

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

**Физические основы взаимодействия
лазерного излучения
с материалами электронной техники**

Практическое пособие

для студентов специальностей
1–39 03 01 «Электронные системы безопасности»,
1–31 04 03 «Физическая электроника»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2019

УДК 52-626:621.3.049.77(076)
ББК 32.86-53я73+32.844.2я73
Л175

Авторы:

В. Н. Мышковец, А. Н. Купо,
А. В. Максименко, Г. А. Баевич

Рецензенты:

кандидат технических наук А. А. Алексеенко;
кандидат технических наук Н. Н. Федосенко

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Л175 Лазерные технологии в микро- и наноэлектронике.
Физические основы взаимодействия лазерного излучения
с материалами электронной техники: практическое
пособие / В. Н. Мышковец [и др.]; Гомельский гос. ун-т
им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2019. – 37 с.
ISBN 978-985-577-553-0

Практическое пособие содержит пять лабораторных работ, тематика которых посвящена вопросам термического воздействия лазерного излучения на поверхность материалов электронной техники. Каждая работа включает краткие теоретические сведения по теме, порядок выполнения и вопросы для самоконтроля. Особое внимание уделяется технике безопасности при работе с лазерным оборудованием.

Предназначено для студентов факультета физики и информационных технологий специальностей 1–39 03 01 «Электронные системы безопасности» и 1–31 04 03 «Физическая электроника».

УДК 52-626:621.3.049.77(076)
ББК 32.86-53я73+32.844.2я73

ISBN 978-985-577-553-0

© Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Список условных обозначений.....	5
Лабораторная работа 1. Оценка степени опасности лазерного излучения.....	6
Лабораторная работа 2. Особенности нагрева материалов лазерным излучением.....	13
Лабораторная работа 3. Поверхностное термоупрочнение металлов импульсным излучением твердотельных лазеров.....	20
Лабораторная работа 4. Лазерное разделение стекла методом управляемого термораскалывания.....	27
Лабораторная работа 5. Лазерное скрайбирование диэлектрических материалов.....	30
Литература.....	38

ПРЕДИСЛОВИЕ

В соответствии с учебными планами специальностей 1–39 03 01 «Электронные системы безопасности» и 1–31 04 03 «Физическая электроника» в процессе изучения дисциплин «Лазерные технологии в микро- и наноэлектронике» и «Лазерные технологии обработки материалов электронной техники» предусмотрено выполнение лабораторных работ, описание и методика проведения которых представлены в данном практическом пособии.

Работа в лаборатории – основной элемент подготовки будущего инженера в области прикладной электроники и радиофизики, поскольку учит самостоятельно воспроизводить и анализировать наблюдаемые физические явления, сопоставлять экспериментальные результаты и теоретические расчёты.

В издании «Физические основы взаимодействия лазерного излучения с материалами электронной техники» приведено описание первых пяти лабораторных работ. В данных работах рассмотрены физические основы термического воздействия лазерного излучения на поверхность диэлектрических полупроводниковых материалов, а также технологические процессы лазерной обработки этих материалов. Приводятся оптические схемы и описание лабораторных технологических установок, сопряжённых с компьютером. Одна из работ посвящена изучению правил техники безопасности и охраны труда при работе на лазерных установках.

Выполнение каждой работы связано с необходимостью предварительного изучения соответствующего теоретического материала, который представлен в лекциях по данной дисциплине, а также в списке рекомендованной литературы.

Данное практическое пособие разработано авторами на основании многолетнего опыта проведения лабораторных работ по дисциплинам, связанным с технологиями лазерной обработки материалов.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АИГ – алюмоиттриевый гранат.
ЗЛВ – зона лазерного воздействия.
ЗТВ – зона термического влияния (воздействия).
ЛИ – лазерное излучение.
ПДУ (ЛИ) – предельно допустимый уровень (лазерного излучения).
 λ – длина волны ЛИ.
 α – видимый угловой размер источника излучения (рад).
 $\alpha_{\text{пред}}$ – предельный видимый угловой размер источника, при котором он может рассматриваться как точечный (рад).
 τ – длительность импульса лазерного излучения (с).
 D – оптическая плотность.
 D_{λ} – оптическая плотность светофильтра на длине волны λ .
 d – диаметр пучка ЛИ (м).
 D_a – диаметр ограничивающей апертуры (м).
 E – облученность ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$).
 $E_{\text{ПДУ}}$ – ПДУ облученности ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$).
 $E_{\text{ПДУ}}^c(t)$ – предельно допустимое значение облученности серии импульсов общей длительностью t .
 f – частота следования импульсов излучения (Гц).
 H – энергетическая экспозиция лазерного излучения ($\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$).
 $H_{\text{ПДУ}}$ – предельно допустимое значение энергетической экспозиции ЛИ.
 k – кратность (увеличение) оптического средства наблюдения.
 r – расстояние от источника излучения до точки наблюдения (м).
 P – мощность ЛИ (Вт).
 $P_{\text{ПДУ}}$ – предельно допустимый уровень мощности.
 S_a – площадь ограничивающей апертуры (м^2).
 $S_{\text{п}}$ – площадь поперечного сечения пучка (м^2).
 S_o – площадь поверхности источника излучения (м^2).
 t – длительность воздействия (облучения) непрерывным излучением или серией импульсов лазерного излучения (с).
 T – температура (К).
 W – энергия ЛИ (Дж).
 $W(\tau)$ – энергия импульса ЛИ и длительностью τ .
 $W_{\text{ПДУ}}$ – предельно допустимый уровень энергии ЛИ.
 $W_{\text{ПДУ}}(\tau)$ – предельно допустимое значение энергии импульса ЛИ длительностью τ .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: изучение теоретических основ безопасности при работе с лазерным оборудованием. Определение класса и измерение уровня опасности лазерного излучения. Получение навыков выбора защитных средств.

Оборудование: лазерная технологическая установка (описание и порядок работы представлены в лабораторной работе 3).

Теоретические сведения

При эксплуатации лазерных установок обслуживающий персонал может подвергаться воздействию большого числа опасных и вредных факторов. Все эти факторы подразделяются на основные и сопутствующие. К основным относятся собственно прямое, отраженное и рассеянное лазерное излучение. К сопутствующим – факторы, которые возникают на лазерных участках при эксплуатации лазеров и другого оборудования, такие как высокое электрическое напряжение, шум, вибрации, электромагнитные и ионизирующие излучения, а также наличие вредных веществ. Под влиянием этих факторов может происходить нарушение жизнедеятельности как отдельных органов человека, так и всего организма в целом.

Наибольшую опасность лазерное излучение представляет для органов зрения. На всех длинах волн оптического диапазона лазерное излучение свободно проникает внутрь глаза. Прежде чем достигнуть сетчатки глаза, излучение проходит последовательно через несколько преломляющих сред: роговицу, хрусталик и, наконец, стекловидное тело. При рассмотрении воздействия лазерного излучения на орган зрения необходимо отдельно разбирать действие излучения в интервале длин волн 0,4–1,4 мкм и вне этого интервала, где оптические среды глаза являются непрозрачными. Облученность, создаваемая лазерным излучением на сетчатке, вследствие фокусирующего действия хрусталика (который имеет вид двояковыпуклой линзы), может быть в десятки и сотни тысяч раз выше, нежели облученность, создаваемая на роговице и других частях глаза. Как показывает анализ, ее величина будет определяться мощностью лазерного излучения, его апертурой и углом

расходимости, а также диаметром зрачка. Длительное облучение сетчатки в видимом диапазоне на уровнях порядка порога ожога может вызывать в ней необратимые изменения. Повреждение сетчатки обязательно сопровождается нарушением функции зрения. Клетки сетчатки, как и клетки центральной нервной системы, после повреждения не восстанавливаются.

Первой линией защиты других органов человека от повреждения лазерным излучением является кожа, которая представляет собой важный физиологически активный орган, обширные повреждения которого могут привести к гибели организма. Степень повреждения кожи зависит от поглощенной энергии, а сами повреждения могут быть различными: от легкого покраснения (эритемы) до обугливания. Минимальное повреждение кожи образуется при воздействии лазерного излучения с энергетической экспозицией $0,1 - 1,0 \text{ Дж/см}^2$ (в зависимости от степени пигментации кожи и длительности воздействия). Наибольшее биологическое воздействие на кожу оказывает лазерное излучение с длинами волн $0,28 - 0,32 \text{ мкм}$.

Лазерное излучение дальней инфракрасной области спектра способно проникать через ткани тела и взаимодействовать с биологическими структурами на значительной глубине, поражая внутренние органы. Наибольшую опасность для внутренних органов представляет сфокусированное лазерное излучение. Однако следует учитывать, что и несфокусированное излучение может фокусироваться в глубине тела человека. Кроме того, следует учитывать воздействие ударной волны, возникающей при работе мощных лазеров в импульсном режиме. Степень повреждения в значительной степени определяется энергетической облученностью и цветом окраски органа. Печень является одним из наиболее уязвимых органов.

Расчёт предельно допустимых уровней лазерного излучения при воздействии на глаза

В соответствии с Санитарными правилами и нормами (СанПиН) 2.2.4 -13-2-2006 «Лазерное излучение и гигиенические требования при эксплуатации лазерных изделий» устанавливаются предельно допустимые уровни (ПДУ) лазерного излучения в диапазоне длин волн $180 - 10^5 \text{ нм}$ при различных условиях воздействия на глаза и кожу человека. Время и частота воздействия определяют количество энергии, переданной биоткани. Поэтому ПДУ лазерного излучения

устанавливаются по-разному для различных условий облучения:

– однократное либо хроническое воздействие;

– непрерывный либо импульсный режим работы лазера. При нормировании ПДУ лазерного излучения также играют роль параметры источника излучения:

– коллимированное (параллельный пучок) или неколлимированное (рассеяное) излучение;

– точечный или протяженный источник.

Излучение различных диапазонов по-разному взаимодействует с биотканью. При оценке ПДУ рассматривают три диапазона длин волн лазерного излучения:

I. $180 \text{ нм} < \lambda \leq 380 \text{ нм}$,

II. $380 \text{ нм} < \lambda \leq 1400 \text{ нм}$,

III. $400 \text{ нм} < \lambda \leq 10^5 \text{ нм}$.

Нормируемыми параметрами ЛИ являются энергетическая экспозиция H и облученность E , усредненные по ограничивающей апертуре. Для определения предельно допустимых уровней $H_{\text{пду}}$ и $E_{\text{пду}}$ при воздействии на глаза ЛИ в диапазонах I и III усреднение производится по апертуре диаметром $1,1 \cdot 10^{-3}$ м, а в диапазоне II – по апертуре диаметром $7 \cdot 10^{-3}$ м.

Наряду с энергетической экспозицией и облученностью нормируемыми параметрами являются также энергия W и мощность P излучения, прошедшего через указанные ограничивающие апертуры.

При оценке воздействия на глаза лазерного излучения в диапазоне II ($380 < \lambda \leq 1400$ нм) нормирование энергии и мощности ЛИ, прошедшего через ограничивающую апертуру диаметром $7 \cdot 10^{-3}$ м, является первостепенным. Параметры $H_{\text{пду}}$, $E_{\text{пду}}$ и $W_{\text{пду}}$, $P_{\text{пду}}$ могут использоваться независимо в соответствии с решаемой задачей.

Указанные выше энергетические параметры связаны соотношениями:

$$H_{\text{пду}} = E \cdot t; \quad H_{\text{пду}} = W_{\text{пду}} / S_a; \quad E_{\text{пду}} = P_{\text{пду}} / S_a \quad (1.1)$$

В случае неравномерного распределения интенсивности по случайному закону производится усреднение ПДУ этих параметров по ограничивающей апертуре. Апертура в данном случае это диаметр активного элемента лазера или диафрагмы, через которую проходит лазерное излучение.

Предельно допустимые уровни в диапазоне 380 – 1400 нм ПДУ при однократном облучении глаз

Соотношения для определения $W_{\text{ПДУ}}$ и $P_{\text{ПДУ}}$ при воздействии на глаза коллимированного лазерного излучения (наблюдении прямого или зеркально отраженного пучка) в диапазоне $380 < \lambda \leq 1400$ нм приведены в таблицах 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Соотношение для определения $W_{\text{ПДУ}}$ при однократном воздействии на глаза коллимированного лазерного излучения в спектральном диапазоне II ($380 < \lambda \leq 1400$ нм). (Длительность воздействия меньше 1 с. Ограничивающая апертура – $7 \cdot 10^{-3}$ м.).

Спектральный интервал λ , нм	Длительность воздействия t , с	$W_{\text{ПДУ}}$, Дж
$380 < \lambda \leq 600$	$t \leq 2,3 \cdot 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2,3 \cdot 10^{-11} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-8}$
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$5,9 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt[3]{t^2}$
$600 < \lambda \leq 750$	$t \leq 6,5 \cdot 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$6,5 \cdot 10^{-11} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{t^2}$
$750 < \lambda \leq 1000$	$t \leq 2,5 \cdot 10^{-10}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2,5 \cdot 10^{-10} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$3,0 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{t^2}$
$1000 < \lambda \leq 1400$	$t \leq 10^{-9}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$10^{-9} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$7,4 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{t^2}$

Таблица 1.2 – Соотношения для определения $P_{\text{ПДУ}}$ при однократном воздействии на глаза коллимированного лазерного излучения в спектральном диапазоне II ($380 < \lambda \leq 1400$ нм). (Длительность облучения больше 1 с. Ограничивающая апертура – $7 \cdot 10^{-3}$ м.).

Спектральный интервал λ , нм	Длительность воздействия t , с	$P_{\text{ПДУ}}$, Вт
1	2	3
$380 < \lambda \leq 500$	$1,0 < t \leq 5,0 \cdot 10^2$	$6,9 \cdot 10^{-5} / \sqrt[3]{t}$
	$5,0 \cdot 10^2 < t \leq 10^4$	$3,7 \cdot 10^{-3} / t$
	$t > 10^4$	$3,7 \cdot 10^{-7}$

Окончание таблицы 1.2

1	2	3
$500 < \lambda \leq 600$	$1,0 < t \leq 2,2 \cdot 10^3$ $2,2 \cdot 10^3 < t \leq 10^4$ $t > 10^4$	$5,9 \cdot 10^{-5} / \sqrt[3]{t}$ $10^{-2} / t$ 10^{-6}
$600 < \lambda \leq 700$	$1,0 < t \leq 2,2 \cdot 10^3$ $2,2 \cdot 10^3 < t \leq 10^4$ $t > 10^4$	$1,2 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$ $2,0 \cdot 10^{-2} / t$ $2,0 \cdot 10^{-6}$
$700 < \lambda \leq 750$	$1,0 < t \leq 10^4$ $t > 10^4$	$1,2 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$ $5,5 \cdot 10^{-6}$
$750 < \lambda \leq 1000$	$1,0 < t \leq 10^4$ $t > 10^4$	$3,0 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$ $1,4 \cdot 10^{-5}$
$1000 < \lambda \leq 1400$	$1,0 < t \leq 10^4$ $t > 10^4$	$7,4 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$ $3,5 \cdot 10^{-5}$

ПДУ при воздействии на глаза серии импульсов коллимированного излучения в спектральном диапазоне П ($380 < \lambda \leq 1400$ нм) установлены для случаев, когда длительность отдельного импульса в серии τ не превышает 0,25 с, а частота следования импульсов в серии f больше 0,005 Гц (интервал между отдельными импульсами в серии меньше 200 с). Если $f < 0,005$ Гц, воздействие на глаза отдельных импульсов излучения считается независимым. При этом нормируется значение энергии импульса, имеющего максимальную амплитуду:

$$W^c(\tau)_{max} \leq W_{ПДУ}(\tau). \quad (1.2)$$

Если $f > 0,005$ Гц, значение предельно допустимой энергии серии импульсов излучения длительностью t при воздействии на глаза $W^c_{ПДУ}(t)$ равно меньшему из двух значений энергии W_1 и W_2 , определяемых формулами:

$$W_1 = W_{ПДУ}(t), \quad (1.3)$$

$$W_2 = W_{ПДУ}(\tau_n) (N / \xi)^{2/3}.$$

где $W_{ПДУ}(t)$ и $W_{ПДУ}(\tau)$ – предельно допустимые значения энергий одиночных импульсов длительностью t и τ , соответственно, для коллимированных потоков излучения;

ξ – определяется отношением максимальной энергии отдельного импульса в рассматриваемой серии к среднему значению:

$$\xi = W^c(\tau)_{max} / \overline{W^c(\tau)}. \quad (1.4)$$

В тех случаях, когда ξ неизвестно, следует считать $\xi = 1$.

$$W_{\text{пду}}^c(t) = W_1 \text{ при } W_1 \leq W_2, \quad (1.5)$$

$$W_{\text{пду}}^c(t) = W_2 \text{ при } W_1 > W_2.$$

Предельно допустимое среднее значение энергии одного импульса из серии при этом определяется по формуле:

$$\bar{W}_{\text{пду}}^c(\tau) = W_{\text{пду}}^c(t) / N.$$

Когда длительность серии импульсов превышает 1 с, целесообразно определять значение предельно допустимой средней мощности.

Предельно допустимая средняя мощность серии импульсов лазерного излучения при облучении глаз коллимированным пучком $P_{\text{пду}}^c(t)$ равна меньшему из двух значений мощности P_1 и P_2 , определяемых формулами:

$$P_1 = P_{\text{пду}}(t), \quad (1.6)$$

$$P_2 = \frac{W_{\text{пду}}(\tau_{\text{и}})}{t} \cdot \left(\frac{N}{\xi} \right)^{\frac{2}{3}},$$

где $P_{\text{пду}}(t)$ – значение предельно допустимой мощности импульса длительностью t для коллимированного излучения.

$$\bar{P}_{\text{пду}}^c(t) = P_1 \text{ при } P_1 \leq P_2, \quad (1.7)$$

$$\bar{P}_{\text{пду}}^c(t) = P_2 \text{ при } P_1 > P_2$$

Если источником излучения является протяженный объект, предельно допустимые значения энергии серии импульсов $W_{\text{пду}}^{cD}(t)$, средней мощности излучения в серии $P_{\text{пду}}^{cD}(t)$, энергии одного импульса в серии определяются умножением предельных значений на поправочный коэффициент B .

$$W_{\text{пду}}^{cD}(t) = B \cdot W_{\text{пду}}^c(t),$$

$$\bar{P}_{\text{пду}}^{cd}(t) = B \cdot \bar{P}_{\text{пду}}^c(t), \quad (1.8)$$

$$W_{\text{пду}}^{cD}(\tau) = B \cdot W_{\text{пду}}^{cD}(\tau).$$

Для определения предельно допустимых значений $W_{ПДУ}$ и $P_{ПДУ}$ коллимированного или рассеянного ЛИ в диапазоне $380 < \lambda \leq 1400$ нм при хроническом воздействии на глаза необходимо уменьшить в 10 раз соответствующие предельные значения для однократного воздействия, приведенные ранее.

Средства защиты от лазерного излучения

Средства защиты должны снижать уровни лазерного излучения, действующего на человека, до величин ниже ПДУ. Они подразделяются на коллективные и индивидуальные. Выбор средств защиты в каждом конкретном случае осуществляется с учетом требований безопасности для данного процесса. Средства индивидуальной защиты от лазерного излучения включают в себя средства защиты глаз и лица (защитные очки, щитки, насадки), средства защиты рук, специальную одежду.

При выборе средств индивидуальной защиты необходимо учитывать:

- рабочую длину волны излучения;
- оптическую плотность светофильтра.

Оптическая плотность светофильтров, применяемых в защитных очках, щитках и насадках, для диапазона ЛИ II должна удовлетворять требованиям:

$$D_{\lambda} \geq \ln \frac{W_{\max}}{W_{ПДУ}}, \text{ или } D_{\lambda} \geq \ln \frac{P_{\max}}{P_{ПДУ}}, \quad (1.9)$$

где индекс *max* соответствует максимальным значениям энергетических параметров лазерного излучения в рабочей зоне;

ПДУ – предельно допустимым уровням энергетических параметров при хроническом облучении.

Порядок выполнения работы

1. Изучить основы оценки степени опасности лазерного излучения.

2. Оценить характеристики воздействия лазерного излучения (диапазон II), с учётом которых определяются ПДУ нормируемых параметров:

- а) действие лазерного излучения: однократное (время

воздействия $t < 3 \cdot 10^4$ с) либо хроническое ($t > 3 \cdot 10^4$ с);

б) режим работы лазера: непрерывный (одиночный импульс длительностью более 10^{-6} с), либо импульсный (серия импульсов).

3. Определить $W_{ПДУ}$ и $P_{ПДУ}$ ЛИ при однократном воздействии на глаза (параметры лазерной установки приведены в лабораторной работе 3 настоящего пособия), используя таблицы 1.1, 1.2.

4. Определить величину минимально необходимой оптической плотности D_λ защитных светофильтров (формула 1.9).

5. Составить отчёт о проделанной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Охарактеризуйте основные, опасные и вредные производственные факторы при эксплуатации лазерного оборудования.

2. Каковы особенности воздействия лазерного излучения на биологические структуры?

3. Как проявляется воздействие лазерного излучения на глаза?

4. Назовите предельно допустимые уровни воздействия лазерного излучения.

5. Каковы нормируемые параметры лазерного излучения?

6. Какие общие правила безопасности при работе с лазерным излучением существуют?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Цель работы: изучение физических основ процесса взаимодействия лазерного излучения с веществом, решение уравнения теплопроводности для твердого тела при облучении его лазерным излучением.

Теоретические сведения

Использование лазерной энергии для обработки материалов основано на поглощении лазерного излучения веществом. При

взаимодействии с поверхностью материала излучение частично отражается, а частично проникает внутрь материала, поглощается в нем и, как правило, достаточно быстро переходит в тепло.

В этом случае изменение плотности лазерного потока по глубине описывается известным уравнением Бугера:

$$E(x) = E_0 \cdot A \cdot \exp(-\alpha \cdot x), \quad (2.1)$$

где $E(x)$ – световая энергия, проникающая на глубину x ;

E_0 – энергия, падающая на поверхность;

A – поглощательная способность материала;

α – линейный коэффициент поглощения;

x – координата, отсчитываемая от поверхности в глубь материала.

Количество энергии, поглощенной в слое толщины Δx :

$$\Delta E = |E(\Delta x) - E_0|. \quad (2.2)$$

Формула (2.1) применима к различным материалам в широком диапазоне длин волн. В то же время конкретные значения входящих в нее величин A и α , а также механизм поглощения лазерного излучения и перехода его в тепло могут сильно отличаться для материалов различных классов. Поглощательная способность материала $A = (1-R)$, где R – коэффициент отражения, показывает, какая часть энергии падающего излучения поглощается, и участвует в процессе нагрева вещества. Поглощательная способность зависит от длины волны излучения, состояния поглощающей поверхности и температуры.

Коэффициент отражения для большинства материалов увеличивается с ростом длины волны, что определяет требования к энергетическим характеристикам лазера: лазер с большей длиной волны должен обладать большей мощностью, чем лазер с меньшей длиной волны, для оказания эквивалентного воздействия на начальном этапе поглощения излучения.

Коэффициент отражения зависит также от ρ_a – среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности и в общем случае описывается выражением:

$$R = R_0 \exp \left[- \left(\frac{5\pi \cdot \rho_a \cos \varphi}{\lambda} \right)^2 \right]. \quad (2.3)$$

При нормальном падении излучения

$$R = R_0 \exp \left[- \left(\frac{5\pi \cdot \rho_a}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (2.4)$$

где R – измеряемый коэффициент отражения;

R_0 – коэффициент отражения, определяемый по формуле Френеля;

λ – длина волны излучения.

Анализируя эти выражения, можно сделать вывод, что для данной длины волны излучения, увеличение шероховатости поверхности (по сравнению с оптически гладкой ($\rho_a \leq \lambda$)) приводит к снижению коэффициента отражения.

Для металлов наличие шероховатостей поверхности обеспечивает возрастание резонанса локального поля, обусловленного возбуждением в поверхностных шероховатостях, осциллирующих дипольных моментов (электронного газа). Взаимодействуя друг с другом, они образуют коллективные моды, кулоновское поле усиливает поле падающей волны. Таким образом, шероховатости служат аккумуляторами энергии, поступающей из поля падающей волны. Поглощательная способность материала зависит от температуры во время действия потока излучения. В первом приближении зависимость $A(T)$ может быть представлена в виде:

$$A = a + B \cdot T.$$

Для неметаллических материалов возможно падение A с ростом температуры. Значение коэффициентов a и B температурной зависимости, приведены для ряда материалов в справочниках по лазерной технологии. Так, например, для оксида алюминия: $A(T) = 0,77 - 4,28 \cdot 10^{-4} T$.

В качестве критерия необходимости учета зависимости поглощательной способности от температуры можно использовать параметр:

$$\beta = \frac{q_0 \cdot b}{k \sqrt{k_1}}, \quad (2.5)$$

где q_0 – плотность потока падающего излучения;

k_1 – коэффициент сосредоточенности теплового источника при гауссовой интенсивности,

k – коэффициент теплопроводности.

При $|\beta| < 1/5$ учет температурной зависимости дает вклад не более 10 %, следовательно, при расчетах температурную зависимость $A(T)$ можно не принимать во внимание.

Коэффициент α в выражении (2.1) характеризует толщину слоя вещества $\delta = 1/\alpha$, после прохождения которого интенсивность света уменьшается в $e \approx 2,7$ раз.

Для металлов значение α , как правило, составляет величину $10^4 - 10^5 \text{ см}^{-1}$, то есть энергия лазерного излучения в металлах поглощается в приповерхностном слое толщиной $10^{-5} - 10^{-4} \text{ см}$. Значение α зависит от частоты света ν , химической природы и состояния вещества. Связь α с комплексным показателем преломления поглощающего вещества имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{4nk}{\lambda} = \frac{4\pi nk\nu}{c} = \frac{2nk\omega}{c} = \frac{2\omega k}{V}, \quad (2.6)$$

где $V = c/N$ – скорость света в среде;

c – скорость света в вакууме;

N, k – оптические характеристики материала $N^2(1 - k^2)$, где ε – диэлектрическая проницаемость материала.

Для металлов $k \gg 1$, поглощение среды в этом случае называют «металлическим», если $k \ll 1$, поглощение среды типично для диэлектриков. В этом случае обычно полагают:

$$\alpha = \frac{2\omega\sqrt{\varepsilon}}{c} = \frac{4\pi\nu\sqrt{\varepsilon}}{c} = \frac{4\pi\sqrt{\varepsilon}}{\lambda}. \quad (2.7)$$

Воспринимая лазерное излучение как источник энергии в различных технологических процессах, мы должны рассматривать порождаемый им высокотемпературный практически безынерционный источник тепла, на поверхности обрабатываемого изделия, зависящий также от энергетических характеристик лазерного излучения.

Энергетический вклад лазерного излучения в различные технологические процессы определяют величины q – плотность мощности излучения, и τ – время действия излучения.

Как известно,

$$E = P \cdot \tau = q \cdot S \cdot \tau, \quad (2.8)$$

где E – энергия поглощенного излучения;

P – мощность поглощенного излучения;

S – площадь облучения.

Из (2.8) видно, что увеличение энергетического вклада в технологический процесс достигается увеличением q или τ , однако характер нагрева при этом будет различным.

Высокие скорости нагрева и остывания в зоне действия лазерного излучения характерны для импульсного режима работы лазера: чем более короткий импульс излучения τ , тем выше плотность мощности и меньше масса нагреваемого материала. При увеличении длительности импульса, а также в случае непрерывного потока лазерного излучения за счет возрастающей роли теплопроводности нагревается все большая масса материала. При этом реализуются мягкие условия нагрева и «длительного» остывания, определяемого механизмами теплопередачи и теплообмена со средой.

Известно, что в результате перехода энергии лазерного излучения в тепло начинается нагревание материала. Перенос тепла в твердом теле осуществляется механизмами теплопроводности, из которых для металлов и сильно выраженных полупроводников основным является электронная теплопроводность, а для неметаллов – решеточная. Превращение поглощенной энергии излучения в тепловую энергию материала происходит почти мгновенно (порядка 10^{-11} с), поэтому температура поверхности материала в область воздействия быстро возрастает, примерно сохраняя распределение плотности мощности в поперечном сечении лазерного пучка. Одновременно происходит перенос тепла вглубь материала. Для гауссова распределения мощности излучения в фокусе распределения температуры в материале, получаемое в результате теплопроводности, описывается зависимостью:

$$T(r, z, t) = \frac{2p}{\rho c (4\pi a)^{3/2}} \int_0^t \frac{1}{(\tau + t)\sqrt{t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at} - \frac{r^2}{4a(t + \tau)}\right) dt. \quad (2.9)$$

Температура в центре фокуса лазерного пучка на поверхности материала

$$T_0(0, 0, t) = \frac{P_0}{\pi \rho c a (4\pi a t^*)^{1/2}} \operatorname{arctg}\left(\frac{t}{t^*}\right)^{1/2}, \quad (2.10)$$

где $P_0 = q \cdot S$ – мощность излучения, введенная в материал через площадку S ;

$t^* = a / (4 R_0^2)$; R_0 – радиус пятна излучения по уровню $1/e$ от максимальной интенсивности;

c – теплоёмкость;

ρ – плотность материала;

a – коэффициент температуропроводности;
 t – текущее время.

В случае, когда теплопроводом можно пренебречь, температуру поверхности можно определить из уравнения:

$$c(T)\rho(T)\frac{dT}{dt} = A(T)\frac{qT}{\delta(T)}, \quad (2.11)$$

где c , ρ – теплоемкость и плотность материала соответственно.

Интегрируя, можно получить выражение для энергозатрат лазерного излучения, обеспечивающих нагрев поверхности до заданного значения температуры T к моменту времени t :

$$E(t) = \int_0^t q(t)dt = \int_0^T f(t)dt = F(T), \quad (2.12)$$

где $f(t) = c(T)\rho(T)\frac{\delta(T)}{A(T)} > 0$.

Выражение (2.12) можно преобразовать к виду:

$$T = F^{-1}(E(t)). \quad (2.13)$$

Порядок выполнения работы

Решить уравнение теплопроводности для твердого тела при воздействии на него лазерного излучения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a\Delta T = \frac{f(x, y, z, t)}{\rho c},$$

где T – температура в произвольной точке материала с координатами x, y, z в момент времени t ;

ρ – плотность материала;

c – удельная теплоемкость вещества.

Объемная плотность мощности лазерного излучения задается функцией:

$$f(x, y, z, t) = \alpha(x)q(y, z, t) \exp\left(-\int_0^x \alpha(x)dx\right),$$

где $q(y,z,t)$ – функция, характеризующая распределение плотности поглощения светового потока на поверхности материала и изменение его во времени.

Теплообменом облучаемой поверхности с окружающей средой можно пренебречь.

Граничное условие на поверхности ($x = 0$):

$$\frac{\partial T}{\partial x}(0, y, z, t) = 0.$$

Облучаемый образец считать полубесконечной средой, имеющей в начальный момент времени температуру T_n :

$$T(\infty, y, z, t) = T(x, y, z, 0) = T_n.$$

Полагать, что $T_n = 0$. Излучением равномерно освещается вся поверхность материала, и плотность поглощенного светового потока не меняется со временем, то есть:

$$F(x, y, z, t) = \alpha \cdot q \cdot \exp(-\alpha x).$$

Необходимые теплофизические константы материала, параметры и характеристики лазерного излучения для решения уравнения даются преподавателем.

Вопросы для самоконтроля

1. Опишите основные физические процессы при взаимодействии лазерного излучения с веществом.
2. Каково влияние оптических постоянных материала на характер взаимодействия с лазерным излучением?
3. Как происходит нагрев материалов лазерным излучением с учетом теплофизических коэффициентов?
4. Как происходит нагрев твердых материалов лазерным излучением с различными временными и энергетическими характеристиками?
5. Каковы основные теплофизические характеристики материала, их физический смысл и зависимость от температуры.
6. Запишите уравнение теплопроводности. В чём его физический смысл?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

ПОВЕРХНОСТНОЕ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

Цель работы: приобретение представлений о поверхностном лазерном термоупрочнении металлов и навыков проведения поверхностной закалки стальных образцов импульсным излучением твердотельного лазера.

Оборудование: лазерная технологическая установка, металлографический микроскоп, микротвердомер ПМТ-3, измеритель энергии ИКТ-1Н, осциллограф, порошки и реактивы для изготовления шлифов, образцов сталей У8, У10 и ХВГ.

Теоретические сведения

Поверхностным упрочнением называется упрочнение поверхностного слоя детали за счёт изменения его химического состава или структуры.

Для получения стали с наибольшей прочностью и твёрдостью необходима термическая обработка – закалка. Термообработка – это совокупность операций технологии теплового воздействия на материал с целью изменения его структуры и обеспечение необходимых эксплуатационных характеристик. Упрочнение поверхности может быть достигнуто различными способами обработки: химико-термической, плазменной, лазерной и др.

Термическое упрочнение материалов и сплавов лазерным излучением основано на локальном нагреве участка поверхности под воздействием излучения и последующем охлаждении этого поверхностного участка со сверхкритической скоростью в результате теплоотвода теплоты во внутренние слои металла. При этом время нагрева и время охлаждения незначительны, практически отсутствует выдержка при температуре нагрева. Эти условия обеспечивают высокие скорости нагрева и охлаждения обрабатываемых поверхностных участков.

Термическая обработка железоуглеродистых сплавов начинается с нагрева в область температур устойчивого существования аустенита. Конечные свойства закаленной зоны зависят от скорости и температуры нагрева, времени выдержки в

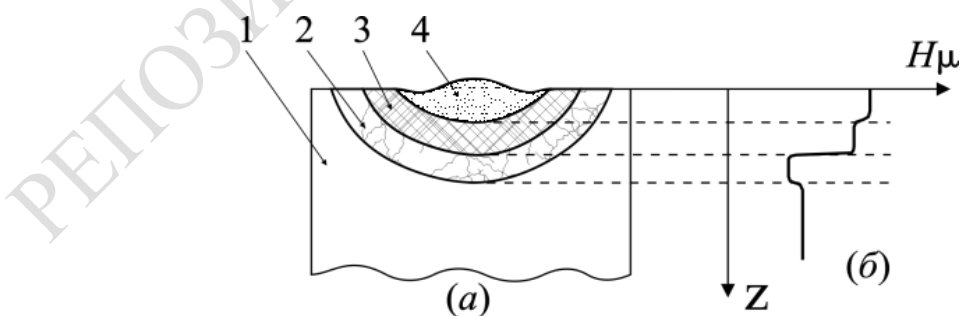
нагретом состоянии, от закона охлаждения, а также от исходной структуры (т. е. предварительной термообработки и механообработки). При лазерной закалке так же, как и при других методах интенсивного нагрева, кинетика превращения лимитируется диффузией углерода, что приводит к необходимости введения понятия сдвига критических точек температуры фазового перехода. В зависимости от структурного состояния (плотности дефектов, дисперсности и морфологии фаз) реальные температуры фазовых превращений отличаются от указанных на равновесной диаграмме состояния Fe–C. Перегрев над точкой равновесия фаз переводит систему в метастабильное состояние, и возникают зародыши высокотемпературной фазы (аустенита) без подготовительного инкубационного периода. Так как процесс образования аустенита является эндотермическим, кинетика превращений может реализовываться лишь в той мере, в какой условия теплопередачи позволяют передавать необходимое количество энергии к месту появления или роста зародыша новой фазы. При лазерном нагреве в каждом микроскопическом объеме металла термический цикл описывается своей термической кривой $T = T(t)$. Первые зародыши аустенита появляются в момент t_{al} , когда температура $T(t_{al})$ достигает равновесной температуры перехода A_{cl} . Завершение аустенизации происходит через некоторое время Δt , в момент $t_a = t_{al} + \Delta t$, и при этом температура аустенизации $T_a(t_a) = A_{cl} + \Delta T$. Таким образом, критическая точка аустенизации при быстром нагреве металла характеризуется временем протекания диффузионных процессов Δt и перегревом ΔT относительно равновесной температуры перехода. Чем больше средняя скорость нагрева $\Delta T/\Delta t$, тем быстрее происходит её $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение (Δt уменьшается) и тем выше смещается критическая точка перехода (ΔT увеличивается). Корректное описание процесса аустенизации при скоростном нагреве предполагает совместное решение тепловой и диффузионной задач с учётом характерных особенностей реального процесса диффузии углерода в стали (в частности, с учётом объёмных конфигураций различных фаз в микроструктуре, с диффузией углерода во всех фазах и движением границ фаз, с изменением коэффициента диффузии во времени и пространстве и др.).

Сущность закалки состоит в бездиффузионном превращении при быстром охлаждении гранцентрированной кубической решетки аустенита в искажённую объёмно-центрированную кубическую решетку мартенсита. Характерными особенностями мартенсита

являются его высокая твердость и прочность, с одной стороны, и низкая пластичность и склонность к хрупкому разрушению, с другой стороны. Мартенсит по сравнению с другими структурными составляющими стали, и особенно с аустенитом, имеет наибольший удельный объем, что является одной из основных причин возникновения при закалке больших внутренних напряжений, вызывающих деформацию изделий или даже появление трещин.

Превращение аустенита в мартенсит не идёт до конца, поэтому в закаленной стали наряду с мартенситом всегда присутствует в некотором количестве остаточный аустенит. Аустенит при охлаждении ниже температуры A_1 становится метастабильным и превращается в более стабильные структуры. При небольшой скорости охлаждения образуется перлит, при большей скорости – сорбит, затем троостит; наконец, при некоторой высокой скорости охлаждения (называемой критической скоростью закалки) перлитный распад аустенита становится вообще невозможным и весь аустенит переохлаждается до точки M_n . Данные о температурных интервалах протекания фазовых превращений при непрерывном охлаждении и об образующихся при этом структурных составляющих приводятся на так называемых термокинетических диаграммах.

Если рассмотреть поперечное сечение упрочненной лазерным излучением дорожки (представлено на рисунке 3.1), то в нем можно выделить несколько основных зон: зону оплава (зону закалки из жидкого состояния), зону закалки, зону отпуска и исходную структуру материала. В ряде частных случаев некоторые из этих зон могут отсутствовать (например, может отсутствовать зона оплава при закалке без оплавления поверхности или зона отпуска при закалке предварительно отожженного металла)



1 – исходный металл; 2 – зона отпуска; 3 – зона закалки;
4 – зона закалки из жидкого состояния

Рисунок 3.1 – Схема поперечного сечения зоны лазерной обработки (а) и распределения микротвердости по глубине зоны обработки (б)

Каждая зона, в свою очередь, может состоять из нескольких слоев и иметь по своему сечению различия в микроструктуре, элементном составе, соотношении составляющих ее фаз и т. п. В сталях типичным является дендритное строение зоны оплавления, причем дендриты растут перпендикулярно границе раздела в направлении отвода тепла в тело образца. Карбиды при этом обычно растворяются, и основной структурной составляющей является мартенсит.

Зоны закалки стали в твердом состоянии неоднородны по сечению. Как и следует из общих положений, в глубине наряду с мартенситом имеются элементы исходной структуры: феррит (для доэвтектоидной стали) и цементит (для эвтектоидной стали), а ближе к поверхности после охлаждения гомогенизированного аустенита формируется мартенсит и остаточный аустенит. Перекристаллизация сопровождается измельчением зерна и гомогенизацией аустенита, особенно если производить ее в течение достаточного времени без сильного перегрева, т. е. с выдержкой при температуре выше M_n . Растворение избыточного цементита при перегреве заэвтектоидных сталей приводит к повышению доли остаточного аустенита и к понижению микротвердости по сравнению с зоной оптимального нагрева, содержащей наряду с мартенситом нерастворенные карбиды.

Поскольку лазерное излучение воздействует на зону малого объема, то наиболее удобным параметром, описывающим изменения, протекающие по глубине зоны лазерного воздействия (ЗЛВ), может служить микротвердость. Глубина ЗЛВ зависит от ряда факторов: вида обрабатываемого материала, характера предварительной термической обработки, типа излучения, режимов лазерной обработки. Также важным параметром процесса упрочнений излучением импульсных лазеров является коэффициент перекрытия или шаг обработки. На выбор этого параметра влияет ряд ограничений: размер упрочненной и неупрочненной зон, шероховатость упрочненной поверхности, толщина слоя равномерного упрочнения, производительность процесса.

Исходя из того, какой из указанных факторов является лимитирующим, устанавливается максимально возможный коэффициент перекрытия, при котором лимитирующий фактор будет находиться в оптимальных пределах. Поэтому коэффициент перекрытия выбирают по лимитирующему фактору. Можно рекомендовать некоторую оптимальную величину коэффициента перекрытия, при которой все ограничивающие факторы выдерживаются в допустимых пределах. Наибольшее влияние на процесс формирования упрочненного слоя оказывают такие энергетические параметры излучения: энергия импульса, диаметр пятна фокусирования и

длительность импульса, они и определяют плотность мощности излучения. Эти параметры используют при работе с импульсным технологическим оборудованием.

Схема обработки поверхности образца импульсным лазерным излучением представлена на рисунке 3.2. Обработка может проводиться как одиночными пятнами, так и «дорожками» из пятен с коэффициентом перекрытия 50 %.

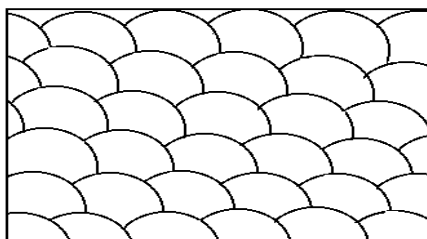
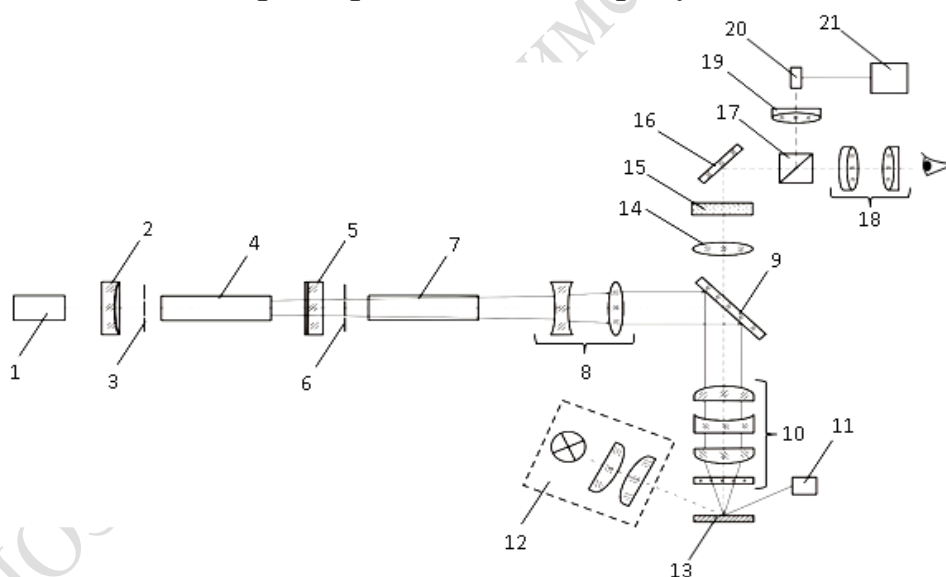


Рисунок 3.2 – Схема обработки поверхности излучением импульсного лазера

Для термообработки используется лазерная установка, оптическая схема которой представлена на рисунке 3.3.



- 1 – гелий-неоновый лазер; 2 – зеркало резонатора; 3 – электромеханический шаттер; 4 – активный элемент генератора из АИГ: ND^{+3} ; 5 – зеркало резонатора; 6 – электромеханический шаттер; 7 – активный элемент усилителя;
- 8 – телескопическая система; 9 – поворотное интерференционное зеркало;
- 10 – фокусирующий объектив; 11 – устройство подачи газа;
- 12 – система подсветки; 13 – плоскость обработки; 14 – корректирующая линза;
- 15 – светофильтр; 16 – поворотное зеркало и бинокляр;
- 17 – светоделительная призма; 18 – окуляр; 19, 20 – объектив и видеокамера;
- 21 – монитор

Рисунок 3.3 – Оптическая схема лазерной технологической установки

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. СКОРИНЫ

В состав установки входят: лазерный излучатель, визуальный канал и объектив, которые при совместном использовании позволяют изменять диаметр пятна лазерного пучка в зоне обработки от (0,1 до $3 \cdot 10^{-3}$) м, а также проводить наблюдение за процессом обработки при использовании монокуляра и монитора. Блок питания и система охлаждения лазера смонтированы в стойке. Для обработки материалов по заданному контуру в установке используется двухпозиционный координатный стол с устройством вращения (для обработки изделий цилиндрической формы) и возможностью управления от персонального компьютера.

Источником питания лазерной установки обеспечивается работа двух импульсных ламп с разрядным промежутком до $120 \cdot 10^{-3}$ м. Максимальная амплитуда выходного тока – 500 А. Диапазон регулировки амплитуды выходного тока – от 50 А до 500 А. Напряжение заряда накопительной батареи конденсаторов – не менее 650В. Максимальная суммарная средняя мощность источника питания при работе двух разрядных каналов – не менее 12 кВт. Максимальная частота повторения импульсов тока – не менее 100 Гц. Лазерное излучение в излучателе генерируется в кристаллах АИГ: Nd^{+3} расположенных последовательно по схеме «генератор – усилитель накачиваемых световым излучением импульсных ламп». Размер активных элементов $6,3 \times 130 \cdot 10^{-3}$ м. Длина волны излучения 1,064 мкм, а максимальное значение средней мощности 400 Вт. Диаметр лазерного пучка на выходе из резонатора $6 \cdot 10^{-3}$ м. Диапазон изменения длительности импульсов генерации – от 0,25 до $20 \cdot 10^{-3}$ с.

Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство и принцип работы лазерной технологической установки, металлографического микроскопа, микротвердомера ПМТ-3 и методику изготовления микрошлифов.
2. Включить установку согласно инструкции по эксплуатации.
3. Провести термообработку образцов сталей У8, У10, и ХВГ на воздухе и в среде аргона.
4. Измерить микротвердость H_{100} кг/мм²: исходную и после закалки.
5. Определить глубину закаленного слоя.
6. Измерить микротвердость закаленного слоя по глубине и поверхности образца.
7. Составить отчет о проделанной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите достоинства и недостатки существующих методов поверхностного упрочнения металлов.
2. Каков механизм термического упрочнения металлов лазерным излучением?
3. Какие структурные изменения происходят в зоне лазерного воздействия в процессе лазерного термоупрочнения?
4. Какие факторы определяют глубину зоны лазерного воздействия?
5. Назовите ограничения, влияющие на коэффициент перекрытия.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

ЛАЗЕРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СТЕКЛА МЕТОДОМ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ

Цель работы: изучение процесса лазерного управляемого термораскалывания стекла, отработка технологических режимов резки стекла.

Оборудование: CO₂ – лазер мощностью излучения 35 Вт, комбинированная сфероцилиндрическая линза из NaCl, форсунка для подачи хладагента в зону обработки, координатный стол с плавной регулировкой скорости перемещения, измеритель мощности лазерного излучения, образцы стекла.

Теоретические сведения

Процесс лазерного управляемого термораскалывания заключается в следующем. Если изделие из стекла перемещать относительно лазерного луча достаточной мощности, нагревающего поверхность стекла до температуры, превышающей предел термостойкости, но не больше температуры стеклования, то при определенных условиях на некотором расстоянии от луча в стекле возникает трещина, которая следует за лучом лазера. Лазерный луч как бы «ведет» за собой трещину, обеспечивая возможность вырезания изделий из стекла теоретически любой формы, хотя практически имеются ограничения. В процессе облучения стекла

лазерным лучом прогревается очень тонкий поверхностный слой, в результате чего в поверхностном слое наводится большой градиент температуры, вызывающий значительные напряжения, превышающие предел прочности стекла. Слабая теплопроводность стекла обуславливает небольшую скорость распространения действия термонапряжений по сравнению с возможными скоростями перемещения лазерного луча вдоль поверхности стекла, и разрушение стекла происходит с некоторым запаздыванием. Появление трещины в стекле под воздействием лазерного излучения должно наступить в тот момент, когда температурный перепад в e раз устанавливается по всей толщине стекла H , т. е.

$$\sqrt{4at} = H. \quad (4.1)$$

Это значит, что через время t и при выполнении условия (4.1) практически по всей толщине стекло будет разогрето до температуры, превышающей предел термостойкости.

Пока стекло прогревается до такой степени, чтобы обеспечить условие (4.1), лазерный луч успевает уйти вперед на расстояние $l = V \cdot t$.

Подставляя значение t из (4.1), получаем выражение для длины запаздывания начала трещины от неподвижной точки облучения поверхности стекла:

$$l = \frac{H^2 V}{4a}. \quad (4.2)$$

Решая (4.2) относительно V , получим выражение для скорости управляемого термораскалывания стекла:

$$V = \frac{4al}{H^2}. \quad (4.3)$$

Как следует из (4.3), скорость термораскалывания прямо пропорциональна температуропроводности материала и обратно пропорциональна квадрату его толщины.

С другой стороны, скорость V определяется плотностью мощности лазерного излучения. Выражение для мощности лазерного излучения, необходимой для обеспечения управляемого термораскалывания стекла с заданной скоростью выглядит следующим образом:

$$P = 2,85 \cdot T_c \cdot \sqrt{H^3 \lambda \rho c V}, \quad (4.4)$$

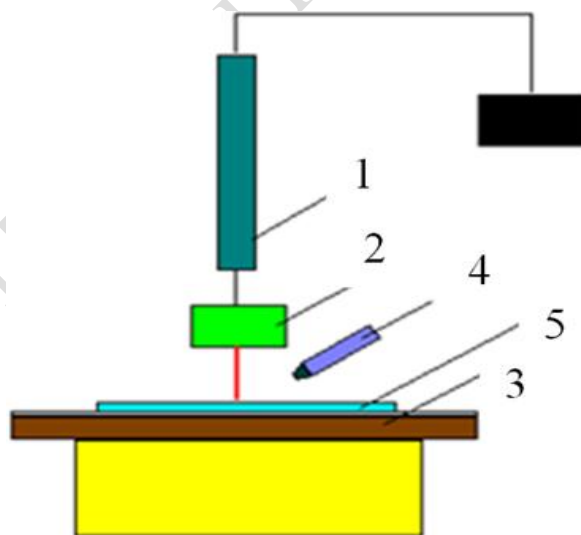
где T_c – температура стеклования;

H – толщина материала;
 λ – коэффициент теплопроводности материала;
 ρ – плотность материала;
 V – скорость термораскалывания;
 c – удельная теплоемкость.

Таким образом, зная размеры и характеристики подлежащего обработке стекла, можно используя (4.3) и (4.4) рассчитать режим управляемого термораскалывания.

Большое значение при осуществлении управляемого термораскалывания имеет форма пятна, формируемого лазерным лучом на поверхности материала. Экспериментально установлено, что для качественного термораскалывания, кроме описанных ранее условий, необходимо также, чтобы форма лазерного пятна на поверхности стекла имела вид эллипса, вытянутого в направлении разделения. Геометрические размеры лазерного пятна должны быть соизмеримы с толщиной стекла.

Исследование процесса лазерного управляемого термораскалывания выполняют на установке, схема которой представлена на рисунке 4.1. На рисунке 4.2 показана форма лазерного пучка 1 на поверхности стекла, а также зона воздействия хладагента 2, следующего за лазерным пятном.



1 – CO₂-лазер с блоком питания; 2 – формирующая оптическая система;
3 – координатный стол с плавной регулировкой скорости перемещения относительно лазерного луча; 4 – форсунка для подачи хладагента в зону обработки стекла; 5 – образец из стекла для проведения исследований

Рисунок 4.1 – Установка лазерного термораскалывания стекла

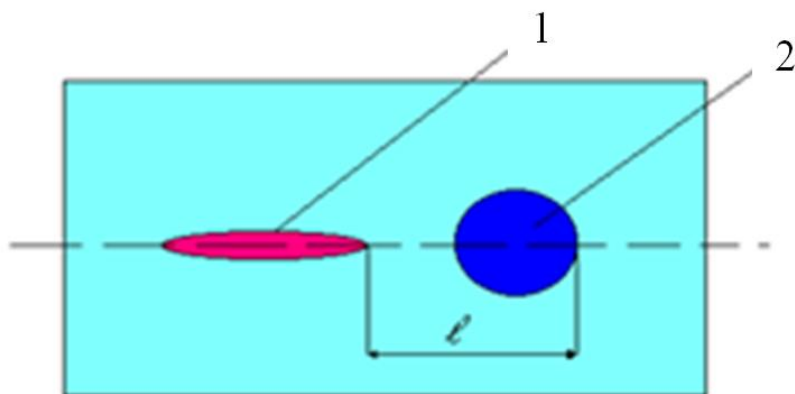


Рисунок 4.2 – Форма лазерного пятна на поверхности стекла (1), зона подачи хладагента (2)

Порядок выполнения работы

1. Подключить контур охлаждения для CO_2 – лазера. Включить блокпитания лазера и установить ток 35 мА.

2. Рассчитать по формулам (4.1)–(4.4.) величины l , V и P , зная, что H – заданная величина.

3. Зная теоретически рассчитанный режим управляемого термораскалывания для заданного образца из стекла, провести экспериментальные исследования процесса управляемого термораскалывания, изменяя плотность мощности лазерного пучка и регулируя скорость перемещения координатного стола. Выполнить указанные операции для двух других заданных образцов стекла.

4. Результаты теоретического расчета, а также экспериментальных исследований занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Режимы управляемого лазерного термораскалывания стекла

Вид материала	Размеры образцов, мм		Мощность излучения, Вт		Скорость перемещения, мм/с		Отставание трещины
	толщина	поперечные размеры	расчёт	эксперимент	расчёт	эксперимент	

5. По данным таблицы 4.1 построить график зависимости величины отставания трещины от скорости перемещения образца.

6. Сравнить полученные экспериментально результаты с теоретическими.

7. Составить отчет о проделанной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы условия возникновения управляемой трещины в стекле под действием лазерного излучения?

2. Каковы условия искривления трещины?

3. Как проявляется влияние формы пучка лазера на качество обработки?

4. Назовите способы увеличения эффективности разделения методом лазерного управляемого термораскалывания.

5. Каковы причины, обуславливающие форму лазерного пучка на поверхности при лазерном управляемом термораскалывании?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

ЛАЗЕРНОЕ СКРАЙБИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: исследование процессов лазерного скрайбирования диэлектрических материалов.

Оборудование: лазер на алюмо–иттриевом гранате, работающий в режиме модулированной добротности резонатора, оптическая система для фокусировки лазерного пучка, измерительный микроскоп, координатный стол с ЧПУ, измеритель мощности, осциллограф.

Теоретические сведения

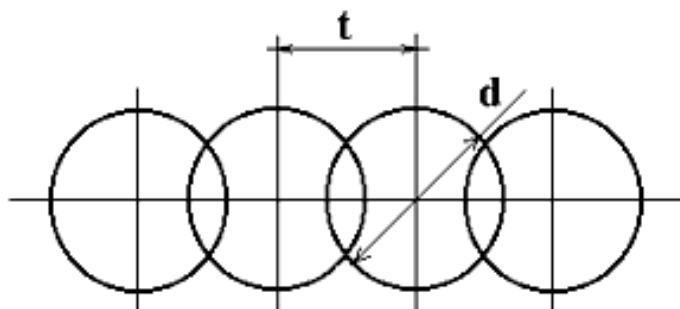
При воздействии импульса сфокусированного лазерного излучения на обрабатываемую поверхность образуется лунка.

Вследствие относительного перемещения излучения или пластины лунки частично совмещаются, образуя сплошную риску на поверхности пластины, что уменьшает местную прочность материала. Снижение местной прочности при нанесении лазерной риски

происходит под действием трех факторов: уменьшения площади поперечного сечения пластин, образования концентратора напряжения и изменения прочности слоя материала вблизи риски под действием лазерного излучения. Схема образования риски показана на рисунке 5.1, где d – диаметр отдельной лунки, а t – расстояние между центрами соседних лунок. Ширина реза равна диаметру пятна излучения в фокальной плоскости, а скорость нанесения риски или скорость скрайбирования

$$V = t \cdot f, \quad (5.1)$$

где f – частота следования импульсов.



d – диаметр отдельной лунки;
 t – расстояние между центрами соседних лунок

Рисунок 5.1 – Схема образования риски

Характеристикой степени совмещения отдельных лунок является коэффициент наложения

$$K = (d - t) / d. \quad (5.2)$$

отсюда скорость скрайбирования:

$$V = f \cdot d (1 - K). \quad (5.3)$$

При $K > 0,5$ на точки, расположенные на линии центров отдельных лунок, воздействует больше одного импульса. Усредненное число импульсов, воздействующих на одну точку:

$$N = 1 / (1 - K). \quad (5.4)$$

В случае одномодового режима генерации интенсивность излучения в пятне распределяется по закону Гаусса, а так как центр фокального пятна перемещается относительно фиксированной точки, то очевидно, что вклад каждого последующего импульса в увеличении глубины риски различен. Максимальный вклад вносит

импульс, центр пятна которого совпадает с данной точкой. Экспериментально установлено, что глубина скрайбирования квазилинейно увеличивается с увеличением числа импульсов и коэффициента наложения при постоянной плотности мощности лазерного излучения. Кроме того, известно, что для каждого значения глубины риски h зависимость скорости скрайбирования от частоты следования импульсов $V = F(f)$ имеет максимум. Это свидетельствует о том, что для скрайбирования на заданную глубину всегда можно определить частоту и коэффициент наложения, обеспечивающие максимальную скорость скрайбирования.

Лазерное скрайбирование полупроводниковых пластин

Скрайбирование пластин из кремния, арсенида галлия и других материалов для последующего разделения пластин на отдельные элементы по линии надреза позволяет увеличить выход годных изделий, что даст очень большую экономию. Увеличение производительности за счет большой скорости скрайбирования также значительно уменьшает стоимость продукции.

Для скрайбирования полупроводниковых пластин используют исключительно YAG-лазеры (ИАГ-лазеры) непрерывного действия с модуляцией добротности (длина волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм, продолжительность импульса лазерного излучения 0,15–0,3 мкс, частота следования импульсов 1–40 кГц, средняя мощность последовательности импульсов 0,5–16 Вт при мощности в импульсе 1–20 кВт. При этом глубина надреза, выполненного пучком сфокусированного лазерного излучения, составляет 40–125 мкм, а ширина 20–40 мкм при толщине пластины 150–300 мкм. Скорость скрайбирования обычно 10–15 см/с. Возможно также полное разделение пластины.

Большая плотность мощности 10^8 – 10^9 Вт/см² вызывает плавление и кремния, и арсенида галлия (температура в месте воздействия сфокусированного лазерного пучка при скрайбировании составляет 2 000 °С). Очень малая продолжительность лазерного импульса и быстрое перемещение разрезаемой пластины (относительно сфокусированного лазерного пучка) является причиной того, что тепло, выделяющееся в прилегающую к надрезу область материала полупроводника, не вызывает существенных изменений в нем. Зона термического воздействия в прилегающем к надрезу слое полупроводника вообще не более 50 мкм. Существует экспериментально установленные зависимости оптимальной

плотности мощности q для скрайбирования на заданную глубину (рисунок 5.2) и мощности в импульсе лазерного излучения в зависимости от частоты следования лазерных импульсов (рисунок 5.3).

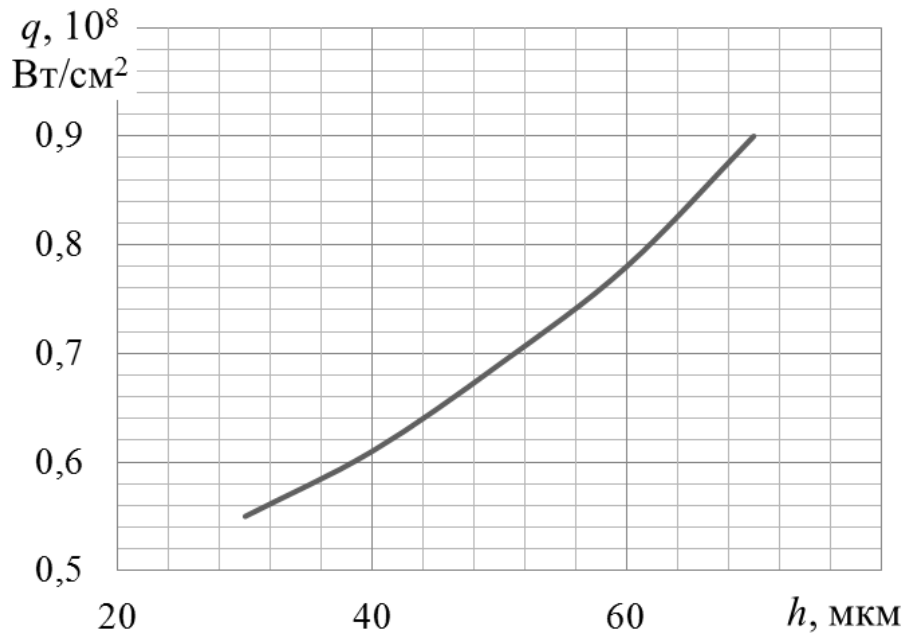


Рисунок 5.2 – Зависимость оптимальной плотности мощности лазерного излучения для скрайбирования на заданную глубину

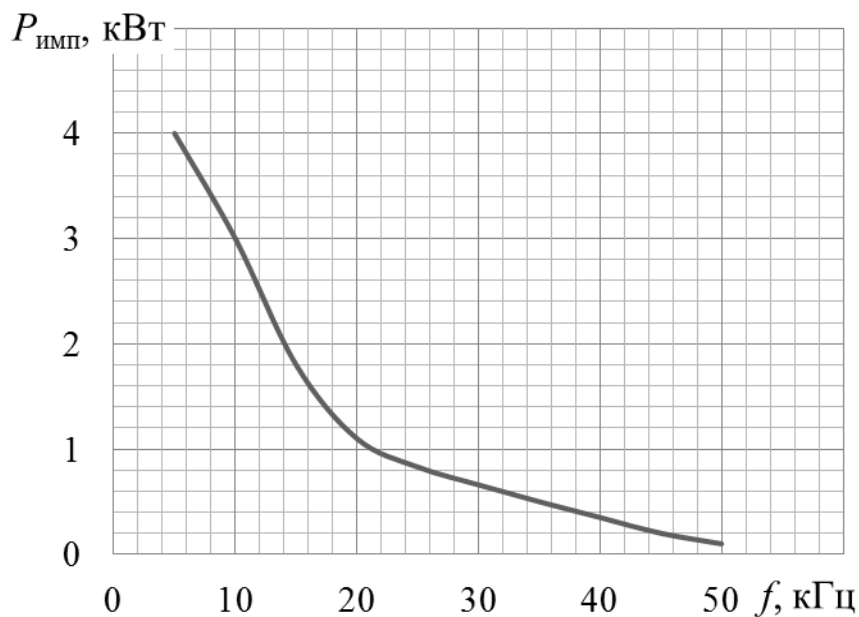


Рисунок 5.3 – Зависимость мощности в импульсе лазерного излучения от частоты следования импульсов

Во время скрайбирования лазером часть удаляемого полупроводника может оседать около надреза на поверхности пластины. Эти загрязнения можно удалить, например, поместив надрезанные пластины в ультразвуковую ванну. Кроме того, разработаны специальные предохраняющие покрытия, которые наносят на поверхность пластины перед скрайбированием и удаляют после него. Чтобы избежать загрязнения поверхности со структурами, применяют скрайбирование во избежание повреждения структур при разламывании.

Лазерное скрайбирование керамических пластин

Скрайбирование керамических пластин с нанесенными структурами или без структур производят для деления их на модули вдоль линии надреза. Для лазерного скрайбирования пластин из электрокорундовой или бериллиевой керамики применяют CO_2 или ИАГ-лазеры, работающие в импульсном режиме с большей частотой следования импульсов.

Скрайбирование с применением CO_2 -лазера заключается в выполнении вдоль линии раздела пластины ряда несквозных отверстий диаметром 75–200 мкм и глубиной 100–200 мкм на расстоянии друг от друга 75–200 мкм, при этом средняя мощность пучка излучения CO_2 -лазера 20–50 Вт и мощность в импульсе 40–150 Вт. Продолжительность импульсов 0,1–5 мс, а частота повторения от 100 Гц до 1 кГц. Излучение с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм (CO_2 -лазер) лучше поглощается керамикой, чем излучение с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм (ИАГ-лазеры), что говорит в пользу применения CO_2 -лазеров. Однако неодимовые и ИАГ-лазеры испускают излучение, которое можно сфокусировать (длина волны в 10 раз меньше), что при большей мощности лазерных импульсов (до 40 кВт) и большей их частоте (до 40–50 кГц) также обеспечивает хорошие результаты скрайбирования. И еще одним очень важным преимуществом обладают неодимовые и ИАГ-лазеры – возможность использования стеклянных фокусирующих объективов.

При использовании ИАГ-лазеров для скрайбирования керамических пластин получается непрерывный надрез; возможно даже полное разделение пластины из-за большой частоты и большой мощности лазерных импульсов.

Кроме керамики, возможно надрезать методом лазерного скрайбирования пластины из сапфира, стекла и других диэлектрических материалов.

Исследование процесса лазерного скрайбирования выполняют на установке, содержащей лазер на ИАГ, средняя мощность излучения – 5–10 Вт, частота следования импульсов – 1–50 кГц, максимальная импульсная мощность – 3–10 кВт при длительности импульса 100–600 нс.

Порядок выполнения работы

1. Включить лазерную технологическую установку согласно техническому описанию.

2. Для скрайбирования образцов из керамики толщиной 0,5 и 1,0 мм из графика зависимости оптимальной плотности мощности $q_{над. опт} = F(h)$, приведенного на рисунке 5.2, определить значение $q_{над.}$, необходимое для скрайбирования на заданную глубину h .

3. Импульсную мощность излучения найти из соотношения:

$$P_{имп} = q_{над. опт} \cdot \pi d^2 / 4 \text{ Вт.}$$

4. Из графика зависимости $P_{имп} = F(f)$, приведенного на рисунке 5.3, определить частоту следования импульсов излучения.

5. Значение скорости скрайбирования рассчитать для коэффициента наложения K , указанного преподавателем по формуле:

$$V = d \cdot f \cdot (1 - K) \text{ см/с.}$$

6. Провести экспериментальные исследования процесса лазерного скрайбирования для керамики толщиной 0,5 и 1,0 мм.

7. Результаты эксперимента по лазерному скрайбированию керамики занести в таблицу 5.1.

8. Составить отчет о проделанной работе.

Таблица 5.1 – Режимы лазерного скрайбирования керамических пластин

Вид материала	Толщина, мм	Скорость скрайбирования, см/с	Частота следования импульсов, кГц	Средняя мощность лазерного пучка, Вт

Вопросы для самоконтроля

1. Какова область применения метода лазерного скрайбирования, в чём его преимущества?
2. Что такое лазерное скрайбирование полупроводниковых материалов и керамики?
3. Какова зависимость скорости и глубины скрайбирования от частоты следования импульсов и мощности лазерного излучения?
4. Как проводится скрайбирование диэлектрических материалов с применением CO_2 – лазера и лазера на ИАГ?
5. Назовите недостатки лазерного скрайбирования.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скоринь

ЛИТЕРАТУРА

1. Мышковец, В. Н. Лазерная технология обработки материалов : лабораторный практикум / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2001. – 83 с.
2. Мышковец, В. Н. Методы поверхностной лазерной обработки металлов и сплавов : лабораторный практикум / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Ю. В. Никитюк. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2013. – 87 с.
3. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц; под ред. А. Г. Григорьянца, И. Н. Шиганова, А. И. Мисюрова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 73 с.
4. Шахно, Е. А. Математические методы описания лазерных технологий : учеб. пособие / Е. А. Шахно. – СПб : ГУИТМО, 2002. – 82 с.
5. Вейко, В. П. Лазерные микро– и нанотехнологии в микроэлектронике / В. П. Вейко. – Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2011. – 141 с.
6. Делоне, И. Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом : курс лекций / И. Б. Делоне. – М. : Наука, 1980. – 280 с.
7. Действие излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов [и др.]. – М. : Наука, 1970. – 207 с.
8. Вейко, В. П. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии». Раздел: Введение в лазерные технологии / В. П. Вейко. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2009 – 143 с.
9. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А. М. Прохоров [и др.]. – Бухарест : Academiei; М. : Наука, 1988. – 537 с.
10. Альтудов, Ю. К. Лазерные микротехнологии и их применения в электронике / Ю. К. Альтудов, А. Г. Гарицын. – М. : Наука, 2001. – 632 с.
11. Климков, Ю. М. Лазерная техника : учеб. пособие / Ю. М. Климков, М. В. Хорошев. – М. : МИИГАиК, 2014. – 143 с.
12. Мурзин, С. П. Лазерные технологии обработки материалов : учеб. пособие / С. П. Мурзин, В. Н. Илюхин. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 98 с.
13. Ковалев, О. Б. Физические основы лазерной резки тонких листовых материалов / О. Б. Ковалев, В. М. Фомин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 256 с.

Производственно-практическое издание

**Мышковец Виктор Николаевич,
Купо Александр Николаевич,
Максименко Александр Васильевич,
Баевич Георгий Александрович**

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

**Физические основы взаимодействия
лазерного излучения
с материалами электронной техники**

Практическое пособие

Редактор *В. И. Шкредова*
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 17.06.2019. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,3.
Уч.-изд. л. 2,5. Тираж 25 экз. Заказ 505.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.

