

Бюджетное общеобразовательное учреждение города Омска

«Средняя общеобразовательная школа №94»

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОЕКТ

по теме «Определение пороговой интенсивности лазерной абляции
сверхпроводящей керамики»

Выполнила: Слесаренко Софья Константиновна,

ученица 10-1 класса.

Руководители: Филимонов Андрей Александрович,

учитель физики;

Серопян Геннадий Михайлович,

канд. физ.-мат. наук, доцент ФГБОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского».

Омск - 2026 г.

Оглавление

Введение.....	3
Глава I. Теоретическая часть.....	5
История импульсного лазерного напыления.....	5
Характеристика лазера.....	5
Характеристики лазерного излучения.....	7
Глава II. Практическая часть.....	7
I этап. Измерение энергии лазерного излучения.....	7
II этап. Определение пороговой интенсивности лазерной абляции сверхпроводящей керамики.....	10
Заключение.....	17
Список литературы.....	18

Введение

Актуальность

Лазерное напыление позволяет осаждать сверхпроводящие плёнки состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO), которые используются в электронике, энергетике и медицине для создания мощных магнитов, линий передачи энергии, СВЧ-устройств, сенсоров и элементов квантовых компьютеров [4].

В то время как большинство сверхпроводников работает только при экстремально низких температурах (около 4 К или $-269\text{ }^\circ\text{C}$), требуя дорогостоящего охлаждения жидким гелием, плёнки из YBCO остаются сверхпроводящими при температурах выше точки кипения более дешёвого, безопасного и доступного жидкого азота (около 77 К или $-196\text{ }^\circ\text{C}$), так как их собственная критическая температура составляет около 93 К ($-180\text{ }^\circ\text{C}$). Это делает их применение в реальных устройствах экономически более выгодным и технологически удобным [4].

Для повышения качества плёнок требуется исследование процесса взаимодействия лазерного излучения с мишенью, в частности, определение пороговой интенсивности лазерной абляции керамики YBCO [6], [7].

Цель исследования: определение пороговой интенсивности лазерного излучения, при которой начинается абляция керамики YBCO, для длин волн 1064 и 532 нм.

Задачи исследования:

- 1) Изучить твердотельный импульсный лазер.
- 2) Изучить основные параметры лазерного излучения.
- 3) Измерить импульсную энергию для двух длин волн лазерного излучения (1064 и 532 нм).
- 4) Провести эксперименты по облучению керамики YBCO.
- 5) Рассчитать пороговые интенсивности для длин волн 1064 и 532 нм.
- 6) Проанализировать полученные результаты и сформулировать выводы.

Гипотеза: длина волны излучения влияет на пороговую интенсивность лазерной абляции, так как материалы могут иметь разные коэффициенты поглощения для разных длин волн.

Объект исследования: процесс лазерной абляции.

Предмет исследования: зависимость пороговой интенсивности лазерной абляции от длины волны излучения.

Глава I. Теоретическая часть

История импульсного лазерного напыления

Впервые о том, что керамические материалы могут проявлять сверхпроводящие свойства при высоких температурах, было сообщено учёными Георгом Беднорцем и Карлом Мюллером в 1986 году. За это они получили Нобелевскую премию по физике (в 1987 году). Ранее считалось, что в керамике сверхпроводимость невозможна, но это открытие опровергло прежние представления и положило начало поиску способов получения плёнок из этих сложных соединений, в частности YBCO [5].

Далее в 1987 году Дирк Дейккамп, Тирумалай Венкатесан и их коллеги доказали, что метод импульсного лазерного напыления относительно прост, не требует использования сверхвысоковакуумных технологий и хорошо подходит для напыления сверхпроводящих плёнок. Спектрометрия резерфордского обратного рассеяния показала, что их состав был близок к составу исходного материала [6].

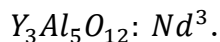
В 1988 году, когда учёные начали детально изучать, как именно лазерное излучение выбивает частицы из керамики и при какой энергии это происходит наиболее эффективно, была выявлена основная проблема при напылении сверхпроводящих плёнок: чтобы получить идеальную плёнку, необходимо работать в определённом диапазоне интенсивности. Он должен быть выше порога лазерной абляции, но ниже уровня, вызывающего разбрызгивание микрокапель [7].

Характеристика лазера

В данной работе применялся твердотельный наносекундный лазер с Nd:YAG стержнем. Длины волн лазерного излучения составляли 1064 нм (инфракрасное излучение) и 532 нм (зелёное, видимое излучение), длительность импульса $\tau = 16$ нс, частота следования импульсов $\nu = 10$ Гц. В Nd:YAG лазере в качестве активного вещества используется алюмоиттриевый гранат с добавками неодима. Данный лазер обладает низким порогом генерации и высокой теплопроводностью активного

элемента, что позволяет получать генерацию при большой частоте повторения импульсов даже в непрерывном режиме.

Химическая формула данного лазера выглядит следующим образом:



Ион Nd^3 может быть встроен как активатор в разные рабочие вещества, причём для генерации лазерного излучения чаще всего используют кристаллы YAG.

Nd:YAG лазеры могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах. В режиме свободной генерации длительность импульса, как правило, равна времени жизни верхнего лазерного уровня (примерно 250 мкс, в зависимости от концентрации неодима). В режиме модулированной добротности длительность импульса может варьироваться от единиц наносекунд до микросекунд. Наибольшую импульсную мощность возможно получить в режиме модуляции добротности. Основная идея этого режима состоит в том, что во время накачки намеренно «ухудшают» свойства оптического резонатора и, таким образом, лазеру не дают излучать. Благодаря этому энергия не расходуется на излучение, и можно получить высокий уровень инверсной населенности энергетических уровней активной среды. В результате вся накопленная энергия реализуется в виде короткого мощного лазерного импульса [2].

На рис. 1 показан лазер, используемый в работе.



Рис. 1. Твердотельный лазер

Характеристики лазерного излучения

Длина волны излучения - расстояние между двумя ближайшими друг к другу точками в пространстве, в которых колебания происходят в одинаковой фазе. Длина волны электромагнитного излучения оптического диапазона измеряется в нанометрах (нм) или микрометрах (мкм), при этом $1 \text{ мкм} = 1000 \text{ нм}$. В зависимости от длины волны излучение может принадлежать к различным участкам спектра: ультрафиолетовому, видимому или инфракрасному.

Длительность импульса (τ) - время, в течение которого лазер излучает энергию в виде короткого всплеска. Измеряется в наносекундах (нс), пикосекундах (пс) или фемтосекундах (фс).

Частота следования импульсов (ν) - количество импульсов, испускаемых в единицу времени. Измеряется в герцах (Гц) и показывает, сколько импульсов генерируется за одну секунду.

Энергия в одном импульсе ($E_{\text{имп}}$) - количество энергии, передаваемой за один короткий всплеск излучения. Измеряется в джоулях (Дж).

Радиус лазерного луча (R) - минимальный радиус поперечного сечения луча. Самая распространенная единица измерения - миллиметры (мм).

Глава II. Практическая часть

I этап. Измерение энергии лазерного излучения



Рис. 2. Лазер и калориметр

Измерение энергии лазерного излучения проводилось с использованием калориметрического метода [3]. Одновременно запускалась лазерная установка и секундомер. Время фиксировалось, когда на калориметре достигались следующие значения теплоты (Q):

Для инфракрасного излучения: $Q \in \{5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40\}$ Дж.

Для зелёного излучения: $Q \in \{2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24\}$ Дж.

Полученные данные занесём в таблицу и построим графики зависимости дозы облучения Q от времени t :

Таблица 1. Данные инфракрасного излучения

Q , Дж	t , с
0	0
5	3,51
10	5,19
15	6,98
20	8,61
25	10,54

30	12,98
35	15,63
40	19,29

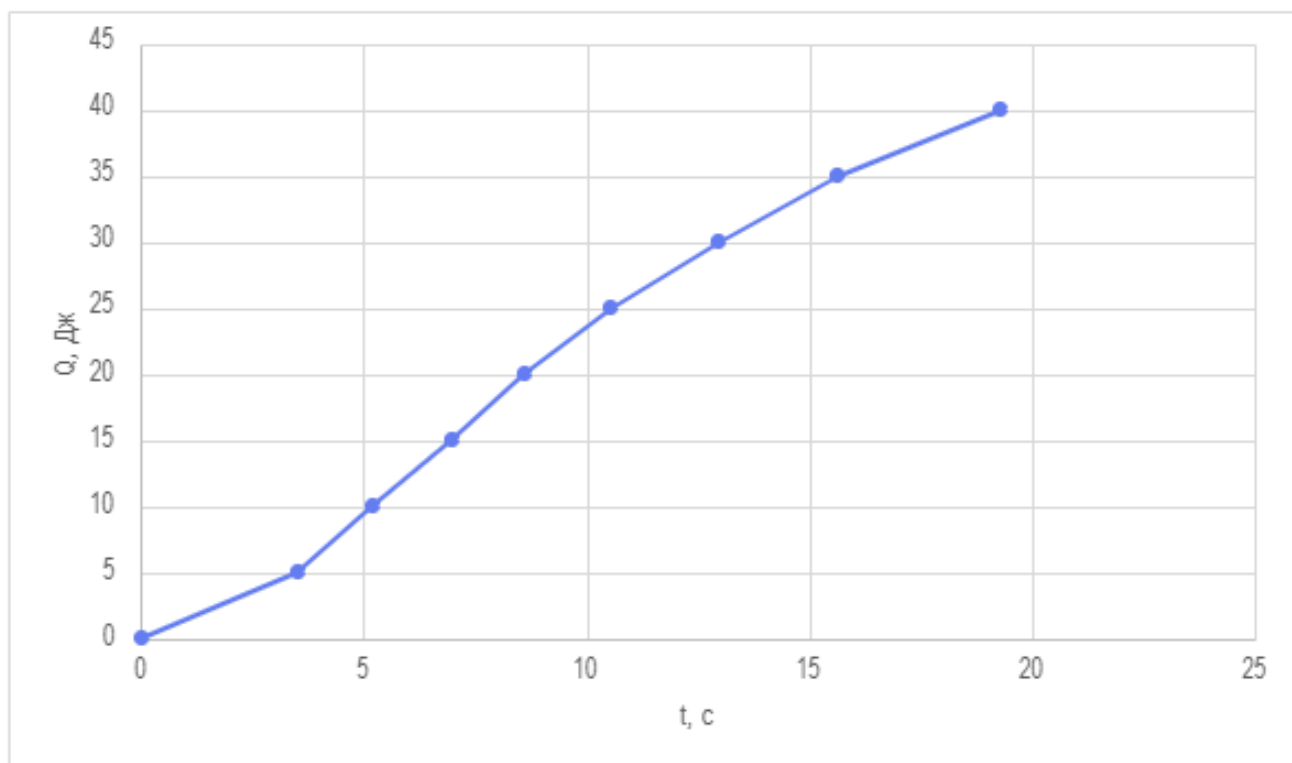


Рис. 3. График зависимости теплоты от времени для инфракрасного излучения

Таблица 2. Данные зелёного излучения

Q, Дж	t, с
0	0
2	2,94
4	4,72
6	6,21
8	7,55
10	9,00
12	10,64
14	12,82
16	15,02
18	17,91
20	21,74
22	26,61
24	35,75

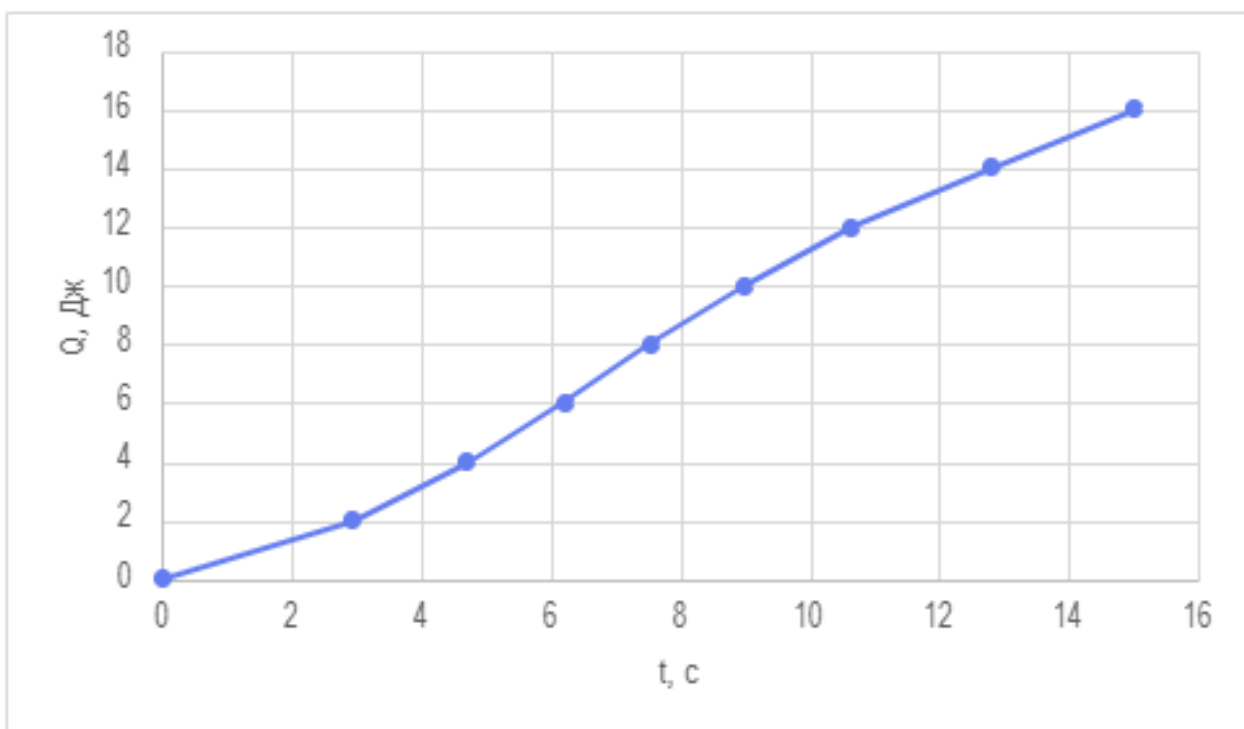


Рис. 4. График зависимости теплоты от времени для зелёного излучения

Рассчитаем энергию в одном импульсе по формуле:

$$E_{\text{имп}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot \nu}$$

где ΔQ - количество теплоты, полученное за некоторое время Δt , ν - частота импульсов. Значения ΔQ и Δt определяются по прямолинейному участку экспериментальных графиков $Q(t)$.

Для инфракрасного излучения:

$$E_{\text{имп}} = \frac{25 - 5}{(10,54 - 3,51) \cdot 10} \cong 0,28 \text{ Дж}$$

Для зелёного излучения:

$$E_{\text{имп}} = \frac{12 - 4}{(10,64 - 4,72) \cdot 10} \cong 0,14 \text{ Дж}$$

II этап. Определение пороговой интенсивности лазерной абляции сверхпроводящей керамики

Образец сверхпроводящей керамики YBCO устанавливаем на рабочий столик, как показано на рис. 5, настраиваем лазер на одиночные импульсы, включаем лазер.

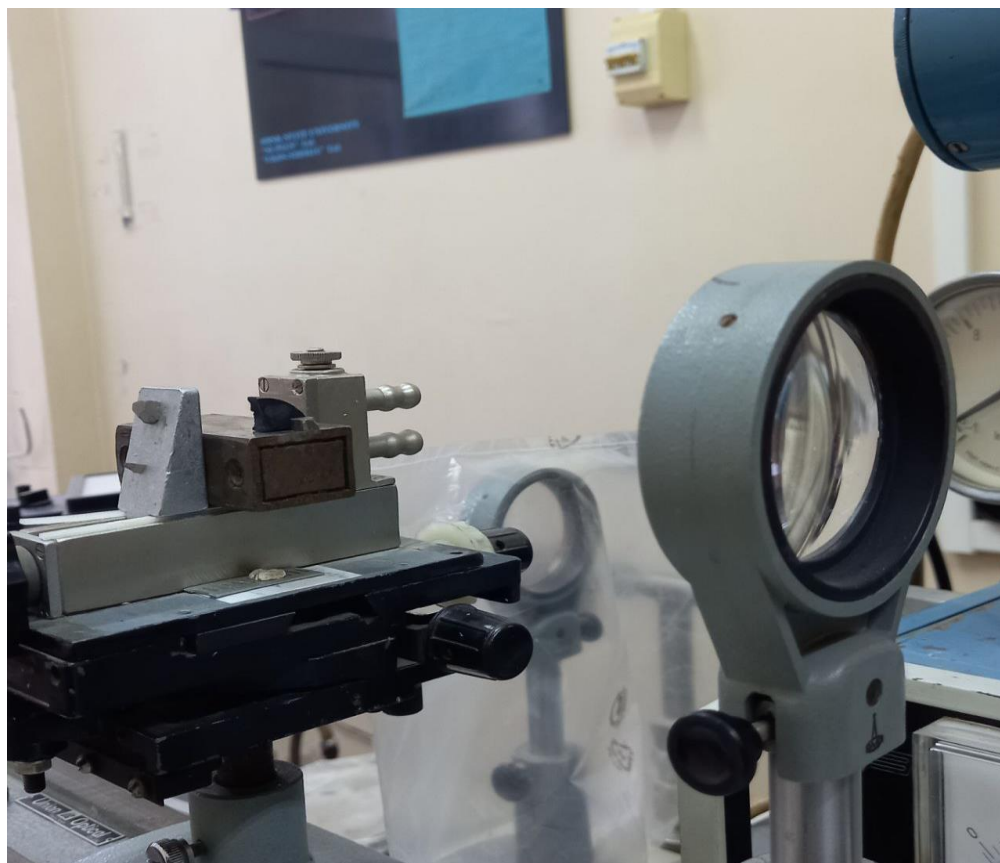


Рис. 5. Образец на рабочем столике

В наших экспериментах используется кварцевая линза с фокусным расстоянием $F = 115$ мм. Интенсивность излучения меняется путем перемещения фокусирующей линзы относительно керамики. При этом изменяется диаметр лазерного пятна на керамике.

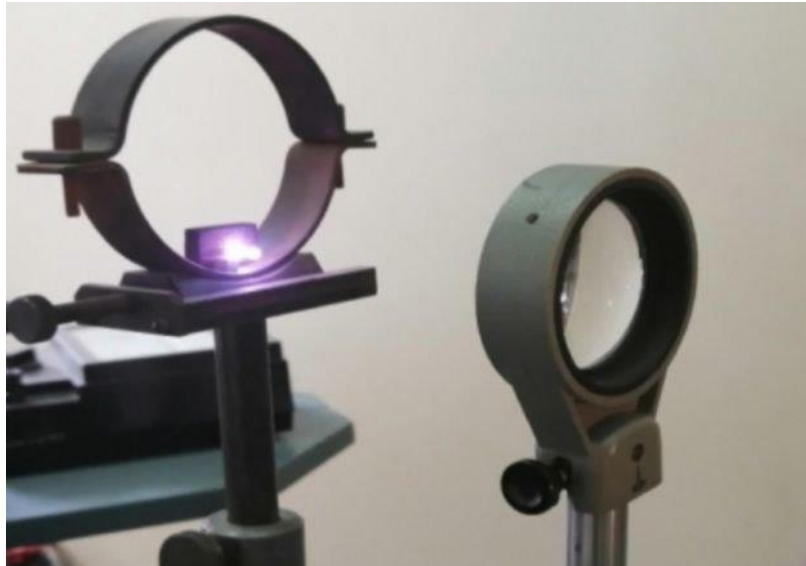


Рис. 6. Эксперимент по облучению керамики инфракрасным излучением

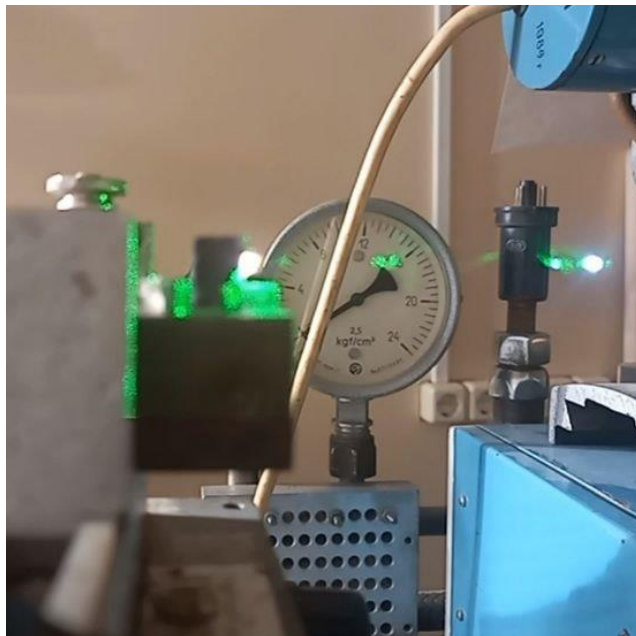


Рис. 7. Эксперимент по облучению керамики зелёным излучением

Определим пороговое расстояние между фокусом и мишенью $l_{п}$, при котором начинается абляция, данные занесем в таблицу:

Инфракрасное излучение:

$l_{п}$, мм	абляция
70	да
75	да
80	да
85	да
90	нет
100	нет
120	нет
140	нет

$$l_{п} = 85 \text{ мм}$$

Зелёное излучение:

$l_{п}$, мм	абляция
40	да
50	да
55	да
60	да
65	да
80	нет
100	нет

$$l_{п} = 65 \text{ мм}$$

Схема для расчета пороговой интенсивности показана на рис. 8.

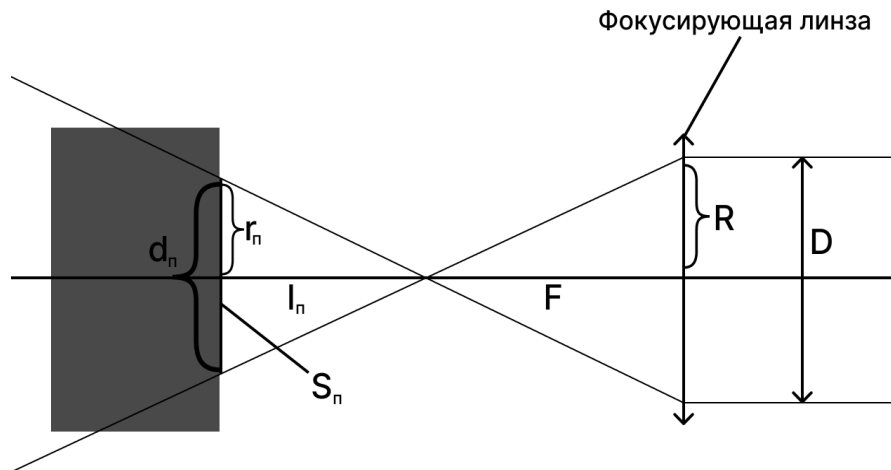


Рис. 8. Схема для расчета пороговой интенсивности

Рассчитывать пороговую интенсивность $I_{п}$ будем по формуле:

$$I_{п} = \frac{E_{имп}}{\tau \cdot S_{п}}$$

где $E_{имп}$ - энергия в одном импульсе, τ - длительность импульса, $S_{п}$ - площадь лазерного пятна на мишени.

Площадь лазерного пятна на мишени $S_{п}$ и его радиус $r_{п}$ определяются по формулам:

$$S_{п} = \pi r_{п}^2$$

$$r_{п} = \frac{R \cdot l_{п}}{F}$$

где R - радиус лазерного луча до линзы ($R = 3$ мм), $l_{п}$ - пороговое расстояние от фокуса до мишени, F - фокусное расстояние линзы.

Среднее значение пороговой интенсивности $I_{п, ср}$ и погрешность $\Delta I_{п}$ находим по формулам:

$$I_{п, ср} = \frac{I_{п, max} + I_{п, min}}{2}$$

$$\Delta I_{п} = I_{п, max} - I_{п, ср}$$

где $I_{п, \max}$ - максимальное значение пороговой интенсивности, $I_{п, \min}$ - минимальное значение пороговой интенсивности.

Для инфракрасного излучения:

Найдем $I_{п, \max}$ при $l_{п} = 80$ мм и $I_{п, \min}$ при $l_{п} = 90$ мм:

$$r_{п}(80) = \frac{3 \cdot 80}{115} \cong 2,1 \text{ мм}$$

$$S_{п}(80) = 3,14 \cdot 2,1^2 \cong 13,85 \text{ мм}^2$$

$$I_{п, \max} = \frac{0,28}{16 \cdot 10^{-9} \cdot 13,85 \cdot 10^{-6}} \cong 0,00126 \cdot 10^{15} = 1,26 \cdot 10^{12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$r_{п}(90) = \frac{3 \cdot 90}{115} \cong 2,3 \text{ мм}$$

$$S_{п}(90) = 3,14 \cdot 2,3^2 \cong 16,61 \text{ мм}^2$$

$$I_{п, \min} = \frac{0,28}{16 \cdot 10^{-9} \cdot 16,61 \cdot 10^{-6}} \cong 0,00105 \cdot 10^{15} = 1,05 \cdot 10^{12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$I_{п, \text{cp}} = \frac{1,26 \cdot 10^{12} + 1,05 \cdot 10^{12}}{2} \cong 1,16 \cdot 10^{12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$\Delta I_{п} = 1,26 \cdot 10^{12} - 1,16 \cdot 10^{12} = 0,10 \cdot 10^{12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$I_{п} = (1,16 \pm 0,10) \cdot 10^{12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Для зелёного излучения:

Найдем $I_{п, \max}$ при $l_{п} = 60$ мм и $I_{п, \min}$ при $l_{п} = 80$ мм:

$$r_{п}(60) = \frac{3 \cdot 60}{115} \cong 1,6 \text{ мм}$$

$$S_{п}(60) = 3,14 \cdot 1,6^2 \cong 8,04 \text{ мм}^2$$

$$I_{п, \max} = \frac{0,14}{16 \cdot 10^{-9} \cdot 8,04 \cdot 10^{-6}} \cong 0,00109 \cdot 10^{15} = 1,09 \cdot 10^{12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$r_{\Pi}(80) = \frac{3 \cdot 80}{115} \cong 2,09 \text{ мм}$$

$$S_{\Pi}(80) = 3,14 \cdot 2,09^2 \cong 13,72 \text{ мм}^2$$

$$I_{\Pi, \min} = \frac{0,14}{16 \cdot 10^{-9} \cdot 13,72 \cdot 10^{-6}} \cong 0,00064 \cdot 10^{15} = 0,64 \cdot 10^{12} \frac{\text{БТ}}{\text{М}^2}$$

$$I_{\Pi, \text{cp}} = \frac{1,09 \cdot 10^{12} + 0,64 \cdot 10^{12}}{2} \cong 0,87 \cdot 10^{12} \frac{\text{БТ}}{\text{М}^2}$$

$$\Delta I_{\Pi} = 1,09 \cdot 10^{12} - 0,87 \cdot 10^{12} = 0,22 \cdot 10^{12} \frac{\text{БТ}}{\text{М}^2}$$

$$I_{\Pi} = (0,87 \pm 0,22) \cdot 10^{12} \frac{\text{БТ}}{\text{М}^2}$$

Заключение

В результате проведённых экспериментов были установлены значения пороговой интенсивности лазерной абляции для керамики YBCO. Для инфракрасного излучения ($\lambda = 1064$ нм) порог составил $(1,16 \pm 0,10) \cdot 10^{12}$ Вт/м², для зелёного излучения ($\lambda = 532$ нм) порог составил $(0,87 \pm 0,22) \cdot 10^{12}$ Вт/м².

Также подтверждена выдвинутая гипотеза: длина волны действительно влияет на пороговую интенсивность лазерной абляции. Порог интенсивности для зелёного излучения оказался ниже, чем для инфракрасного. Это обусловлено тем, что керамика YBCO имеет более высокий коэффициент поглощения в видимой области спектра [6].

Несмотря на перекрытие доверительных интервалов, выявлена тенденция снижения пороговой интенсивности с уменьшением длины волны. Большая погрешность для зелёного излучения ($\pm 0,22$) может быть обусловлена неоднородностью структуры керамики YBCO и высокой чувствительностью процесса лазерной абляции к рельефу поверхности.

Для получения качественных сверхпроводящих плёнок следует использовать длину волны 532 нм, так как это позволяет проводить напыление при меньших плотностях мощности, что снижает риск термического повреждения мишени.

Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. IV. Оптика. - 3-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 792 с.
2. О. Звелто Принципы лазеров. - 3-е изд. - М.: Мир, 1990. - 560 с.
3. С.А. Пячин, М.А. Пугачевский НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ: лазерная абляция, электроискровое воздействие. - Хабаровск: 2013. - 38 с.
4. В.В. Шмидт Введение в физику сверхпроводников. - 2-е изд. - М.: МЦНМО, 2000. - 402 с.
5. Беднорц И.Г., Мюллер К.А. Возможная высокотемпературная сверхпроводимость в системе Ba-La-Cu-O // Zeitschrift für Physik B: Condensed Matter. - 1986. - №2. - С. 189-193.
6. Дейккамп Д., Венкатесан Т., Ву С. С., Шахин С. А., Жиссо Н., Мин-Ли Х., Маклин У. Л., Крофт У. Л. Получение эпитаксиальных и ориентированных пленок высокотемпературного сверхпроводника Y-Ba-Cu-O методом лазерного испарения // Applied Physics Letters. - 1987. - №8. - С. 619-621.
7. Роас Б., Шульц Л., Эндрес Г. Напыление тонких пленок Y-Ba-Cu-O методом эпитаксиального лазерного испарения при температуре подложки 650 °C // Applied Physics Letters. - 1988. - №16. - С. 1557-1559.

