

### В.П. Вейко, Е.А. Шахно

# **ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** В ЗАДАЧАХ И ПРИМЕРАХ

Учебное пособие



Санкт-Петербург 2014

## МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

# В.П. Вейко, Е.А.Шахно ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ И ПРИМЕРАХ

Учебное пособие

Издание посвящено 50-летию создания лаборатории лазерных технологий в Университете ИТМО



Санкт-Петербург 2014 Вейко В.П., Шахно Е.А. Лазерные технологии в задачах и примерах: Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 88 с.

Настоящее учебное пособие представляет собой оригинальную попытку изложения основных разделов лазерных технологий с позиций компетентностного подхода к их изучению: краткие теоретические сведения подкреплены примерами решений и сопровождаются большим количеством задач для самостоятельной работы студентов. В первых 3-х разделах пособия рассмотрены общие для различных лазерных технологий вопросы: характеристики технологических лазеров и лазерного излучения, оптические схемы лазерной обработки, основные физические процессы лазерной обработки. В дальнейших 5 разделах рассмотрены вопросы, относящиеся к конкретным приложениям: резка, сверление отверстий, термоупрочнение, сварка, обработка пленочных элементов, очистка поверхностей, медицинские технологии и др. В приложении даны основные теплофизические и оптические свойства некоторых материалов.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники для межвузовского использования в качестве учебного пособия для обучения бакалавров и магистров по направлениям 12.03.05 и 12.04.05 (200500) «Лазерная техника и лазерные технологии».



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкуренто-способности российских университетов среди ведущих мировых научнообразовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2014

© В.П. Вейко, Е.А.Шахно

### Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ4
ВВЕДЕНИЕ8
РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ13
РАЗДЕЛ 2. ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ21
РАЗДЕЛ 3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
РАЗДЕЛ 4. ЛАЗЕРНАЯ МИКРООБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ41
РАЗДЕЛ 5. ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ И СВАРКА50
РАЗДЕЛ 6. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ58
РАЗДЕЛ 7. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ66
РАЗДЕЛ 8. НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ 75
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ82
ПРИЛОЖЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ
ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ84

#### Предисловие

Система высшего образования в нашей стране в настоящее время находится в процессе поиска новой, оптимальной образовательной модели. Необходимость смены образовательной модели кроется как в значительном ускорении научно-технического прогресса, когда знания могут устаревать до начала их использования, так и в смене экономической модели общества. Считается, что молодой специалист должен прийти на производство не только имеющим знания, но и способным их применить. С этой целью квалификационная модель образования: знания-умения-навыки, которая ранее являлась основой высшего образования, заменяется на компетентностную, куда входят не только профессиональные, но и социально-личностные, и другие компетенции, позволяющие выпускнику ВУЗа сразу включиться в активную профессиональную деятельность. Система образования в этой модели должна быть нацелена на привитие указанных компетенций в процессе обучения. В этом смысле обучение через разбор лучших методов примеров и самостоятельное решение задач является одним из достижений указанных целей. Решение реальных проектных задач одновременно с повышением профессионального уровня многократно увеличивает мотивацию студентов, прививает навыки организации творческой деятельности, и изменяет оценку полученных знаний с их наличия на способность их использования, что, собственно, и является целью новой образовательной модели.

Обучение посредством решения задач — это достаточно традиционная технология в таких областях знаний, как математика и физика. Если же говорить о технологиях обработки материалов вообще и о лазерных технологиях в частности, то такие прецеденты авторам неизвестны. Связано это, скорее всего, со сложностью и многофакторностью технологий вообще и комплексностью лазерных технологий, когда надо быть специалистом и в лазерной технике, и в оптике, и в физике, и в материаловедении, и т.п. К счастью, именно в лазерных технологиях ситуация частично облегчается достаточной разработанностью теории, как взаимодействия света с веществом и преобразования световых пучков, так и теорией самих лазеров.

Так или иначе, авторы столкнулись с проблемами уже при формировании структуры пособия. В том виде, в каком она представлена, она отражает подход к лазерным технологиям, который сложился в Университете ИТМО, начиная с создания инициативной (1965 г.), а затем проблемной лаборатории (1975 г.) и, наконец, кафедры лазерных технологий (1980 г.) и Ведущей научной школы РФ «Фундаментальные основы лазерных микро- и нанотехнологий» при проведении научной и учебной работы в различных конкретных направлениях лазерных технологий (ЛТ). Таким образом, в 2015 г. исполняется 50 лет с начала исследований и разработок лазерных технологий в ИТМО.

Мы полагаем, что «материк» лазерных технологий (рисунок), на котором «произрастают» различные конкретные процессы, базируется на

трех китах, изображенных на рисунке – лазерах, оптике и взаимодействии излучения с веществом.



Для разработки любого конкретного процесса лазерных технологий надо решить 3 задачи:

- 1) Какие свойства взаимодействия (действия) лазерного излучения с веществом (на вещество) должны быть выбраны для достижения цели (резонансные нерезонансные, поглощение рассеяние, фото- или термопоглощение, нагревание, закалка, плавление, размягчение, испарение, разложение, коагуляция и т.д.). Решить этот вопрос вероятно, наиболее важная часть разработки. Эти знания должны дать возможность сделать обоснованные предложения для выбора лазерного источника (задача 2) и оптической системы (задача 3), а также снизить реальные затраты времени на эксперимент и средств на разработку всего процесса (потому что «хорошая теория это весьма выгодная вещь!»).
- 2) Какой тип лазерного источника нужно использовать для достижения поставленной цели (длина волны, режим операции непрерывный или импульсно-частотный, мощность, продолжительность импульса, поперечное распределение энергии в пучке, когерентность, монохроматичность, поляризация и т.д. с учетом надежности, устойчивости процесса и его стоимости). И как рассчитать и проверить эти параметры?
- 3) Какие требования к поперечной и продольной форме пучка следует предъявить, и какие оптико-механические, оптико-электронные, и т.п. системы необходимы для решения поставленной задачи? Так как оптический пучок при лазерной обработке это инструмент, то он должен быть соответствующим образом организован во времени и пространстве. Оптические системы: линзы, объективы, зеркала, электромеханические, акустооптические, оптико-механические сканеры и системы, управляющие диафрагмами,— определяют размеры и форму (размер пятна в фокусе, форму поперечного сечения, форму каустики) лазерного пучка.

Специальная оптика, оптико-механические, оптико-акустические, электро-оптические и другие модуляторы могут регулировать длительность воздействия. Одновременно приходится решать задачи передачи лазерной

энергии (в свободном пространстве или по оптоволокну, и т.д.) и его коллимации, фокусировки или проецирования пучка и т.д.

Этот подход, основанный на многолетнем опыте разработок систем и процессов различных лазерных технологий, реализован и в предлагаемом учебнике, где вслед за рассмотрением некоторых характерных примеров применения лазерных технологий основное внимание уделено:

- физическим процессам при лазерной обработке материалов,
- параметрам технологических лазеров и лазерного излучения,
- оптическим системам лазерной обработки.

Заметим, что рассмотрение этих вопросов применительно почти к любой лазерной технологии, будь то резка металлов или обработка тонких пленок, приварка отслоившейся сетчатки глаза или лечение кариеса зубов, очистка скульптур или создание трехмерных изделий, является важнейшим этапом разработки процесса.

В связи со спецификой Университета ИТМО, в пособии нашли меньшее отражение вопросы мощной лазерной техники, оптики и технологии, которые, конечно, имеют свою специфику. Наконец, нельзя объять необъятное и, в частности, объять все известные лазерные технологии, включая такие экзотические пока, как лазерное разглаживание морщин и полировка роговицы глаза, лазерную реактивную тягу, лазерный термоядерный синтез и т.п. Кроме того, следует оговорить, что термин «лазерные технологии» в настоящее время имеет расширительное толкование, так что его относят и к информационным, и к разнообразным медицинским лазерным технологиям и т.д. В настоящем издании мы ограничились традиционной областью применения лазерных технологий для обработки материалов, в том числе биотканей, связанной с силовым действием лазерного излучения [27].

Издание основано на многолетнем опыте преподавания с использованием указанных (и других) задач курса «Физико-технические основы лазерной технологии» и в соответствии с его программой. И в этой области авторы остановились лишь на основах — технологических лазерах и лазерном излучении, оптических схемах и системах для работы с лазерами, воздействии лазерного излучения на вещество — и наиболее общих технологиях, таких как лазерная резка и сверление отверстий, сварка и термообработка, лазерная обработка тонких пленок. Хотелось бы заметить, что подавляющее число задач, представленных ниже, продиктованы потребностями практики и взяты из совершенно конкретных проектов, а не «высосаны из пальца». Собственно перечислению задач в каждом разделе предшествует краткое изложение основных теоретических сведений, которые не заменяют курс лекций, но должны освежать в памяти некоторые его фрагменты.

Опыт использования трех предыдущих изданий сборника задач подтвердил его эффективность. В настоящем пособии несколько смещены акценты в сторону добавления новых учебных материалов, исправлены замеченные ошибки и опечатки. Добавлены два новых раздела «Лазерные технологии в медицине» и «Некоторые другие применения лазерной обработки»,

добавлены новые задачи во второй и третий разделы. Все задачи разделены на два уровня, задачи первого уровня предназначены для подготовки бакалавров, второго — магистров. Авторы надеются расширять проблематику пособия и в будущем.

Авторы благодарят всех студентов специальности «Лазерная техника и лазерные технологии», начиная с 1995 г., аккуратно, а иногда и творчески решивших задачи, защитивших и сдавших их преподавателям, а также всех сотрудников кафедры ЛТ, внесших посильный вклад в создание данного учебного пособия.

Авторы вполне отдают себе отчет в том, что, несмотря на многократные проверки, в текст пособия вполне могли вкрасться различные недочеты, начиная от опечаток и кончая недостатком или избытком отдельных данных, условий и т.п. Авторы будут благодарны за все замечания по существу и по оформлению задачника. Они особенно надеются, что атмосфера творчества и сотворчества, возникшая при составлении задачника, частично присутствует в тексте и будет способствовать предложению преподавателями и студентами новых задач и тем.

Все замечания и предложения можно посылать на имя авторов в Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр., 49, Университет ИТМО или по электронной почте veiko@lastech.ifmo.ru.

#### Введение

Прежде, чем приступить собственно к изложению основных разделов учебного пособия — основных теоретических сведений, примеров решений и самих задач, предлагаем краткий обзор состояния современного лазерного рынка. По нашему замыслу, обзор должен дать представления об основных сегментах лазерного рынка и тенденциях последних лет.

Для правильного понимания места лазерных технологий и их роли в современном обществе (не только в промышленности, но и в медицине, информационном секторе, связи, оборонном секторе, а также в других сферах жизни) рассмотрим уровень развития основных критических технологий в мире и в России (рисунок 1), сложившийся к 2005 году (по версии Минобороны России, опубликованной в «Независимой газете»).

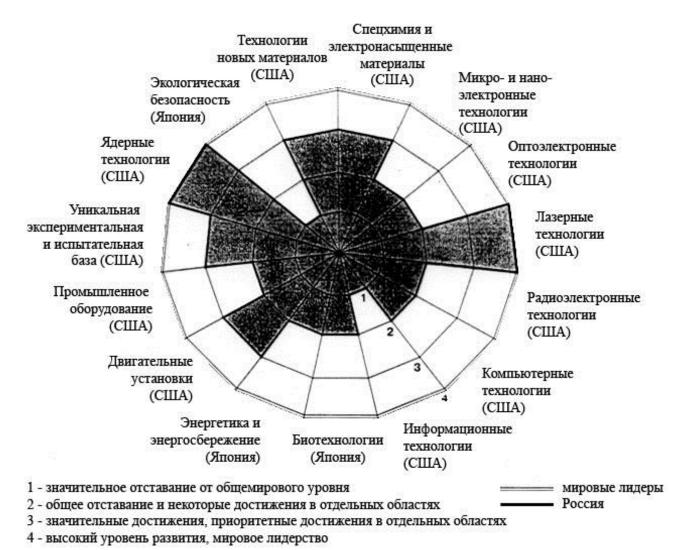


Рисунок 1. Схема уровней развития основных критических технологий в мире и в России.

Хотя приведенная схема, на наш взгляд, не вполне отражает современное положение вещей, тем не менее, из нее можно сделать два наиболее важных для нас вывода:

- 1) лазерные технологии относятся к списку критически важных для независимого развития государства (что справедливо, на наш взгляд, и сейчас),
- 2) уровень развития лазерных технологий в России сравним с уровнем наиболее развитых стран.

Мы полагаем, что следует присоединиться к существующему мнению о том, что фотоны являются основной инновационной движущей силой XXI века в промышленной обработке материалов, в науке о материалах и медицине, в способности обеспечить электрическую энергию, освещение и инфраструктуру связи и коммуникаций. Фотоника в целом, и лазерные технологии, как ее часть, уже обеспечили новые материалы и технологии, на основе которых появились: дешевая фотоэлектрическая энергия (солнечные элементы) — новое светодиодное освещение — волоконная оптическая связь — новая медицина, что, взятое вместе с информационными технологиями, ведет к грядущей трансформации и к преобразующей информатизации нашего общества.

#### Производственные лазерные технологии и системы

Лазерные технологии, позволяющие автоматизировать многие промышленные процессы, обеспечивающие высокую производительность обработки материалов и при этом существенное энергосбережение и экологическую чистоту, к которым сегодня стремится мир, останутся активно востребованными при любой экономической конъюнктуре, так как они позволяют производственникам повысить свою конкурентоспособность во времена спада и рецессии.

Спрос на лазерное оборудование на рынке растет главным образом из-за того, что лазерные технологии на производстве дают более высокие результаты, чем традиционные не лазерные — такие, например, как механическая резка, дуговая сварка или различные виды термообработки. Ведущие эксперты уверены, что потенциал лазерных технологий в промышленности ещё далеко не исчерпан.

Анализируя использование этих технологий в таких разных областях, как ремонт штампов литейных форм, резка, сварка и маркировка изделий, изготовление имплантов и миниатюрных зондов, отжиг полупроводников и лазерная литография в микроэлектронике, все эксперты сходятся во мнении, что лазерные технологии сегодня не только незаменимы, но и открывают всё новые и новые возможности. По этой причине спрос на лазерное оборудование будет сохраняться, а в некоторых секторах и бурно расти.

Хорошей иллюстрацией увеличения числа технологических процессов, которые могут быть реализованы только с использованием лазерного луча, служит «выход на широкую сцену» аддитивной технологии так называемой трёхмерной печати. Лазерные 3D-принтеры могут с микронной и даже более

высокой точностью наносить слой за слоем металлокерамический порошок или фотополимеризирующийся пластик, или инжектировать металл из микрокапельной фракции по заранее заданной программе, создавая тем самым необходимое изделие без всяких промежуточных инструментов и операций. Считается, что именно эти технологии будут использоваться в космосе для изготовления необходимых запчастей, что будет оперативнее и дешевле, чем доставка их с Земли.

Среди многих процессов, идущих в этом сегменте лазерного рынка, отметим выход волоконных лазеров на широкий рынок. Продажи волоконных лазеров в последние годы растут очень быстро, в среднем на 20% в год, они «захватывают» уже, казалось бы, устоявшиеся рынки — особенно в части промышленных технологий, где хотя и не открывают новых применений, но активно заменяют другие лазеры.

Обработка материалов (вместе с литографией и печатью) является главным рынком лазерной промышленности, занимая около 70 % его общего объема (исключая сектор полупроводниковых лазеров) — Рисунок 2.

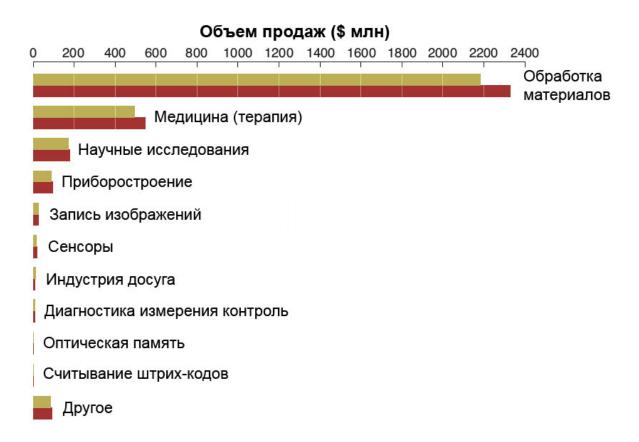


Рисунок 2. Типичное распределение мирового рынка технологических лазеров (кроме полупроводниковых) по видам применений.

#### Лазерные информационно-измерительные системы и технологии

Основная тенденция в рассматриваемом сегменте лазерного рынка – рост и продолжающееся расширение областей применения полупроводниковых

лазеров взамен других типов во многих применениях – от медицины до Миниатюрные полупроводниковые графики. лазеры повсеместно используются не только в системах оптической связи, но и во всё шире применяемых системах управления движением, мониторинга окружающей среды, диагностики биологических сред и объектов (имплантируемые «лаборатории на чипе»). Такие устройства, основанные на распознавании голосов, жестов, папиллярных узоров и пр., будут без прикосновений включать и выключать домашнюю электронику, без ключей открывать хозяину дверь с секретными замками, в магазине представят информацию о том, что привлекает наибольшее внимание покупателей и т.д. Обеспечивая бесконтактную оценку состояния объекта, они могут существенно улучшить гигиену – в условиях медучреждений, продуктовых магазинов и т.п.

Сенсорные технологии становятся массовыми, создавая новые сектора лазерного рынка.

Заметный спрос отмечен в части сложных систем технического зрения, метрологической аппаратуры в полупроводниковой, авиакосмической и оборонной промышленности, и особенно, в части лазерных устройств для оборонных применений.

Вообще, микроэлектроника, производство полупроводников и изделий из них продолжает оставаться важнейшей составляющей рынка лазеров и лазерных технологий. Одними из наиболее мощных «новых» рынков для лазеров и оптоэлектроники является фотоэлектрическая (солнечная) энергетика и диодное освещение, которое медленно, но верно приходит на смену «ламповому».

#### Биофотоника и лазерные медицинские технологии

Медицинские технологии входят в сектор наук о жизни и являются его главным содержанием. Они включают три важнейших раздела: диагностику, терапию и хирургию и подразделяются на множество направлений по каждой области медицины. Медицинский сектор лазерного рынка продолжает уверенно расти, что подтверждается как постоянным ростом количества тематических конференций и увеличением числа их участников, так и появлением на рынке новых образцов лазерной медицинской техники для офтальмологии, хирургии, стоматологии, терапии и др. Мировой рынок лазеров для медицинской аппаратуры (хирургической, офтальмологической, стоматологической, косметологической и др.) вырос в 2013 г. на 11% по сравнению с 2012-м годом, а на 2014 г. прогнозируется рост ещё на 10%.

Среди наиболее быстро растущих сейчас областей применения лазеров в медицине отметим офтальмологию (сферо-цилиндрическую корректировку кривизны хрусталика глаза и лечение глаукомы), эстетическую медицину — (удаление татуировок и нежелательных волос, сведение доброкачественных пигментных пятен, разглаживание морщин) и стоматологию (безболезненную обработку твёрдых и мягких тканей зуба, изготовление зубных протезов).

Помимо аппаратов для эстетической медицины большим спросом в секторе лазерной биофотоники пользуются также переносные диагностические приборы — рамановские спектрометры, с помощью которых можно детектировать следы определённых химикатов и взрывчатых веществ, а также комнатные анализаторы выдыхаемого воздуха, обнаруживающие молекулы, которые служат маркёрами заболеваний.

# Медицина — вторая по объемам использования область применения лазеров — 20% общего лазерного рынка — Рисунок 2.

В настоящем издании основное внимание уделено общим для всех приложений основам лазерных технологий — собственно лазерным источникам и их параметрам, оптическим системам, формирующим пространственные характеристики лазерных пучков, и процессам взаимодействия излучения с материалами. Из приложений лазерных технологий рассмотрены производственные и медицинские лазерные технологии, такие как лазерная резка и сверление отверстий, сварка и термообработка, обработка тонких пленок, лазерная хирургия и некоторые другие.

#### Раздел 1. Технологические лазеры и лазерное излучение

Основные типы технологических лазеров представлены в диаграмме (рисунок 1.1):

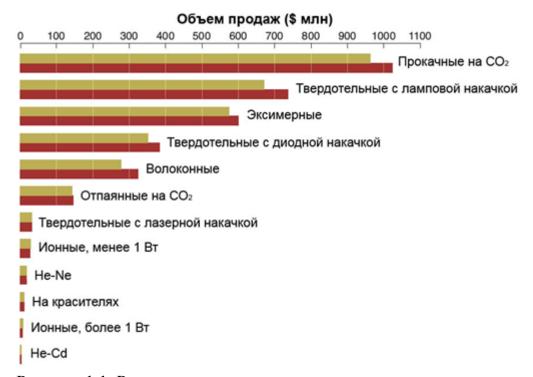


Рисунок 1.1. Распределение мирового рынка технологических лазеров по типам

Выбор лазера для проведения технологической операции определяется спецификой воздействия лазерного излучения на данный материал и особенностями поставленной технологической задачи. Основными параметрами, характеризующими лазерное излучение, являются мощность, длина волны излучения, длительность воздействия излучения, энергия и частота следования импульсов, а также когерентность, направленность, монохроматичность и поляризация излучения.

Большинство лазерных технологий основано на тепловом действии излучения, то есть предполагается необходимость нагревания объекта воздействия до заданной температуры. Поэтому главной характеристикой лазера, используемого в таких технологиях, является его мощность. Для импульсных лазеров рассматривают мощность в импульсе и среднюю мощность, которая зависит от длительности и частоты следования импульсов.

Температура T, до которой нагревается объект воздействия, определяется плотностью поглощенной мощности излучения q, которая зависит от мощности излучения  $P_0$ , ее распределения по облучаемой поверхности и поглощательной способности объекта A. В частности, при равномерном распределении плотности мощности в пределах облученной зоны

$$q = P_0 A / S, \tag{1.1}$$

где S – площадь облученной зоны на обрабатываемой поверхности.

Нагревание тела излучением описывается дифференциальным уравнением теплопроводности, которое при сильном поглощении излучения, когда глубина проникновения света в материал  $\delta = \frac{1}{\alpha}$  ( $\alpha$  – показатель поглощения света) много меньше толщины прогретого слоя  $\sqrt{a\tau}$  ( $\alpha$  – температуропроводность материала,  $\tau$  – длительность импульса), например, для металлов в видимом диапазоне и для стекол в среднем ИК-диапазоне ( $\lambda$  ~ 10 мкм,  $\alpha \approx 10^{-5} - 10^{-6}$  см) имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),\tag{1.2}$$

Где t – время, x, y, z – координаты декартовой системы координат, связанной с облучаемым телом.

Граничное условие на поверхности задает действие поверхностного источника:

$$-\mathbf{E}_{\mathbf{z}} = \mathbf{e}_{\mathbf{z}} \mathbf{e}_{\mathbf{z}}, \qquad (1.3)$$

где  $q = q_0(1-R)$ ,  $q_0$  — плотность мощности падающего излучения, R — коэффициент отражения поверхности, k — теплопроводность материала, ось z перпендикулярна поверхности и направлена вглубь материала.

Если размеры нагреваемого тела достаточно велики  $(l_x, l_y, l_z \gg \sqrt{a \tau})$ , а практически  $\geq 1$  мм для металлов при  $\tau = 10^{-3}$  с, его можно считать полубесконечной средой:

$$T\big|_{x=+\infty} = T\big|_{y=+\infty} = T\big|_{z=\infty} = T_H, \tag{1.4}$$

где  $T_H$  — начальная температура  $\left(T\big|_{t=0} = T_H\right)$ .

Таким образом, из решения уравнения теплопроводности в каждом конкретном случае можно определить связь температуры облучаемого материала T(x,y,z,t) с плотностью мощности лазерного излучения  $q_0$ , что позволяет ввести понятие порогового значения плотности мощности излучения — такого, при котором температура поверхности тела в центре облученной области к моменту окончания воздействия излучения достигает заданного значения.

При расчете пороговых значений плотности мощности излучения удобно использовать формулу, определяющую максимальную температуру тела при нагреве его лазерным излучением (на поверхности тела в центре облученной области в виде круга радиуса  $r_0$  в момент окончания воздействия), которую получаем при решении системы уравнений (1.2, 1.3, 1.4) для случая постоянной во времени и по площади облученной зоны плотности мощности излучения q:

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc}\frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}}\right) + T_H.$$
 (1.5)

Выражение (1.5) имеет два непосредственно следующих из него частных случая:

а) при  $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$  (импульсное нагревание):

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_H; (1.6)$$

б) при  $r_0 \ll \sqrt{a \tau}$  (стационарный режим нагревания):

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0}{k} + T_H. (1.7)$$

**Длину волны** лазерного излучения выбирают так, чтобы обеспечить максимальное поглощение излучения веществом. Например, для обработки металлов используют излучение видимого и ближнего ИК-диапазона, стекол – среднего ИК-диапазона и т.д.

**Длительность воздействия** излучения определяет температуру нагреваемого объекта, темп нагревания и охлаждения, величину температурных градиентов и размеры прогретых слоев в материале. При использовании импульсных лазеров длительность воздействия определяется длительностью импульса излучения  $\tau$ . Длительность воздействия излучения лазеров, работающих в непрерывном режиме, зависит от скорости сканирования  $V_{\rm ck}$  лазерного пучка по поверхности материала:

$$\tau = \frac{2r_0}{V_{CK}}. (1.8)$$

**Частота следования импульсов** определяет производительность обработки.

Важной характеристикой лазерного излучения является **степень** его **ко-герентности**. При обработке поверхности материала когерентным излучением возможно формирование на ней дифракционной картины, а также периодической поверхностной структуры, возникающей при образовании поверхностных электромагнитных волн. Большое значение когерентность излучения имеет в многолучевых лазерных системах, когда при согласовании фаз излучений отдельных лазеров суммарная интенсивность в многолучевой системе значительно превышает сумму интенсивностей излучений каждого лазера в отдельности (многолучевые  $CO_2$ -лазеры, полупроводниковые лазерные матрицы и т.п.).

Когерентность излучения связана с направленностью пучка излучения, его монохроматичностью и поляризацией.

**Направленность пучка** излучения характеризуется углом расходимости пучка и пространственным распределением интенсивности. Распределение интенсивности излучения на выходной апертуре лазера определяется типом используемого резонатора и модовым составом излучения. Для одномодового лазера это распределение описывается распределением Гаусса:

$$(1.9)$$

где  $I_0$  — интенсивность излучения на оси пучка, w — текущий радиус (расстояние до оси пучка),  $w_G$  — радиус, при котором интенсивность излучения снижается в e раз.

Теоретическая дифракционная расходимость пучка зависит от длины волны излучения  $\lambda$  и диаметра пучка на выходе лазера  $2w_G$ . Профиль радиального распределения интенсивности излучения сохраняется по мере удаления от лазера только для гауссовых пучков. Для определения угла расходимости пучков с произвольным распределением интенсивности рассматривают распределение интенсивности в дальней зоне ( $x\gg w_0^2/\lambda$ , где  $w_0$  – радиус выходного окна лазера).

Теоретическая расходимость излучения многомодовых лазеров определяется углом дифракционной расходимости  $\theta = 1,26 \frac{\lambda}{2w_0^{\min}}$ , в котором содер-

жится 85% энергии пучка. Здесь  $w_0^{\min}$  — минимальный радиус области генерации на выходном окне лазера, зависящий от числа поперечных мод. Число поперечных мод определяет число зон на выходной апертуре лазера, в которых они сосредоточены; соответственно характерный размер этих областей уменьшается с увеличением числа поперечных мод, что приводит к увеличению расходимости излучения. Поперечное распределение интенсивностей продольных мод на выходе резонатора одинаково, они различаются лишь частотами излучения.

При равномерном распределении интенсивности излучения на выходе лазера (при очень большом числе мод) угол расходимости определяется классической дифракцией. На уровне первого дифракционного минимума (86% энергии) этот угол равен  $\theta = 2,44\frac{\lambda}{D}$ , где D — диаметр пучка на выходе лазера.

В реальных условиях экспериментальная величина расходимости излучения  $\theta$  превышает теоретический дифракционный предел.

Расходимость пучка излучения  $\theta$  определяет возможности его фокусировки. Минимальный размер пятна в фокусе определяется выражением, следующим из геометрической оптики телецентрических пучков (взаимно параллельные лучи которых пересекаются в одной и той же точке фокальной плоскости, см. рис. 2.1 из раздела 2):

$$d_0 = \theta f \,, \tag{1.10}$$

где f – фокусное расстояние оптической системы.

**Монохроматичность** лазерного излучения характеризует свойство лазера излучать в узком диапазоне длин волн. Степень монохроматичности излучения зависит от свойств активной среды и характеристик резонатора: ее необходимо учитывать в технологических процессах, основанных на селек-

тивном воздействии (лазерная химия, медицина, биология, разделение изотопов).

В отдельных случаях лазерной обработки необходимо учитывать **поляризацию** излучения, в частности, в технологических процессах, при которых происходит многократное отражение излучения под углами, близкими к углу Брюстера (когда p-составляющая поляризованного излучения полностью отражается от поверхности). Примером такого технологического процесса является резка металлических материалов большой толщины.

#### Примеры решения задач

<u>Задача 1.1.</u> Определить мощность и энергию импульсов излучения  $N_2$ -лазера длительностью  $\tau = 10^{-8}$  с, необходимые для достижения плотности мощности излучения в фокусе  $q_0 = 10^7$  BT/см<sup>2</sup>, если расходимость пучка 1 мрад, а фокусное расстояние оптической системы 3 см.

#### Решение

Мощность импульсов лазерного излучения определяется выражением

$$P_0 = q_0 S$$
,

где  $S = \pi d_0^2 / 4$  — площадь пятна в фокальной плоскости.

Определим, чему равен диаметр пятна в фокусе, по следующей формуле:

$$d_0 = \theta f = 30$$
 MKM.

Вычислим мощность импульсов излучения:

$$P_0 = q_0 \pi d_0^2 / 4 = 70 \text{ BT},$$

а энергия импульсов излучения равна  $W = P\tau = 7 \cdot 10^{-7}$  Дж.

**Ответ:**  $P_0 = 70$  Вт,  $W = 7 \cdot 10^{-7}$  Дж.

**Задача 1.2.** Определить, во сколько раз изменится диаметр пучка в фокусе линзы, если перед ней поставить телескопическую систему с увеличением  $b^x$ .

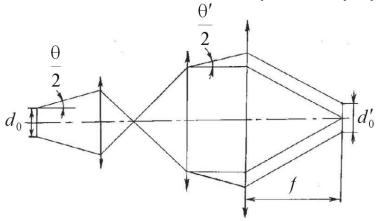


Рисунок 1.2. Определение диаметра пучка в фокусе линзы

#### Решение

Диаметр пучка в фокусе линзы  $d_{\scriptscriptstyle 0} = \theta f$  .

Если перед линзой поставить телескопическую систему, размер пучка в фокусе линзы определяется как  $d_0{}'=\theta'f$ , где  $\theta'-$  расходимость лазерного пучка после телескопической системы:  $\theta'=\theta/b^x$ . В результате получим:

$$\left. egin{aligned} d_0^{'} &= heta^{'}f = rac{ heta f}{b^x}; \ d_0 &= heta b, \end{aligned} 
ight.$$
 откуда  $\left. egin{aligned} rac{d_0^{'}}{d_0} = rac{1}{b^x}. \end{aligned} 
ight.$ 

**Ответ:** диаметр пучка в фокусе линзы уменьшится в  $b^{x}$  раз.

#### ЗАДАЧИ 1-го уровня

- 1. Привести соотношения между импульсной и средней мощностью излучения, плотностью энергии и плотностью мощности. Привести характерную зависимость порогов разрушения (плотности мощности) от длительности импульса.
- 2. Определить полную мощность гауссова пучка, поперечное распределение интенсивности в котором определяется зависимостью от радиуса *w*:



3. Определить расходимость гауссова пучка, если зависимость радиуса его поперечного сечения от расстояния определяется выражением



4. Вывести формулу для определения разности частот между ближайшими продольными модами резонатора.

#### ЗАДАЧИ 2-го уровня

- 5. Определить плотность мощности лазерного излучения на обрабатываемой поверхности в центре обученной области, если известна мощность излучения P и распределение плотности мощности излучения
  - а) гауссово  $q = q_0 e^{-(r/r_0)^2}$ ,
  - б) постоянное в пределах облученной области  $q = \begin{cases} q_0 & \text{при } r \leq r_0, \\ 0 & \text{при } r > r_0. \end{cases}$

- 6. Определить, какая доля лазерного излучения находится внутри круговой области  $r \le r_0$ , где  $r_0$  характерный размер гауссова распределения плотности мощности излучения в пучке  $q = q_0 e^{-(r/r_0)^2}$ .
- 7. Определить радиус области, в которой сосредоточено 50%, 90% всей энергии гауссова пучка, если задан характерный размер гауссова распределения  $r_0$ .
- 8. Рассчитать параметры механического прерывателя, представляющего собой вращающийся диск с прорезью (размеры прорези и угловую скорость вращения диска), если из импульсов длительностью 100 мкс необходимо получить импульсы излучения длительностью 40 мкс при частоте следования импульсов 250 Гц.
- 9. Определить распределение интенсивностей в многолучевой лазерной системе для случайного и постоянного сдвига фаз  $\varphi$  излучения отдельных лазеров, если излучение каждого из них поляризовано в одной и той же плоскости и колебания их электрического поля описываются формулой

$$E_i = E_0 \cos(\omega t + \varphi_i)$$
.

При решении задачи принять во внимание, что амплитуда суммы двух колебаний с амплитудами  $E_{01}$  и  $E_{02}$ , фазами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и одинаковой частотой равна  $E_{0\Sigma} = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos\left(\varphi_1 - \varphi_2\right)}$ .

10. Определить теоретическую дифракционную расходимость излучения различных лазеров, считая распределение интенсивности равномерным в пределах заданного диаметра пучка для Cu, Nd:YAG,  $N_2$  и  $CO_2$ -лазеров и гауссовым для He-Ne лазера, по следующим данным:

a) Nd:YAG	$\lambda=1,06$ мкм	D = 5  MM;
б) Не-Nе	$\lambda$ = 0,63 мкм	D = 0.3  mm;
в) Cu	$\lambda \! = \! 0$ ,5 мкм	D = 3  MM;
r) N <sub>2</sub>	$\lambda$ $=$ 0,34 мкм	D = 0.3 mm;
д) CO <sub>2</sub>	$\lambda$ $=$ $10$ ,6 мкм	D = 5 MM,

где  $\lambda$  — длина волны излучения, D — диаметр лазерного пучка на выходе лазера. Решение оформить в виде таблицы.

- 11. Определить расходимость излучения многомодового лазера в зависимости от числа генерируемых поперечных мод.
- 12. Доказать, что при угле падения, равном углу Брюстера, угол между отраженным и преломленным лучами равен  $\pi/2$ .
- 13. Показать, какой режим, импульсный или непрерывный, более эффективен для лазерной обработки.
- 14. Рассмотреть различные методы обеспечения импульсного режима воздействия (режимы свободной генерации, модуляции добротности и синхронизации мод) и сравнить их по следующим параметрам: КПД, энергия импульса, длительность импульса, средняя и импульсная мощность, частота следования импульсов.

#### Раздел 2. Оптические схемы лазерной обработки

В лазерных технологиях инструментом воздействия на обрабатываемый материал является пучок лазерного излучения. Кроме энергетических характеристик пучка, рассмотренных в предыдущем разделе, существенную роль играют его пространственные параметры, такие как размер и форма зоны воздействия. Эти характеристики определяются выбранной оптической или оптико-механической схемой обработки, основное назначение которой состоит в концентрации энергии и в обеспечении заданного поля воздействия и формы облученной зоны внутри него.

В настоящем разделе рассмотрены методы формирования облученной зоны заданных размеров и формы при последовательном обходе лазерным пучком или при ее одновременном облучении методом оптической проекции. Концентрация энергии осуществляется либо путем фокусировки лазерного пучка, либо за счет его оптической проекции в соответствующем масштабе. Основными методами формирования облученной зоны являются:

- 1) методы сканирования поверхности сфокусированным пучком,
- 2) проекционные методы.

#### 2.1. Методы сканирования поверхности сфокусированным пучком

При использовании этих методов изображение синтезируется в результате последовательного облучения заданного топологического рисунка сфокусированным пучком излучения. Обход контура на обрабатываемой поверхности осуществляется путем относительного перемещения пучка излучения и объекта обработки.

Фокусировка лазерного пучка зависит от поперечного распределения интенсивности в нем. Последнее определяется модовой структурой пучка. Для наиболее часто встречающихся в лазерных технологиях случаев можно ограничиться двумя моделями лазеров: одномодовой, хорошо известной из литературы [1], и телецентрической для многомодовых лазеров.

Последняя модель особенно важна, поэтому кратко опишем ее: считается, что все точки выходного сечения лазера являются источниками одинаковых конических пучков лучей, оси которых параллельны оптической оси лазера, а углы конусов при вершине равны полному углу расходимости излучения лазера (рисунок 2.1). Разумеется, это лучевая (геометрическая) модель, и для нее применимы все положения геометрической оптики: связь углового распределения источника с поперечным распределением интенсивности в фокусе оптической системы, приближение «тонкой» линзы, перенос изображения предмета, масштабы изображений и пр. [5, 28].

Соответственно, с учетом ограниченного угла расходимости, могут быть рассчитаны размер пятна в фокусе, глубина резкости и т.п.

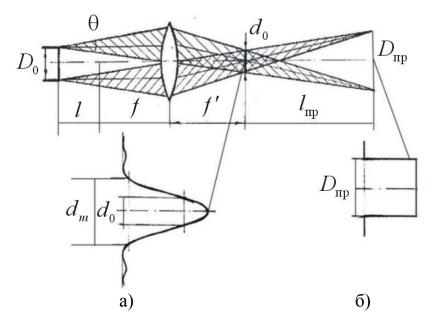


Рисунок 2.1. Телецентрическая модель лазера совместно с оптической системой

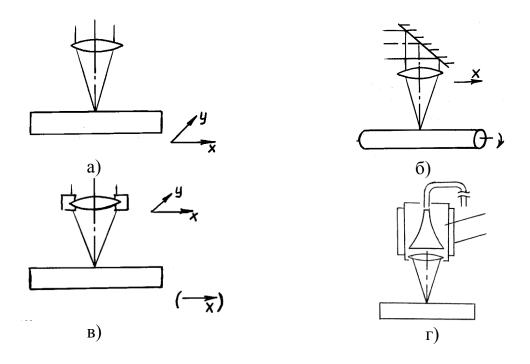


Рисунок 2.2. Способы относительного перемещения пучка излучения и обрабатываемого изделия

Относительное перемещение пучка излучения и обрабатываемого изделия может быть обеспечено разными способами (рисунок 2.2).

- а) Перемещение детали в плоскости обработки (фокальной плоскости оптической системы). Деталь при этом располагается на координатном столе (рисунок 2.2, а), на валу (при производстве гибких печатных форм, рисунок 2.2, б) и т.п.
- б) Перемещение оптической системы в заданной плоскости так называемые плоттерные системы или системы с «летающей» оптикой (рисунок

2.2, в) — или по заданной траектории в пространстве, когда излучение к оптической системе, управляемой роботом, подается с помощью оптического кабеля (рисунок 2.2, г).

Особенностью систем  $(a, \delta, B, \Gamma)$  на больших скоростях движения является проблема обеспечения постоянной плотности мощности излучения на поверхности детали при изменении скорости движения.

в) Отклонение пучка лазерного излучения, например, с использованием сканера, содержащего два качающихся зеркала с магнитоэлектрическим приводом (рисунок 2.3). Как видно из рисунка 2.3, размер облученной зоны d зависит от ее расположения относительно центра рабочего поля y. Увеличение размера облученной зоны при отклонении пучка происходит по двум причинам: вследствие дефокусировки пучка и вследствие наклонного падения пучка на обрабатываемую поверхность. Допустимое изменение размера облученной зоны определяет размеры рабочей области.

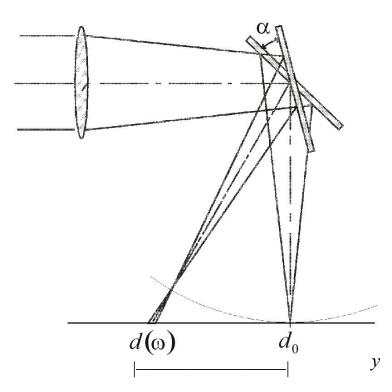


Рисунок 2.3. Изменение размера облученной области при сканировании пучка

Основным достоинством методов сканирования сфокусированным пучком является возможность концентрации всей энергии излучения лазера на площадке минимальных размеров и относительная простота формирования сложного топологического рисунка. К недостаткам метода относятся невысокая точность, связанная с неравномерностью распределения энергии в фокальной плоскости и с изменением размеров облученной зоны в процессе сканирования, а также необходимость использования сложных систем управления и перемещения пучка (или объекта).

#### 2.2. Проекционные методы

Сущность проекционных методов заключается в формировании изображения в целом, его части или образующего элемента путем проецирования пучком лазерного излучения изображения маски на обрабатываемую поверхность с заданным масштабом уменьшения.

Схема микропроекционного метода представлена на рисунке 2.4. Пучок излучения лазера 1 расширяется с помощью осветительной оптической системы 2 до размера маски-трафарета 3, уменьшенное изображение которого строится с помощью проекционного объектива 4 на поверхности обрабатываемого материала 5.

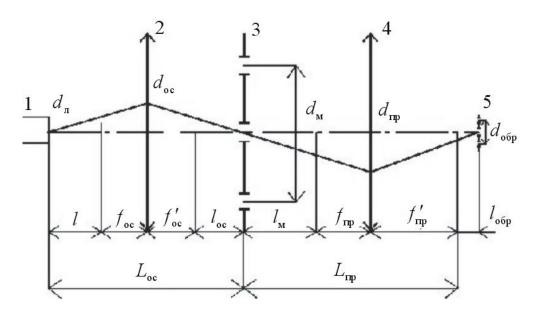


Рисунок 2.4. Схема микропроекционного метода

$$\beta_{np} = d_{o\delta p0}/d_{Mo}. \tag{2.1}$$

При этом минимальный масштаб проекции, соответствующий  $\beta_{np}^{\max}$ , можно определить из условия обеспечения требуемой плотности энергии на образце  $Q_{\text{обр}}$ , при отсутствии разрушения маски:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{p}}^{\mathbf{a} \times} \mathbf{Q}_{\mathbf{c}}, \tag{2.2}$$

где  $Q_{\scriptscriptstyle \mathrm{M}}^{\scriptscriptstyle \mathrm{II}}$  – пороговая плотность энергии разрушения маски.

Максимальный масштаб проекционной системы ограничен дифракционными явлениями на апертуре проекционной системы и на маске.

Рабочее увеличение проекционной системы  $\beta_{np}$  должно лежать в интервале  $\beta_{np}^{\min} < \beta_{np} < \beta_{np}^{\max}$  . Полный размер маски составляет  $d_{_{M}} = d_{oбp} \big/ \beta_{np}$  .

Увеличение осветительной системы определяется как

$$\beta_{oc} = d_{\scriptscriptstyle M}/d_{\scriptscriptstyle R} \,. \tag{2.3}$$

При этом максимальное увеличение осветительной системы определяется условием обеспечения сохранности маски при известной плотности энергии на выходе лазера  $Q_n$ :  $\beta_{oc}^{min} = \sqrt{Q_n/Q_{_M}^n}$ .

Выбирая объектив и осветительную систему с известными фокусными расстояниями, находим значения  $l_{_{\it I}}, l_{_{\it oc}}, l_{_{\it M}}, l_{_{\it oбp}},$  определяющие габаритные размеры системы, из формул:

$$\beta_{oc} = \frac{l_{oc}}{f'_{oc}} = \frac{f_{oc}}{l_{_{I}}}; \tag{2.4}$$

$$\beta_{np} = \frac{l_{o\delta p}}{f'_{np}} = \frac{f_{np}}{l_{M}}.$$
(2.5)

В отдельных случаях могут быть использованы упрощенные варианты оптической схемы. Если  $d_{_{M}} < d_{_{\Lambda}}$  и  $Q_{_{\Lambda}} < Q_{_{M}}^{^{n}}$ , осветительная система может отсутствовать. Если не требуется уменьшение размеров маски и  $Q_{_{M}}^{^{n}} > Q_{_{O}\delta p}$ , может отсутствовать проекционная схема. В последнем случае проекционный метод сводится к контактному.

Особенностью микропроекционного способа формирования изображения является то, что требования максимального поля обработки и высокой разрешающей способности  $\delta = 1/d_{o\delta p0}$  находятся в противоречии: чем выше разрешающая способность изображения, тем меньше площадь одновременно облучаемой поверхности.

Основными достоинствами проекционных методов обработки материалов являются возможность получения изображения сложной конфигурации и высокая разрешающая способность. Недостатками проекционных методов, ограничивающими их применение, являются потери энергии на маске и жесткие требования к равномерности освещения всего поля маски.

При отсутствии проекционной системы для получения изображения маски она должна быть вплотную прижата к обрабатываемой поверхности, и проекционный метод переходит в контактный. Недостатками контактного метода являются быстрый износ трафарета и механические повреждения образца, а также дифракционные искажения изображения при неплотном прижатии и невысокая разрешающая способность (меньше 1 мкм<sup>-1</sup>).

#### 2.3. Волоконно-оптические системы лазерной обработки

При расчете волоконно-оптических схем лазерной обработки используют инвариант Лагранжа-Гельмгольца (рисунок 2.5):

$$D\alpha = D'\alpha' = J = const \tag{2.6}$$

Чем меньше значение J, тем выше качество пучка.

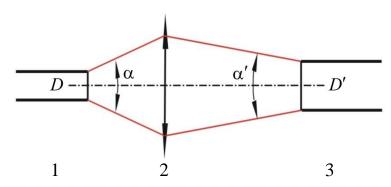


Рисунок 2.5. Схема оптической системы, состоящей из функциональных (1, 3) и согласующих (2) компонентов.

#### 2.4. Комбинированные методы

На практике большое распространение получили комбинированные методы формирования изображения, когда элемент изображения строится методом оптической проекции, а поле обработки перекрывается сканированием пучка (например, перемещением стола). К таким методам относятся мультиплицирование изображения и фотонабор, применяемые в фотолитографии, и некоторые другие. В лазерных технологиях наибольшее распространение из таких методов получил сканирующий проекционный или контурнопроекционный [3, 4].

Контурно-проекционный метод состоит в том, что изображение синтезируется в результате последовательного обхода по контуру световым пучком специального сечения, которое представляет собой микропроекцию простого элемента, например, квадрата.

Схема контурно-проекционного метода аналогична схеме проекционного метода (рис. 2.4), но осветительная система работает с увеличением, меньшим 1.

Обход заданного контура на обрабатываемой поверхности осуществляется перемещением рабочего стола, на котором располагается изделие, по программе или при использовании оптического плоттера.

Достоинствами контурно-проекционного метода формирования оптического изображения являются: независимость размеров общего поля изображения от разрешающей способности, высокая точность рисунка (вследствие использования элемента, образующего изображение, прямоугольной формы и равномерности распределения в нем энергии), высокая разрешающая способность, небольшие потери энергии на маске.

Заметим, что рассмотренное выше положение маски в плоскости изображения выходного окна лазера не является единственно возможным. Иной

принцип построения осветительных систем — использование телескопа или расположение маски вблизи фокальной плоскости осветительной системы. Преимуществами таких осветительных систем являются значительно меньшие габаритные размеры и более равномерное распределение интенсивности излучения.

Для осуществления трехмерной (рельефной) обработки поверхности могут быть использованы различные модификации метода, например, контурно-проекционный метод с «дрожащей» маской (колеблющейся вдоль оптической оси системы по заданному закону в процессе перемещения облученной области по обрабатываемой поверхности), а также применение в микропроекционной схеме полутоновых масок с переменным пропусканием.

#### Примеры решения задач

<u>Задача 2.1.</u> Построить ход лучей лазерного пучка через линзу с фокусным расстоянием f. Определить зависимость диаметра пятна в фокусе  $d_0$  от расходимости лазерного излучения  $\theta$  и фокусного расстояния линзы f.

#### Решение

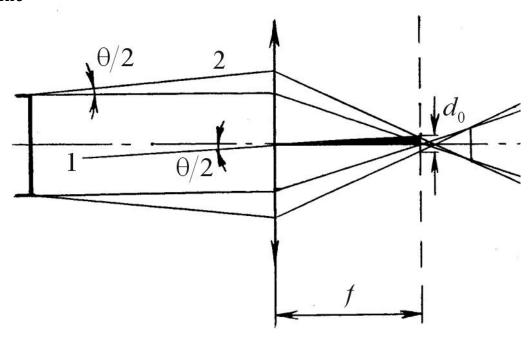


Рисунок 2.6. Определение размера пятна в фокусе

Проведем вспомогательный луч 1, проходящий через центр линзы под углом  $\theta/2$  к оптической оси. Как известно из геометрической оптики, луч, проходящий через центр оптической системы, не испытывает преломления. Далее известно, что луч 2, преломившись линзой, пересечется с лучом 1 в фокальной плоскости. Диаметр пятна в фокальной плоскости определим из заштрихованного треугольника:

$$\frac{d_0}{2}=f\cdot tg\,\frac{\theta}{2}\,.$$
 Учитывая, что для малых углов  $\left(\frac{\theta}{2}\!\ll\!1\right)$  справедливо  $tg\,\frac{\theta}{2}\!\approx\!\frac{\theta}{2},$  получим окончательно

$$d_0 = \theta f$$
.

Задача 2.2. Рассчитать оптическую проекционную схему с телескопической осветительной системой, с параметрами  $d_{o\delta p}=1$  мм,  $d_{np}=50$  мм,  $d_{o\delta p}=1$  мм,  $d_{np}=50$  мм,  $d_{np}=1$  см,  $d_{np}=1/20$ . Увеличение телескопа произвольно, материал маски — медная фольга толщиной 0,1 мм, материал образца — пленка хрома толщиной 0,1 мкм на стекле.

#### Решение

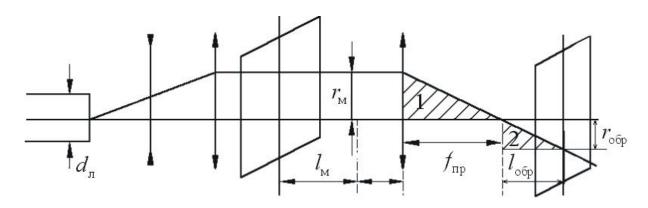


Рисунок 2.7. Схема проекционной системы

Габаритный расчет.

Из условия  $\beta_{np}=\frac{d_{oбp}}{d_{_M}}$  найдем размер щели в маске:  $d_{_M}=20$  мм. Увеличение телескопической системы равно  $\beta_{mc}=\frac{d_{_M}}{d_{_n}}=2$ . Величины  $l_{oбp}$  и  $l_{_M}$  найдем из геометрических соображений. Из подобия треугольников 1 и 2 получаем выражение для нахождения  $l_{oбp}$ :  $\frac{r_{_M}}{r_{oбp}}=\frac{f_{np}}{l_{oбp}}$ , откуда  $l_{oбp}=\frac{r_{oбp}f_{np}}{r_{_M}}=f_{np}\beta_{np}=2$ ,5 мм.

Аналогично получаем выражение для  $l_{\scriptscriptstyle M}$ :

$$l_{M} = \frac{r_{M} f_{np}}{r_{ood}} = \frac{f_{np}}{\beta_{np}} = 1 \text{ M}.$$

Энергетический расчет.

Обработка проекционным способом осуществляется при следующих условиях: температура на поверхности маски не должна превышать температуру плавления, так как нельзя допускать разрушения маски, а температура на поверхности образца должна быть больше температуры испарения. Таким образом, используя для определения температуры на поверхности выражение (6.2), получаем:

- для маски 
$$T_{nn}(Cu)-T_{H}>\frac{q_{_{M}}A_{_{M}}t}{\rho_{_{M}}c_{_{M}}h_{_{M}}};$$

— для образца 
$$T_{\kappa un} \left( Cr \right) - T_H < rac{q_o A_o t}{
ho_o c_o h_o},$$

где  $\rho$  — плотность, c — теплоемкость, h — толщина слоя материала, A — поглощательная способность материала, q — плотность мощности излучения материала на поверхности детали,  $T_H$  — начальная температура; индекс «м» относится к маске, «о» — к образцу.

Учитывая, что Q = qt, где Q — плотность энергии, а q — плотность мощности, определим величину максимального увеличения проекционной системы из следующего выражения:

$$\beta_{np}^{\max} = \sqrt{\frac{Q_{M\max}}{Q_{o\delta p \min}}} = \sqrt{\frac{\left(T_{nn}\left(Cu\right) - T_{H}\right)\rho_{M}c_{M}h_{M}A_{o}}{\left(T_{\kappa un}\left(Cr\right) - T_{H}\right)\rho_{o}c_{o}h_{o}A_{M}}}.$$

Подставляя численные значения, получаем:

$$\beta_{np}^{\text{max}} = 44$$
.

#### ЗАДАЧИ 1-го УРОВНЯ

- 1. Показать графически, зависит ли размер фокального пятна от расстояния между лазером и фокусирующей оптической системой и от угла расходимости лазерного излучения  $\theta$ .
- 2. Определить расходимость пучка рубинового лазера, необходимую для получения на поверхности Луны пятна диаметром 3 км, и предложить оптическую схему системы.
- 3. Определить расходимость излучения лазера, обеспечивающую пятно диаметром 0,5 мм на поверхности Фобоса, если лазер удален от его поверхности на расстояние 100 м. Предложить оптическую схему.
- 4. Пояснить на примере противоречие между разрешающей способностью и полем изображения.
- 5. Рассчитать оптическую схему контактного способа обработки и сравнить с проекционным способом при увеличении  $\beta_{np} = 1$ . Образец пленка хрома на стеклянной подложке.

#### ЗАДАЧИ 2-го УРОВНЯ

- 6. Рассчитать длину  $l_0$  и диаметр  $d_0$  световой трубки, образующейся при фокусировке пучка лазерного излучения диаметром  $D_0$  и расходимостью  $\theta$  линзой с фокусным расстоянием f.
- 7. Вывести формулу для геометрической глубины резкости при фокусировке лазерного излучения.
- 8. Рассчитать пространственно-геометрические характеристики лазерных пучков (одномодового, многомодового, дифракционно-ограниченного и теоретические): угол расходимости, размер фокального пятна и глубину резкости.
- 9. Рассчитать оптическую систему энергетического фокусирующего канала для лазера на аргоне:  $\lambda = 514$  нм, диаметр пучка на выходе лазера 1,5 мм на уровне 1/e, расходимость пучка 0,5 мрад, если излучение должно быть сфокусировано в вакуумированной кювете длиной 30 мм в пятно диаметром 1,2 мкм.
- 10. Изобразить принципиальные схемы лазерных установок с плоттером и координатным столом. Указать условия постоянства плотности мощности излучения в системе с плоттером.
- 11. Определить размеры рабочего поля в сканирующей системе по значениям допустимых отклонений  $\Delta d = 200$  мкм размера фокального пятна d = 50 мкм в плоскости обработки для Nd:YAG-лазера. Фокусное расстояние оптической системы 60 см, расстояние от центра зеркала до обрабатываемой поверхности 50 см.
- 12. Привести габаритный и энергетический расчет проекционной схемы с осветительной телескопической системой.
- 13. Определить теоретический предел максимального и минимального масштаба проекции при телецентрическом освещении маски.
- 14. Дать размерные и энергетические характеристики микропроекционной оптической схемы. Сравнить с условиями обработки в схеме без осветительной системы, без проекционной системы.
- 15. Проанализировать возможность минимизации размеров контурнопроекционной схемы (за счет передвижения лазера), для чего построить ход лучей в оптической системе с лазером, расположенным в передней фокальной плоскости осветительной системы, до и после нее.
- 16. Провести сравнительный анализ достоинств и недостатков сканирующих и проекционных методов лазерной обработки. Результаты анализа свести в таблицу:

		Количество баллов					
Метод			Точность	Эффек-			
формир	ования	Предель-	воспро-	тивность	Произво-	Простота	Сумма
оптиче	еского	ное раз-	изведе-	исполь-	дитель-	реализа-	баллов
изображения		решение	ния	зования	ность	ции	
			рисунка	энергии			
	с коор-						
Скани-	динат-						
py-	ным						
ющие	столом						
	с плот-						
	тером						
	с робо-						
	том и						
	опти-						
	чес-						
	ким						
	кабе-						
	лем						
	co						
	скане-						
	ром						
	микро-						
	проек-						
Проек-	цион-						
цион-	ный						
ные	кон-						
	такт-						
	ный						
	кон-						
Комби-	турно-						
ниро-	проек-						
ванные	цион-						
	ный						

- 17. Провести габаритный расчет оптической системы для фокусировки излучения от оптического многомодового волокна с внутренним диаметром 400 мкм в пятно диаметром 200 мкм. Угол расходимости излучения 0,1 рад, расстояние от торца волокна до плоскости обработки 10 см.
- 18. Провести габаритный расчет оптической системы для фокусировки излучения ( $\lambda$  = 1,06 мкм) от оптического волокна с внутренним диаметром 500 мкм со значением инварианта Лагранжа-Гельмгольца  $0,21\cdot10^{-6}$  м·рад в пятно размером  $d_0$  = 100 мкм.

- 19. Определить, какое смещение маски вдоль оптической оси необходимо обеспечить в проекционной схеме с «дрожащей» маской для получения на образце рельефа высотой  $\Delta_0 = 1$  мкм.
- 20. В проекционной схеме с использованием полутоновой маски (с переменным пропусканием) определить зависимость профиля обрабатываемой поверхности от пропускания маски, приняв скорость испарения равной

$$V=rac{q}{L_{\!\scriptscriptstyle ucn}}$$
  $(q$  — плотность мощности излучения,  $L_{\!\scriptscriptstyle ucn}$  — удельная теплота испа-

рения материала, Дж/см $^3$ ). Рассчитать маску для заданной точности формирования профиля поверхности  $\Delta=0,1$  мкм при длительности импульса излучения  $\tau=10^{-9}\,\mathrm{c}$ , максимальном значении плотности мощности излучения на поверхности образца  $q_{\mathrm{max}}=10^{10}\,\mathrm{Bt/cm^2}$ . Определить количество импульсов, необходимое для получения профиля высотой  $10\,\mathrm{mkm}$ .

- 21. Рассчитать оптическую систему для ввода излучения Nd:YAG-лазера с расходимостью 10' и диаметром пучка 5 мм в одномодовое оптическое волокно с числовой апертурой 0,22.
- 22. Предложить схему, осуществляющую проекционный метод лазерной обработки со сканированием пучка по маске, разрешающий противоречие между разрешающей способностью и полем изображения. Сравнить с базовым проекционным методом (одновременная засветка всей поверхности маски). Провести габаритный и энергетический расчет при соотношении диаметра пучка на поверхности маски и размера максимальной прорези маски 1:20.

#### Раздел 3. Основные физические процессы лазерных технологий

Основными физическими процессами лазерных технологий являются:

- 1. Испарение (и абляция в расплавленной фазе) наиболее популярный процесс, который лежит в основе большинства промышленных технологий любых материалов в микроэлектронике, микромеханике и микрооптике; в настоящее время актуальными остаются проблемы точности и качества.
- 2. Нагревание до температуры размягчения (или плавления) с последующим деформированием в вязко-текучей фазе (дополненное тем или иным механическим воздействием вытяжкой, вращением и т.п.) применяется для изготовления ближнепольных оптических зондов, медицинского оптического инструментария и т.п.
- 3. Направленное локальное нагревание, вызывающее появление контролируемого поля напряжений, приводящего к управляемому деформированию листовых материалов (laser forming), причем не только с целью формообразования, но и прецизионной сборки и юстировки микромеханических компонентов.
- 4. Локальное нагревание, вызывающее появление избыточного давления газа (пара) на поверхности раздела двух сред (например, пленка-подложка) с целью создания направленных микродеформаций и перемещений.
- 5. Послойный синтез трехмерных объектов методом послойного наращивания, в том числе стереолитография, селективное лазерное спекание и послойная сборка из листовых материалов (laminated object manufacturing).
- 6. Комбинированные лазерные процессы совместного действия с другим излучением или с плазмой для инициирования поглощения и т.п.
- 7. Манипулирование микрочастицами (молекулярная сборка), основанное на захвате частиц в фокусе лазерного излучения давлением света и последующем построении микроструктур.

Лазерные технологии могут быть основаны не только на высокой плотности мощности, но также и на большой плотности фотонов  $(N=q/h\nu>10^{30}~{
m cm}^{-2}{
m c}^{-1},$  где q — плотность мощности излучения, h постоянная планка,  $\nu$  – частота излучения). Это важно для нелинейных процессов (нелинейное поглощение в слабопоглощающих средах), в селективных технологиях (химические, биомедицинские технологии). Могут найти применение сильные и сверхсильные электромагнитные поля в области фокуса пучка, когда напряженность электрического поля сравнима с внутриатомной 10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup> В/см. В последнее время появились технологии (манипулирование микрочастицами, атомно-молекулярная сборка – laser trapping), где используется давление света (при нормальном падении параллельного пучка на поверхность давление света выражением  $p_{cs} = \varepsilon (1+R)$ , где  $\varepsilon$  — объемная плотность энергии излучения, R- коэффициент отражения поверхности).

Тем не менее, большинство лазерных технологий основаны на тепловом действии излучения. Остановимся на нем подробнее.

При падении пучка лазерного излучения на поверхность материала часть излучения отражается от нее, а часть проходит вглубь материала, поглощаясь в нем.

Распространение излучения в веществе, как правило, описываются законом Бугера:

$$q(x) = q_0(1-R)\exp(-\alpha x),$$

где q(x) — плотность мощности излучения в веществе на расстоянии x от его поверхности,  $q_0$  — плотность мощности падающего излучения, R — коэффициент отражения поверхности,  $\alpha$  — показатель ослабления света в веществе.

При поглощении излучения вещество нагревается. Различают режимы нагревания материала, соответствующие сильному (поверхностному) и слабому (объемному) поглощению излучения. Для большинства технологических процессов используется лазерное излучение на длинах волн, находящихся в спектральной области сильного поглощения вещества, так как это обеспечивает локальность воздействия и большую эффективность использования энергии. Сильное поглощение света имеет место в металлах, в полупроводниках при их «металлизации» достаточно мощным излучением, а также в полупроводниках и диэлектриках, когда длина волны излучения лежит в области их фундаментального поглощения. При этом глубина проникновения излучения обычно много меньше характерного размера теплопроводности (  $\frac{1}{\alpha} \ll \sqrt{a\tau}$  , где  $\tau$  – время воздействия излучения, a – температуропроводность материала). Тепловой источник в материале в таких условиях является практически поверхностным. Математически при решении уравнения теплопроводности (1.2) это учитывается в граничном условии на поверхности (1.3). Толщина прогретого слоя в материале определяется характерным размером теплопроводности  $\sqrt{a\tau}$ .

Режимы облучения, обеспечивающие объемное поглощение излучения,  $1/\alpha \gg \sqrt{a\tau}$ , используют при необходимости создания в обрабатываемом материале объемного теплового источника или при фокусировке излучения (и локальной обработке) внутри объема.

Для решения уравнений теплопроводности существуют различные математические методы, среди которых наиболее употребительны методы интегральных преобразований (в том числе преобразование Лапласа), метод Фурье (разделения переменных) и метод источников. Заметим, что при нагревании материала его оптические и теплофизические свойства изменяются, в особенности коэффициент отражения *R*. Кроме того, большое влияние на процесс нагревания оказывает временная и пространственная структура излучения. Эти факторы иногда необходимо учитывать для

точного определения временного хода температуры нагреваемого излучением тела и пространственного распределения температуры.

При нагревании тела лазерным излучением в нем активируются различные процессы. К их числу относятся эмиссионные процессы (эмиссия электронов, ионов, нейтральных молекул), поверхностные и объемные химические реакции, структурные превращения, тепловое расширение и термомеханические процессы, плавление, испарение и т.п. Эти изменения могут быть положены в основу того или иного технологического процесса — например, испарение и плавление при резке и сверлении отверстий, плавление при сварке, структурные превращения при термоупрочнении материалов и т.д.

При определении основных параметров процесса на практике в большинстве случаев не требуется точного решения тепловой задачи, а достаточно оценить пороговую плотность мощности излучения  $q_n$  (или пороговую мощность  $P_n$ , пороговую энергию  $W_n$ ). Пороговая плотность мощности излучения – это такое ее значение, при котором в облучаемом материале начинают происходить заданные изменения. Теоретически определяется как такое значение плотности мощности величина  $q_{\scriptscriptstyle 0}$ , при котором максимальная температура падающего излучения обрабатываемого материала достигает значения  $T_*$ , соответствующего началу данного процесса (например, для испарения материала это температура его кипения). Пороговые характеристики могут быть определены из выражения, определяющего температуру на поверхности тела в центре облученной области в виде круга радиусом  $r_0$  в момент окончания воздействия. Для облучения в режиме сильного поглощения эти выражения представлены в разделе 1 (формулы (1.5-1.7)).

Для облучения в режиме объемного поглощения

$$T = \frac{q_0(1-R)\tau}{\rho c\delta} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{r_0^2}{4a\tau}\right) - \frac{r_0^2}{4a\tau} \operatorname{Ei}\left(-\frac{r_0^2}{4a\tau}\right) \right] + T_H, \quad (3.1)$$

где  $\delta$  — глубина проникновения света в вещество (при поглощении по Бугеру  $\delta = 1/\alpha$ ),  $\mathrm{Ei}(u)$  — интегральная показательная функция,  $T_H$  — начальная температура.

Выражение (3.1) имеет два частных случая :

a) при  $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$ :

$$T = \frac{q_0 (1 - R)\tau}{\rho c \delta} + T_H; (3.2)$$

б) при  $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$ :

$$T = \frac{q_0 (1 - R) r_0^2}{4k\delta} \ln \left( 19, 4 \frac{a\tau}{r_0^2} \right) + T_H,$$
 (3.3)

где k — теплопроводность материала.

В ряде технологических процессов лазерной обработки используется сканирование обрабатываемой поверхности лазерным пучком. Результаты теплового воздействия при этом зависят от скорости сканирования  $V_{c\kappa}$ .

При быстродвижущемся источнике  $\left(\frac{V_{_{\it c\kappa}}r_0}{a}\gg 1\right)$  максимальная температура на обрабатываемой поверхности сильно поглощающего материала:

$$T \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q_0 (1 - R)}{k} \sqrt{\frac{2ar_0}{V_{CK}}} + T_H. \tag{3.4}$$

При медленно движущемся источнике  $\left(\frac{V_{c\kappa}r_0}{a}\ll 1\right)$ 

$$T \approx \frac{q_0 (1 - R) r_0}{k} \left( 1 - \frac{V_{c\kappa} r_0}{4a} \right) + T_H.$$
 (3.5)

Другим важным параметром лазерной обработки является скорость активируемого в облучаемом материале процесса. Для большинства термически активируемых процессов, таких как испарение, различные термохимические реакции, скорость процесса V экспоненциально зависит от температуры T, что в наиболее общем виде характеризуется формулой Френкеля:

$$V(T) = c_0 \exp\left(-\frac{L^{\scriptscriptstyle M} \mu}{R_{\scriptscriptstyle \Gamma} T}\right),\tag{3.6}$$

где  $L^{^{_{M}}}$  — энергия активации соответствующего процесса в расчете на единицу массы (теплота испарения и т.п.),  $c_{0}$  — скорость звука в твердом теле,  $R_{\Gamma}$  — универсальная газовая постоянная,  $\mu$  — молярная (атомная) масса обрабатываемого материала.

В частности, фронт испарения — граница раздела парообразной и конденсированной (расплава) среды — продвигается вглубь материала с некоторой скоростью V(T), являющейся функцией температуры поверхности T.

При испарении вещества возникает механический импульс отдачи, связанный с реактивным действием вылетающих паров. Давление отдачи  $P_{omd}$  можно оценить как половину величины давления насыщенных паров  $P_T$ , которое состоит из равных значений давления отдачи  $P_{omd}$  и давления бомбардировки  $P_{omd}$  пара над поверхностью материала:

$$P_T = P_{omo} + P_{fomo}. (3.7)$$

Считая, что при лазерном испарении  $P_{\text{бомб}} = 0$ , получим  $P = 0.5 P_{\text{ото}}$ .

Давление насыщенных паров при температуре T, равной температуре поверхности испарения, определяется из уравнения Клаузиуса-Клапейрона:

$$P_{T} = P_{0} \frac{T}{T_{0}} \exp \left[ \frac{L_{u}^{M} \mu}{R_{\Gamma} T_{0}} \left( 1 - \frac{T_{0}}{T} \right) \right], \tag{3.8}$$

где  $L_u^{\scriptscriptstyle M}$  — скрытая теплота испарения единицы массы материала,  $P_0$  — давление насыщенных паров при температуре  $T_0$  (например,  $P_0=10^5$  Па при  $T=T_{\scriptscriptstyle K}$  — температуре кипения при нормальном давлении).

Определение температуры материала, обрабатываемого лазерным излучением, и основанный на нем расчет скорости испарения дают возможность получить интегральные характеристики процесса и определить необходимые параметры режима обработки.

В некоторых случаях тепловая модель воздействия излучения оказывается недостаточной для корректного рассмотрения процессов лазерных технологий. Например, при сверлении глубоких отверстий нельзя не учитывать поглощения излучения в парах в образующемся канале и т.п. В настоящем пособии эти вопросы не рассматриваются.

## Примеры решения задач

**Задача 3.1.** Оценить плотности мощности лазерного излучения, необходимые для нагревания алюминия, меди, вольфрама, железа до температур плавления и температур кипения излучением лазера с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм при длительностях импульса излучения  $\tau = 10^{-3}$  с и  $\tau = 10^{-7}$  с.

#### Решение

При импульсном воздействии лазерного излучения на металлы температура поверхности определяется следующим выражением:

$$T = \frac{2q_0 A \sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_H,$$

где A = 1 - R — поглощательная способность материала, R — коэффициент отражения материала.

Отсюда получаем выражение для плотности мощности:

$$q_0 = \frac{(T - T_H)k\sqrt{\pi}}{2(1 - R)\sqrt{a\tau}}.$$

Результаты вычислений сведены в таблицу (плотность мощности излучения в таблице выражена в  $Bt/cm^2$ ):

Длитель-	Al		Cu		W		Fe	
ность	$q_{\scriptscriptstyle 0\pi\pi}$	$q_{0{\scriptscriptstyle \mathrm{K}}{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}}$	$q_{\scriptscriptstyle 0\pi\pi}$	$q_{0 \mathrm{кип}}$	$q_{\scriptscriptstyle 0\pi\pi}$	$q_{0{\scriptscriptstyle \mathrm{KUII}}}$	$q_{\scriptscriptstyle 0\pi\pi}$	$q_{0 {\scriptscriptstyle \mathrm{K}} {\scriptscriptstyle \mathrm{H}} {\scriptscriptstyle \mathrm{H}}}$
импульса								
$\tau_1 = 10^{-3} \text{ c}$	6,2.105	$2,4\cdot10^6$	$1,2\cdot10^{6}$	$2,9 \cdot 10^6$	6,3·10 <sup>5</sup>	$1,0\cdot10^{6}$	$1,9 \cdot 10^5$	$3,6\cdot10^{5}$
$\tau_2 = 10^{-7} \text{ c}$	6,2.107	2,4.108	1,2.108	2,9·10 <sup>8</sup>	6,3·10 <sup>7</sup>	1,0.108	1,9·10 <sup>7</sup>	3,6.107
2								

<u>Задача 3.2.</u> Определить диапазон скоростей сканирования  $V_{c\kappa}$  пучка излучения непрерывного лазера при фокусировке его излучения в пятно диаметром 100 мкм, при которых время эффективного воздействия находится в диапазоне  $10^{-3} - 10^{-9}$  с.

#### Решение

Скорость сканирования излучения непрерывного лазера определяется выражением

$$V_{c\kappa} = \frac{d}{\tau}$$
.

Тогда диапазон скоростей при данных временах эффективного воздействия будет следующим:

$$V_{\scriptscriptstyle \mathcal{C}\kappa 1} < V < V_{\scriptscriptstyle \mathcal{C}\kappa 2}\,,$$
 где  $V_{\scriptscriptstyle \mathcal{C}\kappa 1} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{10^{-3}} = 0,1\,$  м/с,  $V_{\scriptscriptstyle \mathcal{C}\kappa 1} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{10^{-9}} = 10^5\,$  м/с, или  $0,1\,$  м/с  $< V_{\scriptscriptstyle \mathcal{C}\kappa} < 10^5\,$  м/с.

## ЗАДАЧИ 1-го УРОВНЯ

- 1. Оценить толщину прогретого слоя материалов стали, хрома, пластмассы и керамики при воздействии на них излучения лазеров:
  - а) Nd:YAG, длительность импульса  $\tau = 10^{-7}$  c,
  - δ) Nd:YAG,  $\tau = 10^{-8}$  c,
- в) Nd:YAG, непрерывный режим, скорость сканирования 40 см/с, диаметр облученной области  $d=10\,$  мкм.
- 2. Оценить значения плотностей мощности лазерного излучения  $q_0$ , необходимых для нагревания поверхностей алюминия, меди, вольфрама, железа до температур плавления и температур кипения непрерывным излучением с длиной волны  $\lambda=1,06$  мкм, если размер области облучения  $r_0=15$  мкм.

Объяснить зависимость значения  $q_0$  от свойств материалов. Привести зависимость плотности мощности излучения, необходимой для нагревания поверхности до определенной температуры, от длительности импульса.

- 3. Оценить плотности мощности лазерного излучения  $q_0$ , необходимые для нагревания поверхностей керамики, стекла, пластмассы
- а) до температуры размягчения излучением лазера с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм и длительностью импульса  $\tau = 10^{-3}$  с и  $\tau = 10^{-7}$  с;
- б) до температуры разрушения непрерывным излучением Nd:YAG-лазера при размере области облучения  $r_0 = 100$  мкм.
- 4. Оценить плотности мощности лазерного излучения  $q_0$  и импульсные мощности P лазера на молекулярном азоте (длительность импульса  $\tau = 10^{-8}\,\mathrm{c}$ ), необходимые для поверхностного окисления, плавления и испарения меди при радиусах облученной области  $r_0 = 5\,\mathrm{mkm}$  и 50 мкм.

- 5. Определить время воздействия на объект излучения непрерывного лазера, размер пятна которого  $d_0$ , при скорости сканирования  $V_{c\kappa}$ . Провести расчеты для  $d_0=1;10;100\,$  мкм и  $V_{c\kappa}=1\,$  см/с;  $1\,$  м/с.
- 6. Определить зависимость температуры тонкой пластины от времени при нагревании ее равномерно по площади и толщине импульсным лазерным излучением, плотность мощности которого изменяется во время импульса следующим образом:
  - a)  $q = q_*$ ,

$$6) q = 2q_* \frac{t}{\tau},$$

$$\mathbf{B}) \ q = 2q_* \left(1 - \frac{t}{\tau}\right),$$

где  $q_* = \text{const}$ ,  $\tau$  — длительность импульса излучения.

- 7. Построить зависимость скорости испарения железа от температуры поверхности. Определить, во сколько раз изменится скорость испарения при изменении температуры от комнатной до температуры кипения.
- 8. Оценить плотность фотонов, давление света на мишень и плотность мощности излучения при нормальном падении света и его полном отражении от поверхности при диаметре облученной области  $1~{\rm cm}^2$  для следующих значений длительности импульса  $\tau$ , энергии импульса W и длины волны излучения  $\lambda$ :
  - а)  $\tau = 10^{-3}$  c, W = 1 Дж,  $\lambda = 1,06$  мкм;
  - б)  $\tau = 10^{-9}$  c,  $W = 10^{-3}$  Дж,  $\lambda = 1{,}06$  мкм;
  - в)  $\tau = 10^{-15}$  c,  $W = 10^{-5}$  Дж,  $\lambda = 1{,}06$  мкм;
  - г)  $\tau = 10^{-13}$  с,  $W = 10^{-6}$  Дж,  $\lambda = 0.8$  мкм (титан-сапфировый лазер);
  - д)  $\tau = 10^{-14}$  с,  $W = 10^{-3}$  Дж,  $\lambda = 0,193$  мкм (ArF эксимерный лазер).

# ЗАДАЧИ 2-го УРОВНЯ

- 9. Оценить плотности мощности лазерного излучения  $q_0$ , необходимые для окисления поверхностей хрома, никеля, висмута, ванадия, меди:
  - а) импульсным лазерным излучением на длине волны 1,06 мкм;
  - б) непрерывным излучением Nd:YAG-лазера;
- в) непрерывным и импульсным ( $\tau = 1$  мкс) излучением  $CO_2$ -лазера при размере области облучения  $r_0 = 500$  мкм.

Сделать выводы о термохимической чувствительности этих металлов на длине волны  $\lambda = 1,06$  мкм при длительности импульса 1 мкс.

10. Определить длительности воздействия, необходимые для испарения керамики, стекла, пластмассы следующими источниками излучения:

- а) непрерывным излучением  ${\rm CO_2}$ -лазера мощностью  $P\!=\!100~{\rm Br}$  при радиусе облученной области  $r_0\!=\!30~{\rm mkm}$ ;
- б) непрерывным излучением Nd:YAG-лазера мощностью  $P = 100~{\rm Br}$  при  $r_0 = 1~{\rm mm}.$
- 11. Определить, произойдет ли локальное испарение поверхности вольфрама при фокусировании на ней пучка непрерывного Nd:YAG-лазера мощностью 100 Вт (фокусное расстояние оптической системы f=5 см) при расходимости пучка
  - a)  $\theta = 2$  мрад;
  - б)  $\theta = 20$  мрад.
- 12. Обосновать применение CO<sub>2</sub>-лазера для обработки Al, Cu (сильное отражение). Рассчитать пороговые плотности мощности по двум схемам: 1) испарение металла, 2) окисление и испарение металла.
- 13. Определить зависимость размера зоны теплового воздействия на поверхности объекта от скорости сканирования излучения непрерывного лазера. Построить график этой зависимости.
- 14. Рассчитать температуру поверхности облучаемого тела в центре облученной области при изменяющейся во времени плотности мощности излучения, приняв аппроксимацию

$$q(t) = q\left(1 - \left(\frac{t}{\tau}\right)^n\right)$$
, если  $T = \frac{A\sqrt{a}}{k} \int_0^\tau \frac{q(t)}{\sqrt{\tau - t}} dt + T_H$ .

- 15. Найти давление отдачи при лазерном испарении железа, если скорость его удаления 1 м/с, а скорость пара у поверхности 1 км/с.
- 16. Определить давление отдачи, действующее на стальную мишень при испарении слоя 10 мкм импульсом лазерного излучения длительностью  $10^{-7}$  с, если скорость вылета паров 1 км/с.
- 17. Определить связь импульса отдачи, возникающего при испарении материала с помощью лазерного излучения, и давления отдачи с плотностью мошности.
- 18. По формуле Френкеля найти максимальное значение dV/dT и определить его величину применительно к конкретным процессам испарения, окисления, диффузии.
- 19. Выявить связь между градиентом температуры  $\partial T/\partial x$  и темпом нагревания  $\partial T/\partial t$  металла на поверхности в центре облученной области радиусом 100 мкм, если максимальная температура нагревания  $T_{\rm max} = 1000^{\circ} {\rm C}$  для случаев воздействия излучения:
  - а) эксимерного ArF-лазера,  $\tau = 1$  нс;
  - б) Nd:YAG-лазера,  $\tau = 100$  нс;
  - в) Nd:YAG-лазера,  $\tau = 1$  мс;
  - г) непрерывного  $CO_2$ -лазера,  $\tau = 1$  с.

## Раздел 4. Лазерная микрообработка материалов

Лазерная микрообработка как раздел лазерного формообразования, основанный на удалении материала, включает прежде всего процессы сверления отверстий, резки, а также гравировки и маркировки. Основным механизмом удаления материала является его испарение и вытеснение расплава из зоны облучения под действием давления паров или внешних механических сил.

Начальная стадия процесса может быть описана моделью поверхностного испарения вещества. Пренебрегая затратами энергии на нагревание материала до температуры кипения  $\rho c T_{\kappa un}$ , на расплавление  $L_{nn}$ , на теплопроводность, то есть считая, что вся подводимая энергия тратится на испарение  $L_u$  (что можно допустить с некоторой погрешностью для малых времен воздействия, т.к.  $L_{nn}$ ,  $\rho c T_{\kappa un} \ll L_u$ ), получим скорость роста цилиндрического отверстия с диаметром, равным диаметру светового пятна  $d_0$  и глубиной h, в виде

$$V\left[\frac{M}{c}\right] = \frac{q\left[\frac{BT}{M^2}\right]}{L_u\left[\frac{J}{M}\right]}$$
(4.1)

где  $V = h/\tau$  (  $\tau$  — длительность воздействия).

При этом связь скорости движения границы испарения V с температурой поверхности  $T_0$  определяется выражением (3.6).

Как видно из выражения (4.1), глубина отверстия h согласно этой модели растет линейно со временем, а диаметр d остается постоянным. Эксперимент удовлетворительно описывается этой моделью для начальной стадии процесса разрушения, когда h(t) < d(t) (рис. 4.1). После этого рост отверстия в глубину замедляется, а его диаметр, наоборот, начинает увеличиваться.

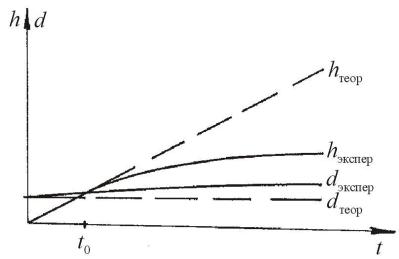


Рисунок 4.1. Изменение глубины h и диаметра d отверстия во времени (экспериментальные и теоретические значения)

На этой стадии развития отверстия необходимо учитывать движение расплава и взаимное расположение поверхности материала и сфокусированного пучка излучения. Особенности лазерной размерной обработки с учетом этих факторов рассмотрим в применении к лазерному сверлению отверстий и резке материалов.

## 4.1. Лазерное сверление отверстий

Кинетика роста лунки при лазерном сверлении отверстий зависит от многих факторов, связанных с особенностями движения пара и течения расплава по стенкам отверстия сложной формы и их взаимным влиянием. Поэтому точное решение задачи достаточно сложно, и используются те или иные феноменологические модели. Согласно наиболее распространенной модели, основанной на результатах скоростной киносъемки, при фокусировке излучения ниже передней поверхности образца вблизи нее в материале образуется лунка, профиль которой близок к цилиндрическому. Изменение размеров лунки со временем происходит таким образом, что ее радиус r(t) и глубина h(t) связаны между собой уравнением светового конуса с углом раствора  $2\gamma$  (рис. 4.2):

$$r(t) = r_0 + \operatorname{tg} \gamma \cdot h(t). \tag{4.2}$$

Предполагается, что материал со дна лунки только испаряется, а со стенок уносится в виде расплава, причем оба процесса являются квазистационарными. Тогда в пренебрежении температурной зависимостью теплоты испарения и экранировкой поверхности продуктами разрушения уравнение энергетического баланса в лунке может быть записано следующим образом:

$$P(t)dt = \rho L_u \pi r^2(t) dh + \rho L_{nn} 2\pi r(t) h(t) dr, \qquad (4.3)$$

где P(t) – текущее значение поглощенной мощности излучения.

Решение системы (4.2, 4.3) для P = const и  $L_u \gg L_{nn}$  дает:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\mathsf{tg}\gamma}\right)^3 + \frac{3Pt}{\pi \mathsf{tg}^2 \gamma \cdot \rho L_u} - \frac{r_0}{\mathsf{tg}\gamma}}; \tag{4.4}$$

$$r = \sqrt[3]{r_0^3 + \frac{3Pt \cdot \lg \gamma}{\pi \rho L_u}}.$$
(4.5)

Анализируя выражения (4.4) и (4.5), можно показать, что на начальной стадии процесса образования лунки ( $h \ll r_0$ ) ее глубина растет линейно во времени за счет испарения материала по площади светового пятна (как в одномерной модели квазистационарного испарения), а диаметр меняется слабо. С течением времени скорость роста лунки в глубину замедляется, в предельном случае ( $t \to \infty$ ) ее глубина и радиус растут пропорционально  $t^{\frac{1}{3}}$ , т.е. форма лунки не меняется. Такой режим квазистационарного развития лунки устанавливается при  $q = 10^7 - 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> к концу лазерного импульса длительностью  $\tau = 1$  мс.

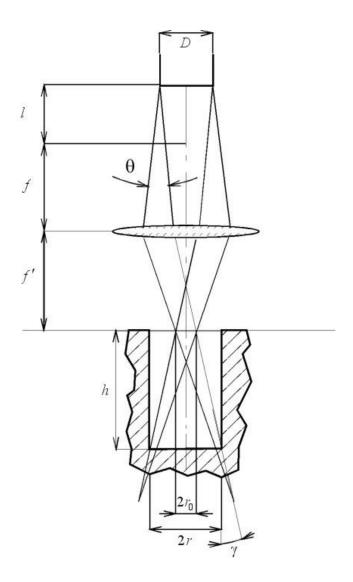


Рисунок 4.2. Схема лазерного сверления отверстия

При заданных значениях h и r параметры режима обработки (преимущественно энергия излучения и фокусное расстояние оптической системы) определяются из баланса энергии и геометрических соотношений (в зависимости от отношения h/r).

Рассмотренная модель справедлива при фокусировке излучения вблизи начального расположения поверхности материала. Однако условия фокусировки оказывают значительное влияние на профиль лунки. При обработке в сходящемся световом пучке характерной является коническая форма лунки, в расходящемся — цилиндрическая. С увеличением расстояния между плоскостью фокусировки и поверхностью материала увеличивается радиус лунки и уменьшается ее глубина.

Существует ряд методов, позволяющих повысить точность и качество сверления отверстий.

а) Применение импульса с определенной формой и структурой. Оптимальным является импульс с коротким передним и задним фронтом

 $(\tau_{\phi} < 0.1 r_0^2/a)$ . Благоприятным для размерной обработки является пичковый режим излучения.

- б) Использование проекционной оптической системы и обработка отверстия в цилиндрической световой трубке (см. раздел 2).
- в) Применение многоимпульсного метода обработки. При этом лунка растет в глубину постепенно за счет послойного испарения материала каждым импульсом. Окончательная глубина отверстия определяется суммарной энергией серии импульсов (в выражении (4.4)  $Pt = W = \sum_{i=1}^n W_i$ , где n число импульсов,  $W_i$  энергия i-го импульса), а радиус отверстия усредненными параметрами отдельного импульса (в выражении (4.5)  $Pt = W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i$ ). Для многоимпульсного режима обработки характерно снижение доли расплава в продуктах разрушения. Многоимпульсный режим используется для получения прецизионных или максимально глубоких отверстий. Таковым, по существу, является режим обработки серией коротких импульсов микросекундной или наносекундной длительности.
- г) Применение систем автоподстройки фокуса. Производится относительное смещение оптической системы перед очередным импульсом на величину, равную толщине испаренного за предыдущий импульс слоя. Таким образом, плотность мощности излучения на движущейся поверхности испарения (дне отверстия) остается постоянной на протяжении всей обработки.

### 4.2. Лазерная резка материалов

Лазерная резка, как и другие виды лазерной обработки, основана на тепловом действии излучения, при этом характерной особенностью является то, что нагревание происходит под действием движущегося источника тепла. В зависимости от значения величины  $\frac{V_{c\kappa}r_0}{a}$  ( $V_{c\kappa}$  — скорость сканирования лазерного пучка по поверхности материала,  $r_0$  — радиус облученной области, a — температуропроводность материала) источник можно считать быстро движущимся или медленно движущимся (см. раздел 3). При лазерной резке металлов и полупроводников со скоростью  $V_{c\kappa} \le 1$  см/с и размере облученной области  $r_0 \le 0.5$  мм источник тепла, как правило, является медленно движущимся, и температура в центре облученной области определяется выражением (3.5). В этом случае из-за большой теплопроводности материала температура поверхности может зависеть и от толщины обрабатываемого листа или пластины h, если время  $2r_0/V_{c\kappa}$  будет больше времени теплопроводностного прогрева пластины  $h^2/a$ , т.е. при  $h < (2ar_0/V_{c\kappa})^{1/2}$ . При этом представляет интерес оценка температуры в центре зоны облучения в случае, когда за счет

теплопроводности температура по толщине пластины становится одинаковой:

$$T \approx \frac{qr_0^2}{2kh} \ln \frac{2,25}{r_0 V_{cK}}$$
 (4.6)

При лазерной резке диэлектрических материалов или металлических пленок на диэлектрических подложках источник тепла является быстро движущимся, и температура в наиболее горячей точке определяется выражением (3.4).

Изложенные особенности процесса нагревания движущимся источником тепла характерны для режима непрерывного облучения материала. Если лазер работает в импульсном режиме, генерируя серию импульсов длительностью  $\tau$  при частоте следования импульсов  $f_u$ , то при длительности импульса  $\tau < 0.1 r_0/V_{c\kappa}$  импульсный источник можно рассматривать как неподвижный (что верно во всех представляющих интерес случаях при  $V_{c\kappa} < 1$  см/с и  $r_0 > 10$  мкм). После окончания очередного импульса материал начинает остывать, и если частота следования импульсов  $f_u < a/30 r_0^2$ , то накопления тепла от импульса к импульсу не происходит, и результат воздействия зависит только от энергетических параметров отдельного импульса.

Лазерная резка может быть основана на различных процессах: испарении материала, плавлении с удалением расплава из зоны реза, химических реакциях (горении, разложении с выделением летучих соединений и др.). Получение глубокого реза испарением сопряжено с образованием достаточно большого количества жидкой фазы и ее неполным удалением из зоны воздействия излучения давлением паров. В этом случае с целью исключения заплавления сквозного реза применяют устройства отсоса продуктов разрушения из зоны резания или поддув активного газа, обычно кислорода, в зону резания (газолазерная резка).

## Примеры решения задач

<u>Задача 4.1.</u> Пользуясь геометрической моделью, найти максимально возможное отношение глубины отверстия к его диаметру.

#### Решение

Из формулы (4.2) следует, что  $\frac{h(t)}{r(t)} = \left[1 - \frac{r_0}{r(t)}\right] \operatorname{ctg} \gamma$ . Искомое отношение

 $\frac{h(t)}{r(t)}$  максимально, если выражение в квадратных скобках стремится к 1, т.е.

r(t) максимально. Тогда

$$\frac{h(t)}{r(t)} = \operatorname{ctg} \gamma.$$

Из геометрии рисунка 4.2 следует, что  ${\rm ctg}\gamma$  определяется следующим образом:

$$agy = \frac{2f'}{D}$$
.

Таким образом, искомое отношение равно

$$\frac{h(t)}{2r(t)} = \frac{f'}{D}.$$

**Задача 4.2.**Определить максимальную скорость резки  $V_{\max}$  медной фольги толщиной h=0,1 мм:

- а) непрерывным излучением Nd:YAG-лазера мощностью  $P_0 = 500$  Вт при радиусе пятна  $r_0 = 50$  мкм;
- б) импульсным излучением Nd:YAG-лазера со средней мощностью  $P_{cp}=500~{\rm Bt},~~\tau=10^{-7}~{\rm c};~~$  частота следования импульсов  $f_u=10~{\rm kFu},~~r_0=50~{\rm mkm},$  угол схождения излучения  $\gamma=3^\circ$  .

### Решение

Так как медь имеет большую теплопроводность, то можно предположить, что при сканировании непрерывным излучением можно воспользоваться формулой для медленно движущегося источника, и за время воздействия происходит выравнивание температуры по толщине фольги. При этом

$$T = \left(\frac{qr_0^2}{2kh}\right) \ln\left(\frac{2,25a}{r_0 V_{c\kappa}}\right) + T_H,$$

где  $q = \frac{P_0(1-R)}{\pi r_0^2}$ . Отсюда

$$V_{c\kappa} = \frac{2,25a}{r_0} \exp \left[ -\frac{2\pi kh(T - T_H)}{P_0(1 - R)} \right].$$

Максимальная скорость сканирования определяется нагревом фольги до температуры  $T=T_{\kappa un}$ . Подставляя численные значения, получим  $V_{\max}=4\,$  см/с. При обработке в импульсно-периодическом режиме происходит накопление тепла от импульса к импульсу, так как

$$f_u > \frac{a}{30r_0^2} = 1,5 \text{ к}\Gamma$$
ц.

В этом случае расчет строится на многоимпульсной модели (аналогично лазерному образованию отверстий). При этом толщина реза (здесь она равна толщине фольги) определяется выражением

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\mathsf{tg}\gamma}\right)^3 + \frac{3W}{\pi L_0 \mathsf{tg}^2 \gamma} - \frac{r_0}{\mathsf{tg}\gamma}},$$

где  $L_0 \approx L_{ucn}$  — удельная теплота испарения,  $\gamma$  — угол схождения, W — суммарная поглощенная энергия n импульсов ( $W = nW_i$ ). Отсюда находим требуемую суммарную поглощенную энергию W:

$$W = \frac{\pi L_0 t g^2 \gamma}{3} \left[ \left( h + \frac{r_0}{t g \gamma} \right)^3 - \left( \frac{r_0}{t g \gamma} \right)^3 \right] = 3, 4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж.}$$

Энергия одного импульса равна

$$W_i = \frac{P_0(1-R)}{f_{ii}} = 4.5 \cdot 10^{-3}$$
 Дж.

Максимальная скорость сканирования определяется минимальным количеством импульсов, облучающих каждую точку реза:

$$V_{\text{max}} = \frac{r_0 f_u}{n} = \frac{r_0 f_u W_i}{W} = 7 \text{ cm/c.}$$

# ЗАДАЧИ 1-го УРОВНЯ

- 1. Оценить скорость испарения материала (скорость роста глубины отверстия) в стали, вольфраме при поглощенной плотности мощности излучения  $q = 10^8$  Bt/cm<sup>2</sup>.
- 2. Определить предельную глубину отверстия в стали, связанную с расфокусировкой излучения, при  $\gamma=0,2$  рад,  $q=10^8$  Bt/cm²,  $\tau=10^{-3}$  с,  $r_0=10$  мкм.
- 3. Определить теплоту разрушения  $L_p$  при двухфазном разрушении и заданной схеме обработки (используя геометрическую модель образования отверстия).
- 4. Найти соотношение жидкости и пара в продуктах разрушения, образующихся при лазерном сверлении отверстий, используя двухфазную феноменологическую модель образования отверстия.
- 5. Определить необходимые и достаточные условия, при которых лазер может использоваться для резки.

# ЗАДАЧИ 2-го УРОВНЯ

- 6. Определить значения плотности мощности излучения, необходимые для получения отверстия в стали глубиной 1 мм ( $\tau = 10^{-3}$  с,  $\gamma = 0.2$  рад). Вывести зависимость поглощенной плотности мощности лазерного излучения от глубины отверстия.
- 7. Пользуясь законом сохранения импульса, оценить давление отдачи пара по известным экспериментальным значениям толщины испаренного слоя алюминия и длительности лазерного импульса. Построить зависимость толщины испаренного слоя от времени.

- 8. Определить зависимость глубины и радиуса отверстия от параметров обработки (энергии лазерного импульса, угла расхождения излучения после фокуса оптической системы) при  $h(t) \gg r_0$  и при  $h(t) \ll r_0$  по геометрической модели.
- 9. Оценить глубину отверстия, получаемую импульсом свободной генерации, игнорируя пичковую структуру, если  $\tau=10^{-3}$  с,  $W=10^{-2}$  Дж, диаметр пятна в фокусе 20 мкм. Определить перекрытие отверстий при скорости перемещения объекта  $V_{c\kappa}=0.1$  см/с, частоте следования импульсов  $f_u=250$  Гц,  $\mathrm{tg}\gamma=0.4$ . Материал железо.
- 10. Предложить оптико-механическую схему лазерного сверления отверстий диаметром от 10 до 200 мкм в фольге толщиной 100 мкм, если производительность лазера равна 600 отв/мин, фокусное расстояние оптической системы  $f=50\,$  мм, материалы сталь и медь.
- 11. Определить параметры оптической системы ( $\gamma$  и f) для профильной резки медицинских стентов («протезов» кровеносных сосудов) металлических трубок диаметром 1 и 2 мм с толщиной стенок 100 мкм, при которых исключаются повреждения противоположной стенки трубки, когда ее передняя поверхность испаряется.
  - 12. Назвать причины отклонения качества отверстий от идеальных.
- 13. Определить глубину отверстия h, его диаметр d и отношение  $\frac{h}{d}$  при многоимпульсной обработке, используя геометрическую модель образования отверстия.
- 14. Оценить параметры многоимпульсного режима обработки для получения в стали отверстий глубиной 1 мм и диаметром 100 мкм при скорости испарения  $V_u=1$  км/с. Расчет провести для импульсов излучения длительностью 1 мс, 0,1 мкс, 10 нс.
- 15. Определить для указанных ниже материалов критерии быстро и медленно движущегося источника и пороговые плотности мощности излучения, необходимые для их резки при скоростях сканирования:
  - 1) бумага, 500 см/с;
  - 2) фанера, 2 см/с;
  - 3) стекло, 2,5 см/с;
  - 4) сталь, 10 см/с;
  - 5) резина, 2,5 см/с;
  - 6) кожа, 28 см/с.

Размер облученной области для стали -200 мкм, для остальных материалов -500 мкм. Определить значения необходимой мощности излучения.

16. Найти пороги лазерной резки материалов непрерывным излучением  ${\rm CO_2}$  и Nd:YAG-лазеров. Определить достижимые глубины резки при мощности излучения  $P_0=100~{\rm Bt}$  (Nd:YAG-лазер) и  $P_0=1000~{\rm Bt}$  (CO<sub>2</sub>-лазер). Найти максимальную скорость резки  $V_{\rm max}$  пластины стали толщиной  $d=1~{\rm mm}$  для этих же лазеров.

- 17. Сравнить пороги резки для импульсного и непрерывного Nd:YAG-лазера и скорости резки при толщине пластины d=1 мм и при одной и той же средней мощности P=500 Вт.
- 18. Проанализировать возможность использования полупроводникового лазера (мощность 100 мВт, расходимость 250×150 мрад) для резки бумаги.
- 19. Рассчитать изменение параметров установки при использовании оптической системы с автоподстройкой фокуса при заданной глубине и диаметре отверстий.
- 20. Определить максимальную допустимую скорость сканирования лазерного пучка при лазерной гравировке испарением поверхности хрома излучением непрерывного Nd:YAG-лазера мощностью 100 Вт при радиусе пятна облученной области  $r_0 = 0,3$  мм. Оценить скорости сканирования, необходимые для удаления слоя хрома толщиной 10 мкм и 100 мкм.

## Раздел 5. Лазерное термоупрочнение и сварка

Процессы нагревания и плавления материала без разрушения являются физической основой для технологических процессов термоупрочнения и сварки.

## 5.1. Термоупрочнение

Особенности применения лазерной термообработки определяются спецификой лазерного нагрева материалов. В частности, высокие скорости нагрева поверхности и ее охлаждения обеспечивают эффективное термо-упрочнение поверхности при нагреве выше температуры закалки, а большие значения температуры и ее градиентов в зоне лазерного воздействия облегчают диффузию легирующих элементов в термообрабатываемый материал.

Основной целью лазерной закалки является повышение твердости и износоустойчивости материалов в результате изменения их структуры. Быстрое охлаждение поверхности материала за счет теплопроводности (со скоростью порядка 108 К/с) после прекращения подвода энергии лазерного излучения приводит к повышению твердости приповерхностных слоев в результате структурных изменений. Закалку производят как непрерывным, так и импульсным лазерным излучением. Для термоупрочнения заданной области поверхности используют сканирование лазерного пучка по поверхности или перемещение обрабатываемой детали. Температуру нагрева поверхности и глубину прогрева можно регулировать путем изменения мощности лазерного пучка, степени его фокусировки и длительности воздействия или скорости перемещения пучка по поверхности материала. Глубину закаленного слоя можно количественно оценить из выражения для распределения температуры в материале при равномерном облучении его поверхности. Для сильно поглощающего материала (например, металла) при условии, что размер облученной области  $r_0$  существенно превышает толщину прогретого слоя (  $r_0 \gg \sqrt{a \tau}$  , где a — температуропроводность материала,  $\tau$  — длительность воздействия излучения), это выражение имеет вид

$$T(x,t) = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + T_H,$$
 (5.1)

где  $q_0$  — плотность мощности падающего излучения на поверхности, R — коэффициент отражения,  $T_H$  — начальная температура материала, k — его теплопроводность, t — время, отсчитываемое с начала облучения, ось x направлена вглубь материала перпендикулярно его поверхности (x = 0 соответствует поверхности).

Выражение (5.1) позволяет также определить скорость нагрева и градиент температуры в материале.

После окончания воздействия излучения ( $t \ge \tau$ ) распределение температуры определяется зависимостью

$$T(x,t) = (T_0 - T_H) \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \left[ \sqrt{t} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} - (\sqrt{t-\tau}) \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right], \quad (5.2)$$

где  $T_0$  — температура поверхности в момент окончания воздействия излучения. Выражение (5.2) позволяет определить скорость остывания материала.

Закалка может производиться как в твердой фазе,  $T < T_{nn}$ , так и через расплав, при  $T > T_{nn}$  ( $T_{nn}$  — температура плавления материала). Глубина закаленного слоя в первом случае  $h_T$  ограничена нагреванием поверхности до  $T_{nn}$ , а во втором,  $h_{\mathcal{K}}$  — до  $T_{\kappa un}$ , таким образом,  $h_{\mathcal{K}} > h_T$ . Однако при закалке в твердой фазе сохраняется исходное качество поверхности детали, а при закалке из жидкой фазы оно ухудшается из-за конвекции и действия давления отдачи.

Возможна еще одна разновидность лазерной закалки — ударная закалка. Она происходит при лазерном испарении с поверхности обрабатываемой детали предварительно нанесенного тонкого слоя материала, имеющего низкую температуру испарения, за счет ударного воздействия давления отдачи паров на нагретый материал.

Другим направлением лазерной термообработки является лазерное легирование поверхности с целью повышения ее твердости. При этом на обрабатываемую поверхность наносится порошок, содержащий легирующие присадки, а затем производится облучение поверхности. В результате происходит механическое перемешивание расплавленного порошка и основного материала в тонком приповерхностном слое под действием гидродинамических сил и температурных градиентов или диффузное распространение с образованием твердого раствора.

## 5.2. Лазерная сварка

Метод лазерной сварки обладает важными преимуществами по сравнению с большинством других способов сварки.

Высокая плотность мощности излучения обеспечивает возможность сваривания тугоплавких материалов (вольфрам, тантал, молибден) и материалов, обладающих большой теплопроводностью (медь, серебро). Кратковременность и локальность лазерного воздействия позволяют сваривать детали малой толщины (~ 10 мкм) и малых размеров при незначительном термическом воздействии на соседние участки. Большое значение имеют бесконтактность воздействия и возможность сварки в прозрачной газовой или жидкой среде.

Плавление под действием лазерного излучения представляет основной процесс, лежащий в основе лазерной сварки. При этом возможность сварки определяется, в первую очередь, используемыми материалами. Если матери-

алы пригодны для лазерной сварки, то для обеспечения хорошего сварного соединения необходимо создать условия, при которых происходило бы опережающее плавление свариваемой детали больших размеров относительно плавления свариваемой детали меньших размеров.

При лазерной сварке металлов световое пятно, получаемое на поверхности свариваемых деталей при фокусировке излучения, является поверхностным источником нагрева, т.к. излучение поглощается тонким поверхностным слоем толщиной в несколько сотых долей микрона. При значениях плотности мощности излучения, недостаточных для интенсивного испарения  $(q \approx 10^5 - 10^6 \ \mathrm{Bt/cm^2}$  при длительностях воздействия  $\tau \sim 10^{-3} \mathrm{c} - 10^{-2} \ \mathrm{c}$ ) передача тепла в глубину свариваемых материалов осуществляется в основном за счет теплопроводности. При этом (теплопроводностный режим, рисунок 5.1, а) форма зоны проплавления близка к шаровому сегменту.

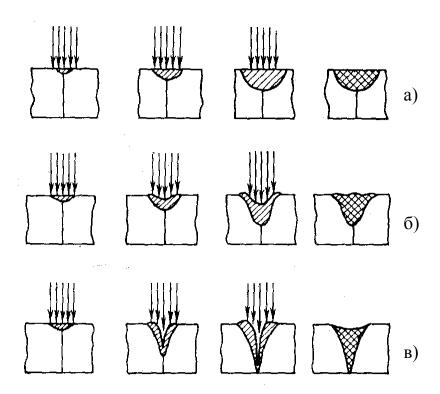


Рисунок 5.1. Режимы лазерной сварки: а) теплопроводностный режим, б) сварка с прогибом, в) режим кинжального проплавления

Если плотность мощности излучения достаточна для испарения материала с поверхности образца (что обычно наблюдается при лазерной сварке), поверхность сварочной ванны прогибается под действием давления пара. При относительно малой плотности мощности излучения поверхностное натяжение расплавленного металла превышает силу давления паров, что препятствует выплеску расплава, т.е.

$$P_{\sigma} = \frac{\sigma}{h_{on}/2} > P_{om\partial}, \tag{5.3}$$

где  $P_{\sigma}$  – давление поверхностного натяжения,  $P_{omd}$  – давление отдачи при испарении,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $h_{nn}$  – толщина расплавленного слоя,  $h_{nn}/2$  – радиус кривизны на краю зоны расплава. При этом после окончания воздействия излучения расплавленный металл заполняет образовавшееся углубление, но глубина проплавления увеличивается по сравнению с нагревом без заметного испарения. Форма зоны проплавления близка к конической (сварка с прогибом – рисунок 5.1, б).

При увеличении плотности мощности излучения до величины  $q \sim 5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^7 \, \mathrm{Bt/cm^2}$  в сварочной ванне образуется узкое глубокое отверстие, металл из которого частично испаряется, частично вытесняется к периферии зоны воздействия давлением паров. При этом после окончания воздействия излучения отверстие заполняется расплавом из периферийной части области воздействия, где интенсивность излучения была недостаточна для испарения расплава (режим кинжального, или глубокого проплавления, рисунок 5.1, в).

Оценка глубины проплавления при сварке в отсутствии испарения может быть получена из решения краевой задачи теплопроводности одномерного нагрева материала (5.1).

Существуют следующие разновидности сварки: точечная и шовная. Точечная лазерная сварка эффективно применяется в микроэлектронной технологии на операциях сварки проводов, приварки проволок к контактным площадкам и тонким пленкам, сварки тонких пластин. Шовная лазерная сварка производится с помощью лазеров, работающих в непрерывном режиме и в импульсно-частотном режиме методом перекрытия зон воздействия.

Скорость шовной импульсной сварки определяется диаметром сварных точек d, коэффициентом их перекрытия p и частотой следования импульсов  $f_u$ :

$$V = f_u d(1-p). (5.4)$$

При заданном коэффициенте перекрытия, от которого зависит качество шва, увеличение скорости сварки может быть достигнуто за счет увеличения диаметра светового пятна или его вытягивания в направлении шва. Из-за ограничений, налагаемых теплопроводностью, высокие скорости сварки возможны лишь для тонких деталей.

## Примеры решения задач

<u>Задача 5.1.</u> Оценить скорость нагрева и охлаждения при лазерной импульсной закалке стали.

#### Решение

Выражение для скорости нагрева можно получить дифференцированием по времени уравнения (5.1):

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{q_0(1-R)}{k} \sqrt{\frac{a}{t}} \left( \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \cdot \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right).$$

На поверхности (при x = 0) эта зависимость имеет вид

$$\frac{\partial T\!\left(0,t\right)}{\partial t} = \frac{q_0\!\left(1\!-\!R\right)\!\sqrt{a}}{k\sqrt{\pi t}}\,.$$

Для оценки скорости нагрева при закалке стали введем величину  $T_0$  — температура поверхности в момент окончания воздействия, которая изменяется в пределах от  $T_{_{3a\kappa}}$  до  $T_{_{nn}}$  и определяется следующим выражением:

$$T\big|_{t=\tau,x=0} = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}}.$$

В итоге получаем:

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial t} = \frac{T_0}{2\sqrt{t\tau}}.$$

Оценим скорость нагрева при  $t=\tau=10^{-3}$  с;  $T_{_{3a\kappa}}=850^{\circ}\mathrm{C}$  ,  $T_{_{nn}}=1500^{\circ}\mathrm{C}$  для стали:

$$5,6\cdot10^5\frac{\mathrm{K}}{\mathrm{c}}<\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial t}<8,8\cdot10^5\frac{\mathrm{K}}{\mathrm{c}}.$$

Для нахождения скорости охлаждения воспользуемся формулой (5.2) для распределения температуры после окончания воздействия излучения:

$$T(x,t) = (T_0 - T_H) \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \left[ \sqrt{t} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} - (\sqrt{t-\tau}) \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right],$$

где  $T_0$  — температура поверхности в момент окончания воздействия излучения, t — время, отсчитываемое с начала облучения.

Производная по времени  $\partial T/\partial t$  от этого выражения имеет вид

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = (T_0 - T_H) \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \left( \frac{1}{2\sqrt{t}} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} \cdot \frac{x}{4t\sqrt{a}} \right) -$$

$$-(T_0 - T_H)\sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \left[ \frac{1}{2\sqrt{t-\tau}} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}} + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \cdot \frac{x}{4(t-\tau)\sqrt{a}} \right].$$

На поверхности (x = 0) получаем:

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial t} = \frac{\left(T_0 - T_H\right)}{2\sqrt{\tau}} \left(\frac{1}{\sqrt{t}} - \frac{1}{\sqrt{t-\tau}}\right).$$

Оценим скорость охлаждения поверхности при  $t = 2\tau$ :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\left(T_0 - T_H\right)}{2\tau} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - 1\right) = -0.146 \frac{T_0 - T_H}{\tau},$$

тогда, в зависимости от величины  $T_0$  ( $T_{3a\kappa} < T_0 < T_{\kappa un}$ ), скорость охлаждения поверхности изменяется в пределах

$$-2,6\cdot10^{5}\frac{\mathrm{K}}{\mathrm{c}}<\frac{\partial T(0;2\tau)}{\partial t}<-1,6\cdot10^{5}\frac{\mathrm{K}}{\mathrm{c}}.$$

Задача 5.2. Определить диапазон допустимых значений плотности мощности излучения для сварки «встык» двух пластин из фольги из золота и хрома толщиной 0,1 мм излучением Nd:YAG-лазера ( $\tau = 10^{-4}$  с). Считать, что до начала расплавления одной из пластин они теплоизолированы друг от друга, после чего температуры пластин в облученной области равны. Облученная область симметрична относительно сварного шва.

### Решение

Для образования сварного соединения необходимо, чтобы оба металла достигли температуры плавления, но не начали испаряться. Плотность мощности излучения, необходимую для нагревания каждого из металлов до температуры T в течение импульса излучения в условиях отсутствия их теплового контакта, определим из уравнения баланса энергий в расчете на единицу площади облученной области:

$$q_0 A \tau = \rho c h (T - T_H).$$

Отсюда

$$q_0 = \frac{\rho ch(T - T_H)}{A\tau}$$
.

Вычисления показывают, что для Cr достижение температуры плавления требует плотности мощности излучения  $q_0 = 1,47 \cdot 10^6~{\rm BT/cm^2}$ , для золота, по причине высокого коэффициента отражения, много больше —  $q_0 = 12,9 \cdot 10^6~{\rm BT/cm^2}$ . Таким образом, при  $q_0 > 1,47 \cdot 10^6~{\rm BT/cm^2}$  происходит плавление фольги Cr в облученной области. После этого будем считать температуру обоих металлов в облученной области одинаковой. Уравнение баланса энергий при этом имеет вид

$$q_0 (A_{Cr} + A_{Au}) \tau = (\rho_{Cr} c_{Cr} + \rho_{Au} c_{Au}) h(T - T_H).$$

Отсюда

$$q_0 = \frac{\left(\rho_{\mathrm{Cr}} c_{\mathrm{Cr}} + \rho_{\mathrm{Au}} c_{\mathrm{Au}}\right) h \left(T - T_H\right)}{\left(A_{\mathrm{Cr}} + A_{\mathrm{Au}}\right) \tau}.$$

Диапазон допустимых значений плотности мощности излучения определим следующим образом:

$$\max\left\{q_0\left(T_{\scriptscriptstyle \mathit{NTCr}}\right),q_0\left(T_{\scriptscriptstyle \mathit{NTAu}}\right)\right\} < q_0 < \min\left\{q_0\left(T_{\scriptscriptstyle \mathit{KUNCr}}\right),q_0\left(T_{\scriptscriptstyle \mathit{KUNAu}}\right)\right\}.$$

Подставив численные значения, получим:

$$2,4\cdot10^6 \,\mathrm{BT/cm^2} < q_0 < 3,34\cdot10^6 \,\mathrm{BT/cm^2}$$
.

### ЗАДАЧИ 1-го УРОВНЯ

1. Предложить материал пленки для осуществления лазерного термомеханического упрочнения стали в твердой фазе путем испарения нанесенной

на поверхность пленки. Оценить диапазон значений плотности мощности излучения и рассчитать толщину пленки.

- 2. Определить максимальную скорость сварки стальных изделий излучением непрерывного  $CO_2$ -лазера мощностью 1 кВт при радиусе пятна облучения на поверхности 0.5 мм.
- 3. Вывести закон изменения плотности мощности лазерного излучения по мере смещения сварочной ванны вниз (прогиб и проплавление), вверх (тепловое расширение).

# ЗАДАЧИ 2-го УРОВНЯ

- 4. Рассчитать глубину термоупрочненного слоя для стали четырьмя способами и сравнить с максимальной глубиной изотермической закалки:
- 1) аналитически из выражения (5.1) при условии  $T_{noe} = T_{nn}$ , температура закалки  $T_{3ak} \approx 0.5 T_{nn}$ ;
  - 2) как  $h = \beta \sqrt{a\tau}$  (найти коэффициент  $\beta$ );
  - 3) графически из выражения (5.1);
- 4) из энергетических соображений, считая, что вся мощность идет на нагрев термоупрочненного слоя (в пренебрежении теплопроводностью).
- 5. Найти глубину расплавленного слоя при лазерной сварке Al четырьмя способами (см. задачу 4).
- 6. Проанализировать влияние малых вертикальных перемещений расплавленной поверхности сварочной ванны на стабильность процесса проплавления при фокусировке излучения на поверхности. Нагревание осуществляется лазером на Nd:YAG мощностью P=100 Вт, диаметр пучка лазерного излучения d=6 мм, расходимость  $\theta=5\cdot10^{-3}$  рад, фокусное расстояние используемой линзы f=50 см.
- 7. Используя значения поглощенной плотности мощности qA, давления отдачи  $P_{om\partial}$ , давления поверхностного натяжения  $P_{nog}$ , привести оценки границ режимов сварки: теплопроводностного, с прогибом, глубокого проплавления; оценить толщину слоя расплава.
- 8. Определить, как зависит диапазон допустимых значений плотности мощности излучения для сварки «встык» двух пластин из алюминия и хрома излучением Nd:YAG-лазера от положения облученной области. Толщина пластин 0,1 мм. Считать, что до начала плавления одной из пластин они теплоизолированы друг от друга, после чего температуры пластин в облученной области равны.
- 9. По оптимальному временному ходу температуры при импульсной сварке (рисунок 5.2) (минимальное значение  $t_0$ , постоянная  $T_{nn}$  в течение импульса) определить требуемую зависимость мощности лазерного импульса от

времени и предложить пути ее реализации. При решении задачи использовать метод преобразования Лапласа.

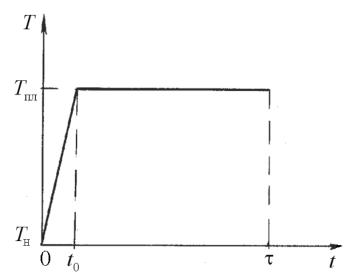


Рисунок 5.2. Оптимальная зависимость температуры от времени при лазерной импульсной сварке

- 10. Провести анализ процесса приварки часовой пружины ко дну корпуса. Разработать расчетные схемы, определить критерии сварки.
- 11. Провести анализ процесса сварки зубных протезов. Разработать расчетные схемы, определить критерии сварки.
- 12. Провести анализ процесса герметизации корпусов микроприборов. Разработать расчетные схемы, определить критерии сварки.
- 13. Провести анализ процесса приварки обмотки к статору электродвигателя. Разработать расчетные схемы, определить критерии сварки.
- 14. Провести анализ процесса приварки сетчатки к глазному дну. Разработать расчетные схемы, определить критерии сварки.

## Раздел 6. Лазерная обработка пленочных элементов

обработка нанесенных на подложку тонких пленок применяется ДЛЯ формирования пленочных элементов, широко используемых в приборостроении и микроэлектронике. Лазерная обработка отличается пленок высокой точностью локальностью, бесконтактностью, хорошей управляемостью и в большинстве случаев достаточной производительностью.

Физические механизмы действия лазерного излучения на тонкие пленки во многом аналогичны действию излучения на массивные материалы, но обладают некоторыми особенностями. Особенности поглощения лазерного излучения в пленке и преобразования лучистой энергии в тепловую связаны с тем, что длина свободного пробега электрона  $l_e$  в материале пленки соизмерима с ее толщиной. Поскольку электрон отдает свою энергию решетке на расстоянии  $\sim 100 l_e$ , то пространственное распределение источников тепла по толщине пленки практически равномерно. Такое приближение оказывается приемлемым для большинства поглощающих пленок толщиной менее 5 мкм. При этом температура пленки практически одинакова по ее толщине, т.к. толщина пленки h, как правило, много меньше размера прогретого слоя в ней  $\sqrt{a_1\tau}$  ( $a_1$  – температуропроводность материала пленки,  $\tau$  – длительность импульса излучения).

Специфика лазерного нагревания пленок связана с тем, что пленка на подложке является двухкомпонентной системой. Температура пленки в середине облученной области достаточно большого размера  $r_0$  ( $r_0 \gg \sqrt{a_1 \tau}$ ) может быть определена из решения системы двух дифференциальных уравнений теплопроводности (для пленки и подложки) с соответствующими граничными и начальными условиями как

$$T_{1} = \frac{q_{0}A_{1}\sqrt{a_{2}t}}{k_{2}} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} + \psi \left[ \exp(\psi^{-2}) \operatorname{erfc}(\psi^{-1}) - 1 \right] \right\} + T_{H}, \qquad (6.1)$$

где  $\psi = \frac{\rho_1 c_1 h}{\rho_2 c_2 \sqrt{a_2 t}}$ ,  $q_0$  – плотность мощности падающего излучения, A –

поглощательная способность,  $\rho-$  плотность, c- теплоемкость, a- температуропроводность, k- теплопроводность,  $T_H-$  начальная температура,

$$t$$
 – текущее время,  $\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{z}^{\infty} e^{-u^{2}} du$  – дополнительный интеграл

вероятности, индекс «1» относится к пленке, «2» – к подложке.

Комплекс  $\psi$  определяет интенсивность теплоотвода из пленки в подложку. Его физический смысл заключается в том, что он характеризует отношение количества тепла в пленке к количеству тепла, запасенного в прогретом слое подложки. При  $\psi \gg 1$  (теплоотвод в подложку мал,

характерный масштаб времени для металлических пленок и диэлектрических подложек для  $h \sim 0.1$  мкм  $t < 10^{-7}$  с) пленка нагревается как адиабатически изолированная, и выражение (6.1) приводится к виду

$$T_{1} = \frac{q_{0}A_{1}t}{\rho_{1}c_{1}h} + T_{H}. \tag{6.2}$$

При  $\psi \ll 1$  (нагрев пленки в основном определяется теплопроводностью подложки, а оптические характеристики пленки влияют лишь на количество поглощенной энергии,  $h \sim 0.1$  мкм,  $t < 10^{-4}$  c)

$$T_1 = \frac{2q_0 A_1 \sqrt{a_2 t}}{k_2 \sqrt{\pi}} + T_H. \tag{6.3}$$

В общем случае (произвольного значения  $\psi$ ) для определения температуры пленки вместо формулы (6.1) можно использовать приближенную формулу

$$T_{1} = \frac{q_{0}A_{1}t}{\rho_{1}c_{1}h\left(1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2\psi}\right)} + T_{H}.$$
(6.4)

В отдельных лазерных технологиях используется обработка прозрачных и полупрозрачных пленок на непрозрачных или слабопоглощающих подложках. При этом поглощение излучения происходит полностью или частично в подложке. Выражения для определения температуры пленки в этих случаях приведены в [4].

С повышением температуры в пленке активируется ряд процессов, которые могут привести к изменению ее физических или химических свойств. Основными процессами, использующимися пленочных технологиях, являются испарение, плавление и термохимические реакции (в окисление). Возможны поверхностное также структурные основном превращения материала типа рекристаллизации, ПЖТО дефектов полупроводниковых структур, спекание и усадка пористых материалов, вжигание вещества пленки в подложку, термическое разложение в твердой и газовой фазе и др.

Основные сферы применения лазерной обработки пленочных элементов следующие.

1. Подгонка электрических параметров пленочных элементов (сопротивлений пленочных резисторов, емкостей пленочных конденсаторов, подстройка частоты кварцевых резонаторов, СВЧ-интегральных схем и т.п.).

Сопротивление пленочного резистора (рисунок 6.1) определяется формулой

$$R_{9} = \frac{\rho_{9}L}{hB},\tag{6.5}$$

где  $\rho_{\ni}$  – удельное электрическое сопротивление материала пленки, h – толщина пленки, L и B – длина и ширина резистора. Подгонку сопротивления

осуществляют, как правило, испарением части резистивного слоя. Изменение сопротивления резистора зависит от длины и ширины удаленной области пленки и ее ориентации на резисторе. Обычно используют X-рез (вдоль линий тока), У-рез (поперек линий тока) и L-рез (комбинация X- и У-резов). Изменение сопротивления резистора при его подгонке можно определить расчетом эквивалентной электрической схемы резистора. Альтернативным методом подгонки электрического сопротивления пленочного резистора является его нагревание без испарения, когда изменение его сопротивления вследствие поверхностного окисления (увеличение происходит сопротивления) или отжига дефектов (уменьшение сопротивления). В зависимости от условий осаждения и облучения преобладает один из двух указанных эффектов.

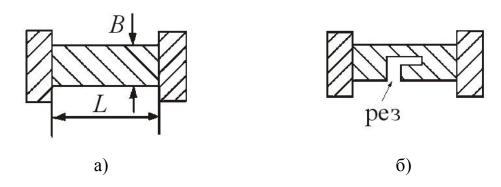


Рисунок 6.1. Схема пленочного резистора до (а) и после (б) подгонки его сопротивления (L-рез)

Щелевые (гребенчатые) пленочные конденсаторы представляют собой систему металлических проводников (обкладок), выполненных в виде двух гребенок, вложенных одна в другую (рисунок 6.2). Емкость конденсатора определяется выражением

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon N L/b$$
,

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  — эффективные диэлектрические проницаемости среды и вакуума, N — число прорезей (зазоров) между проводниками обкладок, L и b — длина и ширина зазоров. Подгонка емкости конденсатора производится резом (испарением пленочного слоя) поперек обкладок, в результате чего количество действующих прорезей N уменьшается.

2. Размерная подстройка пленочных элементов (шкал, сеток, фотошаблонов, монолитных фильтров и т.п.) осуществляется испарением участков пленочного покрытия (устраняются дефекты типа «недотрав») и локальным лазерным переносом участков пленочного покрытия (устраняются дефекты типа «прокол»). Локальный лазерный перенос представляет собой перенесение участка пленки на обрабатываемую поверхность с донорной подложки, расположенной к ней вплотную, путем нагрева пленки лазерным излучением.

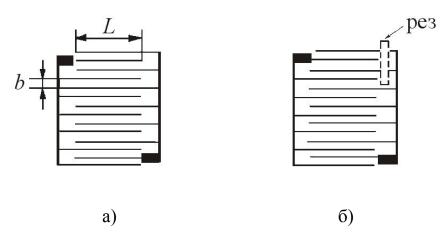


Рисунок 6.2. Схема пленочного конденсатора до (а) и после (б) подгонки его емкости

- 3. Размерная обработка тонких пленок представляет собой формирование на подложке пленочной топологии. Она используется для изготовления пленочных микросхем, фотошаблонов, интегральных схем, оптических шкал, сеток, масок и т.п. При обработке используют различные фокусирующие и проекционные оптические схемы (см. раздел 2). Точность обработки преимущественно определяется термическими искажениями (величина которых оценивается размером прогретого слоя в пленке  $\sqrt{a_1\tau}$ ) и оптическими искажениями (дифракционными, аберрационными, а также связанными с неравномерностью распределения интенсивности излучения по сечению пучка и со сканированием пучка). Обработка обычно производится испарением пленочного покрытия в области, облученной в соответствии с заданным рисунком. При изготовлении пленочных элементов типа сеток или шкал, у которых площадь металлизированной (непрозрачной) поверхности мала по сравнению с площадью поверхности подложки, где пленка отсутствует, целесообразно использовать термохимический метод обработки. В этом случае облучаются те участки пленки, которые должны остаться на подложке, и плотность мощности излучения обеспечивает поверхностное окисление пленки без ее разрушения. Последующим травлением пленки в кислотном растворе удаляют необлученные участки пленки, а защищенные окислом участки остаются на подложке. Таким образом, на подложке создается «негативное» изображение.
- 4. Запись информации (цифровая и аналоговая) осуществляется формированием отверстий в пленке малых (субмикронных) размеров или образованием областей на поверхности пленки с измененными оптическими свойствами путем воздействия на нее пучка лазерного излучения.

Принципиальной характеристикой лазерной обработки пленок является размер минимального получаемого элемента, то есть разрешающая способность метода. При обработке пленок методом абляции (образования малых отверстий) размер минимально возможного элемента в расплавленном участке пленки  $r_*$  определяется его термодинамическими характеристиками

— максимумом свободной энергии образовавшихся поверхностей (при попытке получить отверстие радиуса  $r < r_*$  оно будет схлопываться сразу же после образования). При обработке пленки неразрушающим методом, например термохимическим, минимальный размер элемента зависит от размера фокального пятна и увеличения размера из-за теплопроводности.

Для обработки пленок обычно используются эксимерные лазеры, Nd:YAG,  $N_2$  и Cu-лазеры, реже — лазеры на  $CO_2$ , стекле с неодимом и He-Ne лазеры. Для записи информации используют также полупроводниковые и He-Cd лазеры.

## Примеры решения задач

<u>Задача 6.1.</u> Определить плотность мощности излучения, необходимую для расплавления пленки хрома толщиной 0,1 мкм на стеклянной подложке при воздействии  $N_2$ -лазера с длительностью импульса 10 нс.

## Решение

Температура плавления в этом случае определяется формулой (6.1), но, т.к. длительность импульса невелика ( $\tau = 10^{-8}$  с), то теплоотвод в подложку мал, и можно воспользоваться формулой (6.2):

$$T_1 = \frac{q_0 A_1 \tau}{\rho_1 c_1 h} + T_H,$$

где  $T_1$  — температура плавления материала пленки. Тогда выражение для плотности мощности имеет следующий вид:

$$q_0 = \frac{\left(T_1 - T_H\right)\rho_1 c_1 h}{A_1 \tau}.$$

Подставляя данные для пленки хрома ( $\rho_1 = 7,19 \cdot 10^3 \,\mathrm{kr/m^3}$ ,  $T_1 = 1877 ^\circ\mathrm{C}$ ,  $c_1 = 425 \,\mathrm{Дж/(kr \cdot K)}$ ,  $A_1 = 0,5 - \mathrm{для}$   $N_2$ -лазера,  $\lambda = 0,34 \,\mathrm{mkm}$ ), получаем  $q_0 = 11,35 \cdot 10^6 \,\mathrm{Br/cm^2}$ .

Задача 6.2. Определить скорость сканирования при обработке металлической пленки на стекле излучением импульсного Nd:YAG-лазера при  $\tau=10^{-8}$  c, если диаметр зоны воздействия  $d_0=10$  мкм, погрешность ширины реза 0,1 мкм.

#### Решение

Пусть за промежуток времени между двумя импульсами облученная зона переместилась на расстояние l. Из рисунка 6.3 следует, что

$$\left(R-\frac{a}{2}\right)^2=R^2-\left(R-\Delta\right)^2$$
, откуда получаем:  $\frac{a}{2R}=1-\sqrt{\frac{2\Delta}{R}-\left(\frac{\Delta}{R}\right)^2}$ .

Учитывая, что  $d_0 = 2R = 10$  мкм,  $\Delta = 0.1$  мкм, вычислим величину a: a = 8 мкм.

Скорость сканирования в этом случае выражается следующей формулой:

$$V_{c\kappa} = \frac{d_0 - a}{\tau} = 198 \text{ m/c}.$$

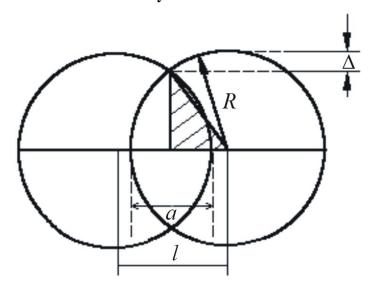


Рисунок 6.3. Перемещение облученной зоны при сканировании пучка

## ЗАДАЧИ 1-го УРОВНЯ

- 1. Во сколько раз уменьшится глубина прогретого слоя в подложке при лазерной обработке пленок при переходе от Nd:YAG-лазера в режиме свободной генерации к  $N_2$ -лазеру?
- 2. Как изменится соотношение между энергиями, затрачиваемыми на испарение пленки и на нагрев подложки, по мере сокращения длительности импульса?
- 3. Найти плотность мощности излучения, необходимую для расплавления пленки Си толщиной 0,1 мкм на керамической подложке при сканировании в непрерывном режиме со скоростью 1 см/с пучком Nd:YAGлазера при размере облученной области 15 мкм.
- 4. Определить, достигается ли температура окисления пленки Ст толщиной 0,1 мкм, нанесенной на стеклянную подложку, при нагревании ее излучением лазера с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульса 10 нс и при сканировании в непрерывном режиме со скоростью 1 м/с. Размер облученной области 20 мкм. Плотность мощности излучения 10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup>.
- 5. Рассчитать изменение сопротивления пленочного резистора R при лазерной подгонке в зависимости от ориентации и вида реза.
- 6. Составить таблицы «Оптимальные импульсные лазеры для обработки пленок» и «Оптимальные непрерывные лазеры для обработки пленок» (указать скорость сканирования). Расставить их по порядку в соответствии с критериями точности и производительности, простоты и надежности.

## ЗАДАЧИ 2-го УРОВНЯ

- 7. Выписать систему уравнений для лазерного нагревания пленки, нанесенной на поверхность подложки, с граничными условиями и объяснить принятые допущения.
- 8. Определить энергетическую эффективность лазерной обработки пленки  $\eta = \frac{Q_1 Q_2}{Q_1}$  (где  $Q_1$  и  $Q_2$  количество тепла, полученное соответственно пленкой и подложкой при действии импульса лазерного излучения) в зависимости от теплофизических свойств материалов пленки и подложки, толщины пленки и длительности импульса излучения. Определить значение  $\eta$  для случаев обработки пленки меди на кварце и хрома на стекле импульсами излучения Nd: YAG-лазера в режиме свободной генерации и  $N_2$ -лазера.
- 9. Оценить плотность мощности лазерного излучения  $q_0$  и импульсную мощность лазера на молекулярном азоте, необходимые для окисления, плавления, испарения пленки Cr толщиной 0,1 мкм на стеклянной подложке при размере области облучения  $d_1=10$  мкм и  $d_2=100$  мкм,  $\tau=10^{-8}$  с.
- 10. Оценить допустимое время воздействия  $\tau$  при обработке металлических пленок, если требуемая погрешность обработки составляет  $x_{np}=0,1$  мкм для непрерывной и импульсно-периодической лазерной обработки (диаметр пятна 50 мкм).
- 11. Определить скорость сканирования излучения непрерывного лазера, его плотность мощности и размеры светового пятна при обработке металлической пленки (испарение или окисление пленок Cr на стекле), необходимые для получения элементов шириной 0,1 мкм, 1 мкм, 10 мкм.
- 12. Определить модовый режим работы лазера и рассчитать оптическую систему, обеспечивающие формирование в режиме сканирования двух раздельных полос на поверхности тонкой пленки.
- 13. Определить плотность мощности излучения, необходимую для получения на обрабатываемой поверхности n полос в результате дифракции. Определить максимальную длительность импульса излучения, при которой количество полос не изменится из-за теплопроводности. Провести расчет для случая локального испарения пленки Cr на стеклянной подложке излучением  $N_2$ -лазера при n=1...5.
- 14. Определить изменение свободной энергии E поверхностей системы пленка-подложка при лазерном формировании в пленке цилиндрического отверстия радиуса r. Определить разрешающую способность лазерной обработки пленок, соответствующую минимально возможному размеру

отверстия в пленке 
$$r_*$$
 из условия  $\frac{dE}{dr}\Big|_{r=r_*} = 0$ .

## Раздел 7. Лазерные технологии в медицине

Применение лазеров в медицине в последние годы завоевало прочные позиции в самых различных областях медицины: диагностике, терапии и хирургии.

В лазерной хирургии используются весьма мощные лазеры, мощность излучения которых достаточна для удаления, разрушения или термического некроза клеток, тканей или иных объектов, подлежащих ликвидации. Методами лазерной хирургии являются:

- непосредственное удаление вещества (абляция),
- термо- или фотокоагуляция,
- сварка (соединение),
- дробление (с помощью ударной волны).

Лазеры, применяемые в медицине, очень разнообразны, что обусловлено сложным составом и разнообразием биологических тканей. Использование того или иного лазера определяется спецификой операции и зависит от спектральной поглощающей способности биологических тканей. Такие лазеры, как Ar-лазер, лазеры на красителях, Nd:YAG, Nd:YAG с удвоением частоты воздействуют преимущественно на гемоглобин, меланин и другие органические компоненты тканей, их действие основано на коагуляционном эффекте.  $CO_2$  и Er:YAG ( $\lambda=2,9$  мкм) лазеры из-за высокого поглощения их излучения водой подходят для рассечения ткани.

Процесс нагревания ткани и температура, до которой она нагреется, зависят от следующих факторов:

- а) объемной плотности мощности поглощенного излучения Q [Вт/м $^3$ ],
- б) эффективности перевода поглощенной энергии в тепло,
- в) времени облучения,
- г) теплоотвода из области поглощения в прилежащие области за счет теплопроводности ткани,
- д) других типов теплоотвода, в частности, кровотоком.

Биологические ткани вследствие своего сложного состава отличаются широким спектральным диапазоном показателя поглощения и, соответственно, глубины проникновения излучения. Глубина проникновения излучения  $l_{onm}\approx 1/\alpha$  изменяется от микронного диапазона (для жесткого УФ и дальней и средней ИК-области — Er:YAG, CO<sub>2</sub>-лазеры) до миллиметрового диапазона (видимая область) и сантиметрового диапазона (ближний ИК диапазон — Nd:YAG-лазер).

Размер слоя, прогретого за счет теплопроводности, составляет величину  $l_{\tiny mepm} \approx 2\sqrt{a\tau}$ . Длительность воздействия в различных медицинских приложениях меняется также в очень широких пределах: от наносекунд до десятков минут и даже больше. Соответствующие значения глубины проникновения энергии в ткань за счет теплопроводности в таком диапазоне

длительностей воздействия изменяются от сотых долей микрона до нескольких сантиметров.

Таким образом, в зависимости от длины волны используемого излучения, может преобладать или оптический перенос энергии, глубина проникновения излучения в этом случае  $l_{onm} > l_{mepm}$  (например, при облучении ткани излучением Nd:YAG-лазера  $\lambda = 1,06$  мкм при длительности воздействия меньше минуты), или перенос энергии за счет теплопроводности — термический перенос энергии  $l_{mepm} > l_{onm}$  (например, при использовании  $CO_2$  лазера при длительности воздействия  $\tau > 1$  мс).

В терминах обычных лазерных технологий оптический перенос энергии соответствует «слабому поглощению» (см. раздел 3), а термический перенос энергии — «сильному поглощению» (по сравнению с теплопроводностными явлениями). Для практических целей эти два случая отличаются тем, что при термическом переносе энергии возможно управление глубиной прогретого слоя изменением длительности воздействия, тогда как при оптическом переносе энергии толщина прогретого слоя определяется только показателем поглощения ткани.

При термическом переносе энергии вглубь материала, когда глубина проникновения света в материал  $\delta = 1/\alpha$  ( $\alpha$  – показатель поглощения света) много меньше толщины прогретого слоя  $\sqrt{a\tau}$  (a – температуропроводность биоткани,  $\tau$  – длительность воздействия), температура биоткани на поверхности в центре облученной области определяется следующим образом:

- в неустановившемся режиме, при  $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$ 

$$T = \frac{2q_0 A \sqrt{a\tau}}{k \sqrt{\pi}} + T_H \,, \tag{7.1}$$

- в стационарном режиме, при  $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$ 

$$T = \frac{q_0 A r_0}{k} + T_H, (7.2)$$

где  $q_0$  — плотность мощности падающего излучения, A — поглощательная способность биоткани, k — теплопроводность биоткани,  $T_H$  — начальная температура,  $r_0$  — радиус облученной области.

При оптическом переносе энергии вглубь материала, когда глубина проникновения света в материал  $\delta = 1/\alpha$  больше толщины прогретого слоя  $\sqrt{a\tau}$  ,

$$- \text{при } r_0 \gg \sqrt{a\tau} \qquad \qquad T = \frac{q_0 A a \tau}{k \delta} + T_H \,, \tag{7.3}$$

- при 
$$r_0 \ll \sqrt{a\tau}$$
  $T = \frac{q_0 A r_0^2}{4k\delta} \ln\left(19, 4\frac{a\tau}{r_0^2}\right) + T_H.$  (7.4)

В живых биологических системах тепловая энергия из облученной области отводится не только путем теплопроводности, но и с потоком крови через сосудистую систему. В оценочных расчетах для учета теплоотвода принимают обычно следующую модель. Кровь с нормальной артериальной температурой поступает в облученный объем и сразу же нагревается до локальной температуры в капиллярной области. Получаемая кровью тепловая энергия определяется удельной теплоемкостью составных частей крови:  $E = cm\Delta T$ , c — средняя теплоемкость элементов крови. Кровь, текущая по венам, транспортирует эту тепловую энергию.

Поскольку учет теплоотвода кровотоком значительно усложняет теоретическую постановку задачи исследования локального нагревания ткани лазерным излучением, то имеет смысл каким-то образом определить, когда можно пренебречь влиянием теплоотвода кровотоком, а когда нельзя. При этом основной характеристикой является время воздействия излучения  $\tau$ . Если  $\tau$  меньше некоторой величины  $t_*$  то влияние кровотока можно не учитывать, так как оно мало, а если  $\tau > t_*$ , влияние теплоотвода кровотоком учитывать необходимо. Характерное время  $t_*$  есть время перфузии, то есть время, за которое заменяется вся кровь в ткани:

$$t_* = \frac{1}{\nu_* \rho} \,, \tag{7.5}$$

где  $\rho$  — плотность ткани,  $\upsilon_*$  — интенсивность кровотока в ткани. Влияние кровотока на стационарное температурное распределение имеет значение только в том случае, если протяженность облученной области  $r_0$  больше, чем длина теплопроводности  $\sqrt{a\tau}$ . Если  $r_0 < \sqrt{a\tau}$ , то перенос тепла определяется преимущественно теплопроводностью.

Лазерное хирургическое воздействие может происходить как в абляционном, так и в субабляционном режиме. В последнем случае осуществляется достаточно мягкое воздействие при невысоких значениях мощности излучения и продолжительных экспозициях. Воздействие излучения приводит к нагреванию биоткани и последующей коагуляции ее в зоне воздействия.

Особенностью воздействия излучения на биоткань является то, что температура начала коагуляции белков зависит от времени, в течение которого ткань пребывает в нагретом состоянии, то есть от длительности воздействия лазерного излучения. Значение температуры коагуляции можно определить из графика (см. рисунок 7.1).

При расчете результатов лазерного нагрева ткани необходимо учитывать, что свойства ткани (в особенности оптические) изменяются в ходе процесса ее лазерного нагревания. В частности, показатель поглощения ткани увеличивается при коагуляции. В результате значения температуры, достигаемой в области воздействия вблизи поверхности, возрастают, а процесс нагрева становится нелинейным.

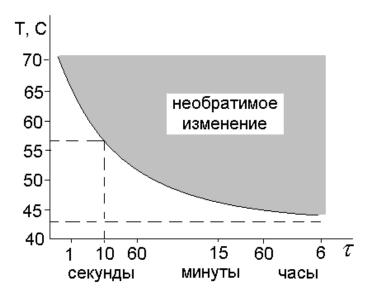


Рисунок 7.1 Зависимость температуры, при которой происходят необратимые изменения в биоткани, от продолжительности нагрева.

Температура, до которой нагревается биоткань при действии лазерного излучения, зависит от оптических свойств биоткани (поглощательная способность, глубина проникновения излучения в биоткань) и ее теплофизических свойств, определяющих эффективность преобразования полученной энергии в тепло и отведения ее из облученной области в результате теплопроводности.

В последние годы стали широко применяться лазерные эндоскопические операции. В частности, лазерное хирургическое лечение злокачественной опухоли производится путем введения зонда в ее центр, через который с помощью оптического волокна подается лазерное излучение. Конец зонда излучает световую энергию равномерно во все стороны, что обеспечивается соответствующим видом излучающего торца световода. равномерности излучения следует из необходимости получения сферической формы коагулированной области, характерной для опухоли печени. При этом используются достаточно продолжительные экспозиции, необходимым условием успешного проведения операции является не только патологической коагуляция ткани, НО И категорическое отсутствия карбонизации (в наиболее горячей области – непосредственно рядом с наконечником световода). Распределение температуры в биоткани в соответствии с диаграммой направленности излучения от наконечника световода имеет сферическую симметрию и определяется зависимостью (исключая область  $r < \sqrt{a\tau}$ , соответствующую области зонда):

$$T = \frac{P}{4\pi kr} \operatorname{erfc} \frac{r}{2\sqrt{a\tau}} + T_H, \tag{7.6}$$

где P — мощность излучения, r — радиус в сферической системе координат, центр которой совпадает с центром симметрии распределения интенсивности излучения,  $T_H$  — начальная температура.

При расчете температуры можно воспользоваться таблицами функции интеграла вероятности erfc z или использовать следующие приближения. Для малых значений аргумента:

$$\operatorname{erfc} z = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} z \,, \tag{7.7}$$

а для больших значений аргумента:

$$\operatorname{erfc} z = \frac{1}{\sqrt{\pi}z} \exp(-z^2). \tag{7.8}$$

Наиболее употребительными в лазерной хирургии являются Nd:YAG и CO<sub>2</sub>-лазеры. Nd:YAG-лазер по причине глубокого проникновения его излучения в биоткань применяется преимущественного для коагуляции ткани и остановки (или предупреждения) кровотечения. СО2-лазер используется как лазерный скальпель. Его излучение интенсивно поглощается молекулами воды, содержащейся в ткани, показатель поглощения при этом на 3-4 порядка выше, чем для Nd:YAG-лазера. Поэтому при поглощении непрерывного излучения СО<sub>2</sub>-лазера биотканью происходит очень быстрый разогрев воды в тонком приповерхностном слое, а от нее и неводных компонентов ткани. В результате происходит абляция - как стремительное (взрывное) испарение тканевой воды и извержение паров воды и вместе с ними фрагментов клеточных и тканевых структур. В процессе абляции происходит формирование абляционного кратера. Вместе с перегретым материалом из ткани удаляется большая часть энергии. Вокруг кратера находится область нагретого материала довольно малой толщины. Соответственно, толщина области с термическими повреждениями материала также мала, порядка 50 мкм за пределами абляционного кратера. Такой характер процесса абляции позволяет предположить, что температура на поверхности ткани при абляции составляет величину около 150°C (испарение воды в условиях высокого давления).

Эти данные позволяют при расчете пренебрегать теплопроводностными явлениями и считать, что энергия лазерного излучения E расходуется на нагревание удаляемого объема ткани и абляцию:

$$E \cdot A = m(c(T_a - T_H) + L). \tag{7.9}$$

Применение в медицине эксимерных лазеров связано с малой глубиной проникновения излучения (до нескольких микрон), малой длительностью теплопроводностные (снижающей явления) механизмом поглощения их излучения, заключающемся в разрыве межмолекулярных поглощении кванта излучения. В результате эксимерного лазера на биоткань приводит к так называемой «холодной абляции», когда тепловые явления практически отсутствуют. При этом толщина удаленного слоя определяется выражением

$$h_{a\delta n} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\varepsilon \alpha}{Q_{\kappa p}}, \qquad (7.10)$$

где  $Q_{\kappa p}$  — удельная энергия абляции (на единицу объема),  $\alpha$  — показатель поглощения биоткани,  $\varepsilon$  — плотность энергии импульса излучения на поверхности биоткани.

## ЗАДАЧИ 1-го УРОВНЯ

- 1. Определить диапазон скоростей сканирования пучка непрерывного лазерного излучения при диаметре пятна в фокусе d=10 мкм, если диапазон допустимых длительностей воздействия находится в диапазоне от 10 мс до 10 мкс.
- 2. Определить, какую скорость сканирования нужно выбрать, чтобы обеспечить время воздействия излучения на биоткань  $\tau=10\,\mathrm{mc}$ , при диаметре пятна  $d=100\,\mathrm{mkm}$
- 3. Определить мощность Nd:YAG-лазера, необходимую для достижения плотности мощности  $Q=10~\mathrm{Bt/cm^3}$  в приповерхностном слое кожи при проведении операции коагуляции кожного новообразования, если диаметр облученной области составляет 1 мм, показатель поглощения 5 см<sup>-1</sup>. Коэффициент отражения (включая диффузное отражение) принять равным 0,3.

# ЗАДАЧИ 2-го УРОВНЯ

4. Определить энергию, сообщенную биоткани при облучении ее поверхности импульсами излучения XeCl-лазера длительностью  $10^{-8}$  с энергией 2 Дж при частоте следования импульсов 20 Гц в течение 1 с. Определить толщину удаленного слоя при площади облученной области  $1 \text{ см}^2$ , если известно, что глубина проникновения излучения 6 мкм, а порог абляции составляет  $0.8 \text{ Дж/см}^2$ .

Определить толщину удаленного слоя биоткани импульсом KrF-лазера (248 нм), если известно, что плотность энергии на поверхности составляет 5  $\mbox{Дж/см}^2$ , глубина проникновения излучения в биоткань — 2 мкм, а порог абляции — 0,5  $\mbox{Дж/см}^2$ .

- 6. Найти плотность мощности непрерывного излучения Ar и Nd: YAG-лазеров, необходимую для термокоагуляции мягкой ткани (температура коагуляции  $T=42\,^{\circ}\mathrm{C}$ ) при времени воздействия излучения 1 c, а также необходимую мощность и скорость сканирования пучка при радиусе облученной области  $r_0=1$  мм.
- 7. Оценить, какая часть энергии, поступившей в кожу при облучении ее непрерывным лазерным излучением в течение 3 минут, удаляется из

области воздействия кровотоком, если кожа в области воздействия нагревается с  $25\,^{\circ}$ С до  $60\,^{\circ}$ С. Интенсивность кровотока принять равной  $0.15\,$  мл/мин $\cdot$ г.

- 8.Определить, во сколько раз плотность мощности излучения Ar-лазера на поверхности кожи должна быть больше плотности мощности излучения Nd:YAG-лазера, чтобы обеспечить одинаковую плотность мощности на глубине 1 мм.
- 9. Определить в пренебрежении теплопроводностью, какая температура будет достигнута на поверхности облучаемой кожи при воздействии Ar и Nd:YAG-лазеров непрерывного действия, если мощность выбрана такой, чтобы температура на глубине 1 мм достигала 60°С при начальном значении 25°С. Определить для каждого случая, возможна ли карбонизация поверхности.
- 7. Определить диапазон значений мощности излучения Kr-лазера (длина волны излучения 568 нм) для коагуляции новообразования на коже в дистанционном режиме, обеспечивающий температуру на поверхности облученной области в ее центре в диапазоне значений от температуры коагуляции до температуры карбонизации. Теплоотвод конвекцией не учитывать. Исходные данные:

Глубина проникновения излучения в кожную ткань  $\delta=0.5$  мм.

Температура карбонизации 150°C.

Температуропроводность кожи  $a = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{c}$ .

Теплопроводность кожи  $k = 0.45 \text{ Bt/m} \cdot \text{K}$ .

Начальная температура  $T_H = 20^{\circ} \text{C}$ .

Поглощательная способность пигментированного новообразования до коагуляции A=0.85, после коагуляции A=0.9.

Поглощательная способность непигментированного новообразования до коагуляции A = 0.6, после коагуляции A = 0.8.

№ варианта задания	Длительность воздействия $\tau$	Диаметр новообразования $d_0$	Характеристика новообразования	
1	1 мин	1 мм	Непигментированное	
2	1 мин	3 мм	Непигментированное	
3	2 мин	1 мм	Непигментированное	
4	2 мин	3 мм	Непигментированное	
5	10 мин	3 мм	Непигментированное	
6	1 мин	1 мм	Пигментированное	
7	1 мин	3 мм	Пигментированное	
8	2 мин	1 мм	Пигментированное	
9	2 мин	3 мм	Пигментированное	
10	10 мин	3 мм	Пигментированное	

8. Определить время воздействия непрерывного излучения Nd: YAG-лазера при внутритканевой коагуляции опухоли печени с помощью световода, конец которого введен через зонд в центр опухоли. При решении задачи проанализировать необходимость учета влияния кровотока на теплоотвод из облученной области. При необходимости (если полученное время воздействия окажется больше времени перфузии  $t_*$ , в данном случае 1 мин.) учесть влияние кровотока путем умножения значения температуры на поправочный коэффициент K=0.8. При необходимости дать рекомендации по изменению мощности излучения.

Исходные данные:

Температуропроводность  $a = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{c}$ .

Теплопроводность k = 0.57 Вт/мК.

Температура коагуляции 48°C.

Температура карбонизации 150°C.

Начальная температура  $T_H = 37$ °C.

Диаметр наконечника световода  $d_0 = 3$  мм.

№ варианта задания	Мощность излучения	Диаметр новообразования $D_0$		
1	6 Вт	2 см		
2	4 B <sub>T</sub>	2 см		
3	2 B <sub>T</sub>	2 см		
4	3 B <sub>T</sub>	1 см		
5	2 B <sub>T</sub>	1 см		
6	1 Вт	1 см		
7	10 B <sub>T</sub>	3 см		
8	5 B <sub>T</sub>	3 см		
9	3 Вт	3 см		
10	3 Вт	0,5 см		

9. Определить мощность пучка лазерного излучения, необходимую для рассечения кожи непрерывным излучением  $CO_2$ -лазера в дистанционном режиме. Исходные данные:

Плотность кожи  $\rho = 1.10^3 \, \text{кг/м}^3$ .

Теплоемкость кожи  $c = 4 \cdot 10^3$  Дж/кг·К.

Температуропроводность кожи  $a = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{c}$ .

Температура абляции  $T_a = 150$ °C.

Удельная теплота абляции  $L = 2 \cdot 10^6 \, \text{Дж/кг}$ .

Поглощательная способность кожи A = 0.8.

Начальная температура $T_H = 25$ °C.

№ варианта	Характер воздействия	Время воздей-	Диаметр пучка $d_0$ ,	Глубина абляции $h$ ,
задания	излучения	ствия <i>t</i> , <i>c</i>	MKM	мкм
1	Неподвижный источник	1	500	300
2	Неподвижный источник	2	400	500
3	Неподвижный источник	1	300	200
4	Сканирование на расстояние $l=1$ см	2	500	300
5	Сканирование на расстояние $l = 2$ см	1	400	500
6	Сканирование на расстояние $l = 3$ см	1	300	200
7	Сканирование на расстояние $l = 1$ см	1	400	200
8	Сканирование со $V = 1 \text{ см/c}$	1	400	500
9	Сканирование со $V = 1 \text{ см/c}$	2	300	200
10	Сканирование со скоростью $V = 0.5$ см/с	3	500	300

#### Раздел 8. Некоторые другие лазерные технологии

В последние годы сфера применения лазеров расширилась. Рассмотрим некоторые из технологических применений лазеров, не затронутые в предыдущих разделах.

Лазерная очистка нашла широкое применение в микроэлектронике, в системах записи информации, в приборостроении, машиностроении, для дезактивации радиоактивно загрязненных поверхностей, реставрации произведений искусства и культуры и т.п. Различают технологии лазерной очистки испарением, а также сухой и влажной лазерной очистки, при которых воздействие излучения происходит в доиспарительных режимах непосредственно на очищаемую поверхность (в случае сухой очистки) или на поверхность, предварительно покрытую тонким слоем жидкости (в случае влажной очистки). Сухая лазерная очистка начинается с быстрого локального теплового расширения приповерхностного слоя основного материала и удаляемого загрязнения под действием коротких импульсов лазерного излучения. При этом приповерхностный слой или загрязняющие частицы удаляются вследствие смещения центра массы пленки или загрязняющей частицы при нагревании под действием инерционной силы после окончания импульса излучения, или вследствие термомеханических напряжений. Технологии влажной лазерной очистки основаны закипании тонкого слоя жидкости, предварительно нанесенного обрабатываемую поверхность, при ЭТОМ становится возможным возникновение акустической или ударной волны, способствующей удалению загрязнений с поверхности. Испарительная лазерная очистка (удаление приповерхностного слоя путем его испарения при нагреве поверхности лазерным излучением) часто применяется для воздействия на металлическую поверхность, в частности для очистки анилоксовых (красконесущих) валов в полиграфии от старой краски и т.п.

Для оптимизации эксплуатационных свойств поверхностей, в том контактных (маслоемкость, сопротивление трению, оптических (отражение и рассеяние), теплофизических (теплоотдача), необходимо целенаправленное изменение микрорельефа поверхности – заданное уменьшение или увеличение шероховатости. Изменение высоты неровностей микрорельефа поверхности возможно осуществить при действии лазерного излучения, когда его интенсивность различна в области выступов и впадин шероховатой поверхности. Такая ситуация может быть реализована при действии на поверхность материала сфокусированного лазерного пучка, если фокальная плоскость совпадает с плоскостью средней линии шероховатой поверхности. При различаются также значения температуры соответственно, скорости разрушения материала вблизи выступов и впадин профиля поверхности. Для уменьшения высоты неровностей

профиля поверхности при ее обработке скорость разрушения материала (и, соответственно, плотность мощности излучения) на выступах профиля поверхности должна быть больше, чем во впадинах. В этом случае обработка должна проводиться расходящимся пучком излучения (рисунок 8.1, а). Значения плотности мощности излучения на линии впадин  $q_1$  и на линии выступов  $q_2$  определяются мощностью пучка излучения, высотой профиля шероховатой поверхности неровностей  $R_{z}$ , фокусным расстоянием оптической системы f, расстоянием между фокальной плоскостью оптической системы и средней линией профиля шероховатой поверхности  $l_0$ , диаметром лазерного пучка на выходе оптической системы  $d_0$  (см. рисунок 8.1). При этом параметры режима обработки должны быть выбраны так, чтобы плотность мощности излучения на линии выступов превышала пороговое значение, а на линии впадин была бы меньше него. Возможно также производить увеличение высоты неровностей профиля поверхности: для этого скорость разрушения материала во впадинах профиля поверхности должна быть больше, чем на выступах, то есть плотность мощности излучения должна быть больше на линии впадин, чем на линии выступов. В таком случае обработку поверхности необходимо проводить сходящимся пучком (рисунок 8.1, б).

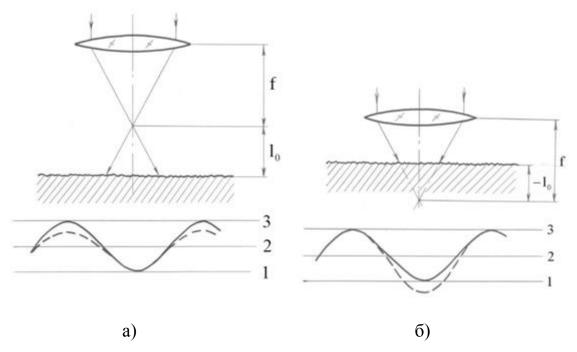
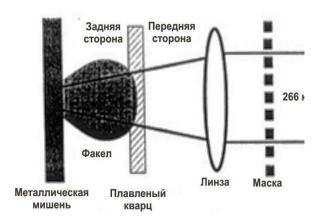


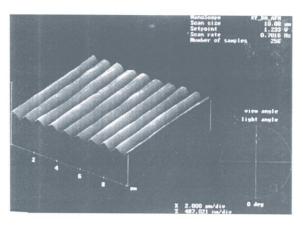
Рисунок 8.1. Схема лазерной обработки поверхности для управления шероховатостью: а) для уменьшения высоты неровностей, б) для увеличения высоты неровностей. Сплошная линия – профиль поверхности до обработки, штриховая – после обработки; 1 – линия впадин; 2 – средняя линия; 3 – линия выступов.

Одним перспективных направлений лазерной ИЗ новых микрообработки является создание микрооптических элементов. Широкие возможности для этого представляет лазерная обработка пористого стекла. При локальном воздействии лазерного излучения на его поверхность в результате поглощения излучения и локального нагревания происходит денсификация (термоуплотнение) пористого стекла в области воздействия с образованием области увеличенного (по сравнению с исходным менее материалом) показателя преломления. Таким происходит формирование оптического микроэлемента, в данном случае – преломляющего отрицательного. При последующем удалении шлифовкой верхнего слоя стекла получаем положительный преломляющий элемент. Формирование микрооптических элементов в стеклокерамике основано на фазовых переходах, происходящих при ее нагревании. Локальное лазерное нагревание кристаллической стеклокерамики со скоростью до 100 К/с приводит к ее аморфизации и сопутствующему просветлению, а также к увеличению удельного объема среды, таким образом в непрозрачной поликристаллической пластине возможно получение прозрачных двояковыпуклых фокусирующих областей с размерами микронного диапазона.

Одним из любопытных методов микроструктурирования стекла является LIPAA — laser-induced plasma-assisted ablation (рисунок 8.2, а). Лазерное излучение используется в проекционно-фокусирующей схеме. При этом плоскость изображения маски находится на задней — обрабатываемой стороне стеклянной пластины, а в фокусе линзы располагается непрозрачная металлическая мишень. Под действием излучения металл испаряется, и пары конденсируются на стекле. Осажденная пленка металла, в свою очередь, нагревается излучением, но только в освещенных местах, соответствующих конфигурации маски. Испарение этой пленки вместе с приповерхностным слоем стекла приводит к образованию микроструктуры (рисунок 8.2, б).

Ряд интересных эффектов, которые могут быть положены в основу наблюдаются различных технологий, при воздействии излучения на жидкость. При подаче излучения через световод, конец которого погружен в жидкость, формируется последовательность паровых пузырьков, движущихся в жидкости от торца световода перпендикулярно воздействии сфокусированного пучка излучения прозрачное окно на жидкость может иметь место светогидравлический эффект, заключающийся в том, что локальное лазерное испарение небольшого количества жидкости в фокальной области приводит к быстрому значительному увеличению количества пара и его давления (если жидкость находится в герметичном сосуде).





а) схема экспериментальной установки LIPAA

б) полученная микроструктура (металлическая мишень — серебро, расстояние между образцом и мишенью 200 мкм, длина волны 248 нм, плотность энергии 1,3 Дж/см², 40 импульсов).

Рисунок 8.2. Проекционно-фокусирующий метод структурирования стекла LIPAA.

#### ЗАДАЧИ 2-го УРОВНЯ

- 1. Определить скорость движения частиц от поверхности детали при ее сухой лазерной очистке, предполагая, что частицы имеют сферическую форму и слабую адгезию к поверхности, распределение температуры в них равномерное, а теплоотвод из частиц в деталь пренебрежимо мал. Определить мощность излучения лазера при длительности импульса 10 нс, необходимую для достижения частицами меди скорости 0,1 м/с при размере облученной области 1 см<sup>2</sup>. Поглощательную способность частиц принять равной 0,1.
- 2. Определить мощность лазерного излучения, необходимую для испарения смазочного масла с поверхности стального рельса при воздействии излучения волоконного лазера (длина волны 0,53 мкм) и СО<sub>2</sub>-лазера, работающих в непрерывном режиме при сканировании со скоростью 1 м/с и диаметре лазерного пятна на поверхности рельса 5 мм. Толщина пленки масла на поверхности рельса 0,1 мм, температуру испарения масла принять равной 400°С, удельную теплоту испарения 190 кДж/кг. Оптимизировать схему сканирования и рассчитать скорость движения вагонетки при ширине рельса 73 мм.
- 3. Определить пороговое значение плотности мощности излучения при лазерной очистке от грязи поверхностей ступеней эскалатора, выполненных из стали, в процессе его работы с использованием волоконного лазера непрерывного действия. Предложить оптическую

схему, при которой достигается оптимальная обработка всей ступени (в пазах) шириной 1 м при скорости движения эскалатора 0,75 м/с. Геометрия рельефа ступени эскалатора приведена на рисунке 8.3.

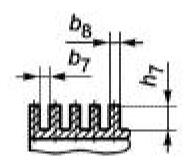


Рисунок 8.3. Схема рельефа ступени эскалатора: ширина впадины  $b_7=7\,$  мм, ширина выступов  $b_8=5\,$  мм, глубина впадин  $b_7=10\,$  мм.

- 4. Проанализировать возможности уменьшения шероховатости поверхности боросиликатного стекла (температура испарения  $T_u = 1200^{\circ} \, \mathrm{C}$ ) с  $R_{zH} = 100$  мкм до  $R_z = 50$  мкм обработкой его сходящимся пучком импульсного  $\mathrm{CO}_2$ -лазера с длительностью импульса 10 мкс и мощностью  $60~\mathrm{BT}$  и оптической системы с фокусным расстоянием  $2~\mathrm{cm}$  при диаметре пучка на выходе оптической системы  $25~\mathrm{mm}$ . Определить расстояние от поверхности положения средней линии профиля обрабатываемой поверхности до фокальной плоскости оптической системы.
- 5. Сформулировать критерии и выбрать оптимальные лазеры для микроструктурирования поверхностей материалов: металла (стали), стекла, кремния, керамики  $(Al_2O_3)$ .
- 6. Определить длину волны лазерного излучения для осуществления сквозной аморфизации стеклокерамической пластины (марки СТ-50) толщиной 0,5 мм, если она уже аморфизована на глубину 0,3 мм от поверхности пластины.
- 7. Сравнить два способа аморфизации стеклокерамической пластины (марки СТ-50) толщиной 0,5 мм с использованием излучения Nd:YAG и СО<sub>2</sub>-лазеров для случая, когда необходимо осуществить аморфизацию на глубину 0,3 мм. Выбрать оптимальный способ.
- 8. Определить геометрическую форму кривой поверхности в стекле в нагревании: результате локального теплового расширения при гауссовым пучком; б) пучком c равномерным распределением интенсивности; в) найти такую форму распределения мощности, чтобы образовался шаровой сегмент.
- 9. Рассчитать фокусное расстояние f и числовую апертуру NA исходной и отшлифованной зоны лазерного спекания в пористом стекле при заданных геометрических параметрах зоны спекания h=10 мкм и d=500 мкм (см. рисунок 8.4) и известных значениях показателя

преломления исходного  $n_1 = 1,33$  и денсифицированного  $n_2 = 1,46$  пористого стекла.

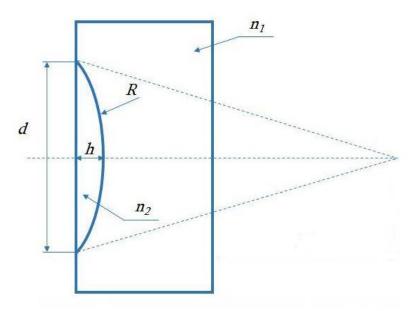


Рисунок 8.4. К задаче 9.

- 10. Рассчитать оптическую силу двойного элемента, полученного локальным спеканием пластины пористого стекла толщиной 2 мм при воздействии излучения  $CO_2$ -лазера непрерывного действия последовательно с обеих сторон пластины для произвольных значений мощности излучения, длительности воздействия и диаметра облученной области.
- 11. Рассчитать взаимное расположение элементов в схеме ЛИПАА (LIPAA) при длине волны 0,248 мкм и фокусном расстоянии 50 мм. Произвести энергетический расчет для случая, когда мишень сделана из стали.
- 12. Торец волновода, передающий излучение лазера непрерывного действия мощностью 1 Вт, покрыт непрозрачной металлической насадкой и погружен в воду. Определить скорость образующихся на торце волновода пузырьков пара в момент их отрыва, частоту генерации пузырьков и расстояние между ними, если известно, что диаметр пузырьков в момент отрыва составляет 3 мм.
- 13. Определить, через какое время с начала воздействия излучения Nd:YAG-лазера на боковую стенку (цилиндрической) бутылки пробка будет удалена из бутылки давлением паров, если известно, что энергия импульса 20 мДж, частота следования импульсов 4 кГц, содержимое бутылки представляет собой жидкость, преимущественно состоящую из воды (88,5%) и спирта (11,5%), объем воздушной части (в горлышке бутылки) составляет 20 мл, а пробка выдерживает избыточное давление 0,5 атм. Считать, что коэффициент отражения от поверхности составляет 0,5, а глубина проникновения излучения внутри бутылки 2 см.

Определить зависимость времени удаления пробки от объема воздушной части.

- 14. Определить диаметр и скорость вращения барабана (с кинопленкой) высокоскоростной киносъемочной камеры, призванной обеспечить скорость съемки 1 млн кадров/с при высоте кадра 8 мм.
- 15. Определить окно «оптической» прозрачности земной атмосферы, используя формулу Вина, считая среднюю температуру земного шара по всем широтам и временам года равной 14°C.

#### Список рекомендуемой литературы

- 1. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Физические основы технологических лазеров. М.: Высшая школа, 1987.
- 2. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989.
- 3. Вейко В.П., Метев С.М. Лазерные технологии в микроэлектронике. София: Изд. Болгарской АН, 1991.
- 4. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. Л.: Машиностроение, 1986.
- 5. Турыгин И.А. Прикладная оптика. М.: Машиностроение, 1966.
- 6. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970.
- 7. Рэди Дж.Ф. Действие лазерного излучения. М.: Мир, 1974.
- 8. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка. Л.: Лениздат, 1973.
- 9. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная техника и технология. Лазерная сварка металлов, т. 5. М.: Высшая школа, 1988.
- 10. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. Основы лазерного термоупрочнения сплавов, т. 6. М.: Высшая школа, 1988.
- 11. Лазеры в технологии. Под ред. М.Ф. Стельмаха. М.: Энергия, 1975.
- 12. Таблицы физических величин. Справочник. Под. ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
- 13. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л.: Машиностроение, 1978.
- 14. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975.
- 15. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1988.
- 16. Кошкин Н.И. Элементарная физика: справочник. М.: Наука, 1991.
- 17. Яковлев Е.Б. Лазерное оборудования, автоматизация и контроль технологических процессов. Конспект лекций. Часть І. Учебное пособие. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.
- 18. Вейко В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение. Опорный конспект лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.
- 19. Вейко В.П. Лазерная микрообработка. Опорный конспект лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007.
- 20. Шахно Е.А. Аналитические методы расчета лазерных микро- и нанотехнологий. Учебное пособие. Издание СПбГИТМО (ТУ), 2009.
- 21. Шахно Е.А. Физические основы применения лазеров в медицине. Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2012.
- 22. Серебряков В.А. Лазерные технологии в медицине. Издание СПбГИТМО (ТУ), 2009.

- 23. Вейко В.П. Лазерное формирование микрооптических элементов. Опорный конспект лекций. Издание СПбГИТМО (ТУ), 2008.
- 24. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
- 25. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.
- 26. Справочник по специальным функциям. Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М.: Наука, 1977.
- 27. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика. М.: Физматлит, 2008.
- 28. Дитчберн Р. Физическая оптика. М.: Наука, 1965.

# Приложение. Основные теплофизические и оптические параметры некоторых материалов [12–16]

Таблица 1. Параметры металлов

	Физические параметры							
Металл	плотность,	теплопро-	теплоем-	температура	температура	теплота	теплота	коэффициент
	$ ho$ , $10^3$ кг/м $^3$	водность,	кость,	плавления,	кипения,	плавления,	испарения,	отражения $R$ ,
		$k$ , $\mathrm{BT/M}{\cdot}\mathrm{K}$	$c$ , Дж/кг $\cdot$ К	$T_{nn}$ , $^{\circ}$ C	$T_{\kappa un}$ , ${ m ^{\circ}C}$	$L_{n_{7}}^{M}$ , $10^{6}$ Дж/кг	$L_{\!\scriptscriptstyle u}^{\!\scriptscriptstyle M}$ , $10^6$ Дж/кг	$(\lambda = 1,06 \text{MKM})$
Al	2,7	233	920	660	2447	0,396	10,9	0,93
Au	19,3	300	128	1063	2700	0,065	1,65	0,98
Bi	9,7	8	122	271	1559	0,052	0,72	0,55
Cr	7,1	45	460	1903	2642	0,280	6,71	0,57
Cu	8,2	373	386	1083	2595	0,205	4,78	0,91
Fe	7,9	50	450	1535	2900	0,278	7,0	0,63
Ni	8,7	68	440	1453	2800	0,303	6,48	0,74
V	6,0	31	514	1730		0,344	8,98	0,55
W	19,3	190	105	3380	5530	0,191	4,35	0,68

Таблица 2. Ориентировочные значения параметров неметаллических материалов

	Физические параметры						
Материал	плотность, $\rho$ , $10^3$ кг/м $^3$	теплопроводность, $k$ , $B_T/M\cdot K$	теплоемкость, $c$ , $10^3$ Дж/кг·К	температура разрушения, $T_{p}$ , ${}^{0}\text{C}$	показатель по- глощения, $\alpha$ , cм $^{-1}$	поглощательная способность, А	
				r	$(\lambda = 10)$	,6 мкм)	
бумага	0,7	0,25	1,5	600	100	0,55	
фанера	0,9	0,5	2,5	1800	100	0,8	
керамика	1,5	0,8	0,6	1500	100	0,9	
пластмасса	2,2	0,5		600	50	0,5	
стекло	2,3	0,75	0,8	1700		0,9	
резина	1,2	0,15	0,9	900			



**Миссия университета** — генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

### КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Лазерные технологии не случайно называют технологиями XXI века. Открытые в середине прошлого века, лазеры сегодня широко проникли в промышленность, связь, строительство, транспорт, медицину, биологию, экологию, искусство, шоу-бизнес и другие сферы жизни. Лазерные принтеры, оптические диски (CD, DVD, Blu-ray и др.), лазерные торговые сканеры и лазерные шоу сегодня известны всем. Менее известны широкой публике, но не менее важны лазерные технологии в микроэлектронике для нанесения и структурирования тонких пленок, для резки и сварки брони, закалки инструментальных сталей, декоративной обработки дерева, камня и кожи, при лечении болезней глаз, сосудов, опухолей и т.д., а в ближайшей перспективе – для избавления человечества от очков и морщин (да, да - сотни операций по лазерной полировке роговицы глаза и кожи уже проведены). На повестке дня сегодня – создание трехмерных объектов за счет прямой трансформации виртуального (компьютерного) образа в материальный объект при взаимодействии лазерного излучения с веществом, разработка лазерного управляемого термоядерного синтеза, лазерных реактивных двигателей, и многое-многое другое.

## История кафедры ЛТ и ЭП.

История кафедры начинается в 1965 г. с организации в ИТМО лаборатории лазерных технологий (совместно с ЛКТБ «Светлана»). В 1975-76 г.г. инициативная лаборатория была преобразована в отраслевую (двух министерств — Высшего образования и Электронной промышленности). Наконец, в 1980 г. на базе лаборатории была создана кафедра, которая в дальнейшем получила современное название кафедры «Лазерных технологий и экологического приборостроения».

Охарактеризуем историю кафедры фактами.

В 1976 г. – научные работы отраслевой лаборатории по «Физическим основам лазерной обработки тонких пленок» удостоены Премии Президи-

ума АН СССР за лучшую научную работу в области «Фундаментальных проблем микроэлектроники».

В 1983 и 1984 гг. – работы кафедры удостоены Премий Минвуза СССР за лучшую научную работу.

В 1986 г. – работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Государственной Премии СССР в области науки и техники за «Разработку и широкое внедрение в промышленность процессов лазерной обработки тонких пленок».

С 2000 г. – лаборатория и кафедра ЛТ признаны Ведущей научной школой Российской Федерации по «Фундаментальным основам лазерных микро- и нанотехнологий» , в 2001-2015 гг. этот статус ежегодно подтверждается.

В 2005 г. – кафедра явилась инициатором организации новой специальности «лазерная техника и лазерные технологии», по которой начинает подготовку и систематический выпуск специалистов ряд кафедр ИТМО и других ВУЗов России

В 2010 г. – работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Премии Правительства России в области образования за «Создание инновационной системы подготовки специалистов по лазерной обработке материалов».

За период времени с 1988 по 2014 г. кафедра выпустила более 500 специалистов в области лазерных технологий;

- За тот же период времени сотрудниками и аспирантами кафедры защищены 2 докторские и более 30 кандидатских диссертаций;
- По результатам работ кафедры издано 12 монографий;
- Результаты исследований сотрудников кафедры изложены более чем в 500 научных статьях и 50 патентах и авторских свидетельствах;
- В настоящее время кафедра активно сотрудничает с университетами и институтами Германии, Китая, Франции, Италии и других стран.

В последние годы по приглашению различных зарубежных организаций прочтен ряд курсов лекций по лазерным технологиям.

## Основные научные направления кафедры

- 1. Фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом: лазерная абляция и конденсация металлических и композиционных пленок.
- 2. Термохимическое действие лазерного излучения.
- 3. Фазово-структурные переходы в функциональных материалах под действием лазерного излучения
- 4. Лазерная локальное осаждение и обработка тонких пленок.
- 5. Лазерная инженерия поверхности.
- 6. Лазерные технологии прецизионной размерной обработки.

- 7. Сверхкороткие лазерных воздействия и их применение.
- 8. Создание новых оптических материалов и элементов фотоники, микро- и волоконной оптики на базе лазерных технологий.
- 9. Лазерная очистка и дезактивация в промышленности.
- 10. Лазерный трехмерный синтез объемных изделий.

Заведует кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения Заслуженный деятель науки России, Лауреат Государственной Премии СССР и Премии Правительства РФ, действительный член Академии Инженерных Наук РФ, д.т.н., профессор В.П. Вейко. Среди преподавателей кафедры Почетный работник высшей школы, д.т.н., профессор Е.Б. Яковлев, д.т.н., профессор Е.А. Шахно, Почетный работник высшей школы, к.ф.—м.н., доцент Г.Д. Шандыбина, к.ф.—м.н., доц. Ю.И. Копилевич, к.т.н., доцент А.А. Петров, молодые научные сотрудники, кандидаты наук Э.И. Агеев, А.А. Самохвалов, Г.В. Одинцова и др.

## Вадим Павлович Вейко Елена Аркадьевна Шахно

# Лазерные технологии в задачах и примерах

### Учебное пособие

В авторской редакции Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО Зав. РИО Н.Ф. Гусарова Подписано к печати Заказ  $N_{\odot}$  Тираж 200 экз. Отпечатано на ризографе