

Исследование процессов обработки монокристаллов HPHT-алмазов наносекундным волоконным лазером

Г. В. Шаронов, Г. А. Гусаков

Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, e-mail: sharonovgv@yandex.by

Разработана экспериментальная установка по лазерной разметке и резке монокристаллов HPHT-алмазов и подложек с использованием импульсного наносекундного волоконного лазера. Исследование процессов лазерной резки алмазных подложек показало, что с увеличением глубины пропила эффективность резания резко снижается за счет перефокусировки лазерного луча и затруднения поступления кислорода воздуха в зону обработки. Предложена методика горизонтально-сдвиговой и послойно-вертикальной обработки HPHT-алмазов, позволяющая повысить качество и производительность процесса резки.

Ключевые слова: синтетический алмаз; волоконный лазер; лазерная абляция.

Study of HPHT diamonds treatment by a nanosecond fiber laser

G. V. Sharonov, G. A. Gusakov

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: sharonovgv@yandex.by

An experimental equipment has been developed for laser marking and cutting of HPHT diamond single crystals and substrates using a nanosecond Q-switched fiber laser. A study of the processes of laser cutting of diamond substrates showed that with increasing cutting depth, cutting efficiency sharply decreases due to refocusing of the laser beam and difficulty in the entry of air oxygen into the processing zone. A method of horizontal-shear and layer-by-layer vertical processing of HPHT diamonds has been proposed, which allows to improve the quality and productivity cutting process.

Keywords: synthetic diamond; fiber laser; laser ablation.

Введение

Современный технический уровень индустриально развитых стран в значительной степени зависит от объемов и структуры потребления сверхтвердых материалов и алмазов в различных отраслях промышленности. Положительные прогнозы, связанные с экономической эффективностью использования алмаза в оптике, фотонике и электронике, основываются на уникальном сочетании оптических, механических и электрофизических свойств этого кристалла [1]. Монокристаллы алмазы используются в качестве материала подложек при изготовлении различных оптоэлектронных устройств. Кроме того, с использованием однокристалльного алмазного инструмента освоена технология получения зеркальных оптических поверхностей на цветных металлах и сплавах [2]. Дальнейшее расширение областей применения алмаза в оптоэлектронике требует совершенствования технологии прецизионной обработки его поверхности [1–3]. Однако из-за чрезвычайной твердости и износостойкости алмаза механическая обработка его поверхности является

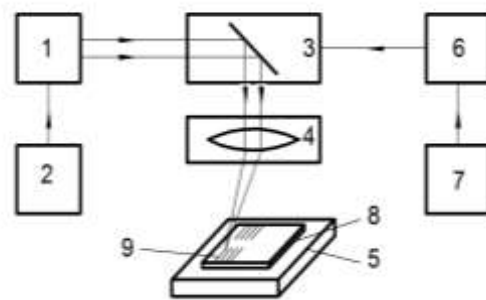
принципиально сложной задачей. Механическая полировка с использованием алмазных абразивов, обычно применяемая при шлифовке и полировке природных и синтетических алмазов, не удовлетворяет требованиям по качеству обработки поверхности, предъявляемым к изделиям электронной техники [1, 3]. За последние десятилетия широко признана эффективность использования импульсного лазерного облучения для резки и полировки алмазов [4]. Лазерная абляция алмаза происходит путем графитизации поверхности за счет комбинированного термического и фотохимического воздействия с последующей сублимацией и окислением предварительно сформированного графита [4, 5]. В настоящее время в инструментальной и ювелирной промышленности для обработки алмазов используются твердотельные лазеры на иттрий-алюминиевом гранате Nd³⁺:YAG [4]. В последнее время появились сообщения про использование для этих целей импульсных частотных волоконных лазеров [6]. Волоконные лазеры обладают рядом преимуществ – это КПД более 30 %, регулируемая в широких пределах частота следования и средняя выходная мощность, компактность, надежность и высокий ресурс эксплуатации. Однако, несмотря на очевидную перспективность волоконные лазеры еще не нашли широкого применения в технологии обработки алмаза. Исходя из этого, настоящая работа посвящена исследованию процессов обработки монокристаллов синтетического алмаза с использованием наносекундного волоконного лазера.

1. Материалы и методы

В качестве материала для изготовления подложек применяются крупные монокристаллы алмаза массой $\geq 0,8$ карат, выращенные на аппаратах высокого давления (АВД) «разрезная сфера» методом температурного градиента (НРНТ-метод) при температуре 1500°C и давлении 5,5 ГПа в системах металла-катализатора Ni-Fe-C [7].



а)



б)

1 – лазер; 2 – блок питания и управления; 3 – сканирующий гальванометр; 4 – оптический блок; 5 – предметный столик; 6 – контроллер; 7 – персональный компьютер; 8 – подложка из НРНТ-алмаза; 9 – линия реза

Рис. 1. Общий вид (а) и структурная схема (б) экспериментальной установки резки НРНТ-алмазов наносекундным волоконным лазером

Для обработки подложек из НРНТ-алмазов использовалась экспериментальная установка на основе импульсного волоконного лазера (рис. 1). В состав уста-

новки входят: импульсный наносекундный волоконный лазер Raycus RFL-P50QB/A5/130/3 (1, 2), сканирующий гальванометр SG7210 (3), оптический блок F-theta OPEX SL -1064-70-100G (4), предметный столик с подъемной осью 500 мм по Z (5), контроллер VJCFIBER-M (6) и персональный компьютер (7).

Лазерный источник, использованный в этом исследовании, работал на длине волны $\lambda = 1070$ нм и имел длительность импульса порядка 200 нс по уровню 0,5. Частота следования лазерных импульсов могла изменяться в диапазоне 30...60 кГц а средняя мощность лазерного излучения – в диапазоне 10...50 Вт. Рабочий диапазон сканирования гальванометра в этой системе составлял 65×65 мм, а скорость сканирования могла изменяться в широком диапазоне от 1 до 1500 мм/с.

2. Результаты и обсуждение

На первом этапе были проведены исследования влияния рабочих параметров обработки волоконного лазера на глубину пропила заготовки НРНТ-алмаза. Эти исследования имели целью достижение наибольшей эффективности резки. Для проведения экспериментов нами была выбрана самая низкая частота следования импульсов 30 кГц, чтобы иметь максимальную энергию импульса и максимальную пиковую мощность в режиме модуляции добротности. Средняя мощность лазерного излучения была зафиксирована на уровне 20 Вт. Глубина пропила контролировалась при помощи оптического микроскопа в месте выхода лазерного луча на торце алмазной подложки.

При фиксированной частоте повторения импульсов, скорость сканирования будет влиять на количество энергии, переданной лазером в область обработки. При высокой скорости сканирования площадь перекрытия импульсов мала, что приводит к образованию прерывистой гофрированной поверхности на линии, а при низкой скорости сканирования площадь перекрытия импульсов значительна и качество линии реза должно быть выше. Кроме того, увеличение скорости сканирования лазерного луча должно приводить к снижению средней плотности энергии, накопленной в приповерхностной области подложки, и тем самым снижать эффективность резания. Проведенные нами эксперименты при однократном прохождении лазерного луча по поверхности алмазной подложки показали, что действительно при снижении скорости сканирования наблюдается увеличение глубины пропила. Однако, при скорости сканирования ниже 5 мм/с глубина пропила практически не изменяется. Это объясняется тем, что накопление лазерной энергии достигло предела абляции алмаза. Поэтому скорость сканирования 5 мм/с была принята в качестве рабочего параметра для последующего тестирования.

Исследование влияния количества проходов лазерного луча на глубину пропила показало, что на начальном этапе резки глубина пропила практически линейно увеличивается с ростом количества проходов. Однако, когда количество проходов лазерного луча на одну траекторию превышает 5, эффективность резания резко снижается. На рис. 2 видно, что если для 5 проходов лазерного луча глубина канала прореза составляет 230 мкм, то для 30 проходов – всего 320 мкм. Этот эффект, по-видимому, связан с тем, что начальное увеличение глубины пропила приводит к перефокусировке лазерного луча материала в нижних слоях, подвергающихся облучению лазерным лучом. Расходимость пучка за плоскостью фокусировки и

поглощение части излучения на стенках канала приводит к снижению плотности энергии лазера в этой перефокусированной области ниже порога абляции материала, что в свою очередь приводит к уменьшению скорости съема материала и ухудшению качества обработки поверхности. Кроме того, согласно теории [4, 5] при облучении алмаза интенсивными лазерными пучками происходит два последовательных процесса: превращение алмаза в графит и последующее испарение этого графитизированного материала. Скорость испарения графитизированного углерода усиливается при обработке алмаза на воздухе за счет окисления его поверхности с образованием летучих компонент [5]. При увеличении глубины пропила затрудняется взаимодействие графитизированного материала в зоне обработки с кислородом воздуха.

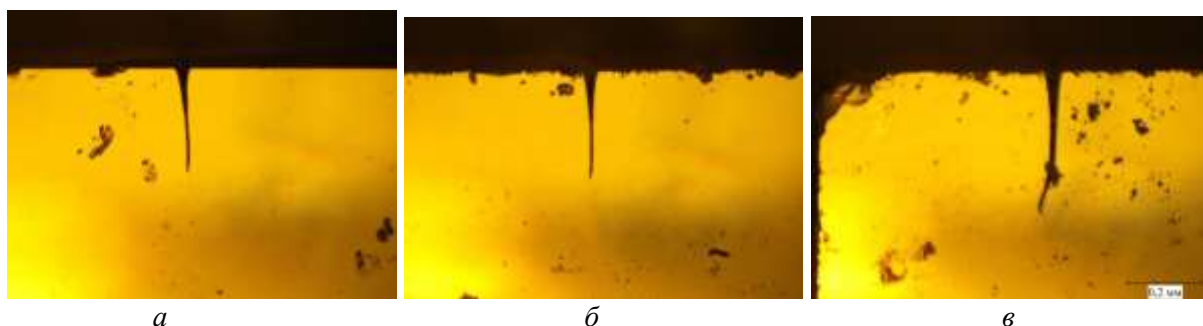


Рис. 2. Фото V-образного канала прореза торца подложки волоконным лазером после 5 проходов лазерного луча (а), после 10 проходов (б) и после 30 проходов (в)

Для повышения эффективности резки было предложено проводить обдув зоны обработки сжатым воздухом. Однако, вследствие узости канала прореза это не привело к значительному увеличению скорости резания. Поэтому при проведении резки заготовок из НРНТ-алмазов для расширения ширины V-образного дна использован метод обработки путем пошагового горизонтального сдвига с послойной вертикальной обработкой [6]. Расширенное дно V-образной формы облегчает продувку через него вспомогательного газа и удаление расплавленного материала в процессе лазерной резки. В дополнение к смещению сканирования гальванометра слева направо во время обработки также необходимо использовать столик позиционирования заготовки по оси Z. При послойной обработке поверхность каждого слоя поднимается на высоту положения фокуса лазера по оси Z, что позволяет нивелировать эффект перефокусировки. Схематическое изображение процесса резки показано на рис. 3.

В результате проведенных экспериментов был определен оптимальный технологический регламент резки заготовок из НРНТ-алмазов. Послойная обработка проводится путем 10 проходов на одну траекторию лазерного луча при скорости сканирования (1–5) мм/сек. Количество линий реза – 7, с расстоянием между ними (10–15) мкм, количество слоев – до 10, с расстоянием между ними (50–100) мкм. С использованием предложенного метода были проведены исследования по лазерной резке заготовки НРНТ-алмазов размером (4×4) мм и толщиной 1 мм. Среднее время распила при 10-слойном вертикальном перемещении заготовки составило порядка 7 минут.

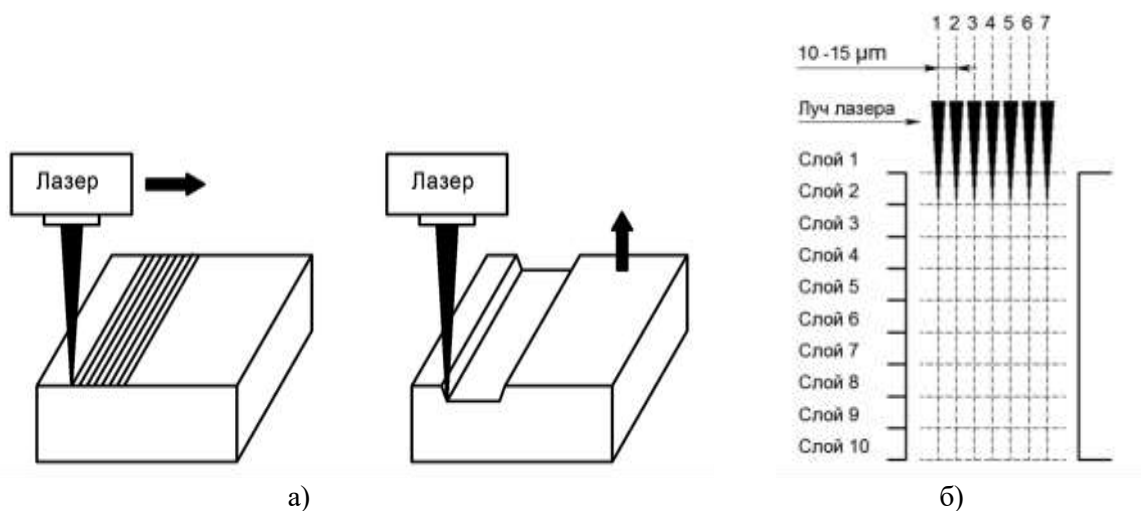


Рис. 3. Схема лазерной резки с использованием пошагового горизонтального сдвига с послойной вертикальной обработкой. (а) Лазерная резка осуществляется по программе путем последовательного разрезания заготовки со сдвигом вправо луча на 10–15 мкм, с общим количеством разрезов, равным 7, с общим сдвигом порядка 90 мкм. (б) После обработки первого слоя лазерный луч переключается обратно в первоначальное положение с подъемом на 70 мкм по оси Z, после обработки первого слоя процесс резки повторяется, пока заготовка не будет прорезана

Заключение

В результате проведенных исследований показана возможность использования импульсного частотного наносекундного волоконного лазера для размерной обработки монокристаллов НРНТ-алмаза. Установлено, что при лазерной резке алмазных подложек с увеличением глубины пропила эффективность резания резко снижается за счет перефокусировки лазерного луча и затруднения поступления кислорода воздуха в зону обработки. Предложена методика горизонтально-сдвиговой и послойно-вертикальной обработки НРНТ-алмазов, позволяющая повысить качество и производительность процесса резки.

Библиографические ссылки

1. Integrated photonic devices in single crystal diamond / S. Mi [et al.] // J. Phys. Photonics. 2020. V. 2. P. 042001 (26 pp).
2. Горохов В. Повышение точности деталей металлооптики при алмазном точении на ультрапрецизионном оборудовании / В. Горохов, Е. Захаревич, М. Скворцова // Фотоника. 2014. № 1. С. 118–123.
3. Hicks M. L. Polishing, preparation and patterning of diamond for device applications / M. L. Hicks, A. C. Pakpour-Tabrizi, R. B. Jackman // Diam. Relat. Mater. 2019. V. 97. P. 107424 (29 pp).
4. Konov V. I. Laser in micro and nanoprocessing of diamond materials // Laser and Photonics Reviews. 2012. V. 6, № 6. P. 739–766.
5. Rothschild M. Excimer-laser etching of diamond and hard carbon films by direct writing and optical projection / M. Rothschild, C. Arnone, D. J. Ehrlich // Journal of Vacuum Science & Technology B. 1986. V. 4, № 1. P. 310–314.
6. Chang F.-Y. Nanosecond-Fiber Laser Cutting and Finishing Process for Manufacturing Polycrystalline Diamond-Cutting Tool Blanks / F.-Y. Chang; C.-F. Hsu; W.-H. Lu // Appl. Sci. 2021 V. 11. P. 5871 (22 pp).
7. Выращивание крупных кристаллов алмаза на беспрессовых аппаратах типа «разрезная сфера» / Ю. Н Пальянов [и др.] // ДАН СССР. 1990. Т. 315. С. 1221–1224.