

Применение углекислотных лазерных установок для исследования процессов резания древесины

А.А. Талых^а, О.В. Спиринов^б, В.С. Сюзнев^в

Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия

^а ata_77@mail.ru, ^б olspirin@petsru.ru, ^в siounev@petsru.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-3750-2608>, ^б <https://orcid.org/0009-0005-8306-5436>, ^в <https://orcid.org/0000-0002-2558-2672>

Статья поступила 01.10.2024, принята 05.11.2024

В статье представлены возможности развития лазерной обработки древесины и древесных материалов в области исследования процессов резки и гравировки. Рассмотрено принципиальное устройство лазера. Выделены классификационные признаки, согласно которым можно разделить все многообразие лазеров. Представлен сравнительный анализ наиболее распространенных видов лазеров — эксимерного, полупроводникового, неодимового, эрбиевого, углекислотного и др. Выявлены лазеры, показывающие наибольшую эффективность при обработке древесины. Среди них выделяется углекислотный лазер. Для изучения процессов и параметров лазерной резки и гравировки древесины и древесных материалов дается подробное описание конструкции экспериментальной установки на основе углекислотного лазера, разработанной и изготовленной авторами. Приводятся принципиальная схема и общий вид экспериментальной установки. Показаны возможности установки для исследования процессов резания древесины, связанные с выявлением наиболее эффективных режимов резки и гравировки для различных пород древесины и древесных материалов, определением влияния плотности, влажности, текстуры и других отличительных признаков и свойств разных пород древесины на качество/энергозатраты при лазерной обработке. Проведенное исследование зависимости выходной мощности лазера от мощности разряда при определенном качестве юстировки показало, что, изменяя мощность, «вкладываемую» в разряд, можно определять наиболее энергоэффективные режимы обработки. Описанная в статье экспериментальная установка позволяет также путем замены выходного зеркала на дифракционную решетку производить перестройку длины волны излучения лазера в пределах 9–12 мкм с целью изучения спектральной зависимости абсорбционной способности различных участков на образцах древесины.

Ключевые слова: лазер; углекислотный лазер; древесина; лазерная резка древесины; режимы резания; энергозатраты при лазерной обработке.

Application of carbon dioxide laser systems for studying wood cutting processes

A.A. Talykh^a, O.V. Spirin^b, V.S. Syunev^c

Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Republic of Karelia

^a ata_77@mail.ru, ^b olspirin@petsru.ru, ^c siounev@petsru.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3750-2608>, ^b <https://orcid.org/0009-0005-8306-5436>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-2558-2672>

Received 01.10.2024, accepted 05.11.2024

The article presents the possibilities for the development of laser processing of wood and wood materials in the field of research of cutting and engraving processes. The fundamental structure of the laser is considered. Classification criteria have been identified according to which the entire variety of lasers can be divided. A comparative analysis of the most common types of lasers is presented: excimer, semiconductor, neodymium, erbium, carbon dioxide and others. Lasers that show the greatest efficiency in wood processing have been identified. Among them, the carbon dioxide laser stands out. To study the processes and parameters of laser cutting and engraving of wood and wood-based materials, a detailed description of the design of an experimental setup based on a carbon dioxide laser, developed and manufactured by the authors, is given. A schematic diagram and general view of the experimental setup are presented. The capabilities of the installation are shown for studying wood cutting processes associated with identifying the most effective cutting and engraving modes for various types of wood and wood materials, determining the influence of density, humidity, texture and other distinctive features and properties of different types of wood on quality/energy consumption during laser processing. A study of the dependence of the laser output power on the discharge power at a certain quality of adjustment shows that by changing the power, which is put into the discharge, the most energy-efficient processing modes can be determined. The experimental setup described in the article also makes it possible, by replacing the output mirror with a diffraction grating, to adjust the wavelength of laser radiation within 9–12 microns in order to study the spectral dependence of the absorption capacity of various areas on wood samples.

Keywords: laser; carbon dioxide laser; wood; laser cutting of wood; cutting modes; energy consumption during laser processing.

Введение. Древесина — это конструкционный материал, который достаточно хорошо обрабатывается пилением, строганием, долблением, точением, сверлением и другими способами. В настоящее время широкое применение получила лазерная обработка древесины с возможностью резки и гравировки.

С помощью лазерных станков можно выполнять резы любой формы сложности с высокой точностью и качеством обработки на древесине и древесных материалах. Лазерная резка и гравировка могут быть использованы и в тех случаях, когда традиционные методы обработки менее эффективны или использование классических инструментов невозможно, например, при изготовлении изделий с элементами очень малых форм и размеров. Наиболее подходящими породами древесины для лазерной обработки являются дуб, бук, кедр, сосна, ольха, бальза, тополь [1].

К достоинствам лазерной обработки также относят:

- высокую скорость разделения материала. Производительность достигает 100 мм/мин без снижения качества;

- точность раскроя до 0,1 мм;

- отсутствие прямого контакта. Инструмент не внедряется в заготовку, т. е. структура не деформируется и не загрязняется;

- возможность реза без ограничения по плотности и толщине. Лазерную резку используют для древесины, фанеры, шпона, древесностружечных плит;

- в станках с ЧПУ-процессом управляет программа, т. е. влияние человеческого фактора полностью исключено. Это важное преимущество, благодаря которому лазерную технологию применяют в работе с ценными, труднообрабатываемыми и хрупкими материалами [1].

Лазер является устройством, преобразующим различные виды энергии (электрическую, световую, химическую, тепловую и т. п.) в энергию когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона [2].

Обычно лазер состоит из трех основных элементов (рис. 1):

- активная среда 1 (активный элемент), в которой создают инверсию населенностей (появляются люминесценция и сверхлюминесценция). Она может быть твердой, жидкой и газообразной;

- устройство для создания инверсии в активной среде (система накачки 2);

- устройство для обеспечения положительной обратной связи (оптический резонатор или резонатор Фабри – Перо), состоящий из двух плоских зеркал — глухого 3 и частично пропускающего 4, расположенных параллельно [2; 3].

В настоящее время все многообразие лазеров можно классифицировать по четырем классификационным признакам:

- по рабочему веществу: газовые, твердотельные, жидкостные (на красителях), полупроводниковые, эксимерные и т. д.;

- по форме выходного сигнала энергии: непрерывные, импульсные, квази КВ-лазеры;

- по выходной длине волны: рентгеновские, ультрафиолетовые, инфракрасные, видимые и т. д.;

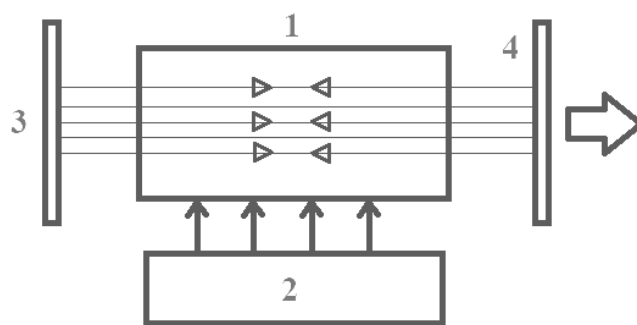


Рис. 1. Принципиальная схема лазера: 1 — активная среда; 2 — система накачки; 3 — глухое плоское зеркало; 4 — частично пропускающее плоское зеркало

- по мощности: низкой мощности (до 100 Вт), средней мощности (100–1500 Вт), высокой мощности (более 1500 Вт) [3].

Несмотря на широкое использование лазеров, процессы и режимы резания древесины лазерами изучены недостаточно. В этой связи нами спроектирована и изготовлена установка для исследования и обоснования оптимальных параметров резания древесины и древесных материалов.

Методы и методология исследования. Длина волны и мощность излучения — наиболее важные параметры лазера, определяющие возможность его применение в той или иной промышленной сфере. На рис. 2 приведены примеры существующих наиболее мощных и распространенных лазеров 4-го класса опасности (более 500 мВт), распределенных по длинам волн [4].

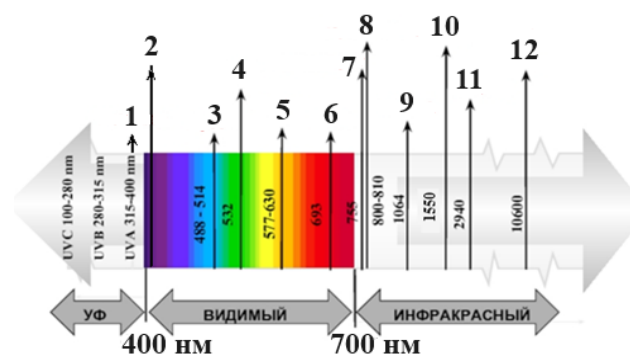


Рис. 2. Диапазон длины волн наиболее распространенных лазеров: 1 — эксимерный XeCl-лазер; 2 — полупроводниковый GaN-лазер; 3 — ионный аргоновый лазер; 4 — твердотельный неодимовый лазер с генерацией 2-й гармоники или *dpss*-лазер с накачкой от лазерного диода; 5 — перестраиваемый жидкостный лазер на красителе Родамин 6Ж; 6 — импульсный рубиновый лазер; 7 — александритовый лазер; 8 — полупроводниковый GaAs-лазер; 9 — неодимовый (Nd: Yag) лазер; 10 — эрбиевый волоконный лазер; 11 — эрбиевый Er: Yag лазер; 12 — углекислотный CO₂ лазер

Спектр поглощения древесины определяет пригодность того или иного лазера для ее обработки. На рис. 3 приведен график спектра поглощения сосновой и буквой древесины [5].

Из графика можно сделать вывод, что для обработки древесины неодимовый лазер (Nd: Yag) имеет самую низкую эффективность. Наиболее производительными

для этой цели являются эксимерный ХеСl [6], полупроводниковый GaN, углекислотный CO₂ и эрбиевые (Er: YaG) лазеры [7–10].

Эксимерный лазер ХеСl относится к классу молекулярных. В верхнем уровне находятся молекулы ХеСl, которые возникают только при возбуждении смеси Хе и Сl импульсным электрическим разрядом.

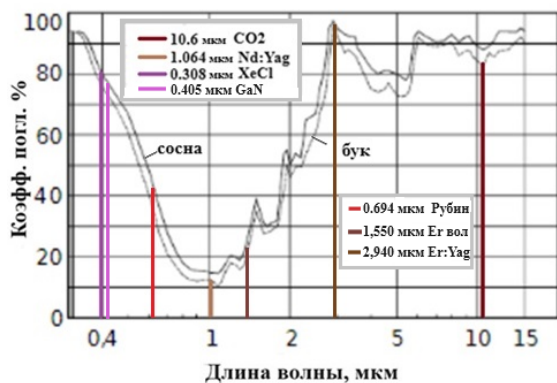


Рис. 3. Спектральная зависимость абсорбционной способности некоторых пород древесины с приведенными длинами волн промышленных лазеров

Излучение кванта с длиной волны 0,308 мкм происходит при переходе между связанным (эксимерным) состоянием и свободным (так называемый свободносвязанный переход) (рис. 4).

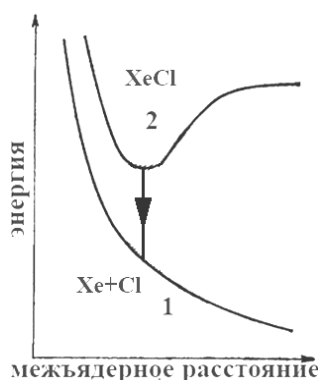


Рис. 4. Энергетические уровни эксимерного лазера

Поскольку давление в газовой смеси таких лазеров, как правило, выше атмосферного, то из-за больших плотностей токов эксимерные лазеры могут работать только в импульсном режиме, но с достаточно высокой частотой повторения (примерно 500 Гц). При этом средняя выходная мощность может достигать до 100 Вт. Эксплуатируя данные лазеры, необходимо учитывать, что диффузно-рассеянное излучение такой длины волны крайне опасно для глаз (необходимы защитные очки).

Стоит отметить, что эксимерные лазеры не получили такого массового распространения, как углекислотные, что связано с технологическими трудностями при производстве первого и относительной простотой изготовления отпаянных разрядных трубок для второго.

Полупроводниковые GaN-лазеры с длиной волны 0,405 мкм имеют высокий КПД (50–60 %), однако диапазон доступных мощностей излучения лежит в интервале 0,5–10 Вт. Чем выше мощность, тем ниже надежность

этих лазеров. В настоящее время они находят свое применение в малогабаритных гравировальных станках.

Эрбиевые (Er: YaG) лазеры генерируют излучение на длине волны 2,940 мкм, т. е. в спектральном диапазоне, на котором поглощение воды очень велико, а значит, подходящее для обработки влажной древесины.

На рис. 5 представлена энергетическая диаграмма Er: YaG-лазера. Время жизни верхнего состояния 3 примерно 0,1 мс, что оказывается намного меньше, чем у нижнего состояния 2 (около 2 мс). По этой причине Er: YaG-лазеры преимущественно работают только в импульсном режиме (из условий существования инверсной заселенности между 2 и 3 уровнями) с невысокой средней мощностью, поэтому не находят применения в сфере деревообработки.

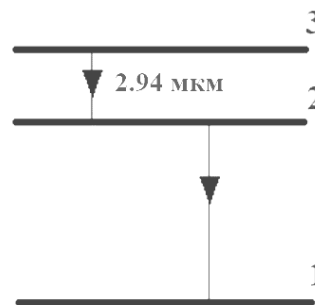


Рис. 5. Схема энергетических уровней эрбиевого лазера Er: YaG

Однако выпускаются кристаллы Er: YaG с высоким уровнем легирования эрбием (~50 ат. %), в которых за счет ап-конверсионных переходов с уровня 2 удается поддержать условие инверсной заселенности и работу лазера в непрерывном режиме, но по определенным причинам они весьма редки. Появившиеся в последнее время высокоэффективные Er YLF-лазеры с диодной накачкой [7–10] (эффективность 35 %) могут найти применение в сфере деревообработки наряду с GaN-лазерами. Они генерируют излучение на длине волны 2,8 мкм (более безопасном для глаз), обеспечивают в непрерывном режиме выходную мощность более 1 Вт.

В настоящее время углекислотный лазер является одним из самых мощных и наиболее эффективных (КПД 15–20 %). Активная среда CO₂ лазера — смесь нескольких компонентов двуокиси углерода, молекулярного азота и гелия. Молекулы CO₂ возбуждаются за счет неупругих столкновений с электронами в тлеющем разряде и излучают на переходах между колебательными уровнями основного электронного состояния [7–13]. Молекула N₂ имеет только один тип колебаний, в молекуле CO₂ возможны три типа колебаний: симметричные ν_1 , деформационные ν_2 , асимметричные ν_3 . По этой причине колебательное состояние молекулы CO₂ характеризуется тремя квантовыми числами $\nu_1 \nu_2 \nu_3$ соответственно (рис. 6).

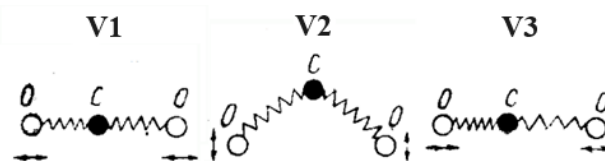


Рис. 6. Направления движения атомов молекулы CO₂ в колебаниях различных типов

На рис. 7 приведены схемы энергетических колебательных уровней молекул CO_2 и N_2 . Лазерная генерация осуществляется на переходе из состояния 0001 в 1000 , возможен еще переход из 0001 в 0200 , но он гораздо слабее. Верхний индекс, стоящий справа при квантовом числе, обозначает угловой момент колебания относительно оси молекулы.

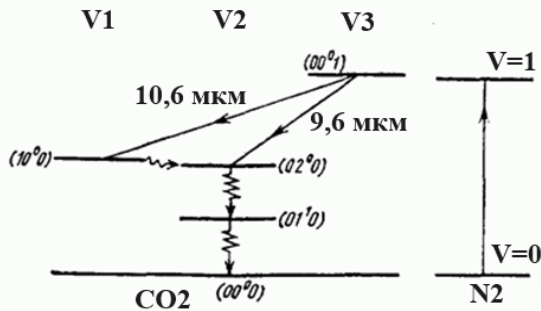


Рис. 7. Колебательные уровни нижнего электронного состояния молекул CO_2 и N_2

Азот играет роль буферного газа. Поскольку энергия первого колебательного уровня молекул азота, которые хорошо возбуждаются электронами в тлеющем разряде, очень близка к энергии верхнего лазерного уровня $00^0 1$ CO_2 , происходит резонансная передача энергии возбуждения молекулам CO_2 , благодаря чему удается резко поднять мощность лазера. Присутствие в лазерной смеси атомов гелия способствует выводу тепла из разряда за счет его высокой теплопроводности, что способствует поддержанию инверсной заселенности среды, а также ускоряет дезактивацию нижнего лазерного уровня, тем самым повышая выходную мощность.

Наиболее массово промышленностью разных стран выпускаются CO_2 лазеры с диффузным охлаждением (рис. 8). Так называют установки, в которых тепло из разряда выводится механизмом теплопроводности. При мощностях до 1 кВт используется классическая схема тлеющего разряда в трубке [7–13].

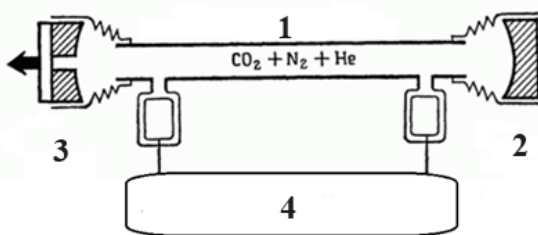


Рис. 8. Схема CO_2 лазера небольшой мощности с диффузным охлаждением: 1 — водоохлаждаемая газоразрядная трубка со смесью CO_2 , N_2 и He; 2 — глухое молибденовое зеркало; 3 — выходное полупрозрачное зеркало из германия; 4 — высоковольтный источник питания

Для существования инверсной заселенности газовая смесь не должна нагреваться выше 200°C [7]. Из уравнения теплового баланса следует вывод, что вклад мощности на единицу длины при определенной средней температуре разрядного столба не зависит ни от радиуса трубы,

ни от давления. Чем длиннее трубка, тем большую мощность к ней можно «приложить». Например, в 1 м трубы нельзя «вкладывать» больше 1 кВт электрической мощности и получить с нее более 70–100 Вт. Для уменьшения длины лазера при более высоких мощностях, когда длина труб достигает десятков метров, их складывают в несколько колен, ставя отражатели излучения в местах поворотов [7] (рис. 9).

Питание подают в отдельные метровые секции, иначе потребовался бы очень высоковольтный источник питания. Лазеры такого типа надежны в работе, неприхотливы, хорошо себя зарекомендовали и выпускаются промышленностью в различных вариантах на десятки, сотни ватт, вплоть до киловатта и выше.

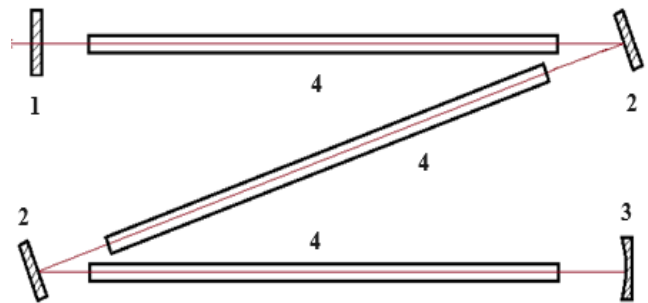


Рис. 9. Схема многосекционного лазера, рассчитанного на мощность 1 кВт и выше: 1 — выходное зеркало; 2 — глухие плоские зеркала; 3 — заднее глухое полусферическое зеркало; 4 — разрядные CO_2 трубки

Результаты и обсуждение. Для изучения энергоэффективности и скорости реза различных пород древесины нами была разработана установка на основе CO_2 лазера (рис. 10 и 11), состоящего из отпаянной разрядной трубки 1 марки ГЛ-501 с германиевым окном 2 под углом Брюстера и выходного водоохлаждаемого германиевого зеркала 4, которое закреплено на юстировочном механизме. Линза 5 из селенида цинка с фокусным расстоянием 100 мм фокусирует лазерный луч на исследуемый образец 6. При гауссовой форме пучка диаметр перетяжки при фокусировке составляет примерно 0,2 мм, и ее длина порядка 10 мм [8; 10; 14–16]. Лазерная трубка 1 охлаждается холодной водой от центральной системы водоснабжения.

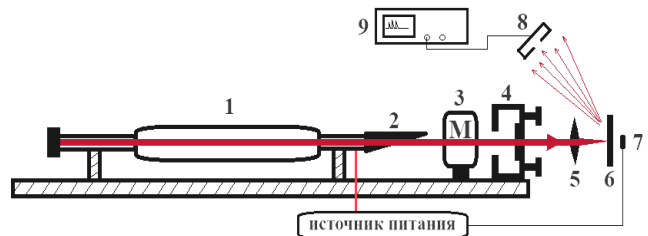


Рис. 10. Схема экспериментальной установки на основе CO_2 лазера: 1 — разрядная трубка; 2 — германиевое окно; 3 — модулятор добротности; 4 — германиевое зеркало; 5 — линза; 6 — исследуемый образец; 7 — термопара; 8 — пьезоэлектрический приемник; 9 — осциллограф марки UTD2025C.

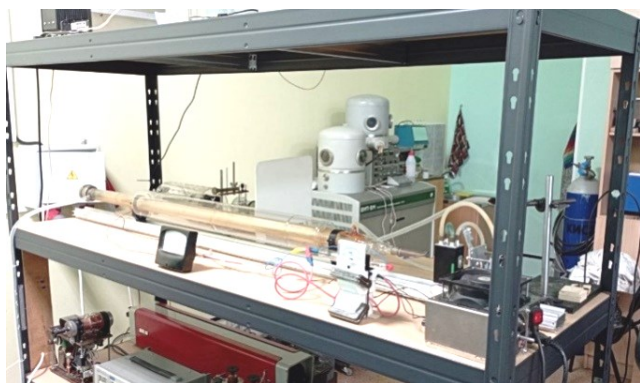


Рис. 11. Общий вид экспериментальной установки на основе CO₂ лазера на трубке ГЛ-501

Конструкция позволяет регулировать расстояние от линзы до выходного зеркала, меняя тем самым параметры перетяжки в фокусе лазерного пучка. Внутри резонатора размещен модулятор добротности 3, что позволяет провести исследования влияния серий лазерных импульсов повышенной мощности на процесс обработки образца [8; 10; 17–20].

Изменение расстояния от выходного германиевого зеркала 4 до фокусирующей линзы 5 позволяет влиять на характеристику луча (гауссова типа) в его перетяжке (ее диаметр и длину), что позволяет, в свою очередь, изменять мощность в зависимости от плотности и толщины обрабатываемой древесины [8; 10; 16].

Формула (1) описывает зависимость радиуса $R'(z_r)$ пучка в перетяжке от фокусного расстояния линзы f , расстояния до выходного зеркала s , радиуса пучка вблизи выходного зеркала R_0 и расстояния от центра линзы z_r :

$$R(z_r) = R_0 \frac{f}{\sqrt{(s-f)^2 + z_r^2}}, \quad (1)$$

где $R'(z_r)$ — радиус пучка в зависимости от расстояния до линзы; f — фокусное расстояние линзы; s — расстояние от выходного зеркала лазера до линзы; R_0 — радиус пучка у выходного зеркала. Единица измерения — м.

Путем замены выходного зеркала на алюминиевую дифракционную решетку с периодом 100–200 шт./мм и соответствующим углом блеска можно производить перестройку длины волны излучения лазера в пределах 9–12 мкм с целью изучения спектральной зависимости абсорбционной способности или интенсивности рассеяния с различных участков на образцах древесины.

Пирозлектрический приемник 8 марки МГ-30А (рис. 12) необходим для оценки относительной амплитуды импульсов рассеянного излучения при частоте модуляции до 30кГц.

Приемник МГ-30А состоит из тонкопленочного пирозлектрического датчика и гибридного предварительного усилителя, требующего двухполярного питания напряжением 12 В. Преобразователь напряжения выполнен отдельно в блоке. Входное окно в крышке корпуса выполнено из просветленного германия с максимумом спектрального пропускания в диапазоне длин волн 8–14 мкм. (рис. 13).

Цифровой осциллограф UTD2025C 9 принимает сигнал с МГ-30А и визуализирует его (рис. 14).



Рис. 12. Блок с датчиком МГ-30А (слева) и модулятором добротности (справа)

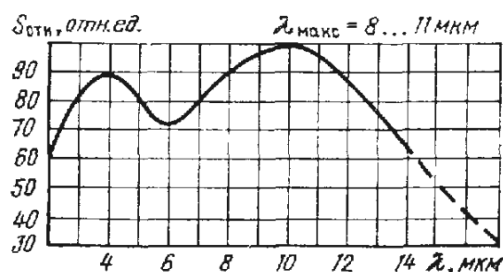


Рис. 13. Относительная характеристика спектральной чувствительности датчика МГ-30А

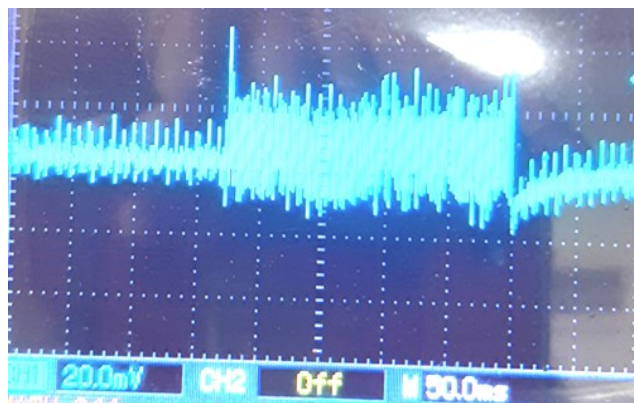


Рис. 14. Пример сигнала на осциллографе DSO, принимаемого с датчика МГ-30 от рассеянного лазерного импульса от поверхности обрабатываемого образца древесины

Кроме того, применение этого пирозлектрического приемника позволяет по рассеянному излучению более точно оценить длительность лазерного импульса a , следовательно, и дозу энергии, падающей на исследуемый образец. Такая возможность необходима, например, в задаче по исследованию влияния обработки излучением CO₂ лазера на степень карбонизации поверхности различных пород древесины, которая в той или иной мере меняет смачиваемость и некоторые другие практически значимые для древесины свойства.

На графике (рис. 15) представлена определенная нами зависимость выходной мощности лазера от мощности разряда при определенном качестве юстировки. Для измерения выходной мощности применялись дисковый аттенуатор 1/100 и калориметр ИМО-2Н.

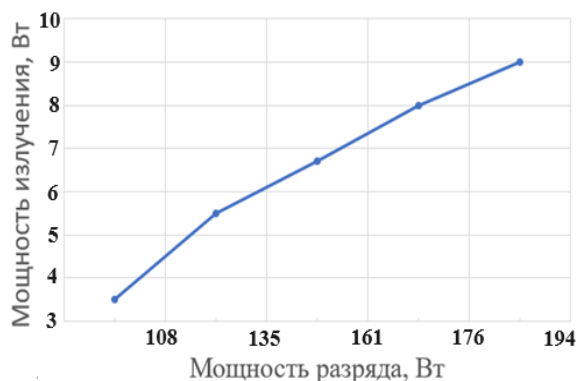


Рис. 15. Зависимость выходной мощности излучения лазера от мощности разряда

Изменяя мощность, «вкладываемую» в разряд, можно найти наиболее энергоэффективный режим либо для гравировки, либо для резки для различных пород древесины.

Одним из основных режимов лазерной обработки является скорость резания. С целью измерения скорости сквозного реза образцов из древесины разных пород использовалось реле времени, которое начинает отсчет с момента запуска лазера и заканчивает в момент окончания реза, когда поступит сигнал с термопары 7.

Реле фиксирует интервал времени с одновременным отключением источника питания лазера. Кроме того, в блоке управления реле времени предусмотрен режим «экспозиция», позволяющий регулировать интервал времени включения лазера от 0 до 2000 миллисекунд и тем самым изменять дозу облучения образцов в широких пределах независимо от сигнала с термопары. В этом режиме может производиться поверхностная обработка образцов древесины (например, гравировка, обжиг и др.).

Скорость сквозного реза определялась путем вычисления отношения толщины образца к среднему времени выполнения реза. В таблице представлены результаты измерений скорости сквозного реза для образцов различных пород толщиной 6 мм.

Таблица. Скорость сквозного реза образцов толщиной 6 мм некоторых древесных пород

Порода древесины	Среднее время сквозного реза, мс	Скорость сквозного реза, м/с
Береза	250	0,024
Дуб	260	0,023
Клен	400	0,015
Осина	220	0,027
Ель	180	0,033
Сосна	230	0,026

Результаты экспериментальной работы показали, что наиболее высокие скорости резания наблюдались у мягких пород древесины с невысокой плотностью (ель, сосна, осина) в отличие от твердых (береза, дуб, клен). Поэтому такие показатели, как плотность и твердость древесины, необходимо учитывать, в первую очередь, при назначении режимов лазерной резки.

В ходе исследования образцов определено, что достаточно хорошо режутся ель, сосна, осина. Для эффективной резки твердых пород древесины (дуб, береза и др.) требуется более высокая мощность лазера. При этом у твердых пород древесины при визуальном осмотре качество сквозного реза оказалось значительно выше, чем у мягких. Чем толще образцы и тверже древесина, тем темнее кромка реза.

Заключение. Проведенное обзорное исследование показало, что для лазерной обработки древесины наиболее эффективным до сих пор является углекислотный лазер.

Разработанная авторами статьи экспериментальная установка на основе CO₂ лазера позволяет:

- выявлять наиболее эффективные режимы резания и гравировки для разных пород древесины и различных древесных материалов;
- определять зависимость качества кромки реза образцов от скорости резания, расстояния до перетяжки пучка и мощности лазерного излучения;
- изучать спектральную зависимость абсорбционной способности различных участков на образцах древесины по изменению среднего времени их сквозного реза или интенсивности диффузно-рассеянного излучения;
- измерять скорость сквозного реза для разных пород древесины и различных древесных материалов в зависимости от мощности выходного излучения и качества фокусировки;
- изучать влияние плотности, влажности, текстуры и других отличительных признаков и свойств разных пород древесины на качество/энергозатраты при лазерной обработке;
- путем подбора мощности лазера, расстояния от выходного зеркала резонатора до фокусирующей линзы, положения образца относительно фокальной перетяжки пучка и длительности лучевого воздействия на различные породы древесины можно подобрать наиболее оптимальный режим для той или иной задачи, будь то гравировка, обжиг или резка.

Результаты экспериментального исследования процессов резания древесины показали, что скорость лазерного резания различных пород древесины и соответствующие энергозатраты зависят, прежде всего, от исходных физико-механических свойств различных пород древесины. Кроме этого, необходимо отметить затруднение реза из-за наличия скрытых дефектов древесины и разницу при обработке зон ранней и поздней древесины.

Литература

References

1. Лазерные технологии для высококачественной резки по дереву [Электронный ресурс] // Молодой учёный. 2019. № 50 (288). URL: <https://moluch.ru/archive/288/91560/> (дата обращения: 02.04.2024)
2. Физика. Большой энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. 4-е изд. М.: Большая Рос. энцикл., 1999. 944 с.
3. Минаев И.В., Сергеев А.Н., Кубанова А.Н., Добровольский Н.М., Гвоздев А.Е., Кутепов С.Н., Малий Д.В. История развития лазера и особенности его применения // Чебышевский сб. 2019. Т. 20, вып. 4. С. 423-438.
4. Что такое длина волны лазера и за что она отвечает [Электронный ресурс]. URL: <https://laserstore.ru/blog/chto-takoe-dlina-volny-lazera/> (дата обращения: 15.04.2024).
5. Исследование лазерной абляции древесины для улучшения модификации и очистки поверхности [Электронный ресурс]. URL: <https://laserstore.ru/blog/issledovanie-lazernoy-ablyacii-drevesiny/> (дата обращения: 15.04.2024).
6. Christensen C.P., Waynant R.W., Feldman B.J. High Efficiency Microwave Discharge XeCl Laser // Appl. Phys. Lett. 1985. 46. P. 321-323.
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
8. Качемарек Ф. Введение в физику лазеров. М.: Мир, 1980. 540 с.
9. Криницина М.В., Кузнецов А.И. Исследование режимов лазерного резания некоторых пород древесины на лазерно-гравировальном станке VL 4060 // Труды БГТУ. 2016. № 2 (184). С. 303-306.
10. Ануфрик С.С., Володенков А.П., Зноско К.Ф., Лосев В.Ф. Экцимерный ХеСl-мини-лазер // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 4. С. 288-292.
11. Patel C.K.N. Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂ // Physical Review: journal. 1964. Vol. 126.
12. Новоселова М.В., Кузнецов А.И. Исследование режимов лазерного резания древесины берёзы // Приволжский науч. вестн. 2013. № 10 (26). С. 31-35.
13. De Maria A.J. Review of High-Power CO₂ Lasers, in Principles of Laser Plasmas, ed. By G Bekefi Wiley-Interscience, New York, 1976. Chap. 8.
14. Голубев В.С., Сафиуллин Р.К. Применение мощных CO₂-лазеров для обработки материалов и изделий // Изв. Казанского гос. архитектурно-строительного ун-та. 2009. № 1 (11). С. 237-242.
15. Kogelnik H., Li T. Laser Beams and Resonators, Appl. Opt. 5, 1996. P. 1550-1567.
16. Тарасов Л.В. Физика лазера. 5-е изд. М.: Ленанд, 2017. 456 с.
17. Koechner W. Solid-State Laser Engineering, 4th ed., Springer Series in Optical Sciences Springer-Verlag, Berlin, 1996. Chap. 8.
18. Brech F., Cross L. Optical Microemission Stimulated by a Ruby MASER // Appl. Spectrosc. 1962. № 16. P. 59-61.
19. Sobol E.N. Phase Transformations and Ablation in Laser-Treated solids. Michigan: Wiley, 1995. 332 p.
20. Ageev Eduard, Andreeva Y.M., Ionin A.A., Kashaev N.S., Kudryashov S.I., Nikonorov N.V., Nuryev R.K., Petrov A.A., Rudenko A.A., Samokhvalov A.A., Saraeva I.N., Veiko V.P. Single-shot femtosecond laser processing of Al-alloy surface: An interplay between Mbar shock waves, enhanced microhardness, residual stresses, and chemical modification // Optic Laser Tecnology. 2020. Vol. 126. P. 106131.
1. Laser technologies for high-quality wood cutting [Elektronnyj resurs] // Young Scientist. 2019. № 50 (288). URL: <https://moluch.ru/archive/288/91560/> (data obrashcheniya: 02.04.2024)
2. Physics. A large encyclopedic dictionary / gl. red. A.M. Prohorov. 4-e izd. M.: Bol'shaya Ros. encikl., 1999. 944 p.
3. Minaev I.V., Sergeev A.N., Kubanova A.N., Dobrovolskij N.M., Gvozdev A.E., Kutepov S.N., Malij D.V. The history of the development of the laser and the features of its application // Chebyshevckij sbornik. 2019. V. 20, vyp. 4. P. 423-438.
4. What is the laser wavelength and what is it responsible for? [Elektronnyj resurs]. URL: <https://laserstore.ru/blog/chto-takoe-dlina-volny-lazera/> (data obrashcheniya: 15.04.2024).
5. Study of laser ablation of wood to improve surface modification and cleaning [Elektronnyj resurs]. URL: <https://laserstore.ru/blog/issledovanie-lazernoy-ablyacii-drevesiny/> (data obrashcheniya: 15.04.2024).
6. Christensen C.P., Waynant R.W., Feldman B.J. High Efficiency Microwave Discharge XeCl Laser // Appl. Phys. Lett. 1985. 46. P. 321-323.
7. Rajzer Yu.P. Physics of gas discharge. M.: Nauka, 1992. 536 p.
8. Kachemarek F. Introduction to Laser Physics. M.: Mir, 1980. 540 p.
9. Krinicina M.V., Kuznecov A.I. Research of the modes of laser cutting of some breeds of wood on the laser and engraving VL 4060 machine // Proceedings of BSTU. 2016. № 2 (184). P. 303-306.
10. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F., Losev V.F. Excimer XeCl Mini Laser // Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. V. 35, № 4. P. 288-292.
11. Patel C.K.N. Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂ // Physical Review: journal. 1964. Vol. 126.
12. Novoselova M.V., Kuznecov A.I. Research of modes of laser cutting of birch wood // Privolzhskij nauch. vestn. 2013. № 10 (26). P. 31-35.
13. De Maria A.J. Review of High-Power CO₂ Lasers, in Principles of Laser Plasmas, ed. By G Bekefi Wiley-Interscience, New York, 1976. Chap. 8.
14. Golubev V.S., Safiullin R.K. The use of high-power CO₂ lasers for processing materials and products // News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2009. № 1 (11). P. 237-242.
15. Kogelnik H., Li T. Laser Beams and Resonators, Appl. Opt. 5, 1996. P. 1550-1567.
16. Tarasov L.V. Laser Physics. 5-e izd. M.: Lenand, 2017. 456 p.
17. Koechner W. Solid-State Laser Engineering, 4th ed., Springer Series in Optical Sciences Springer-Verlag, Berlin, 1996. Chap. 8.
18. Brech F., Cross L. Optical Microemission Stimulated by a Ruby MASER // Appl. Spectrosc. 1962. № 16. P. 59-61.
19. Sobol E.N. Phase Transformations and Ablation in Laser-Treated solids. Michigan: Wiley, 1995. 332 p.
20. Ageev Eduard, Andreeva Y.M., Ionin A.A., Kashaev N.S., Kudryashov S.I., Nikonorov N.V., Nuryev R.K., Petrov A.A., Rudenko A.A., Samokhvalov A.A., Saraeva I.N., Veiko V.P. Single-shot femtosecond laser processing of Al-alloy surface: An interplay between Mbar shock waves, enhanced microhardness, residual stresses, and chemical modification // Optic Laser Tecnology. 2020. Vol. 126. P. 106131.