

# ТЕХНИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1983/3

## ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Н.Н. Рыкалин,  
А.А. Углов  
ОБРАБОТКА  
МАТЕРИАЛОВ

*Практика  
восьмидесятых...*

*Техника  
за рубежом*

*Мозаика  
для лектора*

*Желающим  
знать больше*



# ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

НОВОЕ  
В ЖИЗНИ,  
НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

# ТЕХНИКА

Издается  
ежемесячно  
с 1961 г.

№ 3

## ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

---

В ЭТОМ НОМЕРЕ

---

**Н. РЫКАЛИН,**  
академик

**А. УГЛОВ,**  
доктор технических наук

**ОБРАБОТКА  
МАТЕРИАЛОВ**

---

РЕДАКЦИОННЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ:

---

**МИР ИНЖЕНЕРНОГО ПРОГНОЗА**

---

**МОЗАИКА ДЛЯ ЛЕКТОРА**

---

**ИЗОБРЕТЕНИЯ, ПАТЕНТЫ, ЛИЦЕНЗИИ**

---

**ТЕХНИКА ЗА РУБЕЖОМ**

---

**ББК 32.86**  
**Л17**

Авторы: **РЫКАЛИН** Николай Николаевич — академик АН СССР, лауреат Государственной премии, автор более 300 статей и книг («Лазерная обработка материалов» и др.). Заведующий лабораторией института металлургии им. А. А. Байкова.

**УГЛОВ** Александр Алексе́евич — доктор технических наук, лауреат Государственной премии. Им написано более 250 научных статей и книг. Старший научный сотрудник института металлургии им. А. А. Байкова.

Рецензент: **Д а н и л ы ч е в** В. А., доктор физико-математиче-ских наук, профессор

# **ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ**

**НЕМНОГО ТЕОРИИ.** Одна из наиболее характерных черт современного производства — его интенсификация: увеличение объема продукции в единицу времени с одновременным сохранением или даже улучшением эксплуатационных характеристик и качества изделий. Интенсификация процессов получения и обработки материалов, а также деталей разнообразных по назначению приборов и машин все больше связывается с использованием концентрированных потоков энергии. К их числу относятся потоки заряженных частиц — электронов и ионов различных элементов, ускоренных в постоянных и переменных электрических полях и сформированных в пучки малого диаметра, а также потоки электромагнитного излучения различного спектрального диапазона (потоки фотонов), которые с помощью оптических систем фокусируются на поверхность материалов. Широко применяются для технологических целей потоки горячих газов, наряду с ними — воздействие на вещества струй и сгустков низкотемпературной плазмы, создаваемых с помощью электрической дуги или специальных устройств, получивших название плазмотронов.

Характерная особенность, объединяющая разнообразные по методам получения и физическим характеристикам потоки частиц, — высокая концентрация энергии в области их воздействия на материалы, называемой пятном нагрева. В зависимости от концентрации потока энергии и времени воздействия, а также от физических характеристик обрабатываемого вещества возможен нагрев до температур, не превосходящих точки плавления вещества, при увеличении времени воздействия — плавление определенной области, а при дальнейшем воздействии потока энергии — испарение; формируются углубления или даже сквозные отверстия в изделии. Поэтому реализация конкретного теплового процесса определяется возможностями высокой концентрации энергии в виде потока частиц на малые площади и достаточной длительностью воздействия.

Областей применения концентрированных источников энергии становится все больше. Это и машиностроение, авиастроение, приборостроение, электронная и радиопромышленность, микроэлектроника, легкая и текстильная промышленность и другие.

Источники энергии непрерывно совершенствуются, повышается стабильность их энергетических характеристик, улучшаются методы управления ими, что весьма важно для оптимизации режимов известных технологических процессов или создания новых.

Примером одного из наиболее эффективных источников концентрированной энергии — оптический квантовый генератор, лазер. В 1980 г. исполнилось 20 лет со дня создания первого лазера — устройства, электромагнитное излучение которого в высокой степени монохроматично. Слово «лазер» — производное от начальных слов английской фразы (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), которая переводится как «усиление света посредством стимулированной радиации».

Возможность получения монохроматического излучения была предугадана А. Эйнштейном. Фундаментальные исследования выдающихся советских физиков академиков Н. Г. Басова и А. М. Прохорова, а также американского физика Ч. Таунса, выполненные в 60-е годы, позволили сформулировать условия, необходимые для создания лазера.

Для получения монохроматического излучения используется «лазерный эффект»: некоторая система атомов, находящаяся в неравновесном энергетическом состоянии, под действием излучений внешнего источника испускает кванты света строго определенной длины волны (или частоты). Ситуация, правда, не столь проста, так как время нахождения атомов в возбужденном состоянии весьма мало и для двухуровневой системы (основной и возбужденный уровни) трудно накопить достаточное число атомов в возбужденном состоянии, чтобы получить заметный лазерный эффект. Поэтому используют трех- или четырехуровневые системы, в которых энергетические переходы с испусканием квантов света могут происходить между самым верхним и промежуточными уровнями. В такой системе можно накопить большое количество атомов в неравновесном энергетическом состоянии.

Переводятся атомы в возбужденное состояние с помощью внешнего источника энергии, например импульсной лампы-вспышки.

Направленность энергетического потока монохроматического излучения достигается с помощью резонаторных систем. В них лазерное излучение усиливается и формируется в виде узко направленного потока фотонов. Простейшим типом резонатора является открытый резонатор Фабри—Перо—система из двух параллельных зеркал, помещенных по обе стороны активной среды и ламп-вспышек (ламп «накачки»). Те из квантов света, которые будут излучаться под некоторым углом к оси резонатора, не участвуют в усилении потока лазерного излучения. Так формируется мощный направленный поток. Одно из зеркал резонатора полупрозрачно, и через него излучение выводится в окружающее пространство. Далее оно фокусируется оптическими системами.

В качестве активных сред для генерации лазерного излучения используются твердые, жидкие и газообразные среды. В настоящее время генерация монохроматического излучения получена уже на десятках сред. Причем длины волн генерируемого излучения захватывают диапазон от примерно 0,1 мм до десятков микрометров.

**ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ.** Схемы использования лазеров в технологических процессах обычно достаточно просты. Лазерное излучение фокусируется в определенный участок обрабатываемой детали. Часть его с помощью специального зеркала, поставленного на пути луча, может отводиться на измерительную аппаратуру для контроля параметров излучения в процессе обработки. Зеркало полупрозрачно, поэтому большая часть излучения проходит к фокусирующей системе. Фокусирующая система сжимает лазерное излучение в пятно малых размеров, в ряде случаев единицы микрометров, а в большинстве — доли миллиметров. Малый размер пятна и значительная мощность излучения позволяют получить весьма высокую плотность потока. Рекордные величины этого энергетического параметра достигнуты при использовании лазерного излучения в опытах с попытками осуществить термоядерную реакцию синтеза: величина плотности потока (концентрации мощности) может достигать  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> и

выше. Чтобы понять, насколько велика приведенная величина, отметим, что фокусировка солнечного излучения не позволяет получить плотность потока выше  $5 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>. Но даже с помощью такого потока лучистой энергии можно плавить практически любые металлы.

Сфокусированное лазерное излучение, попадая на непрозрачные материалы (металлы и их сплавы), поглощается в узком поверхностном слое; энергия луча преобразуется в другие виды энергии, и в первую очередь в тепловую. Подчеркнем, что не вся падающая энергия луча преобразуется в тепло или идет на возбуждение механических колебаний и т. д. Часть излучения отражается от поверхности тела и, как правило, безвозвратно теряется, понижая коэффициент использования энергии излучения лазера и полный энергетический КПД процесса, который для большинства типов лазерных технологических установок невелик. Часть энергии излучения (до 10%) теряется при прохождении оптических диафрагмирующих и фокусирующих систем. Чем сложнее оптические системы для фокусировки излучения, тем больше потери и ниже полный КПД.

У читателя может создаться впечатление, что лазеры — приборы, весьма активно расходующие энергию и поэтому их применение в массовом производстве должно быть весьма ограниченным. Не отрицая определенной справедливости такого взгляда на перспективы применения лазеров, например в металлообработке (взгляд пессимиста), отметим, что высокая концентрация излучения в пятно малых размеров и, как следствие, высокая плотность потока существенно снижают потери энергии по сравнению с другими источниками, поскольку нет бесполезного нагрева больших объемов вещества. Здесь и кроется энергетический выигрыш. Кроме того, существуют способы снижения потерь энергии на отражение, скажем, использование поглощающих покрытий, не исчерпаны резервы повышения КПД преобразования электроэнергии в излучение лазеров с различными длинами волн. Вообще говоря, чтобы правильно оценить роль лазеров в современных технологических процессах обработки материалов, нужно научиться оценивать энергетические потери излучения на пути от выходного окна лазерной установки до рассеяния этой энергии в твердом теле.

Большинство процессов обработки материалов лучом лазера производится при плотностях потока  $10^3$ — $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>. В этом диапазоне в зависимости от продолжительности воздействия излучения тело может нагреваться, плавиться или интенсивно испаряться. Что же произойдет с веществом, если дальше увеличивать плотность потока излучения, сохраняя остальные условия опыта неизменными? Начиная с некоторого значения плотности потока (для металлов  $10^8$ — $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>), вводимое в металл тепло не может быть отведено ни с помощью теплопроводности, ни увеличением объема испарившегося вещества. Поверхностный слой тела в этом случае уподобляется взрывчатому веществу с высокой удельной энергией (энергией, приходящейся на единицу массы вещества). Он буквально взрывается и разлетается с высокой скоростью, вызывая ударную волну в окружающей среде, и передавая импульс в объем тела. Ударная волна начинает распространяться по телу. Если тело представляет собой тонкую пластину, то энергия ударной волны несущественно рассеивается в веществе и до обратной стороны пластины доходит волна практически той же амплитуды, что и вблизи поверхности. Отражаясь от обратной стороны пластины, ударная волна может вызвать ее механическое разрушение, так как давление, действующее на обратную сторону пластины, практически удваивается.

Если повышать далее плотность потока, предполагая, как и в предыдущем случае, условия в опыте неизменными, то уже передний фронт импульса излучения будет создавать вблизи поверхности плазменный сгусток, мало пропускающий лазерное излучение к поверхности тела. В этом случае энергия излучения лазера будет тратиться в основном на повышение энергии плазменного сгустка (увеличение его температуры и скорости разлета). Эта область энергетических параметров лазерного излучения (выше  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>) в технологических процессах обычно не используется, за исключением ряда специальных случаев.

**О ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ.** Сначала остановимся на технологиях, в которых работают лазеры с импульсной генерацией излучения. Процессы, в которых плотность потока импульса лазерного излучения такова, что за время его действия ве-

щество существенно не плавится, относятся к лазерной термообработке.

Наибольшее распространение в промышленности получила закалка (из твердого и жидкого состояния) определенных марок стали, действие импульсного лазерного излучения на поверхность изделий из которых повышает твердость поверхностного слоя толщиной в несколько десятков микрон и вследствие этого увеличивает износостойкость материала.

В последние годы реализован процесс, связанный с применением лазерного излучения для так называемого отжига дефектов кристаллической структуры вещества; дефекты эти возникают в нем при легировании тонкого (меньше 1 мкм) поверхностного слоя вещества, чаще всего кремния, с помощью ионной имплантации. Ионная имплантация (широко применяется в технологии создания электронных схем) — посылка потока ускоренных ионов в определенный участок на поверхности полупроводникового материала для создания областей с заданными величиной электропроводности и типом проводимости (электронной или дырочной). Дефекты, обычно называемые радиационными, возникают, когда ускоренный поток ионов проходит через вещество. Они отрицательно влияют на качество материала, ухудшая эксплуатационные характеристики приборов, из него создаваемых. Действие импульсного лазерного излучения малой длительности уменьшает число таких дефектов; как говорят, происходит их отжиг, хотя механизм уменьшения числа радиационных дефектов не всегда ясен.

Процессы закалки сталей и отжига радиационных дефектов в полупроводниках, использующие лазерное излучение, далеко не равнозначны по условиям их осуществления, так как в каждом из них применяется излучение с существенно отличающимися длительностями импульсов. Для закалки поверхностного слоя в низко- и среднеуглеродистых сталях применяют импульсы, длительность которых несколько единиц миллисекунд, а для отжига ионно-имплантированных слоев полупроводниковых материалов — импульсы продолжительностью в десятки или сотни миллиардных долей секунды ( $10^{-8}$ — $10^{-7}$ с). Поэтому чтобы тепловой эффект был существенным, плотность потока излучения в последнем случае должна достигать  $10^8$ — $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, в то время как

при закалке она обычно не превышает  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Существенно отличается и глубина проникновения тепла в этих процессах.

Закалку и отжиг отличают высокие скорости нагрева (миллионы градусов в секунду и выше) и охлаждения. Если закалка производится из тонкого слоя расплава, то столь высокие скорости могут привести к образованию на поверхности металла слоев аморфного вещества (металлического стекла, как его называют в научной литературе) или метастабильных неравновесных структур, которые при низких скоростях затвердевания расплава обычно получить не удастся.

Из тонкого слоя расплава на поверхности вещества можно производить легирование, создавая в поверхностном слое изделия твердые растворы с неравновесной концентрацией легирующего вещества, например раствора вольфрама в железе.

Таким образом, процессы импульсной лазерной термообработки производятся как при относительно небольших плотностях потока ( $10^4$ — $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>), но при больших длительностях импульсов, порядка единиц миллисекунд, так и при больших плотностях потока ( $10^8$ — $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>), но при малой длительности импульса — 10 нс.

Сварка выполняется в диапазоне плотностей потока  $10^5$ — $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, причем на нижней границе сварка импульсным лазером по характеру протекания и размерам сварочного соединения аналогична сварке, которая осуществляется источниками энергии с относительно низкими энергетическими параметрами (электрическая дуга и т. д.). В районе верхней границы удастся процесс с кинжальным проплавлением (называемым так по форме сечения шва), в определенной степени аналогичный тому, который происходит при использовании сфокусированного электронного луча в вакууме.

Если повысить плотность потока выше  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, то у большинства металлов масса вещества будет удаляться из зоны воздействия излучения. В металлах (или других непрозрачных для излучения веществах) формируются отверстия, глубина которых зависит от свойств вещества, толщины пластины, длительности воздействия излучения и ряда других факторов.

Окружающая атмосфера может существенно влиять на результат воздействия лазерного излучения. Если

обработка происходит при плотностях потока, не превышающих  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, то воздействие на материал не сопровождается образованием плазмы в окружающем мишень газе. В этом случае на поверхности мишени может происходить химическая реакция, существенно изменяющая свойства поверхности. Такой процесс обычно называют химико-термической лазерной обработкой. Если же плотность потока превосходит  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, то в окружающем мишень газе появляется сгусток плазмы. Обработку поверхности мишени при совместном действии лазерного излучения и плазменного сгустка, образованного в газе, называют лазерно-плазменной.

В последующем мы подробнее остановимся на основных лазерных процессах обработки материалов, придерживаясь рассмотренной классификации, т. е. начиная с меньших плотностей потока. Для обработки непрерывным излучением лазеров данная классификация технологических процессов в основном справедлива.

**ПРОЦЕССЫ ТЕРМООБРАБОТКИ.** Первые применения лазерного излучения в технологических процессах относились к демонстрации энергетических возможностей нового прибора — основное внимание уделялось пробиванию отверстий в стальных пластинах. И только по прошествии нескольких лет после появления лазеров впервые в СССР были проведены эксперименты, которые показали, что для ряда материалов, в том числе для сталей различных марок (У8, Ст. 45, ХВГ и др.), наблюдается эффект их поверхностного упрочнения на глубину в десятые доли миллиметра. Микротвердость поверхности сталей после воздействия импульсного излучения лазера заметно возрастает: в ряде случаев от исходного значения в 300 кгс/мм<sup>2</sup> до 1000, а в ряде случаев и до 2200 кгс/мм<sup>2</sup>. Это определило тот интерес, который проявили технологи к использованию лазерного излучения для термической обработки сталей и сплавов. Впервые промышленное использование лазеров для термообработки началось в нашей стране в 1974 г.

Основа большинства процессов лазерной термообработки — высокие скорости охлаждения, достигаемые при импульсном действии лазеров. Скорости охлаждения могут превышать миллион градусов в секунду, что достижимо только для ограниченного числа методов термического воздействия на материалы.

Остановимся более подробно на отдельных применениях термообработки. Начнем с лазерной закалики в настоящее время, по-видимому, одного из важнейших по практической значимости процессов термообработки импульсным лазерным излучением.

**Лазерная закалка.** Для сталей при длительности импульса 1 мс глубина зоны закалики — всего несколько десятых долей миллиметра. Еще меньшая глубина получается при действии излучения лазеров с модулированной добротностью — единицы или даже доли микрометра, зато микротвердость обработанной зоны, как правило, выше, чем при обработке излучением в режиме свободной генерации. По радиусу зоны воздействия глубина зоны закалики распределена неравномерно — в центре пятна нагрева она наиболее велика и уменьшается до нуля за пределами пятна нагрева, несколько превышая его по размерам.

В первое десятилетие «лазерной эры» в основном занимались закалкой сталей. В настоящее время под лазерной термообработкой понимают значительно более широкий ассортимент процессов, включающий не только поверхностную закалку, но и лазерное легирование металлов, поверхностную очистку, получение аморфных структур, рекристаллизацию тонких слоев на поверхности подложки, стабилизацию параметров пленок и др.

Лазерное излучение может быть с высокой точностью сфокусировано на небольшом участке поверхности детали, изнашивающейся, например, в результате сухого трения. Повышение микротвердости облученного участка не только уменьшает износ, но и стабилизирует параметры приборов, что для технических приложений весьма важно. Малый размер упрочненного участка с измененной структурой позволяет использовать высокую динамическую прочность объема детали при механических нагрузках. Ведь повышение микротвердости всего объема неизбежно увеличит хрупкость металла и снизит его способность противостоять внешним механическим воздействиям.

Локальная закалка позволяет уменьшить деформацию изделий после воздействия, сократить или даже исключить финишную обработку поверхностей. Другое преимущество лазерной закалики — возможность обработки деталей сложной формы, а также упрочнения деталей в труднодоступных местах.

Импульсную лазерную закалку используют для обработки кромок режущего и штампового инструмента. В результате существенно повышается износостойкость штампов — до 2—5 раз.

Для импульсной лазерной закалки серийно выпускается установка «Квант-16», в которой в качестве активной среды используется стекло, легированное неодимом. Ее основные энергетические параметры таковы: энергия в импульсе до 30 Дж, длительность импульса 4—7 см, частота следования импульсов 0,5 Гц, оптическая система позволяет получать размеры пятен нагрева до 2—5 мм.

На величину упрочнения и другие параметры лазерной закалки инструментальной стали влияет большое число факторов: состояние поверхности изделий после механической или химической обработки, исходная структура, геометрия и углы заточки режущих кромок инструмента и др.

Эксперименты показывают, что для таких сталей, как ШХ15 или 5ХНМ, микротвердость после лазерного воздействия будет тем выше, чем выше их исходная твердость после обычной закалки. Практически отсутствует разница в результатах упрочнения при обработке в средах аргона, азота при атмосферном давлении или в условиях вакуума. Поэтому в промышленных применениях можно использовать относительно дешевый азот или вакуум. Отметим, что повышение давления нейтральных газов может только понизить микротвердость.

Чтобы повысить поглощательную способность поверхности, ее зачерпляют, для чего используют окрашивание, а также химическую обработку (энергетический КПД процесса возрастает в 2—3 раза).

Остановимся на использовании лазеров с непрерывной генерацией для закалки поверхностного слоя материалов. Здесь имеется ряд особенностей по сравнению с закалкой при использовании воздействия импульсных лазеров. Во-первых, глубина упрочненной зоны может быть увеличена благодаря более продолжительному воздействию. Возможность относительного перемещения луча лазера и детали позволяет думать о процессах, связанных со сканированием луча по поверхности по заданному закону. Варьируя скорость движения и характер перемещения, можно добиться оптимизации режима обработки.

Для лазерной закалки непрерывным излучением обычно используют  $\text{CO}_2$ -лазеры, а в ряде случаев — лазеры на алюмоиттриевом гранате (АИГ). Напомним, что длина волны излучения у этих лазеров различна: 10,6 мкм — у  $\text{CO}_2$ -лазера, 1,06 мкм — у АИГ-лазеров. Применение  $\text{CO}_2$ -лазеров для упрочнения чугунных деталей в машиностроении позволяет повысить их износостойкость в 5—10 раз. Лучом образуют упрочненные дорожки шириной 1,5—2,5 мм, при этом глубина зоны закалки 0,25—0,35 мм. Между дорожками располагается зона отпуска с пониженной микротвердостью шириной до 0,5 мм.

Один из наиболее интересных режимов воздействия лазерного излучения на детали из чугуна — закалка поверхности из жидкого состояния, полученного оплавлением поверхностного слоя на глубину до 50 мкм, и последующее затвердевание. При таком режиме толщина слоя расплава мала, и жидкий металл не успевает за время затвердевания стягиваться в капли.

Поверхностное упрочнение чугунных деталей с оплавлением поверхности при действии непрерывного лазерного излучения следует признать перспективным технологическим процессом. Оно резко увеличивает долговечность изделий, причем качество поверхности обработанных деталей сравнительно мало ухудшается, нет коробления, даже если использовать излучение лазерных установок с большей мощностью (более 1 кВт), позволяющее получать диаметры пятен нагрева более 5 мм с достаточным по равномерности распределением мощности по радиусу.

Отметим некоторые промышленные применения мощных «непрерывных» лазеров для термообработки.

На Московском автомобильном заводе им. И. А. Лихачева (ЗИЛ) выполнены эксперименты по использованию мощного  $\text{CO}_2$ -лазера ЛТ1-2 (мощностью 5 кВт) для упрочнения деталей грузовых автомобилей, в частности, гильзы цилиндров автомобильного двигателя ЗИЛ-130. Чтобы разработать технологию лазерного упрочнения гильзы, пришлось изучить влияние энергетических характеристик лазерной обработки на размеры зон лазерного воздействия, а также ряда технологических параметров (скорости перемещения луча, типа поглощающего покрытия). Сравнительные испытания

износостойкости серийной биметаллической гильзы из чугуна СЧ 24-44 со вставкой из сплава «нирезист» и монолитной гильзы из того же чугуна, поверхность которого упрочнена лазерным излучением, показали их малое отличие. Более простая технология изготовления серийных гильз, использующая лазерное упрочнение, позволяет сэкономить в год около 1100 т дефицитного сплава, содержащего 16% никеля.

Другая важная в практическом отношении работа по лазерному упрочнению головки блока цилиндров из литейного алюминиевого сплава также выполнена на ЗИЛе. В этом процессе использовался лазер ЛТ1-2. При мощности 1—5 кВт диаметр светового пятна на поверхности металла составил 3—8 мм, а скорость движения луча 0,5—4 см/с. Плавление поверхностного слоя металла и последующее затвердевание расплава с высокой скоростью охлаждения позволяют получить мелкодисперсную структуру сплава с размером зерен 5—8 мкм, что в 70—80 раз меньше, чем у исходного металла. При этом глубина упрочненной зоны — 1,3 мм. Результаты испытаний головок цилиндра на стойкость против их детонационного разрушения показали более чем двухкратное увеличение по сравнению с серийными головками, не обработанными излучением.

Промышленная технология лазерной термообработки успешно использована на автомобильном заводе им. Ленинского комсомола, где на базе лазеров на  $\text{CO}_2$  типа «Кардамон» (мощность до 1 кВт) создан опытно-промышленный участок для термоупрочнения галтелей распределительных валов в условиях поточного процесса. Экономический эффект от внедрения лазерной технологии превысил 300 тыс. руб.

**Поверхностное легирование.** Легирование тонкого поверхностного слоя расплава, созданного воздействием импульсного или непрерывно действующего излучения, используют как метод повышения микротвердости, а также для получения локального участка с повышенными антикоррозионными свойствами. Например, для легирования стали Ст. 45 на ее поверхность наносится тонкий слой микропорошка легирующего металла и жидкого стекла, используемого как связывающее вещество. В состав микропорошка входят углерод, марганец, кобальт, хром, ниобий, никель, молибден. Химиче-

ский состав стали после лазерной обработки изменяется, что обуславливает изменение микротвердости, которая выше, чем твердость Ст. 45, облученной на воздухе без легирования.

В США описан процесс поверхностного легирования кобальтом для повышения износоустойчивости детали. Ранее его выполняли вручную — дуговой наплавкой неплавящимся вольфрамовым электродом. Сложность процесса, возникновение дефектов, деформации, необходимость длительной механической доводки, потери до 50% дорогостоящих легирующих материалов и другие факторы заставили заменить этот способ лазерным легированием.

При лазерном легировании на поверхность образца из нержавеющей стали, площадь которого была 19 см<sup>2</sup>, наносили порошковые покрытия различной толщины (1,38, 1,77, 2,36 мм). Наносили их с помощью плазменного генератора. Прочность связи между покрытием и основным металлом оказалась невысокой. Чтобы добиться прочной связи, на поверхность воздействовали лазерным пучком прямоугольного сечения 7,6×15,2 мм. Чтобы не появились трещины и поры, изделие предварительно подогревали. Равномерность распределения температуры предварительного подогрева по объему детали — важный фактор, предотвращающий возможность образования дефектов. Глубину проплавления и степень перемешивания расплавов покрытия и основного металла регулируют, управляя скоростью перемещения луча. В некоторых случаях для получения плоской отшлифованной поверхности используется дополнительная механическая доводка. В результате с поверхности детали, обработанной при дуговой наплавке в инертной среде вольфрамовым электродом, удалялся 1,6 мм толщины материала, а при обработке лазером — только 0,4 мм.

**Стабилизация параметров пленок.** Одна из важных задач в технологии нанесения пленок (для целей микроэлектроники) — искусственное «старение» с помощью изменения их структуры. Эксперименты показывают, что воздействие лучом лазера позволяет существенно ускорить этот процесс по сравнению с традиционным способом нагрева в вакуумных печах. Кроме того, лазерная обработка пленок в 2—3 раза повышает стабильность их свойств.

**Рекристаллизация пленок.** Рекристаллизация тонких пленок полупроводников и металлов на подложках из других материалов представляет определенный интерес для пленочной технологии, поскольку позволяет получать монокристаллическую структуру пленок из аморфной. Аморфные слои полупроводников образуются при напылении в вакууме паров, например, германия на неподогретые бесструктурные подложки. Высокие скорости охлаждения приводят к образованию аморфной структуры.

**Получение металлических стекол.** В последнее время усилился интерес к аморфным материалам. Материалы эти обладают рядом свойств, отличающих их от кристаллических материалов. Эти отличия касаются магнитных, электрических, механических и коррозионных свойств. Так, у аморфных металлов существенно выше магнитная проницаемость, более высокая стойкость к коррозии. В настоящее время в различных странах разрабатываются методы получения аморфных пленок быстрым охлаждением тонкого слоя расплава или его капель, вытягиванием тонких нитей из расплава и др.

Лазерное воздействие как метод получения на поверхности слоя металлического стекла весьма заманчиво. У металлов, например, быстро расплавляется тонкий слой, а отвод тепла от ванны расплава в металл обеспечивает высокую скорость охлаждения, в ряде случаев недоступную другим методам. Скорости охлаждения при лазерной обработке могут превосходить  $10^6$  град/с, что достаточно для формирования на поверхности металлического стекла, как называют поверхностный аморфный слой в металлах.

Промышленной технологии лазерного получения аморфных материалов пока нет, хотя в ряде публикаций показаны условия для ее реализации и в этом направлении работает ряд лабораторий в нашей стране и за рубежом. Очевидно, что можно применять как импульсные, так и непрерывные воздействия излучения лазера с созданием «пятнистого» и сплошного покрытия на поверхностях деталей, работающих в условиях интенсивного износа, как, например, лопатки газовых турбин. Для этих целей перспективны непрерывные лазеры с большой мощностью. Так, на IX Международном конгрессе по электротермии в г. Канны (Франция, октябрь 1980 г.) представлены данные по лазерной по-

верхностной аморфизации титанового сплава с помощью лазера с непрерывной мощностью 1,8 кВт и скорости перемещения 380 мм/с. Диаметр луча составлял 0,5 мм.

**Лазерный отжиг ионноимплантированных слоев.** Вспышку публикаций во всем мире вызвало открытие лазерного отжига ионноимплантированных слоев полупроводниковых материалов в СССР в 1976 г. В технологии микроэлектроники одним из методов создания интегральных схем является введение в тонкий поверхностный слой подложки из полупроводника ионов бора, мышьяка и других элементов для получения электрических структур типа *p-n*-переходов. Глубина ионного легирования мала, обычно менее 1 мкм. При ионной имплантации создаются дефекты структуры, связанные с воздействием ионов, так называемые радиационные дефекты, существенно ухудшающие характеристики получаемых этим методом электрических структур. Типичной «долазерной» технологией улучшения качества интегральной схемы после ионной имплантации был длительный (порядка нескольких часов) отжиг подложки в диффузионной печи, что все равно не позволяло уничтожить ряд дефектов.

Воздействие короткого импульса лазера (длительностью в несколько единиц  $10^{-8}$ с) плавит тонкий поверхностный слой в десятые доли микрометра и устраняет большинство радиационных дефектов. Другое важное преимущество лазерного отжига — процесс может быть реализован на воздухе, так как из-за малой продолжительности импульса лазерного излучения является высоким, как говорят, «эквивалентный» вакуум.

**ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА. Методы лазерной сварки.** По характеру воздействия излучения на тела лазерная сварка обычно разделяется на импульсную и непрерывную. С помощью импульсного воздействия лазерного излучения можно осуществить точечную сварку соединений различной геометрической конфигурации, а также шовную сварку стыковых соединений, получаемую при последовательном нанесении сварных точек с перекрытием отдельных зон облучения при высокой частоте следования импульсов излучения. Непрерывная лазерная сварка на практике осуществляется только  $\text{CO}_2$ -лазерами и, как правило, является шовной.

**Импульсная лазерная сварка.** Для сварки большин-

ства материалов, включая тугоплавкие металлы, требуются плотности потоков излучения  $10^5$ — $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, если длительность импульса составляет несколько миллисекунд. В ряде случаев при сварке необходимо выполнить следующие технологические требования:

ограничить размер зоны термического влияния;

ограничить вынос расплава из зоны воздействия излучения, чтобы не снижалась прочность соединения;

ограничить температурные градиенты в зоне сварки, чтобы снизить термические напряжения, приводящие к образованию трещин;

сделать минимальным время контакта твердой и жидкой фаз, чтобы избежать образования интерметаллических прослоек и появления хрупкости зоны термического влияния;

добиться максимальной глубины проплавления без удаления массы, чтобы не снижать прочности соединения;

при необходимости создать защитную атмосферу или проводить сварку в вакууме для избежания заметного окисления поверхности материалов.

При лазерной сварке тепло, введенное при поглощении энергии импульса излучения, передается от поверхности тела в глубь материала благодаря теплопроводности. Для каждого материала и толщины, которую необходимо проплавить, существует оптимальный диапазон длительностей импульса, в пределах которого можно получить сварное соединение без чрезмерного выноса материала из зоны нагрева.

Одной из основных характеристик лазерного импульса при точечной сварке является его энергия. Она влияет как на общее количество тепла, введенного в тело, так и на некоторые характеристики излучения, так как от энергии луча лазера зависит длительность импульса, его временная структура и расходимость луча. Поэтому лазерные установки, чтобы избежать изменения других параметров, обычно работают при постоянной энергии накачки, а энергия лазерного луча изменяется с помощью светофильтров или диафрагм.

Удельная мощность, требуемая для сварки, может быть определена расчетным путем, если известны теплофизические и оптические свойства материала и радиус пятна фокусировки излучения в зоне сварки. Затем параметры излучения уточняются в эксперименте.

Форма импульса при сварке существенно влияет на формирование сварного соединения. Опытные данные показывают, что оптимальной формой импульса является трапецеидальная или треугольная, передний фронт которой достаточно крут, а задний — пологий. Для формирования временной структуры лазерного импульса существуют специальные методы.

Лазерная импульсная сварка наиболее эффективна в труднодоступных местах, в условиях интенсивного теплообмена (когда у соединяемых материалов высокая теплопроводность), при соединении легкодеформируемых деталей, а также изделий, требующих ограничения зоны термического влияния и максимальной технологической чистоты.

Для импульсной лазерной точечной сварки в СССР разработан ряд специализированных установок: СЛС-10-1, «Квант-10», «Квант-12», «Квант-17». Их используют для соединения металлов в электровакуумных приборах, при герметизации металлических корпусов интегральных схем с толщиной кромок 0,6 мм, изделий приборостроения и электронной техники (миниатюрные герметизированные реле, в которых лазерная сварка заменила пайку, что повысило их надежность). Годовой экономический эффект от внедрения лазерной сварки в производство реле — около 1,5 млн. руб.

Универсальные модели СЛС-10-1 и «Квант-10», «Квант-12» на основе лазеров на стекле с несодимой обеспечивают глубину проплавления металлов до 0,3—0,5 мм и диаметр зоны сварки 0,4—1,5 мм при частоте следования импульсов 0,5—1 Гц. Производительность специализированной двухлучевой установки шовной сварки «Квант-17» — до 300 мм/мин при глубине зоны сварки 0,15 мм.

Наиболее широко эти установки используются на предприятиях электронной промышленности. Технология лазерной сварки применяется при изготовлении изделий электронной техники более 100 типов. Ее внедрение позволило в несколько раз повысить производительность труда, увеличить выход годных приборов на 10—30%, улучшить их рабочие характеристики. В частности, надежность некоторых приборов после лазерной сварки возросла на 20—30%. Применение метода позволило разработать ряд новых приборов с повышенными параметрами и уменьшенными габаритами. Годовой

экономический эффект от внедрения лазерных сварочных установок в электронной промышленности составляет более 3 млн. руб.

Лазерная импульсная шовная сварка применяется в производстве кварцевых резонаторов, в том числе для наручных мужских электронных часов. Она полностью заменила прежнюю технологию герметизации корпусов пайкой, которая не удовлетворяла требованиям стабильности вакуумной плотности и стерильности процессов, так как из-за остаточного флюса характеристики приборов выходили за пределы ТУ. Брак по указанным причинам составлял до 80%. Попытки использовать сварку плавлением, контактную сварку, холодную сварку не позволили решить проблему из-за потерь характеристик чувствительных к термическому циклу кристаллов из-за температурных воздействий (при сварке плавлением) и нестабильности по герметичности при контактной и холодной сварке. Внедрение процесса герметизации кварцевых резонаторов только на одном предприятии от первых трех установок дало экономический эффект в 201 тыс. руб. в год за счет повышения выхода годных изделий на 34%.

Лазерная сварка успешно применяется в технологических процессах при изготовлении электровакуумных и СВЧ-приборов. Это объясняется тем, что применение контактной сварки при сборке катодных узлов магнетронов, ламп бегущей волны и клистронов приводит к загрязнению соединяемых деталей частицами материала сварочного электрода. При высоких температурах этот материал испаряется и, попадая на активную поверхность катода, ухудшает его эмиссионные свойства.

Бесконтактность импульсной лазерной сварки позволяет сваривать узлы электронных пушек СВЧ-приборов без деформации конструкции, что повышает выход годных изделий, улучшает их параметры.

Интересно, что некоторые лампы бегущей волны и электронно-оптические приборы собирают при лазерной сварке через стеклянный баллон, что позволяет поддерживать высокий вакуум при нанесении фоточувствительных катодов.

**Непрерывная лазерная сварка.** Наиболее подходящим для непрерывной сварки является  $\text{CO}_2$ -лазер, с большим в сравнении с другими лазерами энергетическим КПД и значительной мощностью — более 20 кВт,

что позволяет применять его для сварки металлов и сплавов средней и большой толщины.

Сварка большинства конструкционных материалов при высоких уровнях непрерывной мощности имеет ряд особенностей. Наиболее важной из них следует считать интенсивное испарение металлов из ванны расплава, в результате чего над поверхностью расплава образуется и существует на протяжении всего процесса облако плазмы (лазерный факел). Это может стать причиной сильной экранировки лазерного луча, нарушения условий фокусировки, что весьма нежелательно. Чтобы избежать подобного, сварку выполняют в атмосфере газа, подавляющего ионизацию (гелий, аргон), либо сдувают лазерный факел струей инертного газа. В этом случае глубина проплавления существенно возрастает. Так, в США при проплавлении нержавеющей стали лучом лазера мощностью 20 кВт в струе гелия при скорости сварки 150 м/ч получили шов глубиной 12,7 мм и шириной 1,6 мм. При сварке той же стали на воздухе глубина шва уменьшилась более чем в 4 раза, одновременно увеличилась ширина шва — до 12,6 мм. В первом случае реализовывался режим глубокого проплавления (называемый также кинжальным по форме поперечного сечения шва), во втором — тепловой источник распространялся по большей площади и его концентрация сильно уменьшалась.

Подавать в зону сварки газовую струю, подавляющую плазмообразование, необходимо еще и потому, что газ может быть одновременно использован и для защиты расплавленного металла от воздействия на него воздуха, что особенно существенно при сварке активных металлов. Опыт подсказывает, что для устранения плазменного облака над сварным швом целесообразно использовать гелий (у него высокий потенциал ионизации), а для защиты шва — аргон.

Как правило, непрерывную лазерную сварку проводят в режиме глубокого проплавления. Поэтому практически все известные случаи ее использования относятся к стыковым, внахлестку и тавровым соединениям металлических листов. Ширина зазора не должна превышать 0,1 толщины соединяемых листов, чтобы исключить непровары. При увеличении зазора происходит либо «подрез» краев шва, либо шов не образуется совсем.

Чем больше мощность излучения, тем большей глубины проплавления и скорости сварки можно достичь при данной схеме. В настоящее время наибольшие мощности излучения достигнуты с помощью так называемых газодинамических  $\text{CO}_2$ -лазеров, в которых используется смесь газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (в соотношении 7,5%, 91,3% и 1,2% соответственно) при давлении, превосходящем 1 ат, и нагретая до температуры 3000 К. Газовая смесь истекает со сверхзвуковой скоростью через сопло Лавала и адиабатически расширяется, что приводит к ее охлаждению, сопровождающемуся испусканием возбужденными молекулами  $\text{CO}_2$  когерентного излучения.

Фирма «AVCO Everett» (США) разработала газодинамический лазер мощностью 100 кВт, на котором была опробована сварка металлов большей толщины. Недавно появилось сообщение об использовании для сварки  $\text{CO}_2$ -лазера мощностью в 200 кВт. Пока швы, полученные с помощью мощных лазеров, не обладают хорошими эксплуатационными характеристиками из-за высокой пористости, неравномерности проплава по глубине и др.

Некоторые параметры сварки ряда металлов мощными (до 20 кВт) лазерами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Материал	Толщина, мм	Мощность, кВт	Скорость сварки, см/с	Материал	Толщина, мм	Мощность, кВт	Скорость сварки, см/с
Низкоуглеродистая сталь	3 9,5	15 14	17 3,18	Инконель	5	14	4,23
Нержавеющая сталь	3,2 17,8	14 17	16,95 1,06	Никель-медный сплав	6,3 11,9	10,2 14,5	5,9 2,12
Высокопрочная сталь	12,7	15	1,27	Титановый сплав	3,2 9,5	10 15	10,7 5,7

Металл сварного шва имеет высокие механические свойства. Двухкратный перегиб стали Ст. 3 на  $180^\circ$  по сварному шву не разрушал его. Испытания на разрыв дали равнопрочность соединения основному металлу.

Следует отметить, что для легированных сталей

прочность на разрыв, твердость и ударная вязкость шва в ряде случаев могут быть даже выше, чем у основного металла. Это объясняется снижением содержания неметаллических примесей в сварном шве при высокоскоростных процессах, протекающих в металлической ванне.

**Схемы и технологические приемы лазерной сварки.** Успех лазерной сварки в значительной мере зависит от схемы соединения деталей. Все многообразие соединений при лазерной сварке подразделяется на несколько основных типов: стыковые, внахлестку, угловые, Т-образные. Практически выбор технологического процесса лазерной сварки конкретных изделий сводится к выбору схемы сварки, которая, в свою очередь, обуславливает режим лазерной установки.

Основные технологические требования при сварке лазерным лучом следующие:

- высокая точность установки детали относительно оси лазерного луча;

- точная установка детали в фокусе луча, чтобы разброс в величинах удельной мощности был небольшим;

- защита зоны сварки газом, например аргоном, если соединяются металлы, окисляющиеся на воздухе, что повышает пластичность соединения;

- симметричный подвод тепла.

Зазор между соединяемыми деталями, как показывает опыт, в большинстве случаев недопустим, так как способствует образованию горячих трещин в соединении. Эксперименты по изучению влияния зазора на образование трещин проводят на образцах с переменным зазором. При некоторой величине зазора, характерной для данной длительности импульса и энергии излучения, появлялись отдельные трещины, расходящиеся по радиусу от центра. Последующие сварные точки уже имеют сетку трещин. Наступает момент, когда соединение не образуется, хотя кромки образцов еще оплавлены. С увеличением удельной мощности излучения граница образования трещин сдвигается в сторону больших зазоров. Влияние этих факторов различно: если увеличение длительности импульса способствует формированию более качественного соединения, то увеличение удельной мощности приводит к значительным выплескам металла, а также к образованию горячих трещин.

Примером успешной замены лазерной сваркой традиционного метода механического соединения двух металлических деталей можно считать сборку узла баланса часового механизма. Стальную спиральную пружину приваривают к массивной металлической колодке из стали диаметром 2,5 мм и высотой 1 мм. Для сварки используется импульсный лазер с параметрами импульса  $E=8$  Дж,  $\tau=0,5-0,8$  мс, размер пятна фокусировки 0,15—0,2 мм. При указанных параметрах импульса излучения глубина проплавления достигает 0,5 мм. В этом процессе удельная мощность доходила до  $4 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>.

Вследствие малой длительности импульса излучения зона термического влияния имеет незначительные размеры, поэтому нет коробления, охрупчивания, не теряются необходимые механические свойства стального волоска. Металлографический анализ зоны сварки показал, что в сварном ядре нет пор и трещин. После лазерной сварки узлов баланса отпала необходимость править волосок по плоскости, в то время как по существующей технологии эту ручную операцию должны были пройти все узлы.

Проверка в лаборатории надежности на Втором московском часовом заводе показала, что максимальная суточная изохронная погрешность часов со сваренным узлом баланса 25 с. В серийных часах с механическим креплением узла эта погрешность составляет 60 с.

**ПОЛУЧЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ.** Технологический процесс получения отверстий с помощью лазерного луча возник как ответ на потребность в эффективных методах изготовления микроотверстий в деталях из сверхтвердых и тугоплавких материалов.

В промышленности лазерные технологические установки широко применяются преимущественно для получения черновых отверстий, например в рубиновых часовых камнях и заготовках алмазных волок, а также в различных деталях приборов и машин ряда отраслей промышленности в тех случаях, когда не предъявляются жесткие требования к точности обработки.

Расплав, образующийся при воздействии излучения, в определенной степени отрицательно влияет на формирование отверстия. Это связано с тем, что снижение удельной мощности в процессе обработки, как правило, имеет место в конечной части процесса, что может при-

вести к заплавлению отверстия при движении жидкой фазы. Поэтому следует принимать специальные меры, чтобы образование расплава не препятствовало получению отверстия или не искажало бы его форму. Кроме того, выброс жидкой фазы на поверхность детали образует венчик застывшего металла и снижает качество обработки.

На параметры отверстий существенно влияют энергетические характеристики импульса, временные параметры излучения, а также условия фокусировки излучения. Остановимся на роли каждого фактора.

**Влияние энергетических характеристик.** Многие технологические лазерные установки имеют одну неизменную длительность импульса или их ограниченный набор. В таком случае для получения заданных размеров отверстия подбирают энергию импульса. Тогда зависимость глубины и диаметра отверстия от энергии импульса излучения — одна из основных характеристик, определяющих возможности получения отверстий с помощью лазера.

Изменить энергию лазерного импульса можно несколькими методами: изменением электрической энергии накачки импульсных ламп (наиболее распространенный способ); применением светофильтров; диафрагмированием луча.

При одинаковых значениях энергии в импульсе диаметры отверстий, полученных, например, в стальных пластинах, будут различными в зависимости от метода получения энергии импульса — диафрагмированием или изменением энергии накачки. При энергии импульса лазерного излучения в несколько джоулей диаметры отверстий могут отличаться в 2—2,5 раза. Это обусловлено тем, что уменьшение диаметра отверстия при диафрагмировании луча связано с уменьшением его расходимости, а при изменении энергии с помощью увеличения (или уменьшения) энергии накачки импульсных ламп меняется не только расходимость луча, но и длительность импульса излучения.

Если диаметр отверстия сильно зависит от диафрагмирования лазерного луча, то глубина отверстия — весьма слабо.

**Влияние временных характеристик.** Специально проведенные опыты показали существенную зависимость размеров отверстия от длительности импульса при по-

стоянной его энергии. Увеличение длительности импульса приводит к росту глубины отверстия, одновременно уменьшая его диаметр. Это объясняется тем, что увеличение длительности импульса снижает удельную мощность излучения (напомним, что энергия импульса считается постоянной), а отсюда — уменьшение экранирующего влияния продуктов разрушения. Однако плотность потока излучения не должна быть ниже некоторой величины, по достижении которой отверстие «затекает» расплавом или вообще не образуется. Влияние формы импульса на параметры отверстия рассмотрим ниже.

**Влияние условий фокусировки.** Более пространно это влияние на параметры отверстия величины фокусного расстояния оптической системы и смещения фокальной плоскости относительно поверхности детали.

С увеличением фокусного расстояния линзы удельная мощность излучения снижается (при прочих неизменных характеристиках энергии, длительности импульса, положения фокальной плоскости относительно поверхности детали), а значит, уменьшается отношение диаметра отверстия на входе к диаметру пятна нагрева. Диаметры входных отверстий при фокусировке луча на поверхность мишени превышают обычно в несколько раз диаметры пятен нагрева на поверхности. Это объясняется тем, что при формировании отверстия стенки его размываются в результате выброса жидкой фазы, образующейся на них.

Наибольшая глубина отверстия достигается при фокусировке лазерного излучения на некоторое расстояние в глубь материала от поверхности детали, которое, например, для Ст. 3 составляет  $\frac{2}{3}$  от глубины получаемого отверстия (при энергии 35 Дж, длительности импульса 1 мс), что при использовании линз с фокусными расстояниями 40—60 мм составляет 1,5—2 мм. Применение линз с меньшим фокусным расстоянием позволяет получать более глубокие отверстия с меньшим диаметром.

**Факторы, влияющие на точность и воспроизводимость результатов.** Области практического применения лазерной размерной обработки ограничены преимущественно получением отверстий не выше 3-го класса точности. Тем не менее лазерная технология получения отверстий внедрена на ряде предприятий, где с ее по-

мощью получают черновые отверстия (на проблемах внедрения этих процессов мы остановимся позднее).

Относительно невысокие точность и качество лазерной размерной обработки в ее одноимпульсном варианте обусловлены большим объемом расплава в продуктах разрушения и его малоуправляемым перераспределением при движении по стенкам отверстия в конце действия импульса излучения лазера и после окончания его действия, пока не произойдет затвердевание. Толщина слоя жидкой фазы на стенках и дне отверстия определяется удельной мощностью и длительностью импульса. Увеличение длительности импульса обуславливает рост объема жидкой фазы, что приводит к увеличению разброса параметров отверстий. Так, если длительность импульса превосходит 1 мс, то увеличивается и зона возможных изменений структуры и вследствие этого — свойств материала, из-за увеличения размеров прогретого слоя вблизи поверхности отверстия.

Для хрупких материалов возрастание длительности импульса приводит к росту зоны термических напряжений и к образованию трещин. В то же время уменьшение продолжительности действия импульса значительно уменьшает вероятность появления трещин для таких материалов, как ферриты; длительность импульса, при которой трещин не появляется, как показывают опытные данные, не превышает 0,1 мс. С другой стороны, коротким импульсом излучения невозможно получить глубокое отверстие.

На точность и воспроизводимость параметров отверстий влияет ряд факторов, которые можно разбить на три основные группы.

Факторы первой группы, которые оказывают наибольшее влияние на воспроизводимость размеров и форм отверстий, связаны с нестабильностью таких параметров излучения, как энергия, длительность импульса, угол расходимости, пространственная и временная структура излучения.

Факторы второй группы обусловлены различными неточностями установки деталей и их перемещения в зоне воздействия излучения. Например, несовпадение нормали к поверхности детали с оптической осью фокусирующей системы при перемещении детали может при получении серии отверстий повлиять на диаметр и форму отверстия вследствие расфокусировки.

Факторы третьей группы связаны с неоднородностью структуры вещества, свойств и состояния обрабатываемой поверхности деталей, что также влияет на воспроизводимость результатов в партии однотипных изделий.

Влияние указанных факторов может быть существенным в тех случаях, когда диаметры отверстий соизмеримы с размерами неоднородностей или когда их число велико (пористые материалы, полученные методами порошковой металлургии).

**Методы повышения точности и воспроизводимости результатов.** Их можно условно разбить на две группы: методы, связанные с выбором режима обработки, управления импульсом (длительность и форма импульса), способа обработки (многоимпульсная обработка, обработка в цилиндрической световой трубке) и т. д.; методы, применяющие различные способы калибровки полученных отверстий, химическое травление, продувку отверстий сжатым газом и т. д.

Опытные данные показывают существенное влияние на процесс разрушения вещества не только интегрального значения энергии и длительности импульса, но и его формы. Закономерность ввода энергии и скорость нагрева вещества изделия в существенной степени определяют результаты размерной обработки. Так, длительность переднего фронта импульса определяет время роста температуры вещества изделия до температуры испарения. При пологом переднем фронте импульса температура и поглощательная способность поверхности растут медленно, что увеличивает размеры зоны термического влияния и диаметра кратера на входе отверстия.

С другой стороны, чем короче длительность заднего фронта импульса лазерного излучения, тем менее вероятно заплавление отверстия жидкой фазой, поскольку малая длительность фронта обуславливает резкое прекращение процесса ввода энергии в момент получения отверстия необходимой глубины.

Пичковый режим излучения твердотельных лазеров благоприятен для размерной обработки материалов, так как обеспечивает эффективное использование энергии излучения для процесса разрушения. Это связано с тем, что в отдельных пичках импульсная мощность значительно превышает среднюю мощность за импульс, а интервал между пичками позволяет заметно уменьшить

потери энергии, обусловленные экранировкой излучения продуктами разрушения.

В ряде случаев хаотичность генерации отдельных пиков в импульсе лазера, работающего в режиме свободной генерации, снижает воспроизводимость результатов из-за непредсказуемости эффекта воздействия. Большую точность и воспроизводимость результатов обеспечивает упорядоченный режим генерации излучения, т. е. такой, при котором практически все пики (за исключением небольшого по длительности интервала вначале и конце действия импульса) имеют одинаковую форму, продолжительность и следуют с одинаковым интервалом друг за другом.

Чтобы получить упорядоченный режим генерации излучения, разработан ряд способов: использование сферических резонаторов, применение вращающихся с большой скоростью дисков с прорезями для прохождения излучения, помещаемых на пути следования излучения (механический модулятор излучения), и др.

Использование излучения с упорядоченной временной и пространственной структурой повышает точность размеров и формы отверстий, а также их качество. Как правило, в этом случае наплывы расплавленного металла на стенках отверстия и на поверхности деталей отсутствуют.

Повысить качество обработки можно также с помощью оптической системы с цилиндрической световой трубкой (ЦСТ). Поясним, в чем тут дело. При фокусировке излучения на поверхности изделия наибольшая концентрация излучения происходит в фокальной плоскости, а в обе стороны перпендикулярно фокальной плоскости диаметр светового пятна возрастает. Однако имеется некоторая область по обе стороны от фокальной плоскости, где увеличение диаметра незначительно. Чем меньше фокусное расстояние линзы, используемой для фокусировки излучения, тем меньше длина этой области, называемой каустикой, и тем сильнее сказывается на изменении плотности потока смещение детали относительно фокальной плоскости. При углублении отверстия расфокусировка излучения может сказаться на качестве получаемого отверстия.

Одним из методов борьбы с изменением плотности потока излучения при получении глубоких отверстий является использование ЦСТ. На каустике имеются две

характерные плоскости, с которыми совмещают поверхность обрабатываемого изделия. В первом случае с плоскостью обрабатываемого изделия совмещается фокальная плоскость (обработка по методу дальней зоны). Во втором — совмещаются плоскости изделия и излучающего торца или ограничительной диафрагмы (обработка по методу ближней зоны). Для первого случая пространственное распределение плотности потока излучения имеет вид гауссовой кривой, во втором — оно идентично распределению электромагнитного поля на торце излучающего активного элемента. Если расположение оптической системы и лазера удовлетворяет условию, что размеры светового пятна в фокальной плоскости и в плоскости изображения торца излучателя равны, то световая трубка ограничена цилиндрической поверхностью. Длина и диаметр ЦСТ регулируются соотношением между углом расходимости луча, фокусным расстоянием линзы и диаметром диафрагмы.

Применение ЦСТ существенно снижает величину непосредственного поглощения стенками отверстия светового пучка и тем самым повышает качество обработки. Так, обработка изделия на установке, в оптической системе которой предусмотрено формирование ЦСТ (установка К-6, СССР, К-НД, США), позволяет получать отверстия с отклонением от цилиндричности не более  $1/200$  при отношении глубины к диаметру равном 15.

Одним из методов повышения точности обработки является продувка отверстия сжатым газом, например воздухом, для удаления жидкой фазы в процессе обработки. Точность обработки повышается до 2-го класса, понижая шероховатость на 1—2 класса. Струю сжатого воздуха можно также подавать не только по направлению следования луча, но и перпендикулярно ему, чтобы обеспечить защиту поверхности фокусирующих оптических систем от конденсации продуктов разрушения и т. д.

В ряде случаев прошивка черновых отверстий совмещается с последующей механической обработкой, например, калибровкой отверстия пуансонами или проволокой.

Другой метод дополнительной обработки полученных лазерным излучением черновых отверстий — химическое растравливание. Оно позволяет калибровать от-

верстия практически любого диаметра и высоты из тех, которые могут быть получены в металлах и сплавах с помощью лазерной обработки. При травлении исправляются овальности и другие отклонения сечения отверстия от круглой формы.

**Многоимпульсный метод получения отверстий.** Один из наиболее эффективных методов повышения точности и воспроизводимости результатов получения отверстий с помощью луча лазера — использование многоимпульсной обработки (МИО). Сущность ее в том, что отверстие формируется не одним импульсом, а серией одинаковых импульсов с определенной энергией и длительностью, действие которых доводит размеры отверстия до необходимого. Этот процесс в определенной степени аналогичен процессам электроэрозионной обработки.

Толщина снимаемого каждым импульсом слоя может быть весьма малой. Поэтому при получении отверстий глубиной в 1 мм и более наличие жидкой фазы в меньшей степени сказывается на искажении формы отверстия, чем при действии одного импульса.

Особенностью МИО является то, что характерный размер зоны термического влияния определяется длительностью отдельного короткого импульса, поскольку период следования импульсов значительно больше времени остывания материала. Поэтому с помощью МИО можно получать отверстия в хрупких материалах без их раскалывания.

Способ используется для решения двух различных технологических задач: получения максимально глубоких отверстий без жестких требований к их точности (не выше 3-го класса) и форме; получения прецизионных отверстий (не ниже 2-го класса).

Число импульсов в серии при МИО обычно близко к 10. Дело в том, что эффективность удаления вещества с ростом числа импульсов падает. При обработке без ЦСТ это связано с уменьшением плотности потока излучения при углублении отверстия.

Опыты и расчеты показывают, что при использовании МИО можно увеличить глубину отверстия по сравнению с обработкой одним импульсом в несколько раз. Углубить отверстие при МИО можно, смещая в процессе обработки фокус линзы в глубь образца: удастся получать отверстия с отношением глубины к диаметру, равным 25 и более.

# ТЕХНИКА

Рассмотрим основные применения лазеров в технологических процессах за рубежом. Лазерная технология наиболее широко развита в промышленных капиталистических странах, в том числе в США, ФРГ, Японии, Англии:

Сначала остановимся на применении мощных непрерывных  $\text{CO}_2$ -лазеров. В зарубежных странах серийное использование мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров началось с середины 70-х годов. Объем производства мощных лазеров с непрерывной генерацией постоянно возрастает. По данным журнала *Laser Focus* [1], в западных странах в 1979 г. на производство лазеров для обработки материалов затрачено 46 млн. долл. (из общих затрат на лазерную технику в 740 млн. долл.). Уже в 1979 г. в зарубежных странах изготовлено около 100 лазерных установок мощностью свыше 1 кВт, однако высокая стоимость лазерного оборудования в определенной степени сдерживает более широкое применение лазеров в промышленности. Например, технологическая лазерная установка мощностью 5 кВт в 1979 г. стоила выше 100 000 долл. Однако следует иметь в виду, что по мере насыщения рынка сбыта стоимость оборудования обычно снижается.

В США имеется ряд фирм, специализирующихся на производстве технологических лазеров мощностью 1—2 кВт при непрерывной генерации излучения. Это такие фирмы, как [2] «Spectra Physics», «Photon Sources», «Coherent Radiation», «Apollo». Аналогичные по мощности непрерывного излучения технологические лазеры производятся в Западной Европе фирмами «Messer Grisheim» (ФРГ), «Ferranti» (Англия), «CGE-Scilac» (Франция), а в Японии фирмой «NEC-Nippon Electric».

Фирмы «Spectra Physics», «Avco», «Union Carbide» и др. в США, «CGE-Scilac» во Франции изготавливают технологические  $\text{CO}_2$ -лазеры с непрерывной генерацией, мощность которых превышает 2 кВт.

Ряд фирм США и Канады производит мощные импульсные и импульсно-периодические лазеры, имеющие сбыт как на внутреннем, так и на внешнем рынках [3].

Внедрение лазерной технологии за рубежом наиболее эффективно происходит в уже «подготовленных» отраслях промышленности. К их числу относятся автомобильная и авиационная отрасли промышленности. Так, журнал «Laser Focus» [4] сообщает об использовании лазера фирмы «Spectra Physics» мощностью 5 кВт для закалики внутренней поверхности гильз цилиндров дизельных двигателей. Процесс, осуществляемый при поступательно-вращательном движении обрабатываемой детали, требует 15 мин. Фирма «General Motors» [4] использовала лазер фирмы «Avco» мощностью 15 кВт для закалики кулачков коленчатого вала. Продолжительность процесса составляет всего 4 с.

Приведенные примеры не исчерпывают разнообразного приме-

# РУБЕЖОМ

нения лазерной термообработки за рубежом. Несмотря на достоинства лазерной термообработки, которая является одним из наиболее эффективных применений лазеров в технологических процессах, она обладает еще достаточно высокой стоимостью, поэтому экономически целесообразна обработка только относительно небольших, но наиболее ответственных областей изделия.

Отметим процессы лазерной сварки. Она нашла достаточное распространение за рубежом, в том числе в таких отраслях промышленности, как автомобилестроение, сварка газопроводов, отчасти в авиационной промышленности и ряде других. Так, фирма «General Motors» использует мощные  $\text{CO}_2$ -лазеры при сварке кузовов автомашин. Тем не менее ряд исследователей (к их числу относится автор книги «Промышленные применения лазеров» Дж. Рэди) [5], основываясь на опыте фирм США, считает, что из-за высокой стоимости оборудования лазерная сварка непрерывным излучением не может рассматриваться как альтернатива обычным методам сварки, если они по условиям процесса являются приемлемыми. Вообще этот вопрос, как и в случае лазерной термообработки, в каждом конкретном случае требует технико-экономических обоснований.

Применение лазерной резки листовых материалов, таких, как алюминиевые сплавы и стали различных марок, уже давно вышло за пределы лабораторных исследований, хотя многие научные вопросы лазерной резки остаются еще нерешенными. Используя  $\text{CO}_2$ -лазеры мощностью 3—6 кВт, авиационные фирмы США «Boeing», «Lockheed», «McDonnell Douglas», «Northrop» [6] используют в производстве деталей раскрой листов из алюминиевого сплава со снижением затрат на 70% по сравнению с плазменной резкой.

Поскольку технологические процессы с использованием импульсного лазерного излучения начали раньше использоваться в промышленности, чем лазеры с непрерывной генерацией, объем и номенклатура внедрений их выше, чем у лазеров с непрерывной генерацией.

Большой объем внедрений имеется в области микросварки лазерным излучением, в том числе при герметизации электронных схем, сварке деталей электронных часов, при импульсном термоупрочнении ряда деталей, как поверхность штампов и др.

[1] Laser Focus, 1979, 15, № 12, p. 26.

[2] Pasturel M. Elect.—Opt. System Desing, 1976, 8, p. 26.

[3] Абильтснитов Г. А., Голубев В. С. Основные проблемы лазерной технологии и технологических лазеров. Препринт, НИЦТЛ, Троицк, 1981, с. 3—39.

[4] Laser Focus, 1978, 14, № 11, p. 25.

[5] Рэди Дж. Промышленные применения лазеров, Мир, 1981.

[6] American Metal Market, 1977, 11, p. 12.

**Промышленное применение лазерного способа получения отверстий.** В этих целях разработан и внедрен ряд отечественных установок: К-3, К-3М, «Квант-9», «Квант-9М», «Кристалл-6», «Кристалл-16», «Корунд-2» и др. Их внедрение благодаря эффективности технологических процессов, связанной с повышением производительности, позволило получить большой экономический эффект. Приведем некоторые примеры.

Наибольший экономический эффект имеет место при изготовлении алмазных фильер (на Рославльском и Полтавском заводах алмазного инструмента) и сверлении черновых отверстий в рубиновых часовых камнях (на часовом заводе в г. Петродворце и др.) — в сумме более 2,9 млн. руб. в год. Ранее алмазные фильеры получали механическим сверлением алмазным абразивом или с помощью электрофизических методов, производительность которых уступает лазерному. Установка «Квант-9» позволила в десятки раз повысить производительность по сравнению с электрофизическими и в 200 раз по сравнению с механическим методами. Существенно улучшены условия труда, высвобождены производственные площади.

Для сверления рубиновых камней (объем их выпуска в нашей стране превышает 500 млн. в год) широко используется автомат «Корунд», работающий в режиме МИО. Чтобы получить одно отверстие диаметром 0,05—0,08 мм в рубиновой заготовке, толщина которой 0,45 мм, используют 4—5 импульсов с энергией 0,2—0,3 Дж при частоте следования 5 Гц или 7—8 импульсов с энергией 0,1 Дж, с частотой следования 10 Гц. Производительность установки при автоматической смене заготовки на рабочей позиции — 1 камень в секунду. Установка «Корунд» успешно эксплуатируется на ряде заводов (Кусинский завод точных технических камней — 53 установки, Углицкий часовой завод им. 50-летия СССР — 18 установок и др.).

На московском машиностроительном заводе «Красный Октябрь» решены задачи получения с помощью лазерной технологии отверстий в деталях из жаропрочных и нержавеющей материалов и сплавов и др. Успешно эксплуатируется в условиях серийного производства лазерный полуавтомат ЛП-2. С его помощью за 24 мин в одной детали прошивается 60 отверстий диаметром 0,3

и глубиной 1 мм (2—3-й класс точности, шероховатость 8—9-го класса).

Имеется множество примеров внедрения метода лазерного получения отверстий в различные отрасли промышленности, на которых мы не будем останавливаться. Отметим только, что возможности применения лазеров для прошивки отверстий в материалах с различными свойствами далеко не исчерпаны. Получать отверстия таким образом становится выгодным, если существует необходимость в отверстиях диаметром менее 1 мм, если отверстия необходимо получать под углом к поверхности, необходимо сверлить сверхтвердые и твердые материалы, отверстия в которых обычными методами просверлить достаточно трудно.

**ЛАЗЕРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ.** Процессы разделения материалов можно считать одной из наиболее перспективных областей для применения лазеров большой мощности с непрерывной генерацией. Дело в том, что резка тонколистовых высокопрочных стальных материалов механическими способами — малоэффективный и трудоемкий процесс, особенно при мелкосерийном производстве деталей сложной конфигурации. Использование для этих же целей известных термических способов (кислородная резка, плазменная резка) неэффективно из-за крайне низкого качества кромок реза, большой зоны термического влияния и значительных термических деформаций. Не случайно за рубежом лазерная резка по числу патентов стоит на одном из первых мест среди технологических процессов.

Для резки материалов обычно используются лазеры на  $\text{CO}_2$  и на алюмонитриевом гранате. У  $\text{CO}_2$ -лазеров высокий КПД (15%); кроме того, излучение на длине волны 10,6 мкм поглощается большим числом материалов, включая металлические окислы, стекла, керамику, кварц, естественные органические материалы (дерево, кожа и др.), синтетику, пластики и т. д. Процесс легко автоматизируется для получения фигурных контуров реза.

Для термораскалывания необходимо создать в объеме материала при поглощении лазерного излучения термические напряжения и микротрещины. Затем материал разламывается по линии действия теплового источ-

ника. Метод в какой-то мере аналогичен методу резки стекла или других хрупких материалов алмазным инструментом с последующим приложением механического усилия для разлома.

Остановимся более подробно на лазерной резке. Как известно, действие излучения на поверхность разрезаемой детали приводит к образованию теплового источника. Он нагревает материал до температуры плавления и выше, что формирует зону плавления. Перемещение источника тепла вдоль предполагаемой линии разделения и удаление расплава газовой струей формирует зону лазерной резки.

Лазерная резка возможна, если плотность потока излучения, поглощаемого поверхностью вещества, превышает критическое значение для достижения температуры, несколько превышающей температуру плавления данного материала за время, в течение которого диаметр луча лазера пересечет данную точку на поверхности детали. Очевидно, что это время зависит от скорости движения теплового источника, оно тем короче, чем выше эта скорость.

Обычные плотности потока при лазерной резке —  $10^6$ — $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> для металлов и  $10^2$ — $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> для диэлектриков. Для металлов при диаметре пятна фокусировки одинаковом с пятном при воздействии на диэлектрики требуется большая плотность потока, так как у металлов, как правило, не только большая теплопроводность и более высокая температура плавления (и испарения), но также и меньший коэффициент поглощения излучения. Последнее обстоятельство является решающим различием в определении энергетических характеристик излучения, требуемых для резки металлов и диэлектриков.

Низкий коэффициент поглощения металлов требует определенной подготовки поверхности перед резкой. Ее приходится либо подвергать специальной химической обработке, чтобы повысить поглощение, либо закрашивать поглощающим составом. Справедливости ради отметим, что такая «неблагодарность» по отношению к технологам несколько компенсируется увеличением поглощательной способности металлов с повышением их температуры. Кроме того, при достижении на поверхности металла определенного диапазона температур, характерного для каждого вещества при обработке в

окислительной атмосфере, активизируется экзотермическая реакция образования на поверхности окисной пленки. У последней более высокий коэффициент поглощения, и температура поверхности начинает быстро расти.

При резке металлов, как, впрочем, и других материалов, используется схема с подачей соосно лазерному излучению потока газовой струи. Метод разделения материалов, предложенный в 1967 г., получил название газолазерной резки. Струя газа через специальное сопло подается в зону резки и выполняет несколько функций. Если режутся легко воспламеняющиеся материалы (дерево, картон, текстильные материалы, кожа), содержащие органические вещества, то применяется нейтральный газ, например аргон, который препятствует их загоранию и способствует удалению продуктов разложения из зоны реза. Еще чаще используется азот, как более дешевый.

Для металлов, напротив, подают воздух или кислород, которые инициируют химическую реакцию окисления и способствуют удалению расплава со стенок реза. Процесс газолазерной резки с применением кислорода аналогичен кислородно-ацетиленовой резке, в которой экзотермическая химическая реакция также используется как источник значительной части энергии. Сфокусированное излучение лазера заменяет кислородно-ацетиленовое пламя в качестве источника тепла для нагревания металла до температуры, при которой химическая реакция начинает протекать весьма бурно. Лазерный луч — тепловой источник с более высокой концентрацией энергии, что уменьшает ширину реза, размеры зоны термического влияния, но дает более высокую скорость резки по сравнению с любым другим способом.

Ширина реза близка к диаметру пятна нагрева фокальной плоскости или несколько меньше, а размер зоны термического влияния — 0,05—0,2 мм. Увеличение мощности лазера повышает скорость резки, которая также существенно зависит от теплофизических свойств материала и толщины листа. При мощности 300—500 Вт скорость резки таких металлов, как сталь и титан, достигает нескольких метров в секунду, однако мощности еще недостаточно для резки металлов с высокой теплопроводностью (например, меди и алюминия). Но повышение мощности до 15—20 кВт позволяет ре-

зять их с высокой скоростью, причем даже без подачи газовой струи в зону резки.

Важным фактором, определяющим производительность и качество газолазерной резки, является положение фокальной плоскости оптической системы относительно поверхности разрезаемого листа. Чтобы не снижать скорости резки и ее качества, следует располагать сфокусированный луч лазера на поверхности листа с точностью  $\pm 0,5$  мм.

Чтобы на кромках реза не образовывался грат, необходимо поддерживать давление кислорода (при резке стали толщиной 0,5—5 мм) в пределах 3—5 кгс/мм<sup>2</sup> при расходе 1,02—2,5 м<sup>3</sup>/ч.

Газолазерная резка, по-видимому, наиболее целесообразна для дорогих металлов и сплавов, так как с ее помощью можно существенно снизить потери материала. В нашей стране разработаны установки для лазерной резки металлов. Это «Кардамон», выходная мощность которой 800 Вт, а длина волны излучения 10,6 мкм; установка «Алмаз-5» с числовым программным управлением и лазером на СО<sub>2</sub> мощностью 800 Вт внедрена на московском предприятии для раскроя тонких листов нержавеющей стали.

Остановимся кратко на лазерной резке неметаллических материалов. В легкой промышленности она используется для раскроя тканей, искусственных материалов типа кожи, резки бумаги, картона и др. Газолазерный станок для раскроя тканей с программным управлением установлен в Ленинграде на швейном объединении им. Володарского. Результат — повышение точности раскроя, его скорости, существенный экономический эффект.

Имея в виду большое количество новых материалов с разнообразным назначением как в легкой, так и в других областях промышленности, следует считать, что перспективность лазерной резки здесь не вызывает сомнений.

Одна из важных областей применения лазерного метода разделения материалов — скрайбирование. Быстро растущие объемы производства интегральных схем (ИС) и больших интегральных схем (БИС) требуют создания оборудования высокой производительности для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы. Следует подчеркнуть, что высокая степень автоматиза-

ции последующих операций сборки ИС и БИС ужесточает ряд качественных требований к операции разделения: точности размеров кристаллов, прямоугольности геометрической формы, отсутствия сколов на боковых гранях и т. д.

Сущность лазерного скрайбирования — в создании по линии предполагаемого разлома канавки в материале, формируемой воздействием отдельных лазерных импульсов малой длительности  $10^{-8}$  с и с большой плотностью потока, достигающей  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Малая длительность импульса излучения не позволяет испарить большой объем вещества. Увеличивать же плотность потока выше  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> нецелесообразно из-за развития взрывных процессов на поверхности разрезаемого полупроводника и генерирования в его объеме ударной волны (что приводит к образованию дефектов, снижающих качество края реза). Наложение отдельных, частично перекрывающихся лунок при перемещении луча образует скрайберный рез.

Для скрайбирования используют лазеры на алюмоиттриевом гранате, легированном неодимом. Пороговая мощность, при которой начинается испарение материала, определяется температурой плавления, коэффициентами теплопроводности и поглощения.

У кремния край собственной полосы поглощения близок к энергии кванта АИГ-лазера, равной 1,17 эВ, поэтому при комнатной температуре поглощение невелико. Однако оно резко возрастает с увеличением температуры, в связи с чем формирование реза в кремнии происходит достаточно эффективно.

Лазерный скрайбер, используемый для разделения полупроводниковых пластин на отдельные кристаллы, состоит из трех основных частей: лазера с высоковольтным блоком питания, оптической системы фокусировки и визуального наблюдения за зоной обработки и системы координатных перемещений.

Частота следования отдельных импульсов достаточно велика (до 50 кГц), что позволяет получить скрайберный рез на больших скоростях. Глубина реза достигает 15—50 мкм при ширине до 25—30 мкм. При лазерном скрайбировании высокое качество разделения обеспечивается при глубине скрайбирования не менее  $\frac{1}{4}$  толщины пластины, когда скорость скрайбирования становится значительно ниже максимально возможной,

Определенной технологической проблемой при лазерном скрайбировании является защита пластины от конденсатов полупроводникового материала и очистка ее от них. Существует несколько вариантов решения этой проблемы: вакуумный отсос, погружение пластин в деионизованную воду, размещение над пластиной прозрачной эластичной ленты с хорошей адгезией к испаряющимся частицам и др.

**ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА.** Химико-термическая обработка материалов связана с иницированием поверхностной химической реакции при повышении температуры подложки, например реакции окисления.

Самостоятельный характер у лазерной обработки материалов в различных газах при повышенных и даже высоких давлениях, когда воздействие излучения сопровождается оптическим пробоем газа вблизи поверхности и образованием плазменного сгустка, взаимодействующего, с одной стороны, с лазерным излучением, а с другой — с поверхностью мишени. Обработка материалов лазерным лучом в таких условиях получила название лазерно-плазменной обработки. Она отличается от химико-термической наличием вблизи поверхности обрабатываемой мишени плазменного сгустка, роль которого в ряде процессов при изменении свойств поверхностного слоя вещества оказывается определяющей.

Обычная схема лазерно-плазменных процессов такова. Обрабатываемое изделие — пластина, стержень или другая геометрическая конфигурация — помещается в камеру, наполняемую газом \* (например, азотом, углекислым газом или другим) при повышенном или высоком давлении. Излучение лазера через окно в стенке камеры вводится в ее объем и с помощью оптической системы, находящейся внутри камеры, фокусируется на поверхности мишени. Мишень может перемещаться внутри камеры с помощью микродвигателей, что допускает многовариантность процесса и возможность обработки серии изделий, помещенных в обоймы кассеты. Возможны варианты лазерно-плазменной обработки и без камеры высокого давления, когда на поверхность изделия подается струя газа, который вблизи поверхности «пробивается» оптическим излучением, например излучением  $\text{CO}_2$ -лазера.

Остановимся подробнее на упомянутом выше явлении оптического пробоя газов, сопровождающегося образованием сгустка плазмы. Чтобы получить с помощью сфокусированного излучения оптического диапазона пробой газа, нужны весьма большие удельные мощности. В частности, для излучения с длиной волны, близкой к 1 мкм (напомним, что длина волны неодимового лазера 1,06 мкм), требуются удельные мощности излучения  $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>, чтобы в воздухе при атмосферном давлении образовался сгусток плазмы (или лазерная искра, как часто называют это явление). Образование лазерной искры сопровождается яркой вспышкой и сильным звуком, что объясняется образованием в воздухе ударной волны и ее распространением от места пробоя.

Впервые об этом явлении доложили американские физики Мейеранд и Хот еще в 1962 г. Указанное явление стало предметом исследований ученых в лабораториях различных стран. За короткий срок были поняты основные причины образования лазерной искры с температурой  $10^5$  градусов и выше, выявлены основные характеристики плазмы и режимы распространения плазменного сгустка. Дело в том, что образовавшееся плазменное облако не стоит на месте, а распространяется по лазерному лучу. Лазерный луч как бы сгорает, т. е. его протяженность от выходного окна лазера до плазменного сгустка непрерывно уменьшается со временем. Скорость распространения плазменного сгустка может изменяться в широких пределах — от сотен до сотен тысяч сантиметров в секунду и выше в зависимости от удельной мощности излучения и ряда других факторов. Было обнаружено, что рост давления газа снижает пороговое значение удельной мощности, при которой начинается его пробой и образование плазменного сгустка.

Механизм развития лазерной искры объясняется следующим образом. При фокусировке лазерного излучения в некоторый объем газа под действием электрического поля световой волны возможна фотоионизация — вырыв электрона из атома и его последующее ускорение в поле электромагнитной волны до энергий, достаточных для ионизации другого атома в результате столкновения. Этот процесс тем вероятнее, чем выше плотность потока излучения, так как для фотоионизации электрон атома должен последовательно приобре-

сти энергию от нескольких квантов лазерного излучения.

Помимо фотоионизации существуют и другие механизмы образования свободных электронов в объеме фокусировки излучения. Процесс образования электронов, их ускорение в поле световой волны и дальнейшая ионизация атомов носят, как говорят, лавинный характер. Лавина электронов, если выполнены определенные условия, нарастает очень быстро, их число увеличивается настолько, что начинает формироваться плазменный сгусток (одновременно с электронами образуются ионы), который на своем переднем фронте, обращенном к лучу лазера, интенсивно поглощает энергию лазерного излучения. Испуская вперед себя коротковолновое излучение, а также «горячие» электроны, плазма распространяется по лазерному лучу. Чтобы поддержать плазму, не дать ей, как говорят физики, распасться, необходимо непрерывно вводить в нее энергию.

Оказывается, что для поддержания плазменного сгустка нужна заметно меньшая удельная мощность, чем для его развития. В крайнем случае, когда плазменный сгусток стоит на месте, необходимо только компенсировать энергетические потери на электромагнитное излучение и теплопроводность в окружающий газ из плазмы.

Если поместить на пути лазерного луча твердую мишень, даже почти прозрачную для излучения данной длины волны, то это существенно понизит порог по плотности потока излучения для оптического пробоя газа вблизи твердой мишени.

Для каждой длины волны излучения порог пробоя газа различен. Так, при увеличении длины волны от 1 мкм до 10 мкм порог пробоя по плотности потока излучения падает в 100 раз ( $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> для излучения с длиной волны 1,06 мкм до  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> для излучения лазера с длиной волны 10,6 мкм). Увеличение давления газа, как говорилось ранее, также понижает порог пробоя.

Если скомбинировать эти два фактора — поставить на пути излучения в фокусе линзы мишень и повысить давление газа, можно получить плазменный сгусток вблизи мишени и контролировать его поведение с помощью потока энергии, вводимого в плазму.

Поверхность мишени при лазерно-плазменной обра-

ботке обычно только плавится на глубину в несколько десятков микрон, а процессы испарения при давлениях окружающего газа выше 30—40 ат выражены слабо.

Совместное действие лазерного излучения и плазменного сгустка из частиц окружающего мишень газа приводит к направленному изменению поверхностных свойств вещества мишени. Меняется газонасыщение поверхностного слоя вещества, например, при лазерно-плазменной обработке в атмосфере азота стальной пластины. Причем изменение микротвердости, в зависимости от давления азота, коррелируется с изменением газосодержания.

Интересно проследить за ролью давления окружающего обрабатываемую деталь газа при лазерно-плазменной обработке. Рассмотрим это на примере лазерно-плазменной обработки: пластины из молибдена толщиной 2 мм в атмосфере азота. Если давление газа в камере не превышает 10—20 ат, то в мишени за время продолжительности импульса 1 мс при удельной мощности  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> образуется сквозное отверстие. При тех же условиях и давлении — 100 ат поверхность мишени даже не плавится, а только обожжена. Таким образом, контролируемое изменение давления и газа дает в руки технологов дополнительный параметр, изменяя который можно изменять характер воздействия лазерного излучения на вещество.

Следует подчеркнуть, что наличие газовой атмосферы приводит к качественно новым результатам. Так, с помощью лазерно-плазменной обработки можно производить локальное упрочнение участков на поверхности материалов, в том числе таких, которые не упрочняются обычной лазерной (или иной) термообработкой на воздухе.

Подбор вещества мишени, газа и давления его позволяет синтезировать соединения, например, такие, как нитриды металлов, карбиды и другие вещества, восстанавливать окислы тугоплавких металлов (в атмосфере водорода или метана) или создавать в локальной зоне контролируемые слои окислов.

**ЛАЗЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ.** Производство металлов с различными физическими свойствами и различного назначения — одна из фундаментальных задач со-

временной промышленности. Потенциальные возможности (а в настоящее время пока только о них и можно говорить) применения лазеров в металлургии связаны с высокой мощностью непрерывного излучения, локальностью воздействия и определенной универсальностью их как тепловых источников. Хотя лазерной металлургии практически еще не существует, ее перспективность для применения лазеров большой мощности позволяет вставить этот краткий раздел в текст настоящей работы.

Сначала остановимся на некоторых смежных процессах. В промышленном производстве все шире используется специальная электрометаллургия, цель которой — улучшение свойств уже готовых слитков металла, например, электрошлаковый, плазменный, вакуумно-дуговой и электронно-лучевой переплавы. Каждый из указанных методов имеет свои преимущества и определенные недостатки, что позволяет этим методам «сосуществовать», не конкурируя в своих областях применения. К спецэлектрометаллургии относится восстановление в потоках плазмы окислов тугоплавких металлов (окислы вольфрама и молибдена). В техническом отношении этот класс электротермических процессов отличается высоким уровнем энергозатрат в малый объем пространства при мощностях 100 кВт и выше.

На данном этапе развития лазерной техники и технологии задачи лазерной металлургии должны быть близки к аналогичным задачам спецэлектрометаллургии, в частности плазменной металлургии, с учетом особенностей воздействия лазерного излучения на вещества. Хотя мощности непрерывного излучения технологических лазеров (10—100 кВт) меньше мощностей, достигаемых в струйных плазмотронах ( $>1$  МВт), а КПД  $\text{CO}_2$ -лазеров (15—20%) заметно ниже КПД генераторов низкотемпературной плазмы (50—60%), потенциальные возможности лазеров позволяют надеяться на достижение высоких температур и давлений. Кроме того, мощность излучения лазеров может передаваться обрабатываемому материалу как непосредственно при поглощении фотонов, так и через облако образованной плазмы.

Эффективность использования лазеров в металлургии связана, по сути дела, с теми же процессами, с которых начинались первые опыты по применению гене-

раторов низкотемпературной плазмы: получение тугоплавких металлов при восстановлении окислов, синтез порошков и композиционных материалов.

Классическим, если можно так выразиться, возможным применением мощных непрерывных лазеров в металлургии может оказаться использование их как высоколокальных источников нагрева. Приведем некоторые примеры возможного применения.

Аналогично плазменным процессам или процессам при использовании сфокусированного солнечного излучения возможен переплав тугоплавких металлов или высокотемпературных керамик — рафинирование материалов и улучшение их эксплуатационных свойств. Преимуществами переплава с использованием излучения лазера могут быть высокие температуры при относительно небольшой мощности, гибкость в управлении плотностью потока, что в меньшей степени доступно другим методам нагрева, исключая электронный луч, а также возможность проведения процесса в широком интервале давлений окружающей среды. Правда, при высоких давлениях следует считаться с возможностью экранирования зоны воздействия образующимся плазменным облаком. Тогда обработка станет лазерно-плазменной.

Лазерное излучение как источник локального нагрева может использоваться для создания и поддержания ванны при выращивании из расплава полупроводниковых материалов. В этом случае возможны различные технические схемы решения.

В технологии полупроводниковых материалов широко используется зонная очистка, или зонная перекристаллизация, с помощью перемещения расплавленной зоны по длине слитка. Лазерное излучение может быть использовано для создания расплавленной зоны. Ряд работ в этом направлении уже выполнен. Преимуществом перед индукционным нагревом, обычно используемым для создания зоны расплава, является более узкая тепловая зона, а перед электронно-лучевым нагревом — более дешевое оборудование, а также возможность использования газовой атмосферы в процессе, что может быть важным, если необходимо сохранить в веществе легколетучие примеси. Отметим, что электронно-лучевое плавление производится в вакууме  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  мм рт. ст. Сtimальность процесса и его экономическая целесо-

образность обуславливаются в существенной степени оптическими характеристиками веществ. В литературе, в частности, описана установка для выращивания кристаллов ниобата бария и стронция, в которой для создания зоны нагрева используется лазер на  $\text{CO}_2$ .

Другой пример возможного использования  $\text{CO}_2$ -лазера как мощного источника нагрева — задача повышения износостойкости валков прокатных станов. Хотя в принципиальном отношении эта задача не отличается от рассмотренных выше задач термоупрочнения, ее масштабность (требуется уровни мощности в десятки и сотни киловатт) заставляет отнести ее к металлургическим.

Перспективными процессами, которые практически не рассматривались в технической литературе, могут быть восстановительные процессы, инициируемые в лазерной плазме. В определенной зоне реактора движущегося газа (например, газа восстановителя) образуется оптический пробой, создается плазменное облако, которое поддерживается непрерывным лазерным излучением; в него вводится дисперсная фаза вещества, которое обрабатывается в лазерной плазме. Такая схема близка к струйно-плазменным процессам и сейчас используется в плазменных технологиях для восстановления окислов и синтез веществ в низкотемпературной дуговой или ВЧ-плазме. Лазерная плазма может иметь более высокую температуру, как мы уже отмечали, что в ряде случаев термодинамически выгоднее. Кроме того, процесс можно проводить при более высоких давлениях, управление им более гибко.

Для масштабных металлургических процессов важно использовать тепло отходящих от ядерных реакторов газов. В ряде развитых в промышленном отношении стран создается металлургия на новой энергетической основе — с использованием тепла от ядерных реакторов. Температура газов, отходящих от реакторов, в настоящее время еще низка (не превышает  $300\text{—}400^\circ\text{C}$ ) для использования в металлургическом производстве, где требуются, например, для восстановления, температуры в  $1200\text{—}1400^\circ\text{C}$ . Можно предположить, что задача догрева газов может решаться при больших масштабах процессов с помощью мощной плазмотронной техники при уровнях мощности в десятки мегаватт. В принципе та же задача может решаться с помощью

излучения мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров, если организовать оптический пробой газа и через зону пробоя пропускать поток нагретого в реакторе газа для повышения его температуры. Сейчас такая задача носит, скорее, академический характер.

Можно искать решение задачи и на пути использования резонансных эффектов. Остановимся на этой идее более подробно. Непрерывное излучение лазеров может быть использовано для инициирования поверхностных химических и термохимических реакций. В зависимости от интенсивности излучения, состояния среды, длины волны излучения причины химических превращений могут быть различными. В частности, возможны фотохимический или тепловой механизм реакции, которые могут сменять друг друга.

Известно, что на иницирование химической реакции должна затрачиваться энергия не только поступательного движения, т. е. движения молекул как целого, но и колебательная, и вращательная. В химических превращениях основную роль играет колебательная энергия молекул. Поэтому принципиальным, совершенно новым подходом к проблеме химических превращений является возможность влияния не на молекулу в целом, а на ее отдельные связи. Иницированные лазерным излучением молекулы с температурой в несколько тысяч градусов могут вступать в направленные химические реакции.

Использование избирательности лазерного излучения базируется на двух моментах: на селективном возбуждении некоторых энергетических состояний, на избирательном возбуждении смеси веществ, заставляющем реагировать только то из них, которое поглощает излучение лазера. Лазеры открыли новую возможность, связанную с возбуждением колебательных уровней, поскольку другие источники света не дают необходимой спектральной плотности излучения в инфракрасном диапазоне. Высокая монохроматичность излучения позволяет избирательно воздействовать на один из уровней. В лазерно-химических реакциях, кроме их направленности, наблюдается, как говорят, резкий отрыв колебательной температуры от поступательной.

При резонансном поглощении излучения на колебательных переходах газы могут быть нагреты до температуры  $1000^\circ\text{C}$  за доли секунды уже при удельной мощ-

ности  $10^2$  Вт/см<sup>2</sup>. Отличие резонансного нагрева от обычного, когда возбуждаются поступательные степени свободы, связано с тем, что энергия подводится по единственному каналу возбуждаемых лазерным излучением колебаний, а затем переносится на другие степени свободы. Этот аспект резонансного поглощения может представлять интерес для металлургических процессов.

Металлургические процессы с участием газообразных сред разделяются на три группы: реакции в газовой фазе; окислительно-восстановительные реакции с участием газов и конденсированных сред; процессы синтеза, сопровождающиеся образованием новых фаз.

К первой группе можно отнести процессы переработки сернистых газов, процессы конверсии природного, генераторного и водяного газов и т. д. Для их инициирования необходим определенный уровень температуры и наличие гетерогенных катализаторов. Окислительно-восстановительные реакции (вторая группа) протекают при каталитическом влиянии поверхности исходной конденсированной среды и продуктов реакции. В реакциях синтеза (третья группа) каталитический эффект реагентов выражен слабее.

В металлургии черных и цветных металлов используется относительно небольшое число газов: кислород, водород, СО, хлор, азот, СО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О, СН<sub>4</sub>, аммиак. Активация металлургических процессов с их участием определяется возможностью резонансного возбуждения указанных молекул, частоты колебания которых лежат в инфракрасном диапазоне (соответствующие длины волн 2—20 мкм).

Однако следует сказать, что идея синтеза химических соединений путем селективного возбуждения отдельных связей в молекулах при воздействии мощных источников монохроматического излучения в инфракрасной области еще далека от претворения в жизнь.

Лазерное излучение может быть использовано для получения особо чистых материалов при разложении карбониллов и металлоорганических соединений. Техническое осуществление этих процессов может идти по различным схемам.

Для широкого применения лазеров в металлургии требуются технологические установки с выходной мощностью до тысячи киловатт, а также лазеры с высокой

мощностью и возможностью перестройки по длинам волн в диапазоне 2—20 мкм.

Представленные соображения рисуют схемы, по которым может идти развитие применений мощного монокроматического излучения в металлургии. Действительность, как это часто бывает, корректирует предлагаемые решения и методы в зависимости от общего направления технической и технологической политики и большого числа других факторов. Тем не менее на возможность использования лазеров в этой области авторы настоящей брошюры смотрят оптимистически.

**ЛАЗЕРНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.** Технологические процессы — одна из самых крупных областей внедрения лазерной техники, а по достигнутым результатам — наиболее результативная. На ряде предприятий страны разработаны технологические установки более 50 типов, причем серийно выпущено более 20 типов.

Лазерные технологические установки могут быть классифицированы по ряду признаков. Наиболее важными для технологии являются уровень мощности, характер генерации (импульсный, импульсно-периодический или непрерывный).

В настоящее время существует тенденция разработки специализированных технологических лазерных установок, в большей части автоматизированных и предназначенных для решения конкретных задач. Несмотря на специализацию отдельных типов установок, они имеют общую типовую схему.

В состав типичной лазерной установки, например для размерной обработки, входят: лазерная головка, система охлаждения, источник питания, устройство для дозирования излучения, оптическая система для фокусировки и наблюдения, рабочий стол, датчик параметров излучения, датчик параметров технологического процесса, программирующее устройство.

В лазерную головку установки входят: активный элемент, система накачки, резонатор. Активный элемент представляет собой стержни (чаще всего цилиндрические) из рубина, стекла с примесью редкоземельного элемента неодима, алюмоиттриевого граната с неодимом, вольфрамата кальция и других веществ. В импульсных лазерных установках чаще всего используют

ся стержни из стекла с неодимом, в импульсно-периодических — алюмоиттриевый гранат.

Система накачки (также называемая осветительной системой) состоит из импульсных ламп накачки и отражателя, позволяющего более эффективно использовать излучение ламп накачки, спектральный диапазон которых перекрывает длину волны монохроматического излучения.

Резонатор, входящий в состав лазерной головки, представляет собой два плоскопараллельных зеркала с коэффициентами отражения, близкими к 100% («глухое» зеркало) и 30% («выходное» зеркало). Наряду с плоскопараллельными зеркалами используют резонаторы со сферическими зеркалами, поставленными в конфокальное положение, при котором оба зеркала имеют общий фокус. Плоскопараллельные зеркала должны быть перпендикулярны оси активного элемента (процесс установки их в это положение с помощью специальных микрометрических винтов называется юстировкой), чтобы генерация излучения была вообще возможной. От юстировки зеркал лазеров зависит мощность излучения и ее пространственно-временные характеристики.

Головка лазеров охлаждается либо сжатым воздухом (для маломощных лазеров), либо дистиллированной водой — при больших мощностях и частотах следования импульсов.

Источником питания лазера служит батарея конденсаторов, заряжаемая от высоковольтного выпрямителя. В промышленных установках получили распространение унифицированные блоки питания. В блок питания входит блок поджига, который необходим для первоначальной ионизации разрядного промежутка ламп накачки. При последовательном поджиге высоковольтный импульс подается на один из электродов импульсной лампы, а в случае параллельного поджига высоковольтный импульс подается на корпус осветителя.

Устройство для дозировки излучения состоит из диафрагмы и набора светофильтров различной плотности.

В состав оптической системы для фокусировки и наблюдения входят устройства для формирования светового пучка с высокой плотностью потока на поверхности изделия, а также для наводки и наблюдения. В устройство формирования светового луча входят диа-

фрагма, телескопическая система и фокусирующие объективы.

Для крепления и перемещения обрабатываемой детали используется рабочий стол. Датчики параметров излучения позволяют контролировать их. Специальное программное устройство служит для контроля и управления процессом.

Основные технические характеристики промышленных технологических лазерных установок представлены в табл. 2.

Таблица 2

Марка установки	Назначение	Активный элемент	Параметры излучения			
			мкм	мс	Дж	Гц
Кристалл-6	Получение отверстий	Стекло с неодимом	1,06	0,2	4,0	20
Кристалл-7	—»—	—»—	1,06	0,2	5,0	5
Кристалл-8	—»—	—»—	1,06	0,2	0,3	20
ЛП-2	—»—	—»—	1,06	1,0	10	0,004
Корунд	—»—	—»—	1,06	0,07	0,5	4—10
УЛ-20М	Сварка	Рубин	0,694	1—7	30	0,2
Квант-ЭМ	Получение отверстий	Стекло с неодимом	1,06	0,75	8,0	2,0
Квант-10	Сварка	—»—	1,06	6,0	30	1,0
Квант-12	—»—	АИГ	1,06	4,0	5	20
СЛС-10-1	—»—	Стекло с неодимом	1,06	2—4	10	0,5

Отечественными разработками внесен большой вклад в создание принципов конструирования лазерного технологического оборудования.

Увеличению долговечности лазеров способствовал выбор конструкций, при которых импульсные лампы накачки работают с нагрузками, значительно меньшими паспортных. Для повышения стабильности параметров было предложено использовать резонаторы со сферическими зеркалами, зеркала с управляемой кривизной, схемы стабилизации параметров излучения по питанию. В нашей стране предложен и разработан ряд оптических систем, применяемых в технологических лазерных установках. На основе новых технических решений организован серийный выпуск источников питания со специальными характеристиками для лазерных техно-

логических установок. Разработаны и реализованы в промышленных процессах принципы автоматического управления всеми параметрами накачки, что позволяет стабилизировать параметр каждого импульса излучения с заданной точностью: аналогов за рубежом нет.

**Перспективы.** Лазерная технология и лазерная металлургия представляют быстро развивающиеся области науки и практики. У лазерной техники и технологии все еще впереди. Эта уверенность подкрепляется ломкой устоявшихся традиций в большом числе отраслей, где внедрение даже простейшей лазерной технологии позволяет по-новому взглянуть на существующие технологические процессы. Конечно, определенным препятствием на пути более интенсивного внедрения лазерной технологии является недостаточное количество специализированных лазерных установок, определенное недоверие к ее возможностям, отсутствие достаточного числа инженерно-технических работников в этой области.

Наряду с недостаточным числом технологических лазеров и в определенной степени комплектующих и запасных деталей к ним, трудности обусловлены отсутствием достаточного количества и измерительной и контрольной аппаратуры и приборов, особенно для мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров. В существенной степени отмеченное можно считать трудностями роста и будет преодолено по мере развития лазерной техники и технологии.

Кроме уже сложившихся направлений применения лазеров в технологии (термообработка, сварка, резка и т. д.), с появлением лазеров новых типов могут открыться новые возможности как в научных исследованиях взаимодействия лазерного излучения с веществом, так и в использовании этих уникальных приборов в технологии.

Каких принципиально новых достижений следует ожидать потребителям монохроматического излучения большой мощности?

На наш взгляд, основных возможностей в обозримом будущем три: увеличение уровня мощности непрерывного излучения;

перестройка излучения по частоте; создание мощных лазеров в диапазоне длин волн менее 0,1 мкм.

Кратко остановимся на тех возможностях, которые открываются для технологических процессов при реализации указанных достижений.

Лазеры большой мощности (условно те, чья мощность в режиме непрерывной генерации излучения заметно превышает  $10^2$  кВт) в технологических процессах использовались пока в ограниченном числе случаев. По-видимому, не существует масштабного фактора, при котором рост мощности излучения приводит только к количественным изменениям в параметрах процессов, а следует ожидать качественных изменений. Массовое появление мощных лазеров (с приемлемой стоимостью и приличным КПД) может оказать революционизирующее воздействие на ряд процессов, поскольку позволит резко интенсифицировать сварку металлов большой толщины, повысить скорость резки до недостижимых для других методов величин, «ввести» лазеры в масштабную металлургию и, возможно, горное дело.

Перестройка мощных лазеров по частоте весьма заманчива для резонансных воздействий, процессов разделения изотопов, на которых мы не останавливались, получении новых, а также особо чистых веществ.

Наконец, мощные коротковолновые лазеры позволяют создать в веществах, на которые воздействует излучение, объемные источники тепла, что может быть существенным для обработки пленок, создания в объеме веществ изменений, которые пока недоступны лазерам с большими длинами волн.

Трудно предсказать, какие новые заманчивые перспективы открываются с применением этих новых приборов в технологических процессах. Ясно, что необходимы научные исследования процессов взаимодействия излучения различного спектрального состава с веществом, отыскание наиболее перспективных областей их применения, внедрение в промышленность и оптимальное управление ими. Такова логика развития этой сравнительно молодой области, прошедшей за короткий срок большой путь от «чистого» научного исследования до создания новых отраслей в промышленности.

---

---

---

# ЖИВУЩИМ ЗНАТЬ БОЛЬШЕ...

Басов Н. Г. Физика и технический прогресс. — Вестник АН СССР, 1970, № 4, с. 62.

Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. Перевод с английского под ред. С. И. Анисимова. М., Мир, 1974.

Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. Лазерная обработка материалов. М., Машиностроение, 1975.

Кристалл М. А., Жуков А. А., Кокора А. Н. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера. М., Металлургия, 1973.

Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. М., Наука, 1974.

Углов А. А. Лазеры в технологии неорганических материалов и металлургии (обзор). — Квантовая электроника, 1974, т. 1, № 5.

Углов А. А. Высококонцентрированные источники тепла в обработке неорганических материалов. — Физика и химия обработки материалов, 1976, № 3, с. 3.

Углов А. А., Кокора А. Н. Теплофизические и гидродинамические явления при обработке материалов лучом лазера (обзор). — Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 6.

Промышленным применением лазеров посвящены книги, вышедшие в последние годы:

Крылов К. И. и др. Применение лазеров в машиностроении и приборострое-

нии. Л., Машиностроение, 1978.

Рэди Дж. Промышленное применение лазеров. М., Мир, 1981.

Лазеры в технологии. Под ред. М. Ф. Стельмаха. М., Энергия, 1975.

Кроме того, интерес представляют:

Рыкалин Н. Н. и др. Лазерная обработка материалов. М., Машиностроение, 1975.

Водоватов Ф. Ф. и др. Лазеры в технологии. Под ред. М. Ф. Стельмаха. М., Энергия, 1975.

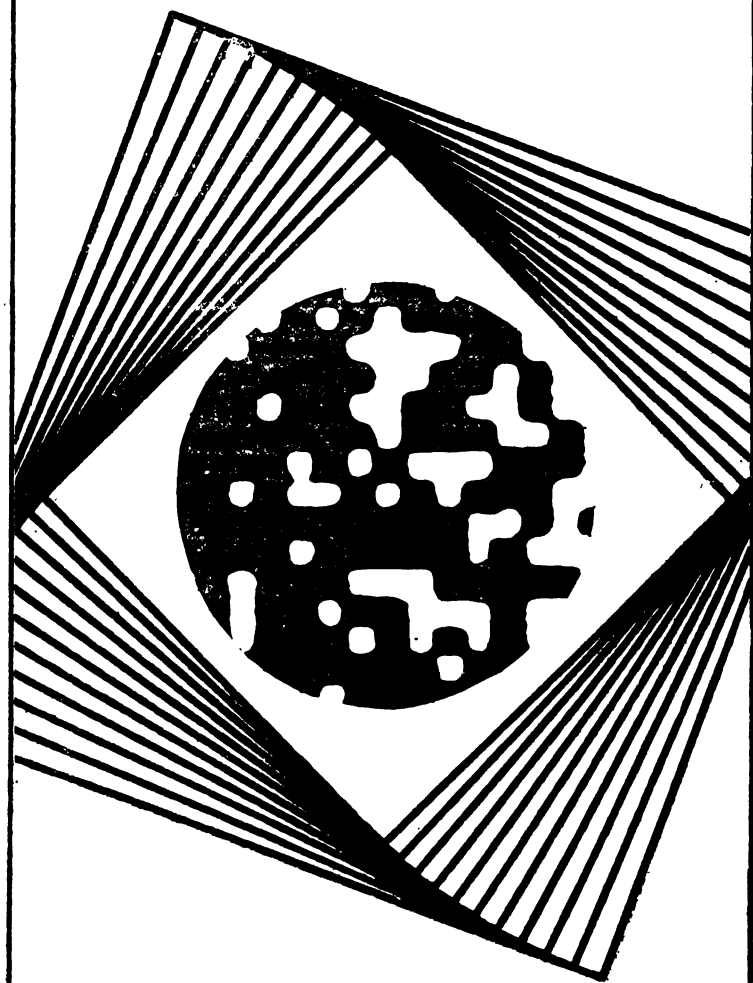
Авсиевич Е. А. Лазеры в промышленной технологии. М., Знание, 1978.

Зенькович В. А. и др. Современные методы и оборудование для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы. Зарубежная электронная техника. ЦНИИЭлектроника, 1978, № 11, 3.

Рыкалин Н. Н., Углов А. А. Лазерно-плазменная обработка металлов при высоких давлениях газов. — Квантовая электроника, 1981, № 6.

Лазерная технология в приборостроении и точном машиностроении. Труды ВНИИТИ-прибора Московского НПО «Темп» и постоянно действующего семинара «Современная технология производства приборов, средств автоматизации и систем управления», вып. 3, Машиностроение, 1980.

# РЕДАКЦИОННЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ



Внедрение лазерной технологии потребовало изучить возможные влияния лазерного излучения на здоровье человека. В ЦНИИ охраны труда ВЦСПС (ВЦНИИОТ) составили охранный документ — **СТАНДАРТ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ЛАЗЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**. В нем указаны нормы и правила использования оптических генераторов, конкретные меры по предотвращению возможных поражений на коже или сетчатке глаза. «Заодно» в институте созданы контрольные приборы, в частности, дозиметр лазерного излучения, ведется поиск «противоядия» от действия вредного для человека отраженного облучения и т. д.

«Техника и наука», 1982, № 2.

**ГАЗОВЫЙ ЛАЗЕР** при плотности потока  $10^6$ — $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> **РЕЖЕТ МЯГКУЮ СТАЛЬ** толщиной до 10 мм, **ЛЕГИРОВАННУЮ И НЕРЖАВЕЮЩУЮ** — до 6 мм со скоростью 4—12 мм/с. Ширина разреза не превышает 0,5—0,6 мм. Легко поддается лазерному «ножу» и извечно неудобное для резки стекло (листовое, цилиндры, трубы). Установка «Кристалл», действующая на Сходненском стекольном заводе, дает экономический эффект, превышающий 100 тыс. руб. в год.

«Техника и наука», 1982, № 3.

Томский филиал института оптики атмосферы СО АН СССР сообщает, что **ЗОНДИРОВАНИЕМ НЕБОСВОДА ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРА** можно прямо с Земли контролировать его загрязненность, а также судить о распределении влажности по всей толще тропосферы и нижней стратосферы. В настоящее время эти измерения делают с помощью специальных метеорологических зондов, выполняющих их, кстати, менее точно.

«Техника и наука», 1981, № 12.

**ЛАЗЕР ПРИМЕНИМ** и при... **ПОДЗЕМНОМ ЗОНДИРОВАНИИ** для поиска полезных ископаемых. Правда, служит он в этом случае дешифровщиком. Первичная карта составляется так. Под землю направляют колебания от источника упругих волн, и каждый из слоев, «подозреваемых» на наличие газа, нефти или минерального сырья, откликается по-своему. После записи сейсмограммы чувствительными приемниками ее уменьшают и закладывают в оптическую вычислительную машину. Лазерный луч микрошагами «обходит» кривые и передает сведения об интерференции и дифракции прошедшего света в ЭВМ для анализа. По расчетам авторов — инженеров НПО «Нефтегеофизика» Министерства геологии СССР, передвижной оптико-механический комплекс выдает необходимые данные в 20 раз быстрее и в 40 раз дешевле существующих методов. От первой внедренной системы получен экономический эффект 120 тыс. руб.

«Техника и наука», 1981, № 9.

**ПЕРЕДВИЖНОЙ ЛАЗЕР** также используют **ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ УТЕЧЕК ГАЗА В ПОВРЕЖДЕННЫХ ТРУБОПРОВОДАХ**. Он смонтирован в кузове

автомобиля. Через выдвижной шуп пробы воздуха из околomagистральной зоны направляют в лазерную камеру для анализа. Малейшая примесь постороннего газа — метана — поглощает часть излучения лазера, о чем мгновенно сигнализируют приборы. Установка создана в киевском НПО «Аналитприбор».

«Сельская жизнь», 23.09.1982 г.

Есть и **«ЛЕТАЮЩИЙ» ЛАЗЕР**. Сотрудники НИИ лесного хозяйства применили его **ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕСНЫХ ЗАПАСОВ**, особенно в таежных районах. Луч оптического генератора, установленного в самолете, направляют вниз подобно эхолоту, используемому при обследовании морского дна. Время прохождения луча в обе стороны фиксируют на магнитной ленте. После ее обработки на ЭВМ получают карту высоты лесных массивов и их плотности.

«Московские новости», 28.06.1981 г.

От 10 до 1000 крат увеличивает **ЛАЗЕРНЫЙ ПРОЕКЦИОННЫЙ МИКРОСКОП ЛПМ-1000**, питаемый от сети. Микрообъекты высвечиваются на жидкокристаллическом экране размером  $20 \times 25$  см. Лазерный луч усиливается на парах меди. Особенностью микроскопа является то, что он выполняет, кроме демонстрационных, еще и рабочие функции: обрабатывает фотошаблоны, воздействует на биологические образцы (процессы контролируются и управляются по изображению на экране). ЛПМ-1000 отличается также высокой яркостью изображения, общим снижением — на 2—4 порядка (1) — общей освещенности объекта по сравнению с классическими аналогами. Еще одна новинка — манипулятор для подведения образцов с полями перемещения  $100 \times 100$  мм (грубо),  $10 \times 10$  мм (точно) и  $1 \times 1$  мм (очень точно). Прибор демонстрируется на ВДНХ СССР.

Материалы ВДНХ СССР

Для монтажа и контроля судовых силовых установок, коррекции упругой линии судна, разметки и ряда других работ можно использовать **ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ «АМУР-ЗМВ»**. Прежде для подобных целей применялась также лазерная установка УЦ-1, однако более громоздкая и трудоемкая в эксплуатации. Упрощение достигнуто изменением структуры лазерного луча. «Широкий» поток не требует перефокусировки при смене объекта и настройки. Масса комплекта всего 6 кг. Годовая эффективность от внедрения 25,9 тыс. руб. Система установлена на ВДНХ СССР.

Материалы ВДНХ СССР

**ПРИБОР ЛАЗЕРОПУНКТУРЫ РИТМ-6А**, демонстрирующийся на ВДНХ СССР, ведет поиск биологически активных точек по биопотенциалу. Кроме пассивного «наблюдения», **РИТМ** воздействует на обнаруженные точки когерентным излучением.

Материалы ВДНХ СССР

# МИР ИНЖЕНЕРНОГО ПРОГНОЗА

Лазерная технология бурно развивается. Это обусловлено рядом факторов. Основными можно считать следующие:

совершенствование существующих технологических лазерных установок, связанное с повышением ресурса их работы; повышение качества излучения (под этим понимается воспроизводимость его энергетических параметров и пространственно-временной структуры излучения); появление приспособлений для закрепления и перемещения деталей; улучшение условий наблюдения за процессом и контроля его энергетических и других параметров; введение добавочных устройств, позволяющих оптимизировать процесс обработки по ряду параметров, существенных для качества обрабатываемого изделия;

освоение новых диапазонов длин волн излучения и повышение эффективности преобразования электрической энергии в энергию монохроматического излучения;

разработка новых технологических процессов, базирующихся на использовании серийно выпускаемого лазерного технологического оборудования, применительно к новым объектам или новому классу материалов, таких, например, как композиционные материалы;

выявление новых областей применения лазерной технологии.

Отсюда ясны задачи дальнейших разработок в области лазерной техники и техноло-

гии. Они должны быть ориентированы на:

разработку мощных лазеров с перестраиваемой в процессе работы длиной волны излучения;

уменьшение габаритов технологического оборудования при неизменных энергетических параметрах и использование техники транспортирования излучения к месту воздействия;

создание коротковолновых лазеров высокой мощности.

Поставим вопрос, зачем увеличивать мощность лазеров в непрерывном режиме? В первую очередь это связано с ростом производительности таких технологических процессов, как шовная сварка металлов большой толщины и скоростная термообработка изделий. Это, если так можно выразиться, области ближнего прицела, в которых лазерная технология в определенной степени уже апробирована. Есть области промышленности и более дальнего прицела, например металлургия. Пока стоимость лазеров еще велика. Здесь уже можно с помощью излучения получать чистые и сверхчистые вещества, выращивать монокристаллы полупроводников и тугоплавких материалов. Но а со временем — перейти к масштабному производству металлов.

Перестраиваемая длина волн излучения для мощных лазеров (1 кВт и выше) нужна не только для инициирования селективно возбуждаемых химических реакций, используя

которые можно разделять изотопы веществ, в первую очередь изотопы соединений урана, получать новые химические соединения и сверхчистые материалы. Речь может идти и о простом повышении КПД использования излучения, за счет увеличения поглощения на определенной длине волны.

Уменьшение габаритов оборудования и его массы связано с более эффективным его использованием в заводских и полевых условиях (при сварке трубопроводов большого диаметра, элементов конструкций и т. д.), в цехах и исследовательских лабораториях. Компактность лазерных устройств, использование гибких световодов для транспортирования лазерного излучения к месту выполнения технологической операции позволит превратить лазер в «ручной» инструмент постоянного использования.

Коротковолновые лазеры большой мощности позволяют существенно повысить КПД преобразования энергии излучения лазеров в тепловую или другие виды энергии; их можно использовать вследствие повышения глубины проникновения излучения и для обработки многослойных систем, к числу которых относятся электронные схемы с высокой степенью интеграции и плотности элементов, приходящихся на единицу объема.

Выскажем некоторые соображения о ряде перспективных применений лазеров, часть которых может быть реализована в ближайшие годы, а часть представляется проектом далекого будущего.

Увеличение мощности лазера может привести к их использованию в горнодобывающей промышленности, в частности, при добыче мрамора и других минералов, при буре-

нии и прокладке штолен. Сейчас лазерное излучение используется в этих отраслях промышленности только в качестве «световой указки», позволяющей повысить точность совмещения встречно прокладываемых тоннелей.

Интересные результаты могут выявиться при совмещении действия лазеров с другими источниками энергии, например, плазменными генераторами, скажем, при догреве отходящих газов ядерных реакторов до температур, потребных в металлургии.

Важной задачей будущей технологии может быть транспортировка энергии лазерного луча из космоса, где лазерное излучение может генерироваться при использовании солнечной энергии в качестве энергии накачки. Транспортируя лазерное излучение к Земле, его будут «разводить» к конкретным предприятиям, используя световоды большого сечения, и разделяя далее энергию луча на лучи меньшей мощности для конкретных рабочих участков. На пути такого проекта множество технических трудностей, однако перспектива получения «даровой» энергии солнца не кажется слишком фантастической.

В круг будущих применений лазерной технологии следует включить и селективное воздействие на сложные органические молекулы в рамках задач генной инженерии. Нельзя также не отметить возможности лазерной химии в деле получения сверхчистых веществ со сложным составом. Эта технология, к сожалению, пока не вышла из стен исследовательских лабораторий, поскольку стоимость продуктов, получаемых с помощью лазерной химии, в настоящее время слишком дорога.

# МОЗАИКА для лектора

Физические принципы работы лазеров выявлены Альбертом Эйнштейном в статье, посвященной вопросам излучения и поглощения света, в которой он ввел понятие о вынужденном излучении. Статья была опубликована в 1917 г. и существенно опередила время создания первого лазера (1960 г.).

Основополагающие работы, приведшие к созданию оптических квантовых генераторов, были выполнены советскими физиками, лауреатами Ленинской премии академиками Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым, а также американским физиком Ч. Таунсом. За эти работы они были удостоены Нобелевской премии.

Использование лазерных методов генерации монохроматического света привело в настоящее время к получению лазерных лучей с различными длинами волн: от 0,1 мкм до 70 мкм, что существенно перекрывает диапазон видимого света (0,3—0,7 мкм).

Лазеры позволили получить мощность, рекордную по сравнению с любыми другими источниками энергии. Так, гигантские импульсы продолжительностью в 2 нс ( $2 \cdot 10^{-9}$  с) при энергии 20 Дж несут мощность  $9 \cdot 10^9$  Вт, что превосходит мощность самых больших электростанций в мире. С помощью специальных методов мощность лазерного импульса может быть доведена до  $10^{13}$  Вт.

Минимальный размер пятна фокусировки монохроматического излучения лазеров тем меньше, чем короче длина волны света и меньше фокусное расстояние линзы, концентрирующей излучение на поверхность тела. Для лазеров с длиной волны излучения 1,06 мкм (лазер на стекле с неодимом) предельные значения пятен фокусировки составляют единицы микрометров.

В качестве активной среды, в которой усиливается монохроматическое излучение, может быть использовано твердое вещество, смеси газов, жидкости, плазма. Наибольшая импульсная мощность излучения достигнута на твердотельных лазерах, использующих в качестве активной среды стекло, легированное неодимом.

Лазерные установки генерируют в основном излучение фиксированной длины волны. Принципиально можно создать лазерные генераторы с перестраиваемой длиной волны (такие установки, пока с невысокой выходной мощностью, реализованы на красителях в качестве активной среды). Они представляются перспективными в химической технологии и для проведения ряда процессов обработки материалов.

Лазерное излучение характеризуется высокой монохроматичностью, т. е. большой степенью близости к идеальному гармоническому колебанию, характеризующемуся одной длиной волны. Немонохроматическое колебание можно представить в виде конечной или бесконечной суммы монохроматических колебаний. Монохроматичность лазерного излучения способствует снижению хроматических aberrаций при фокусировке излучения.

Эффективность преобразования электрической энергии в энергию монохроматического излучения (КПД) составляет менее 1% для лазеров на рубине, 2% для лазеров на стекле, легированном неодимом, 15—20% для  $\text{CO}_2$ -лазеров.

Доля лазерного излучения, которая поглощается поверхностью мишени (часть его отражается от поверхности и безвозвратно теряется), зависит не только от свойств ее вещества, состояния поверхности (полированная, шлифованная и т. д.), длины волны лазерного излучения, но и от свойств окружающей среды (воздух, вакуум и т. д.) и температуры мишени. Поверхностное окисление мишени в большинстве случаев приводит к повышению поглощения излучения.

Металлы существенно лучше поглощают излучение с длиной волны 1,06 мкм, чем с длиной волны 10,6 мкм, типичное для промышленных  $\text{CO}_2$ -лазеров. Излучение  $\text{CO}_2$ -лазеров хорошо поглощается большинством диэлектриков, таких, как стекла, картон, древесина, керамика и т. д. В определенной степени это предопределяет наиболее эффективное применение лазеров данного типа в технологии.

Глубина проникновения тепловой волны, распространяющейся от поверхности вещества, где происходит поглощение излучения, тем больше, чем выше коэффициент температуропроводности — отношение коэффициента теплопроводности к объемной теплоемкости — и чем больше продолжительность импульса излучения. Для импульсных технологических лазеров с длительностью излучения, близкой к  $10^{-3}$  с, глубина проникновения тепла в металл порядка 100 мкм.

Главная энергетическая характеристика импульсного лазерного излучения — плотность потока излучения, по величине которой судят о возможности технической реализации того или иного технологического процесса. Если плотность потока импульсного излучения достигает  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, то большинство процессов сопровождается только нагревом вещества (процессы термообработки). В диапазоне плотностей потока  $10^4$ — $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> основным результатом воздействия на вещество является плавление (процессы сварки).

Для лазеров с непрерывной генерацией характер технологических применений определяется мощностью лазерного излучения. Наиболее перспективен для технологии  $\text{CO}_2$ -лазер с наиболее высоким из мощных лазеров КПД (15—20%).

Как импульсное, так и непрерывное излучение лазера при плотностях потока  $10^5$ — $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> позволяет «получать» в металлах глубинные проплавления. Проплавление называют глубинным (или кинжальным), если отношение глубины проплавления к его диаметру превосходит единицу.

Лазерное воздействие позволяет существенно повысить твердость поверхностных слоев вещества, в первую очередь конструкционных сталей, до величин, практически недоступных большинству других методов поверхностного упрочнения металлов.

(По материалам данной брошюры)

# **ИЗОБРЕТЕНИЯ, ПАТЕНТЫ, ЛИЦЕНЗИИ**

**В США запатентован ЛАЗЕР, ВЫЖИГАЮЩИЙ ...ПЫЛЬ** в промышленных или бытовых условиях. Микропроцессор управляет лучом таким образом, чтобы качество обрабатываемой поверхности не нарушалось и вместе с тем было чисто. Производительность «пылесоса» 200 м<sup>2</sup>/ч.

Техника и наука, 1982, № 5.

Следящую систему — **ЛАЗЕРНЫЙ АЭРОДИСПЕТЧЕР** — разработал румынский изобретатель Лукриан Попеску. Его комплекс применим даже в условиях «нулевой» видимости. Лазерный генератор «засекает» самолет тремя лучами, после чего при помощи ЭВМ выбирается оптимальная траектория приземления. Информация передается на борт самолета, здесь специальное устройство его расшифровывает и автоматически корректирует работу автопилота.

Техника молодежи, 1982, № 4.

Особенно прочно обосновался лазер в современной медицине. Вот несколько разработок. Американская фирма «Коherent» создала **МЕДИЦИНСКОЕ КРЕСЛО, ОБОРУДОВАННОЕ ЛАЗЕРНЫМ СКАЛЬПЕЛЕМ**. Под острым лучом операции проходят бескровно — происходит мгновенная коагуляция крови. Они требуют не только меньше времени, чем обычные, но и с большей точностью фиксируют глубину шва.

Изобретатель и рационализатор, 1979, № 2.

Еще одно медицинское **ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРА — ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ ДОБРОКАЧЕСТВЕННЫХ И ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ ОПУХОЛЕЙ**. Кольцевой луч, который можно фокусировать по форме опухоли, воздействует на больные клетки. Оптическая система, вмонтированная в лазер, подсвечивает операционное поле. Авторы устройства для лазерной терапии — советские изобретатели В. Н. и Л. В. Дудченко и Г. Э. Тимен.

А. с. СССР, БИ, 1982, № 23.

На кафедре специальной геодезии пражского Высшего технического института разработан **ЛАЗЕР ДЛЯ СТРОИТЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА**. С его помощью в подземных тоннелях контролируют точность проходки. При встречном прокладывании магистралей ошибка с таким строгим контролером не превышает 2 см.

Знание — сила, 1982, № 5.

**ЛУЧ ОПТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА**, прошедший через прозрачный кристалл мочевины, **ИМЕЕТ ДЛИНУ ВОЛНЫ** вдвое меньшую первоначальной, т. е. **УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА**. Свойство нелинейной поляризации этих кристаллов расширило возможности лазера, в частности, позволяет его использовать для спектроскопических анализов. Изобретение создано в Корнеллском университете (США).

Техника и наука, 1982, № 2.

В Киевском государственном университете лазер прикрепили к **КРЫШКЕ АКВАРИУМА**. С его помощью ученые изучают люминесцентные возможности водных организмов.

Изобретатель и рационализатор, 1981, № 1.

**ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА** на технологическом комбинате стеклоизделий в г. Леднице (ЧССР) — это реальное **ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА** в производстве его фирменных изделий. После того как изобретатели обучили профессионалов-гранильщиков работе с новым инструментом, не только расширились художественные возможности «ручной» работы, но и перестала выделяться вредная стеклянная пыль.

Техника и наука, 1982, № 5.

**ЛАЗЕРНЫЕ ИМПУЛЬСЫ** могут, кроме того, что резать, жечь, лечить, еще и **СКЛЕИВАТЬ** изделия. Это доказали сотрудники фирмы «Алькон Эквипмент», соединяя тонким лучом мельчайшие звенья золотых цепочек. Скорость сварки 180 звеньев в минуту, однако следов припоя не видно даже через микроскоп. Прибором можно соединять звенья из любых металлов, контакты и другие микродетали. Температуру процесса регулируют фокусировкой луча.

Изобретатель и рационализатор, 1981, № 1.

**ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРА** на фотопластинке **ЗАПИСЫВАЮТ** голограмму... **ВИБРАЦИИ** механизмов. Изображение — интерференционные полосы, количество которых пропорционально величине амплитуды контрольных колебаний. Таким образом инженеры западногерманской фирмы «Сименс» определяют уровень вибрации новых конструкций.

Технише Рундшау (Швейцария) № 45, 24.02.1982 г.

В лаборатории роста кристаллов геологического факультета МГУ изготовлены кристаллы, позволяющие получить **ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОТ ОГОНЬКА СПИЧКИ** или любого другого источника. Размеры их могут быть 3—5 мм (1). Секрет оптического преобразователя объясним просто: по всему его объему распределены неодимовые ионные центры, запасующие энергию, как губка воду. Но в отличие от предложенного аналога разряжается кристалл мгновенно. Мощный поток микролазера (в кубическом сантиметре  $4 \times 10^{21}$  световых центров) нужен десяткам отраслей промышленности, тем более что основа кристаллов — обычное стекло и стоит он совсем недорого.

Знание — сила, 1982, № 3,

**Лазерная технология.** — М.: Знание, 1983. —  
Л17 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер.  
«Техника»; № 3).

11 к.

Возможности лазерного луча уникальны, сферы применения — самые разнообразные. Это сварка, термообработка, контрольно-измерительные операции, размерная обработка, получение тонких пленок и многое, многое другое. Причем лазерные технологии на сегодня не имеют соперников по безотходности, точности, малооперационности, т. е. именно тем параметрам, к которым стремится научно-технический прогресс. Обо всем этом рассказали известные специалисты в данной области академик АН СССР Н. Н. Рыкалин и доктор технических наук А. А. Углов.

Брошюра предназначена специалистам различных отраслей народного хозяйства, лекторам, слушателям народных университетов, пропагандистам новой техники.

2403000000

ББК 32.86  
6Ф4

## ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Главный отраслевой редактор Л. А. ЕРЛЫКИН.

Редактор Г. И. ФЛИОРЕНТ.

Мл. редактор Н. А. СЕРГЕЕВА.

Обложка художника Э. К. ИППОЛИТОВОЙ.

Худож. редактор Т. С. ЕГОРОВА.

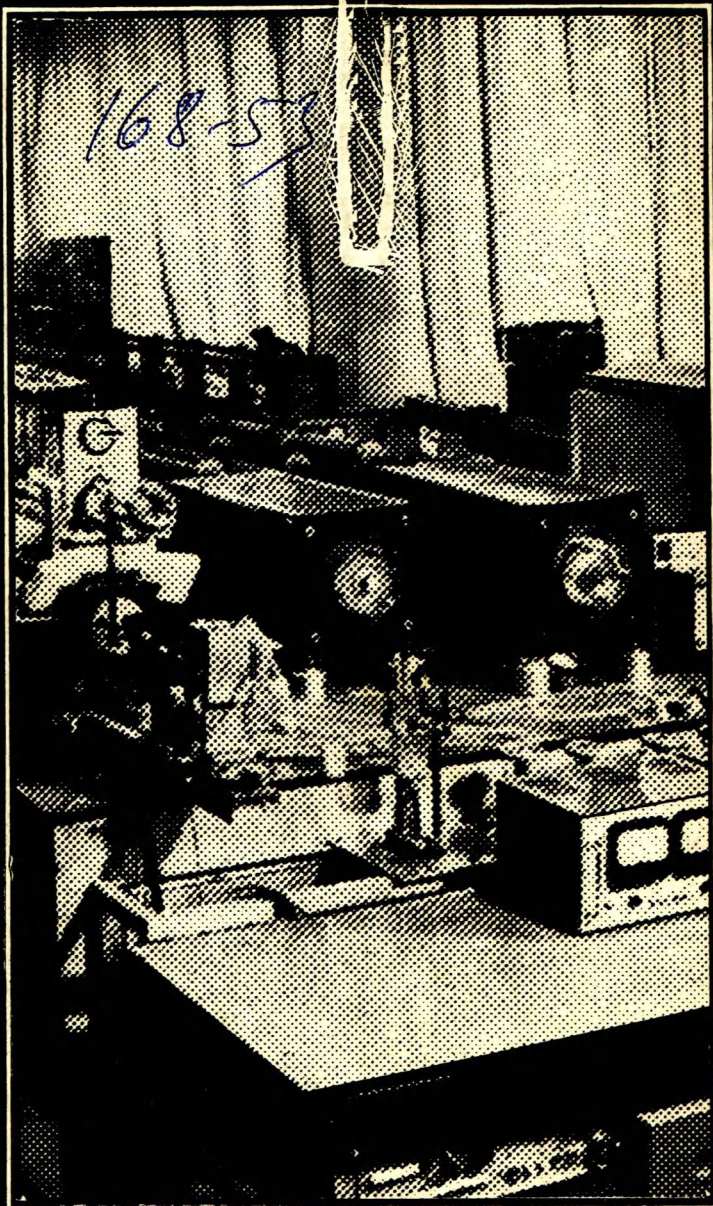
Техн. редактор С. А. ПТИЦЫНА.

Корректор В. Е. КАЛИНИНА.

ИБ № 5453

Сдано в набор 03.01.83. Подписано к печати 31.12.82. Т-17438. Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,67. Уч.-изд. л. 3,71. Тираж 44 880 экз. Заказ 8. Цена 11 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 834403.

Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.



СЕРИЯ

**ТЕХНИКА**