

УДК 621.9.048.7

Влияние параметров процесса на лазерно-водоструйную обработку кремния*

Ю.Л. Чен¹, С. Ли¹, Ш.Х. Чен^{2*}, Х.Э. Ли¹

¹Технологический университет Хэфэя, Хэфэй, Аньхой, Китай

²Аньхойский университет Цзяньчжу, Хэфэй, Аньхой, Китай

E-mail: xhenxh@163.com

Лазерно-водоструйная обработка (ЛВО) — это новый комбинированный метод, разработанный на основе традиционной технологии лазерной обработки. Он сочетает в себе высокую эффективность обработки материалов излучением лазера с воздействием охлаждающей водяной струи. ЛВО может применяться для обработки твердых и хрупких материалов, таких как кремний. Углубленное изучение технологии такой обработки имеет важное практическое значение. Для исследования влияния параметров процесса на глубину канавки реза используется метод контролируемых переменных. Полученные данные показывают, что с увеличением силы тока и длительности лазерного импульса глубина канавки увеличивается; в случае увеличения частоты повторения лазерных импульсов и скорости водяной струи глубина канавки сначала увеличивается, а затем уменьшается. Эксперимент по обработке кремния лазерным излучением с подачей струи воды может стать показательным для обработки других труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: лазерно-водоструйная обработка, кремний, параметры процесса, глубина канавки, глубина.

Введение

Кремний представляет собой полупроводниковый материал с полезными физическими и химическими свойствами [1]. Этот материал нашел широкое применение в микроэлектронике, аэрокосмической технике и других областях [2]. Традиционные методы обработки кремния достаточно сложны, в то время как лазерная обработка демонстрирует многообещающие результаты. Однако традиционная газо-лазерная обработка хрупких и твердых материалов сопровождается образованием микротрещин и шлака. Лазерная обработка с подачей струи воды как новый тип технологии обработки материалов может помочь избежать указанных недостатков. К настоящему времени уже проведено большое количество экспериментальных исследований в этой области.

В работе [3] с использованием лазерной технологии с подачей воды разрезались алюминиевые и титановые сплавы, а также стальные пластины и исследовалось соотношение размеров резов. Авторы [4] изучали влияние параметров лазерного излучения

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда естественных наук Аньхойского университета Цзяньчжу (грант № 2019QDZ20) и Ключевой лаборатории естественных наук провинции Аньхой (грант № KJ2019A0798).

на скорость удаления шероховатости с поверхности жидкокристаллического стекла, используемого в дисплеях, при лазерном сверлении и лазерном сверлении под водой. В работе [5] исследовалась лазерно-водоструйная резка кремния и была разработана гидродинамическая модель, основанная на описании гидродинамики округлых частиц в процессе обработки. В работе [6] была представлена численная модель теплообмена и абляции материала в гибридном лазерно-водяном процессе микровращения монокристалла германия. Исследования показали, что увеличение энергии лазерного импульса приводит к образованию более глубоких канавок, а увеличение приложенного давления воды снижает пороговую температуру заготовки при удалении материала. Авторы [7] предложили улучшенную технологию лазерно-водоструйной микрообработки керамики из нитрида кремния и исследовали влияние энергии лазерного импульса и интенсивности водяной струи на результаты обработки. Было показано, что параметры обработки оказывают прямое влияние на глубину и микроскопическую морфологию реза, а энергия лазерного импульса и давление водяной струи доминируют над всеми другими влияющими факторами. В работе [8] использовался армированный углеродным волокном полимер, который обрабатывался лазером с его наведением водной струей. Было обнаружено, что струя воды играет важную роль в формировании реза, определяя размер зоны термического влияния и форму ее поперечного сечения. Исследователи [9] смоделировали и проанализировали влияние теплопередачи, водяной струи и водяной пленки на лазерную абляцию под водой. В работе [10] для оценки качества лазерно-водоструйной резки корейского кедра использовался ортогональный экспериментальный план. Было изучено влияние расфокусировки лазерного излучения, скорости резания, мощности лазера, давления воды и угла наклона водяной струи к поверхности обрабатываемого материала на качество обработки деталей из красной сосны, а также определены наилучшие параметры процесса. Авторы [11] исследовали влияние различных параметров обработки на глубину и ширину абляции, скорость удаления материала. Они получили массив микроканавок на инструменте с алмазным покрытием с помощью импульсного лазера с водяным охлаждением. В работе [12] изучалось влияние температуры воды, средней мощности, скорости перемещения пучка лазера и времени его сканирования на размер и морфологию поверхности монокристаллической кремниевой пластины, обрабатываемой наносекундным импульсным лазером под водой. Исследование показало, что при более высокой температуре воды, высокой мощности лазера, низкой скорости перемещения луча и большем времени сканирования лазерная абляция в воде позволяет получить более глубокие бороздки. В работе [13] изучалась обработка нержавеющей стали в воде и гексане. Было обнаружено, что разные жидкие среды обеспечивают разную шероховатость аблированной поверхности нержавеющей стали.

С учетом предыдущих исследований в настоящей работе используется технология совместной обработки материала излучением лазера и струей воды для изучения влияния мощности лазера, длительности лазерного импульса и частоты повторения импульсов, а также скорости струи воды на глубину канавки реза. Результаты эксперимента по обработке кремния лазерным излучением в присутствии струи воды могут послужить руководством для модификации других труднообрабатываемых материалов.

1. Принцип лазерной водоструйной обработки

Технология лазерно-водоструйной обработки (ЛВО) основана на традиционной технологии лазерной обработки материалов с использованием газа, дополненной подачей водяной струи на заготовку под определенным углом и с определенной скоростью, как показано на рис. 1. Струя воды удаляет шлак и мусор, образующиеся при лазерной

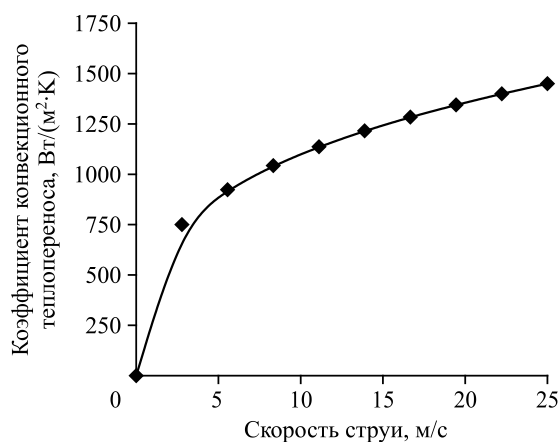
Рис. 1. Схема обработки заготовки струей воды.

обработке, тем самым повышая качество обработки материала, уменьшая шлакообразование, подавляя образование микротрещин и переплавленных слоев при обработке, а также оказывая влияние на размер зоны термического воздействия. Таким образом, хотя струя воды поглощает часть энергии лазера, однако при соответствующей скорости за соответствующее время она смывает шлак и расплавленный слой материала, тем самым уменьшая зону термического воздействия и улучшая качество обработки. Подача воды на заготовку при лазерном воздействии снижает фототермическую эффективность и до некоторой степени подавляет вторичную адгезию вытравленного материала за счет лазерно-индуцированной жидкостной кавитации, водяного охлаждения и потока воды. Проанализируем роль струи воды в процессе ЛВО.

При традиционной лазерной обработке, когда излучение лазера действует непосредственно на поверхность материала, большая часть энергии излучения поглощается обрабатываемым материалом. Подача воды усиливает конвективный теплообмен между излучением и водой. Отметим, что изучение конвективного теплообмена между водой и излучением представляется полезным для анализа результатов ЛВО и дальнейшего углубления теории процесса [14, 15]. Коэффициент теплопередачи хорошо отражает охлаждающий эффект водяной струи. Чем выше его значение, тем больше тепла забирает струя воды, следовательно, сильнее выражен ее охлаждающий эффект, и наоборот:

$$h = \begin{cases} 0,715(vl/\mu)^{1/2} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot \lambda \cdot l^{-1} & \text{при } 0,15 < \text{Pr} < 3, \\ 0,715(vl/\mu)^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \lambda \cdot l^{-1} & \text{при } \text{Pr} > 3, \end{cases} \quad (1)$$

здесь h — поверхностный коэффициент теплоотдачи, λ — коэффициент теплопроводности, l — длина пластины в направлении потока воды, Pr — число Прандтля, v — скорость жидкости, изменяющаяся вдоль длины пластины, μ — динамическая вязкость



жидкости. В соответствии с формулой (1) можно построить кривую изменения поверхностного коэффициента теплоотдачи карбида кремния при различных значениях скорости водяной струи (см. рис. 2).

Из рис. 2 видно, что коэффициент теплопередачи увеличивается с ростом скорости водяной струи, но тенденция к увеличению затухает.

Рис. 2. Поверхностный коэффициент теплопередачи карбида кремния как функция скорости водяного потока.

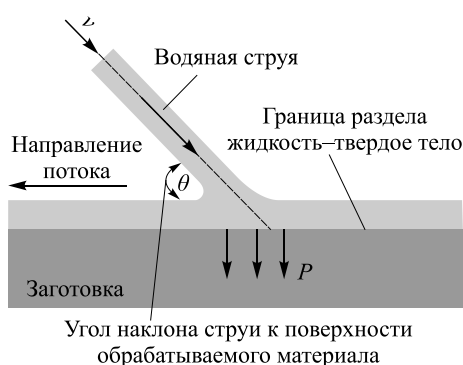


Рис. 3. Схематическое изображение струи воды, падающей на матрицу материала.

По достижении скоростью струи определенного уровня коэффициент поверхностной теплопередачи начинает демонстрировать относительно стабильное поведение, заключающееся в том, что по мере увеличения скорости струи охлаждающее действие струи на обрабатываемую площадь уменьшается, хотя, казалось бы, оно должно становиться более выраженным.

На рис. 3 представлено схематическое изображение струи воды, воздействующей на матрицу материала. При ударе струи воды о твердую поверхность происходит резкое изменение скорости движения контактной поверхности твердое тело – жидкость, вследствие чего давление в струе воды и поле внутренних напряжений в материале в точке контакта резко изменяются. Это приводит к сжатию областей жидкости и твердого тела, и на поверхности контакта твердой и жидкой фаз возникнет область чрезвычайно высокого напряжения сжатия. В то же время при ударе воды в центре струи создается давление гидравлического удара, или ударное давление, возникающее в момент удара струи воды об обрабатываемую поверхность. Это давление играет важную роль в процессе разрушения материала. Продолжительность давления гидравлического удара очень мала. В непрерывной падающей струе, по мере того как жидкость на краю поверхности контакта твердой и жидкой фаз движется наружу, давление в жидкости уменьшается. В это время разреженная волна с искривленным волновым фронтом распространяется от края поверхности контакта твердое тело – жидкость к центру и давление в центре струи уменьшается, что приводит к возникновению бернуллиевского давления торможения. Затем жидкость растекается радиально вдоль твердой поверхности и давление внутри нее исчезает. Согласно [16, 17], давление гидравлического удара P_c и давление торможения P_n определяются формулами

$$P_c = \frac{E}{c} \cdot v \cdot \sin \theta \quad (2)$$

и

$$P_n = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot \sin^3 \theta, \quad (3)$$

здесь E — модуль упругости водяной струи, для которого принято значение $2 \cdot 10^3$ МПа, c — скорость звука в струйной жидкости, которая в настоящей работе составляет 1500 м/с, θ — угол между струей воды и твердой поверхностью, ρ — плотность воды, v — скорость струи. Для более наглядного выражения зависимости между давлением гидравлического удара и давлением торможения, скоростью водяной струи и углом падения построим в соответствии с уравнениями (2) и (3) графики двух давлений, возникающих при угле натекания водяной струи, равном 60° , и при различных скоростях струи (см. рис. 4). Видно, что величина давления торможения, создаваемого ударом струи воды о твердую поверхность, меньше, чем величина давления гидравлического удара. При ЛВО подвижная платформа с заготовкой с обрабатываемой поверхностью движется с определенной скоростью по заданной траектории. Поэтому воздействие водяной струи на твердую поверхность в основном представляет собой давление гидравлического удара, лишь дополнительно — давление торможения. При ЛВО материалов

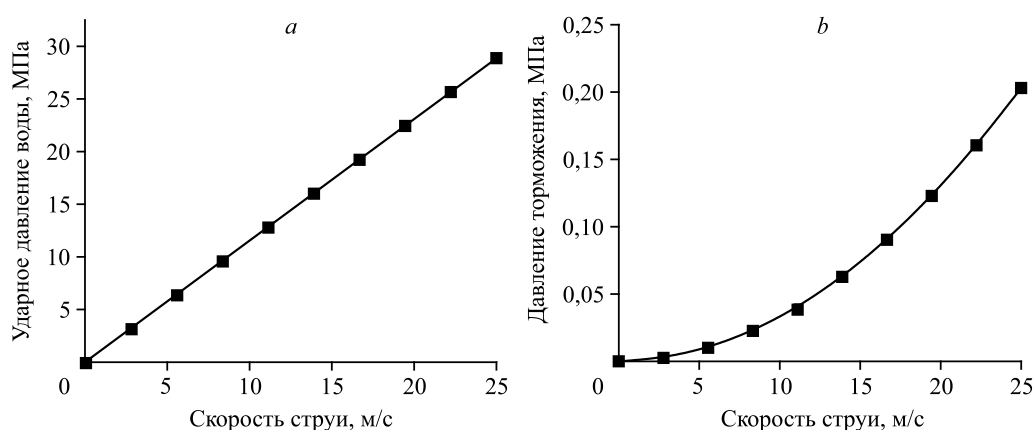


Рис. 4. Сила, создаваемая струей воды, падающей под разными углами на твердую поверхность.

a — ударное давление воды, *b* — давление торможения.

предпочтительно использование большей скорости струи. Однако скорость струи воды не должна быть чересчур высока. При высокой скорости струи будет значительно выражено дрожание соплового устройства, что приведет не только к отклонению центра удара водяной струи, но и вызовет большее растекание воды при ударе струи о поверхность материала. Помимо этого, если скорость воды будет слишком большой, то будут генерироваться брызги и «водяной туман». Все это повлияет на пятно фокусировки лазера таким образом, что потери энергии лазерного излучения увеличатся.

2. Экспериментальная установка и методика эксперимента

В эксперименте использовался твердотельный лазер HGL-LMY500 со средней мощностью 500 Вт. Кроме того, по индивидуальному заказу было разработано водоструйное устройство, основными узлами которого являлись плунжерный насос и сопло. Устройство для лазерной водоструйной обработки материалов представлено на рис. 5. Выходная энергия лазера может варьироваться путем регулировки величины его тока, длительности импульса и частоты повторения импульсов в соответствии с требованиями обработки. В качестве экспериментального материала использовался кремний ($20 \times 20 \times 2$ мм³). При традиционной лазерной обработке независимо от потерь излучения большая часть лазерной энергии поглощается материалом. При ЛВО вода поглощает и частично отражает излучение. В зоне обработки водяная струя отстает от лазерного луча на 1 мм, что уменьшает площадь перекрытия зон струи и лазерного излучения и вызывает дополнительную потерю энергии излучения.

Во время обработки лазерная головка и водоструйное сопло были смещены: лазерная головка была установлена перпендикулярно поверхности материала, а струя воды наклонена под варьируемым углом к его поверхности. Чтобы изучить влияние параметров ЛВО на ее результаты, использовался метод контролируемых переменных (см. таблицу). Во всех случаях угол струи воды составлял 60°. Например, для изучения влияния длительности лазерного импульса на канавку реза все другие параметры, такие как уровень излучения, частота повторения лазерных импульсов и скорость водяной струи оставались неизменными. В представленной работе в основном исследуется влияние таких параметров ЛВО на ее результаты, как величина тока лазера, длительность лазерных импульсов и частота их повторения, а также влияние скорости водяной струи на глубину канавки.

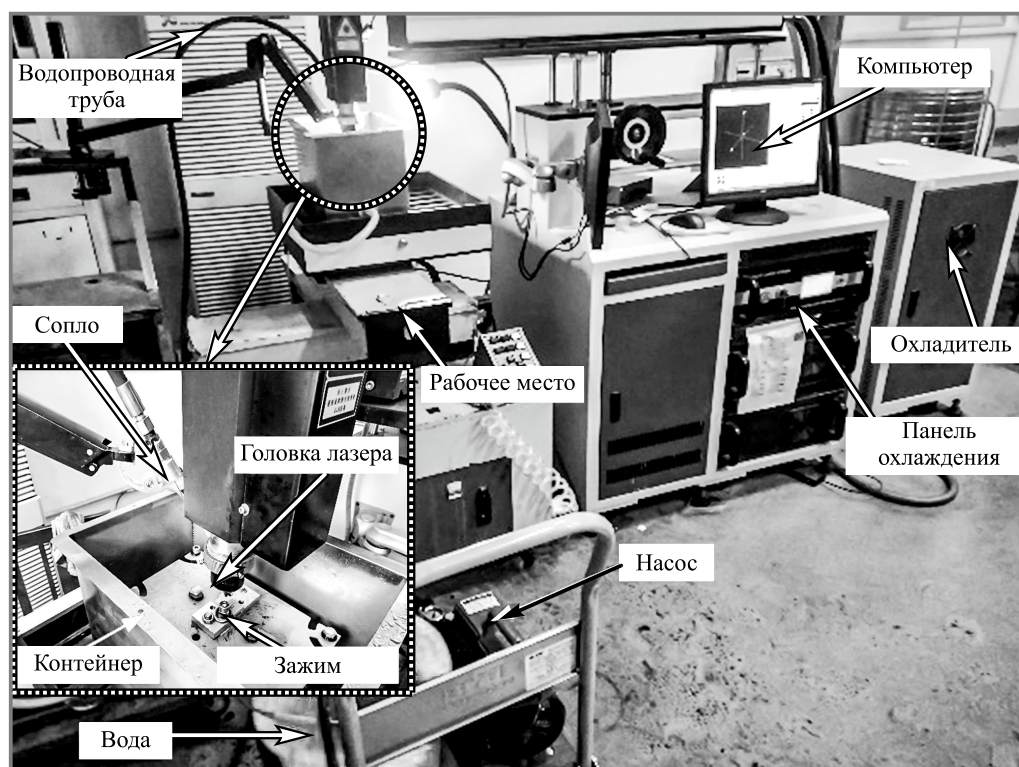


Рис. 5. Схема устройства для травления материала под действием лазерного излучения с подачей водяной струи.

Таблица
План проведения экспериментов по методу контролируемых переменных

Номер	Ток, А	Длительность импульса, мс	Частота повторения, Гц	Скорость водяной струи, м/с
1	100/110/120/130	0,7	30	20
2	120	0,3/0,5/0,7/0,9	30	20
3	120	0,7	10/20/30/40	20
4	120	0,7	30	12/16/20/24

3. Анализ экспериментальных результатов

При ЛВО кремния подача воды позволяет значительно уменьшить зону термического воздействия и шлакообразование. Между тем разные параметры излучения лазера и скорость водяной струи по-разному влияют на результаты обработки. В настоящей работе изучается влияние различных параметров излучения, таких как величина тока лазера, длительность лазерного импульса, частота повторения импульсов и скорость водяной струи, на глубину канавки реза при подаче водяной струи.

3.1. Изучение влияния тока лазера на результаты обработки

Из рис. 6 видно, что по мере увеличения силы тока глубина канавки кремния, подвергнутого ЛВО, постепенно увеличивается. Анализ показывает, что энергия излучения в точке пятна засветки возрастает при увеличении лазерного воздействия. Также

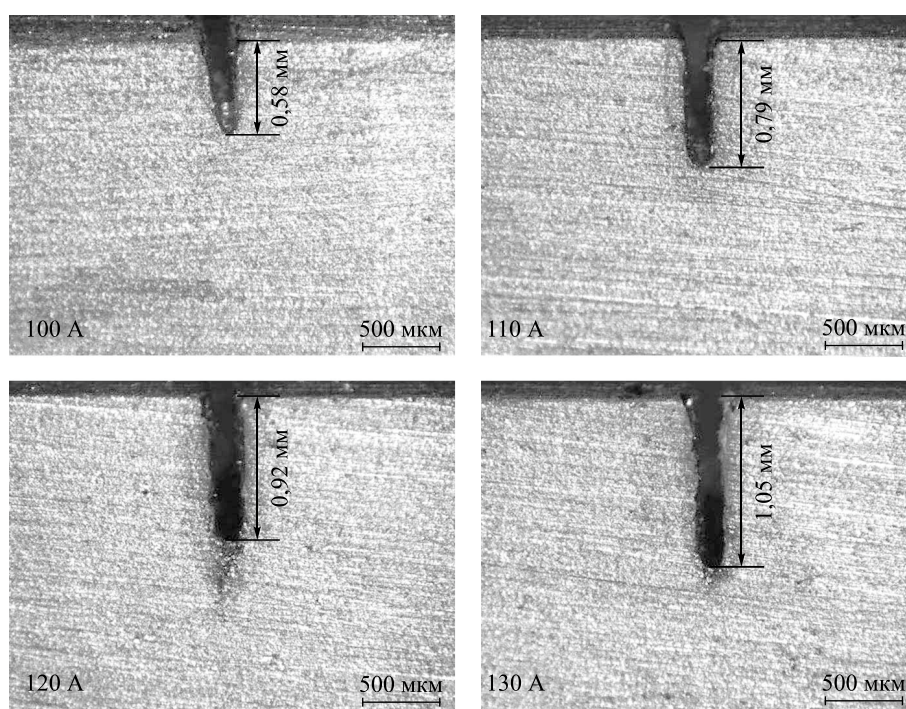


Рис. 6. Влияние силы тока на глубину канавки.

увеличивается общая выходная мощность лазера и энергия излучения, действующая на материал. Вследствие этого глубина канавки увеличивается (при условии сохранения неизменными других параметров процесса).

3.2. Изучение влияния длительности импульса лазера на результаты обработки

Из рис. 7 видно, что при увеличении длительности импульса при ЛВО кремния имеет место постепенное увеличение глубины канавки. Это связано с тем, что при сохранении других параметров лазерного излучения неизменными увеличение длительности лазерных импульсов приводит к увеличению продолжительности действия лазера на поверхность материала, а с нею возрастает и плотность энергии излучения, воздействующего на поверхность. В результате глубина канавки постепенно увеличивается.

3.3. Изучение влияния частоты повторения импульсов лазера на результат обработки

Из рис. 8 видно, что с увеличением частоты повторения импульсов облучения глубина канавки сначала увеличивается, а затем уменьшается. Анализ показывает, что с увеличением частоты повторения импульсов излучения увеличивается полное количество импульсов лазера, а вместе с ним и энергия, воздействующая на поверхность материала в единицу времени. Это приводит к увеличению глубины канавки. Из рисунка также видно, что с увеличением частоты повторения импульсов растет количество накапливаемого шлака. При увеличении частоты повторения импульсов до 40 Гц глубина канавки уменьшается. При дальнейшем увеличении частоты повторения,

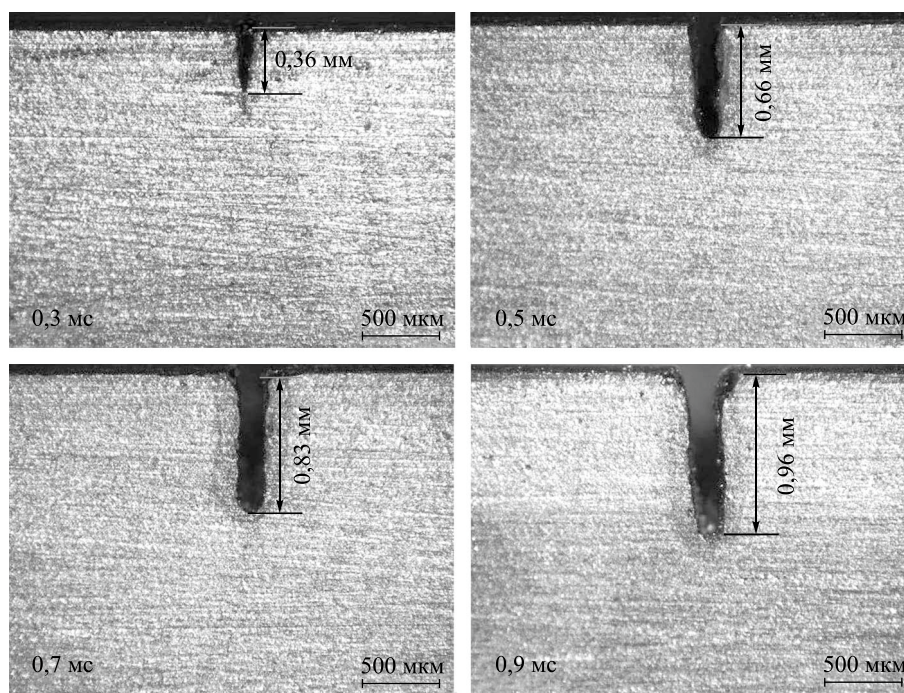


Рис. 7. Влияние длительности лазерного импульса на глубину канавки.

несмотря на то, что энергия излучения, действующего на поверхность материала в единицу времени, является относительно большой, количество шлака, образующегося при обработке, превышает то количество, которое может унести/сдуть поток

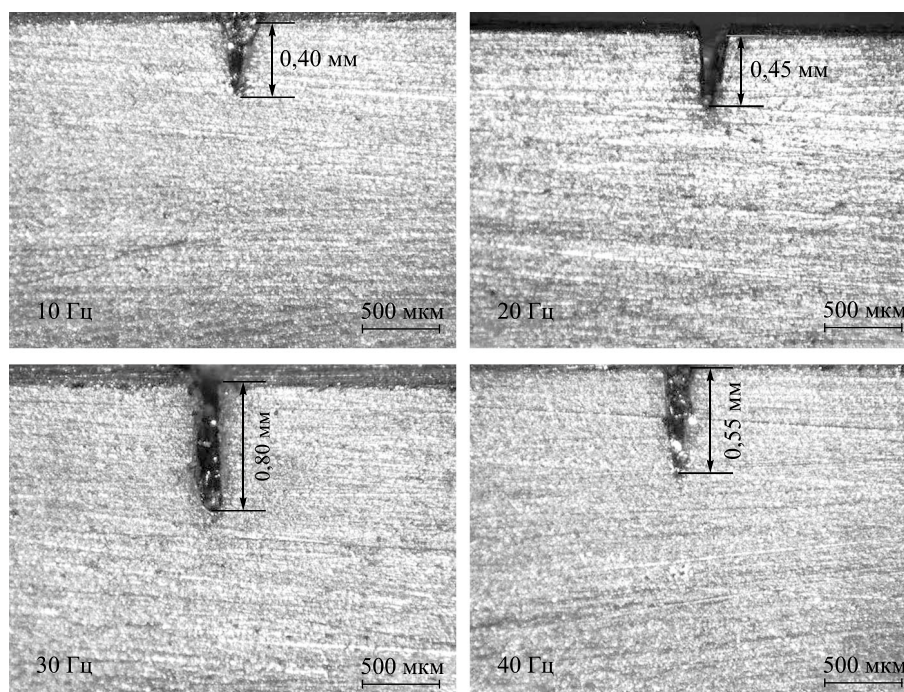


Рис. 8. Влияние частоты повторения лазерных импульсов на глубину канавки.

вспомогательного газа, вследствие чего происходит накопление шлака. Накопившийся шлак влияет на последующую обработку материала, и поэтому глубина канавки имеет тенденцию к уменьшению.

3.4. Изучение влияния скорости водяной струи на результат обработки материала

Рассмотрев совместно рис. 2 и 4, можно отметить следующее. С одной стороны, по мере увеличения скорости водяной струи коэффициент конвективной теплопередачи постепенно увеличивается и большее количество энергии излучения поглощается водой. Вследствие этого энергия излучения, падающего на поверхность кремния, уменьшается, что приводит к уменьшению глубины канавки. С другой стороны, по мере увеличения скорости водяной струи воздействие воды на поверхность материала становится более выраженным. При ЛВО с увеличением силы удара по канавке по мере возрастания скорости струи глубина канавки теоретически должна увеличиваться ввиду того, что после лазерной обработки ее продукты, такие как переплавленный шлак, в принципе можно за короткое время смыть струей воды. Это не только уменьшит поглощение энергии излучения шлаком, но и будет препятствовать накоплению шлака внутри канавки, что напрямую увеличит глубину канавки. Результаты эксперимента показаны на рис. 8.

Из рис. 9 видно, что при ЛВО кремния по мере возрастания скорости водяной струи глубина реза канавки сначала увеличивается, а затем уменьшается. При скорости водяной струи 16 м/с глубина канавки достигает наименьшего значения. Анализ показывает, что в этом случае между струей воды и лазерным излучением имеет место сильный конвекционный теплообмен. Хотя струя воды также оказывает воздействие на материал, однако в силу преобладания отмеченного теплообмена большое количество энергии излучения

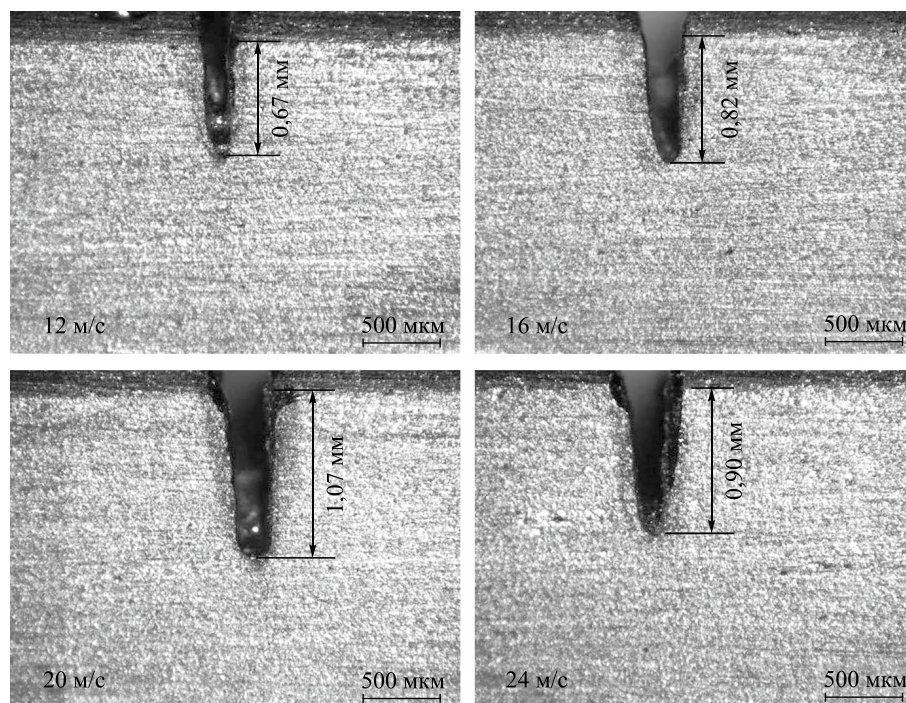


Рис. 9. Влияние скорости водяной струи на глубину канавки.

лазера поглощается водой, поэтому глубина канавки оказывается небольшой. При увеличении скорости водяной струи до значения 20 м/с достигается максимальная глубина канавки. Анализ показывает, что в этом случае струя воды оказывает сильное воздействие на материал. Несмотря на существование сильного конвективного теплообмена между струей воды и лазерным излучением сила удара налетающей на заготовку воды сильно возрастает из-за высокой скорости струи. При этом воздействие водяной струи является доминирующим и расплавленный после воздействия лазера шлак за короткое время уносится из канавки, в результате чего поглощение энергии излучения шлаком уменьшается и глубина канавки оказывается небольшой. При увеличении скорости водяной струи до 24 м/с глубина канавки уменьшается. Анализ показывает, что хотя воздействие струи воды на материал в этом случае увеличивается и также присутствует указанный сильный конвективный теплообмен, однако экспериментальная водоструйная установка испытывает сильную вибрацию из-за высокой скорости водяной струи. Когда струя воды ударяется о материал, центр удара струи смещается. Когда этот центр попадает на поверхность материала, водяной поток сильно расходится, что влияет на пятно фокусировки лазера, в результате чего потери энергии лазера увеличиваются, а глубина канавки оказывается малой.

Выводы

С использованием метода контролируемых переменных изучено влияние параметров лазерного излучения и водяной струи на глубину обработки материала. В случае ЛВО водяная струя обеспечивает ударные и охлаждающие эффекты. Охлаждающее действие водяной струи приводит к уменьшению энергии излучения, воздействующей на поверхность материала, что способствует уменьшению глубины формирующейся канавки. Помимо этого, струя воды вымывает образованный под действием лазера шлак из зоны обработки, в результате чего глубина канавки увеличивается. Основные результаты исследования могут быть сформулированы следующим образом.

1. При увеличении тока лазера глубина канавки, полученная при ЛВО кремния, увеличивается (при силе тока 100, 110, 120 и 130 А глубина канавки составила 0,58, 0,79, 0,92 и 1,05 мм соответственно).
2. При увеличении длительности лазерных импульсов глубина канавки, полученной при ЛВО кремния, увеличивается (при длительности лазерного импульса 0,3, 0,5, 0,7 и 0,9 мс, глубина канавки составила 0,36, 0,66, 0,83 и 0,96 мм соответственно).
3. При увеличении частоты повторения лазерных импульсов глубина канавки, полученной при ЛВО кремния, сначала увеличивается, а затем уменьшается (при частоте повторения импульсов 10, 20, 30 и 40 Гц глубина канавки составила 0,40, 0,45, 0,80 и 0,55 мм соответственно).
4. При увеличении скорости водяной струи глубина канавки, полученной при ЛВО кремния, увеличивается (при скорости водяной струи 12, 16, 20 и 24 м/с глубина канавки составила 0,67, 0,82, 1,07 и 0,90 мм соответственно).

Таким образом, ток лазера и скорость водяной струи оказывают наибольшее влияние на глубину канавки. Вторым по силе влияния фактором является длительность лазерных импульсов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: Ш.Х. Чен спроектировал исследование, Ю.Л.Чен и Х.Э. Ли разработали методологию, С. Ли написал рукопись.

Список литературы

1. Song H., Pan P., Ren G., Yang Z., Xu J. SPH/FEM modeling for laser-assisted machining of fused silica // Intern. J. Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 106. P. 2049–2064.
2. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Урбах А.Э., Фалеев В.А., Чередниченко В.С. Синтез нанопорошков карбида кремния в двухструйном плазмохимическом реакторе // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 3. С. 473–482.
3. Adelman B., Ngo C., Hellmann R. High aspect ratio cutting of metals using water jet guided laser // Intern. J. Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 80. P. 2053–2060.
4. Behera R.R., Sankar M.R. State of the art on under liquid laser beam machining // 4th Intern. Conf. on Materials Proc. and Characterization. Materials Today Proc. 2015. Vol. 2, No. 4–5. P. 1731–1740.
5. Bao J., Long Y., Tong Y., Yang X., Zhang B., Zhou Z. Experiment and simulation study of laser dicing silicon with water-jet // Applied Surface Sci. 2016. Vol. 387, No. 30. P. 491–496.
6. Zhu H., Wang J., Yao P., Huang C. Heat transfer and material ablation in hybrid laser-waterjet microgrooving of single crystalline germanium // Intern. J. Machine Tools and Manufacture. 2017. Vol. 116. P. 25–39.
7. Wang L., Huang C., Wang J., Zhu H., Liang X. An experimental investigation on laser assisted waterjet micro-milling of silicon nitride ceramics // Ceramics Intern. 2017. Vol. 44, No. 5. P. 5636–5645.
8. Sun D., Han F., Ying W. The experimental investigation of water jet-guided laser cutting of cfrp // The Intern. J. Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 102. P. 719–729.
9. Zhou J., Huang Y.X., Zhao Y.W., Jiao H., Long Y.H. Study on water-assisted laser ablation mechanism based on water layer characteristics // Optics Communications. 2019. Vol. 450. P. 112–121.
10. Jiang T., Yang C., Yu Y., Lou Y., Liu J., Ma Y. Water-jet assisted laser cutting of korean pine (pinus koraiensis): process and parameters optimization // BioResources. 2020. Vol. 15, No. 2. P. 2540–2549.
11. Guo B., Zhang J., Wu M., Wang J. Water assisted pulsed laser machining of micro-structured surface on CVD diamond coating tools // J. Manufacturing Processes. 2020. Vol. 56. P. 597–601.
12. Charee W., Tangwarodomnukun V. Laser ablation of silicon in water at different temperatures // The Intern. J. Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 107, No. 5. P. 2333–2344.
13. Soliman W. Laser ablation of stainless steel in water and hexane: characterization of surface modification and nanoparticles for various applications // Surface Engng and Applied Electrochemistry. 2020. Vol. 56, No. 2. P. 133–139.
14. Webb B., Ma C. Single-phase liquid jet impingement heat transfer // Advances in Heat Transfer. 1995. Vol. 26, No. 8. P. 105–217.
15. Shigechi T., Ito T., Nishikawa K. Forced convection film boiling heat transfer from a horizontal cylinder to liquid cross-flowing upward: 2nd report, subcooled liquid // JSME Intern. J. 2008. Vol. 26, No. 214. P. 554–561.
16. Chen X., Li X., Song W., Wu C., Zhang Y. Effects of a low-pressure water jet assisting the laser etching of polycrystalline silicon // Applied Physics A. 2018. Vol. 124, No. 8. P. 556-1–556-14.
17. Huang F., Lu Y., Liu X., Ao X., Li L. Breakage mechanism of transverse isotropic rock subjected to high-pressure water jet // Chinese J. Rock Mechanics & Engng. 2014. Vol. 33, No. 7. P. 1329–1335.

*Статья поступила в редакцию 10 ноября 2020 г.,
после доработки — 23 января 2021 г.,
принята к публикации 23 марта 2021 г.*