в возбужденное состояние (уровень 3), после чего релаксирует на уровень 2 без излучения, с которого переходит в основное состояние 1 излучением фотона с энергией $E=h\nu_{21}$.

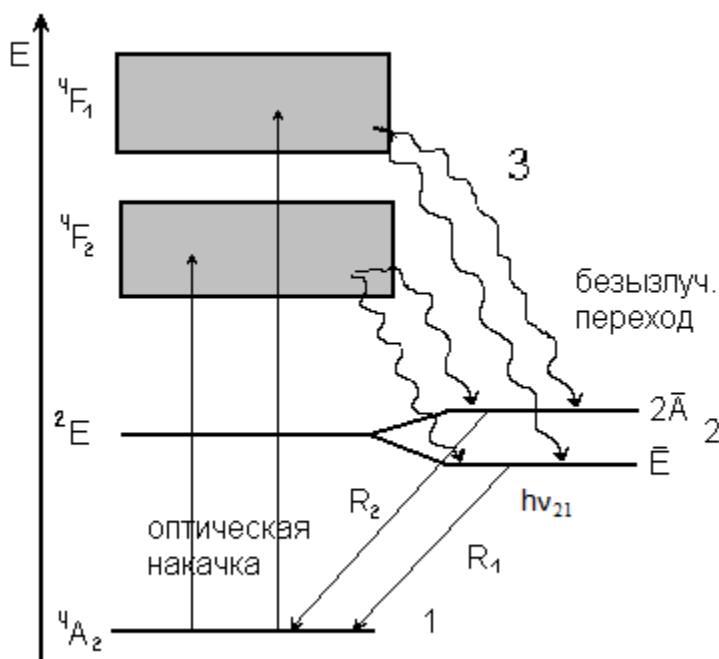


Рис. 2. Схема люминесценции в кристалле рубина

В кристаллических структурах с примесями между энергетическими зонами: валентной и проводимости расположены локальные уровни энергии, связанные с атомами примесей. Если переходы между уровнями локального центра сопровождаются

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/618695.html>

излучением, то такие центры называются центрами свечения или центрами люминесценции. При возбуждении люминесценции электрон поглощает энергию и переходит при этом на более высокий энергетический уровень. Если испускание фотона происходит непосредственно тем же электроном, который поглотил энергию возбуждения, то происходит внутрицентровая люминесценция. В этом случае возбуждение люминофора не сопровождается ионизацией центра свечения, поскольку и основному и возбужденному состоянию электрона соответствуют локальные уровни, лежащие внутри запрещенной зоны. Такой механизм люминесценции характерен для материалов с большой шириной запрещенной зоны, а именно для Al_2O_3 , легированным Cr^{3+} [2].

Известно, что уровни энергии электронов в рубине располагаются таким образом, как схематично показано на рис. 2. Поглощение света, соответствующего синие-зелёной области спектра, переводит электроны с основного уровня ${}^4\text{A}_2$ на возбуждённые уровни ${}^4\text{F}_1$ и ${}^4\text{F}_2$, образующие две широкие полосы. Затем, за сравнительно малое время ($\sim 10^{-8}$ сек) осуществляется переход этих электронов на уровни $\bar{\text{E}}$ и $2\bar{\text{A}}$. Избыток энергии при этом передаётся колебаниям кристаллической решётки. Время жизни электронов на уровнях $\bar{\text{E}}$ и $2\bar{\text{A}}$ составляет 10-3 сек. По истечении этого времени электроны снова возвращаются на основной уровень ${}^4\text{A}_2$. Переходам $\bar{\text{E}} \rightarrow {}^4\text{A}_2$ и $2\bar{\text{A}} \rightarrow {}^4\text{A}_2$ соответствует люминесценция в R_1 и R_2 линиях. Если освещать кристалл рубина светом источника, обладающего достаточно большой интенсивностью в области поглощения рубина, то происходит накопление электронов на уровнях $\bar{\text{E}}$ и $2\bar{\text{A}}$, и может возникнуть инверсия населённостей этих уровней по отношению к основному уровню ${}^4\text{A}_2$. [7].

Методика эксперимента

В качестве люминесцирующего вещества использовался рубин, который представляет собой кристалл окиси алюминия Al_2O_3 с примесью ($\sim 0,05\%$) ионов Cr^{3+} (диаметр 14 мм, толщина 1,5 мм). Для оптического возбуждения использовались He-Ne-лазер (длина волны 632.8 нм) и 2^{ая} гармоника лазера на YAG: Nd^{3+} (длина волны 532 нм). Для регистрации спектров люминесценции был использован цифровой спектрофотометр U21830 с оптической схемой Черни-Тернера (Рис. 3).

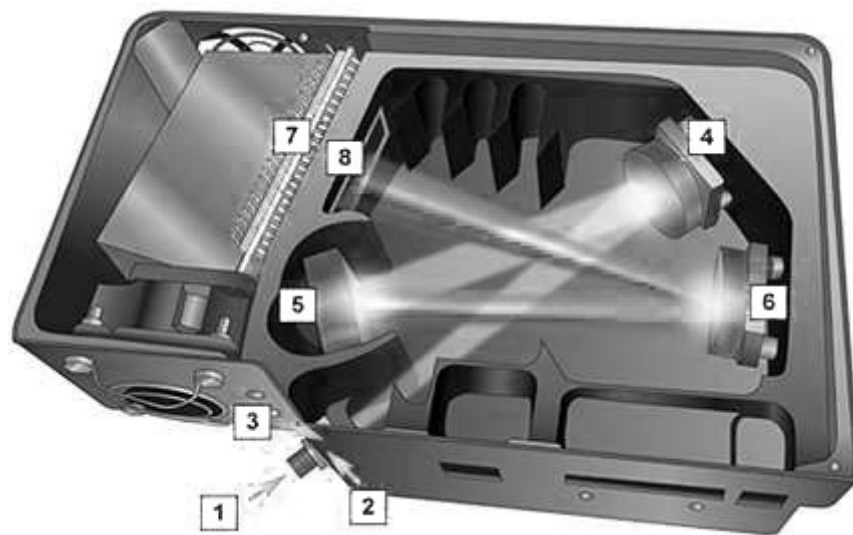


Рис. 3. Схема устройства спектрофотометра. Источник: www.oemoptic.ru

Свет из волоконно-оптического кабеля попадает в спектрофотометр через разъем 1, проходит через щель 2 и длинноволновый поглощающий фильтр 3, затем попадает на коллимирующее зеркало 4. Свет, отраженный от этого зеркала, попадает в виде параллельного пучка на отражательную дифракционную решётку 5. Далее на зеркало 6. Это зеркало фокусирует спектры первого порядка в плоскости ПЗС4-детектора 7. Электроника передает полученный спектр в программу обработки.

Экспериментальная установка схематически изображена на рис.4. Излучение от лазерного источника (1) проходит через рубиновую пластинку (2), после чего вторичное излучение (люминесценция) проходит через светофильтр КС-17 (3), спектральная характеристика которого представлена на рис. 5. Светофильтр выделяет интересующую нас область излучения, которая затем собирается линзой (4). Сфокусированный луч направляется в цифровой спектрофотометр (6) посредством оптоволоконного световода (5). Данные, полученные спектрофотометром, обрабатываются системой сбора данных РХИ(7).

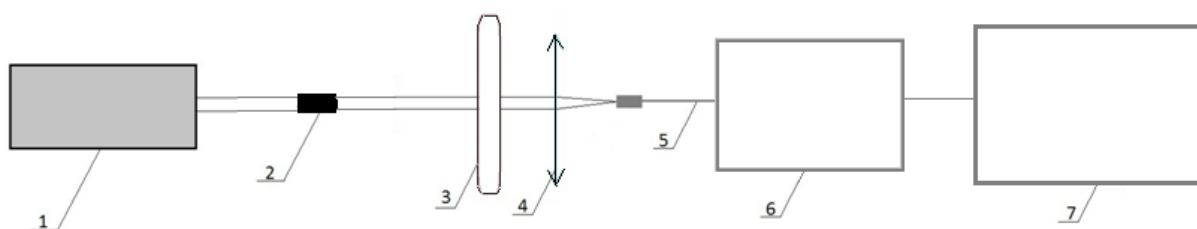


Рис. 4. Схема экспериментальной установки по изучению люминесценции на кристалле рубина

1 – Лазер; 2 – кристалл рубина; 3 – светофильтр КС-17; 4 – линза; 5 – оптоволоконный световод; 6 – цифровой спектрофотометр; 7 – система сбора данных РХИ.



Рис. 5. Характеристики светофильтра КС-17. Источник: ГОСТ 9411-91

Результаты и их обсуждение

Люминесценция кристалла рубина в красной области спектра эффективно возбуждалась обоими видами излучения – как He-Ne-лазером, так и 2^{ой} гармоникой лазера на YAG: Nd³⁺. На рисунках ба., бб. и бв видно, что независимо от вида излучения в зонах 692.9 нм и 694.2 нм наблюдаются R-линии, характерные для ионов Cr³⁺. Люминесценция рубинов с малой концентрацией ионов Cr³⁺ обусловлена переходами с верхних уровней $\bar{E}$ и $2\bar{A}$ на нижний уровень 4A_2 , соответствующие R₁- и R₂-линиям, а также переходами из состояний 4F_1 и 4F_2 в основное состояние 4A_2 [4].

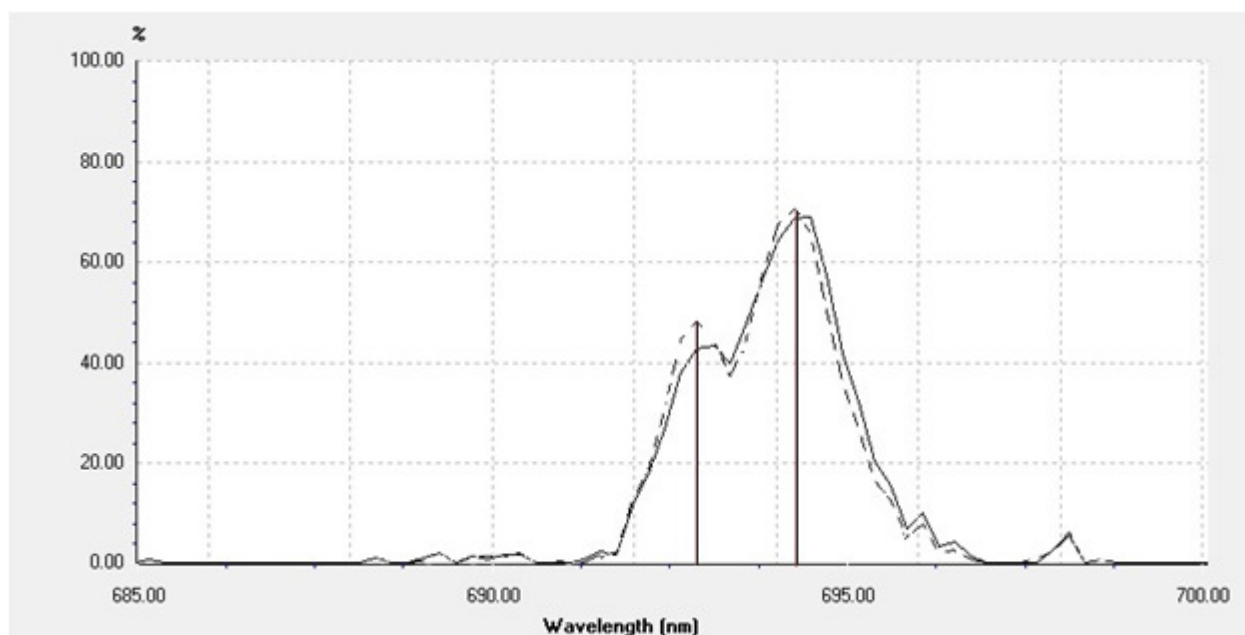


Рис. 6а. Спектры люминесценции. Прерывистой линией представлен спектр возбуждаемый He-Ne-лазером, сплошной – 2^{ой} гармоникой лазера на YAG: Nd³⁺, вертикальные линии соответствуют R-линиям

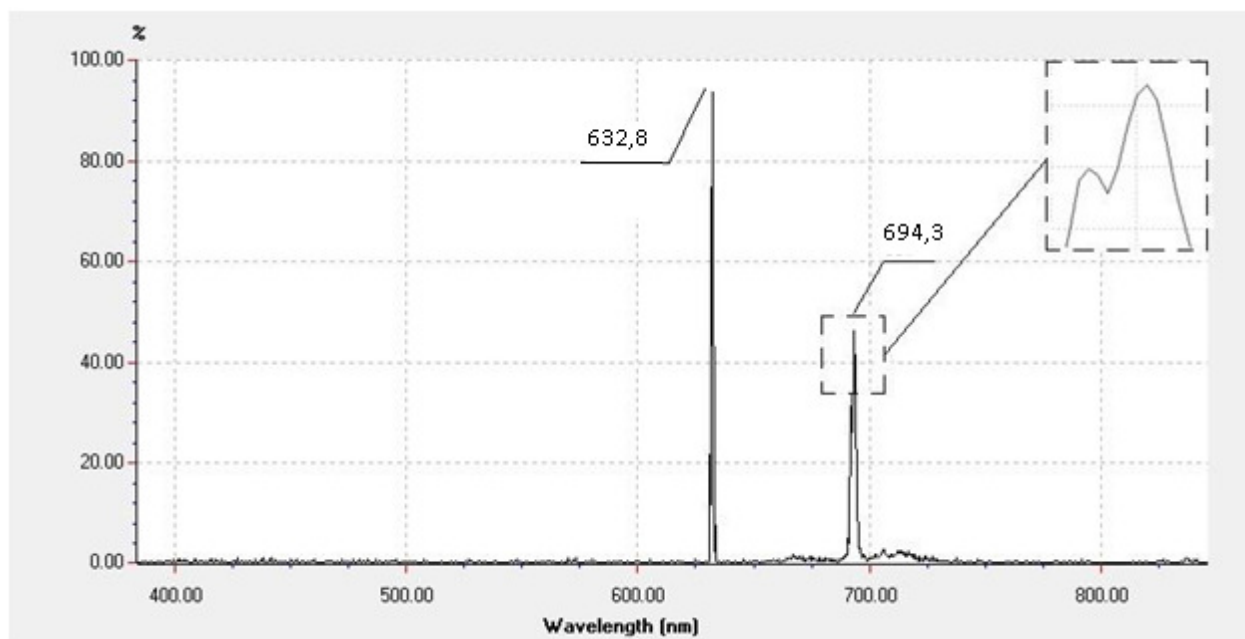


Рис. 6б. Спектр люминесценции, возбуждаемый He-Ne-лазером

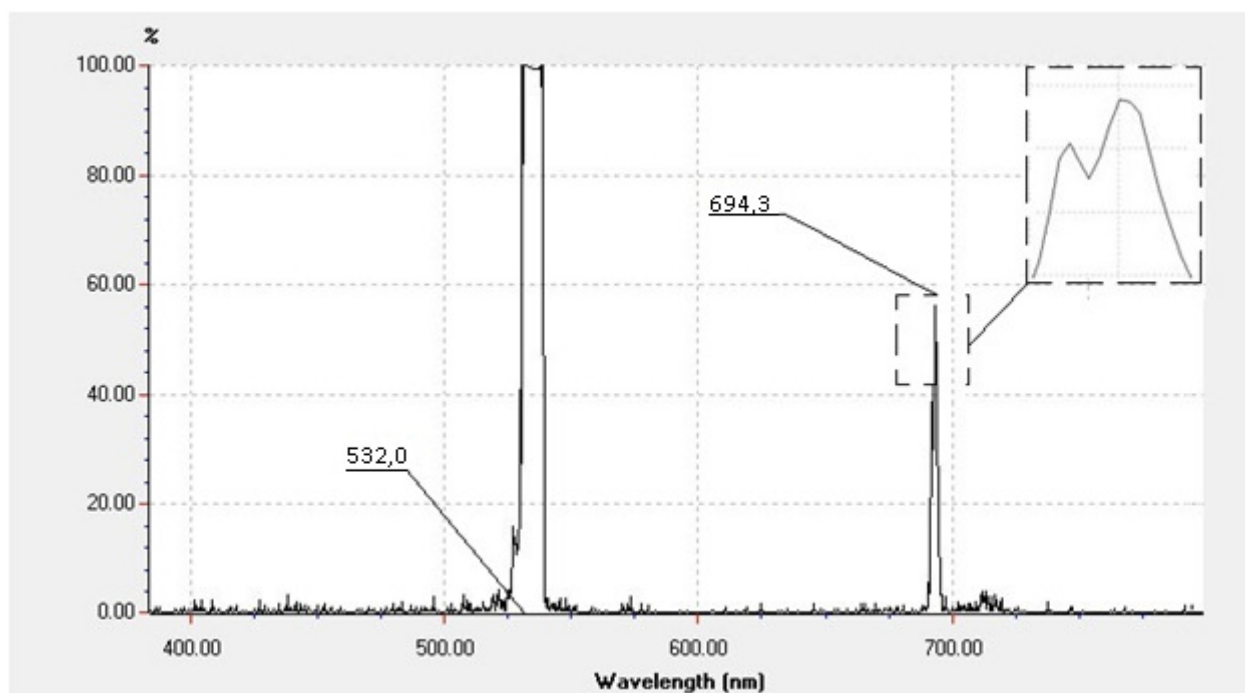


Рис. 6в. Спектр люминесценции, возбуждаемый 2^{ой} гармоникой лазера на YAG: Nd³⁺

При сопоставлении спектров люминесценции видно, что люминесценция в R-линиях вызывается эффективнее излучением He-Ne-лазера, нежели 2^{ой} гармоникой лазера на YAG: Nd³⁺.

Сравнение эффективности возбуждения люминесценции проводилось при одинаковой мощности излучения. В результате выяснилось, что в условиях нашего эксперимента He-Ne лазер возбуждает люминесценцию эффективнее в 4,3 раза (рис.7).

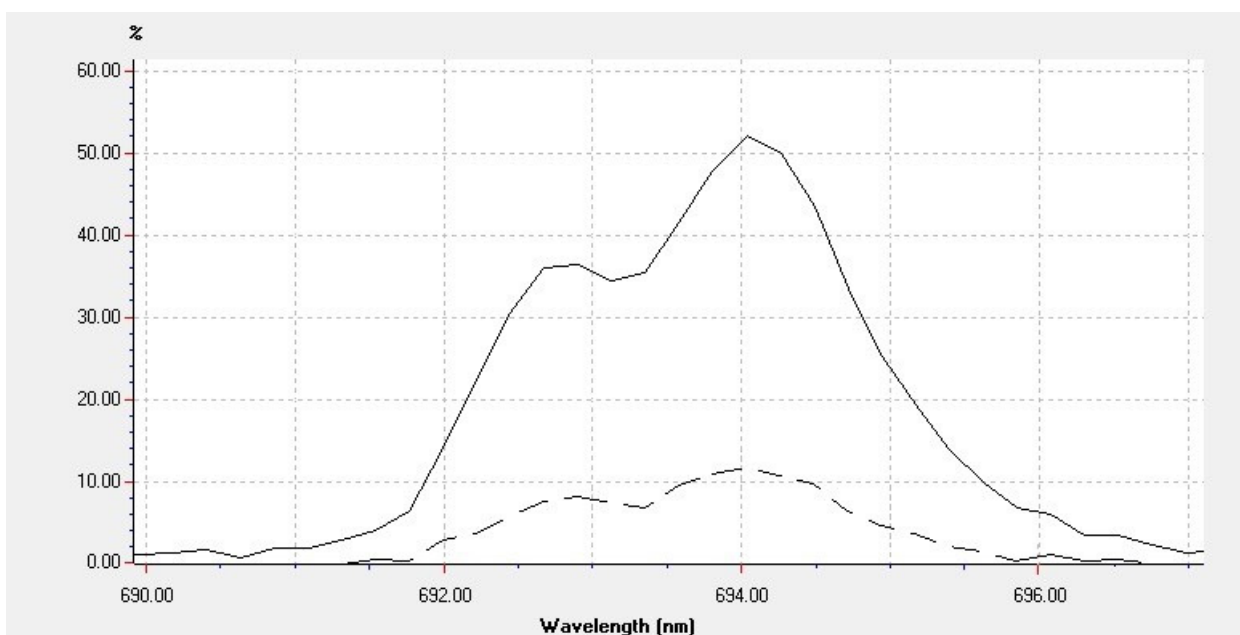


Рис. 7. Сопоставление спектров люминесценции, возбуждаемой He-Ne-лазером (сплошная линия) и 2^{ой} гармоникой лазера на YAG: Nd³⁺ (прерывистая линия) при одинаковой мощности излучения

Полученные спектры, при пропускании излучения лазеров через светофильтр К-17 без люминесцирующего вещества, рис. 8-9, показали, что уровень вносимого фона незначителен и составляет как для He-Ne-лазера, так и для 2^{ой} гармоникой лазера на YAG: Nd³⁺ менее 6%.

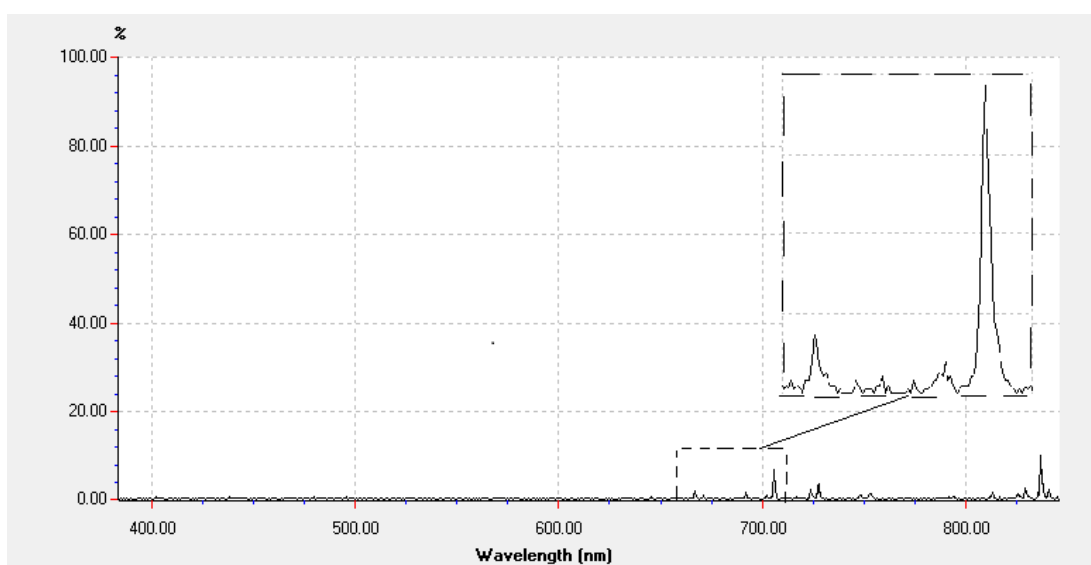


Рис. 8. Люминесценция светофильтра, возбуждаемая He-Ne-лазером

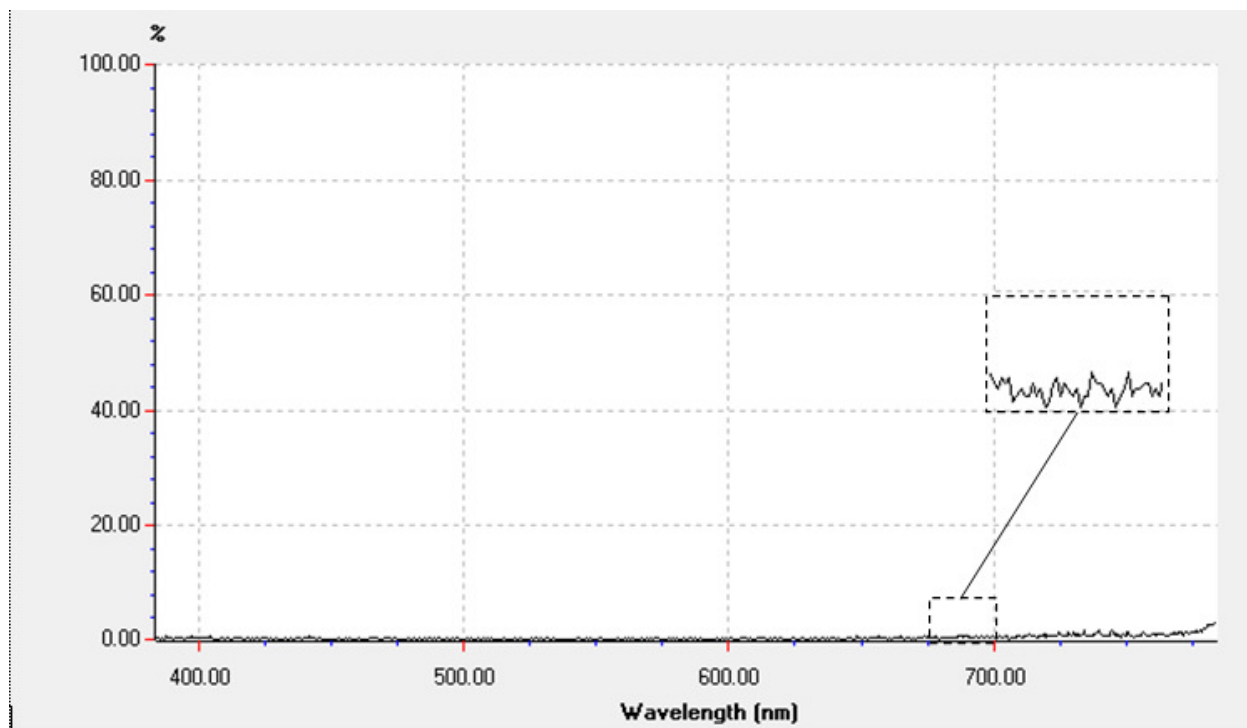


Рис. 9. Люминесценция светофильтра, возбуждаемая 2^{ой} гармоникой лазера на YAG: Nd³⁺

Мы исследовали также зависимость интенсивности люминесценции рубина от расположения оптической оси пластинки кристалла относительно распространения лазерного излучения. Положение оптической оси пластинки рубина показано на рис. 10.

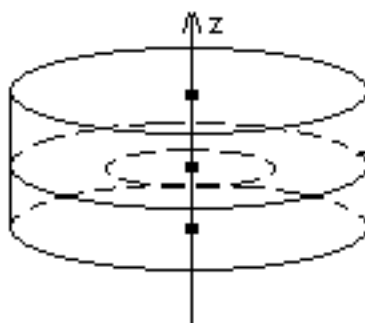


Рис. 10. Вид пластинки рубина с указанием положения оптической оси

Наименьшая интенсивность (рис. 11а) наблюдается при расположении оптической оси рубина параллельно направлению распространения лазерного излучения, что соответствует кратчайшему пути прохождения света. Значительное увеличение результата достигается при повороте оптической оси на 90° (рис.11б). Максимальный результат наблюдается при расположении оптической оси под некоторым углом отличным от 90°

(около 60°) (рис. 11в). В последнем случае излучение в кристалле проходит наибольший путь за счёт эффекта полного внутреннего отражения (рис. 12).

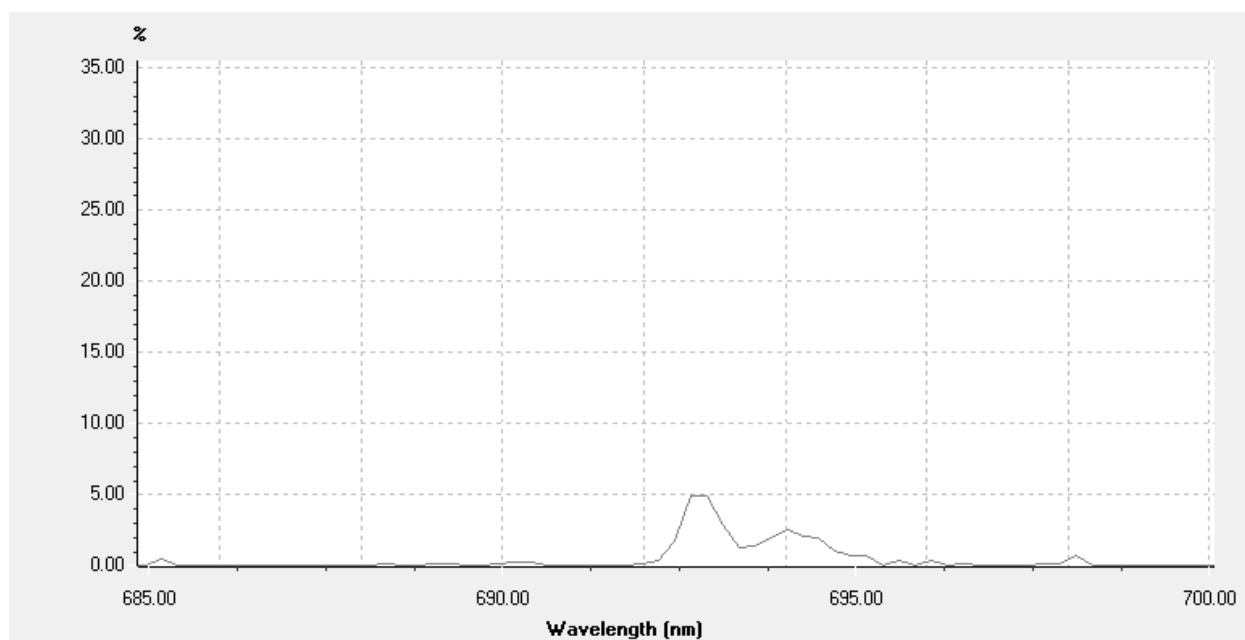


Рис. 11а. Спектр люминесценции, возбуждаемый He-Ne-лазером в рубине при направлении его оптической оси параллельно распространению лазерного излучения

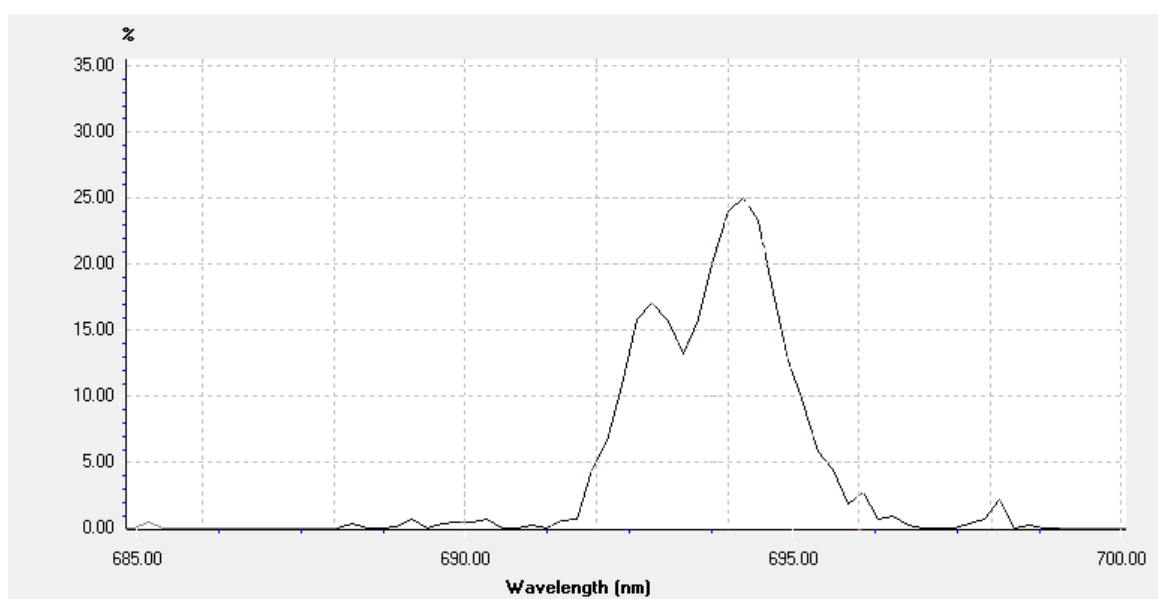


Рис. 11б. Спектр люминесценции, возбуждаемый He-Ne-лазером в рубине при направлении его оптической оси перпендикулярно распространению лазерного излучения

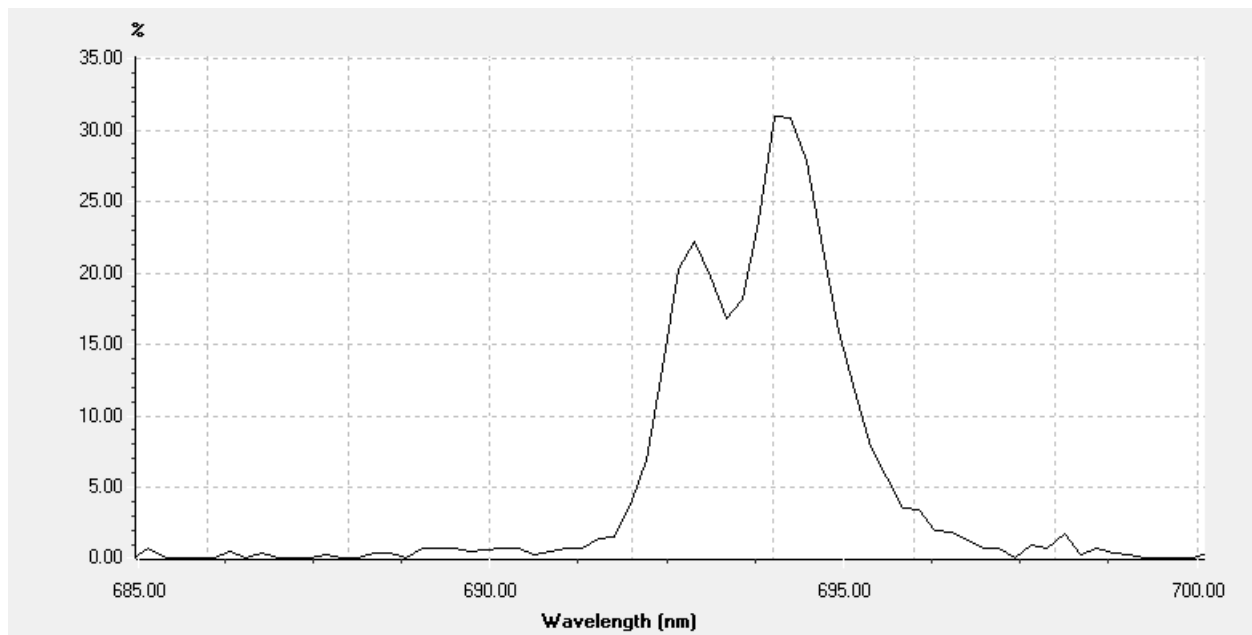


Рис. 11в. Спектр люминесценции, возбуждаемый He-Ne-лазером в рубине при наклоне его оптической оси под некоторым углом отличным от 90° к распространению лазерного излучения

Важно отметить, что в случае прохождения излучения лазера через наклонную рубиновую пластинку, луч входил в нижнюю грань и выходил из верхней, так, как показано на рис. 12.

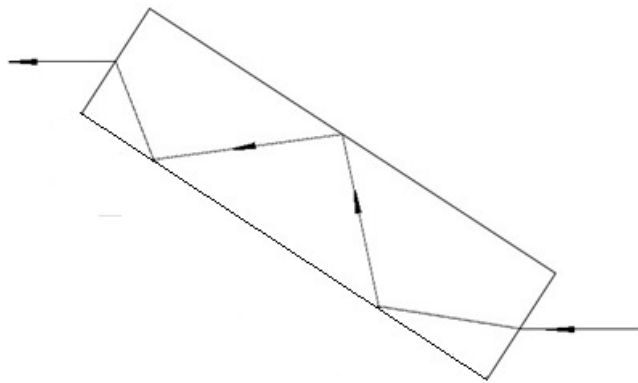


Рис. 12. Схема прохождения излучения лазера через рубин при наклоне его оптической оси под некоторым углом отличным от 90° к распространению лазерного излучения

Была изучена зависимость интенсивности люминесценции от мощности излучения. Экспериментальный график представлен на рис.13.

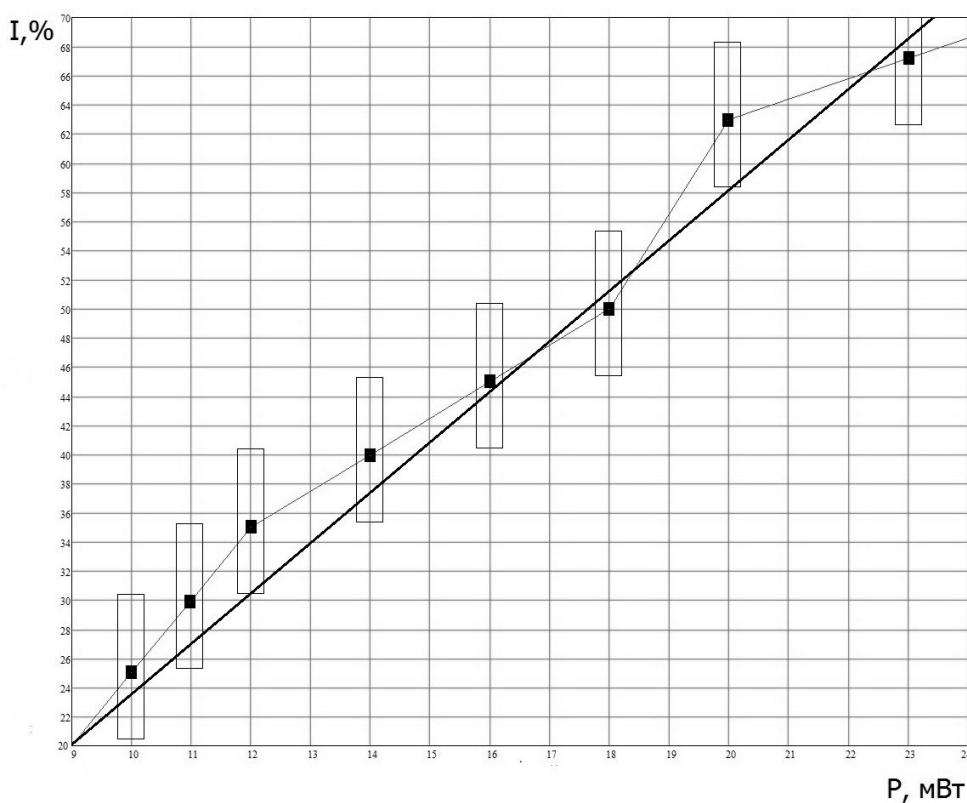


Рис. 13. График зависимости интенсивности возбуждения люминесценции от мощности излучения. Погрешности измерения интенсивности составляют $\pm 10\%$, погрешности измерения мощности составляют $\pm 0.5 \text{ мВт}$

Выводы

В поставленном опыте нам удалось наблюдать люминесценцию кристалла рубина при его накачке излучением He-Ne лазера. Данный экспериментальный факт вызвал интерес к дальнейшему продолжению исследования люминесценции рубина в длинноволновой области спектра поглощения для установления границы возбуждения люминесценции.

Сравнение спектров люминесценции показало, что её интенсивность в районе R-линий при возбуждении излучением длиной волны 633 нм более чем в 4 раза превосходит её интенсивность при возбуждении излучением длиной волны 532 нм.

Для достижения наилучшей эффективности люминесценции нами были изучены различные условия проведения эксперимента. В результате было установлено, что в зависимости от ориентации оси пластинки рубина относительно распространения лазерного излучения, интенсивность люминесценции меняется. Она достигает

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/618695.html>

максимального значения при повороте оси кристалла на угол приблизительно равный 60° относительно лазерного излучения.

Список литературы

1. Maiman T. H. Optical and microwave-optical experiments in ruby. // Physical Review Letters. – 1960 г. – №4(11). – 564-566 стр.
2. Левшин В. Л., Фотолюминесценция жидких и твёрдых веществ, М.- Л., 1951, 456 стр.
3. Mikov S. N., Igo A. V., Gorelik V. S. Two-photon-excited luminescence spectra in diamond nanocrystals. // Physics of the solid state. – 1999 г. – Том 41 - №6.
4. Блецкан Д. И., Лукьянчук А.Р., Пекар Я.М. Исследование собственных и примесных точечных дефектов в кристалле сапфира и сапфировых подложках люминесцентными методами. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006 г. – №3, 5 стр.
5. Слепов Н. О свете медленном и быстром. // Фотоника. – 2007 г. - №1, 11 стр.
6. Куркин Н. Н. Оптико-магнитная спектроскопия Рубина. // Казань, 1983 158 с. : ил РГБ ОД 61:85-1/1358, 158 стр.
7. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия, М., 1969, 447 стр.