

МИКРООБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ПИКОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРАМИ

Ф.Бахманн, Д.Мюллер, Б.Клинт, Р.Кнаппе,
LUMERA Laser GmbH, Германия, www.lumera-laser.com

Пикосекундные лазеры готовы изменить мир микрообработки. Благодаря своему непревзойденному качеству пикосекундные (PS) лазеры позволяют выйти на новый уровень точности микрообработки в различных промышленных приложениях – микроэлектронике, полупроводниковой и фотоэлектрической индустрии. Самые мощные PS-лазеры компании LUMERA Laser семейства RAPID в зависимости от конкретного применения имеют разные значения мощности и частоты следования импульсов. Импульсы лазеров LUMERA RAPID длительностью менее 15 пс позволяют избежать нежелательных тепловых эффектов. С помощью этих лазеров за одну минуту можно удалить 10 мм³ любого твердого труднообрабатываемого материала. А скорость абляции стекла при обработке PS-импульсами превышает 50 мм³ в минуту.

Механизм взаимодействия излучения PS-лазеров с материалами отличается от привычного линейного закона поглощения. Мультифотонный процесс обеспечивает

сильное поглощение даже в прозрачных средах. Такие нежелательные побочные тепловые эффекты, как заусенцы, перекристаллизации и микротрещины, при обработке материалов ультракороткими импульсами пикосекундной длительности отсутствуют. Отличные характеристики

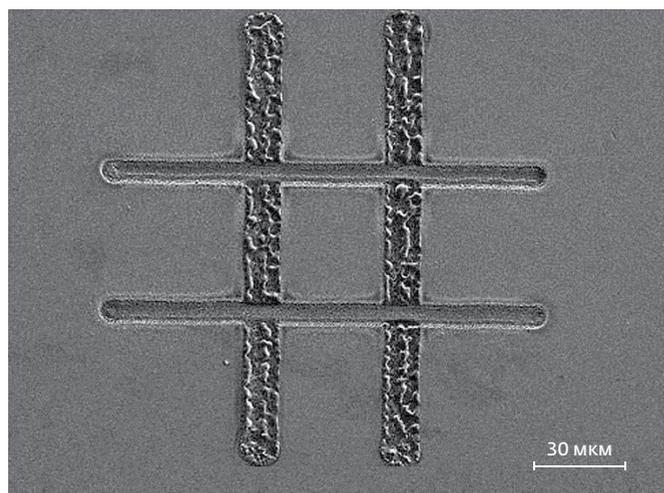


Рис.1. Абляция тонкой (4 мкм) Cr-пленки на фотолитографической маске наносекундным (NS-) лазером (вертикальные линии) и PS-лазером (горизонтальные линии)

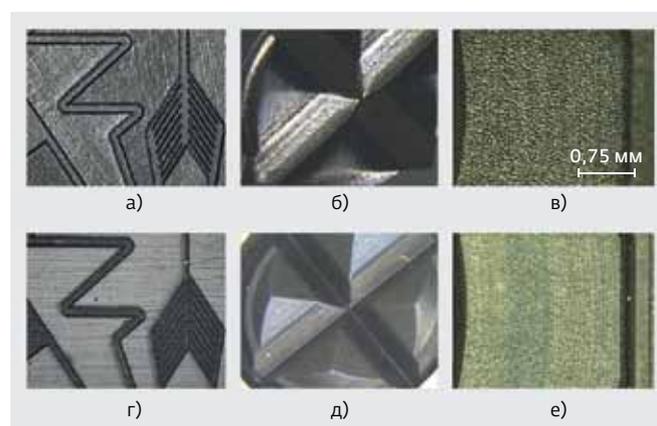


Рис.2. Сравнение поверхностей, обработанных NS- (а-в) и PS-лазером (г-е) с точки зрения выполнения контурного рисунка (а,г), точности (б,д) и качества поверхности (в,е)

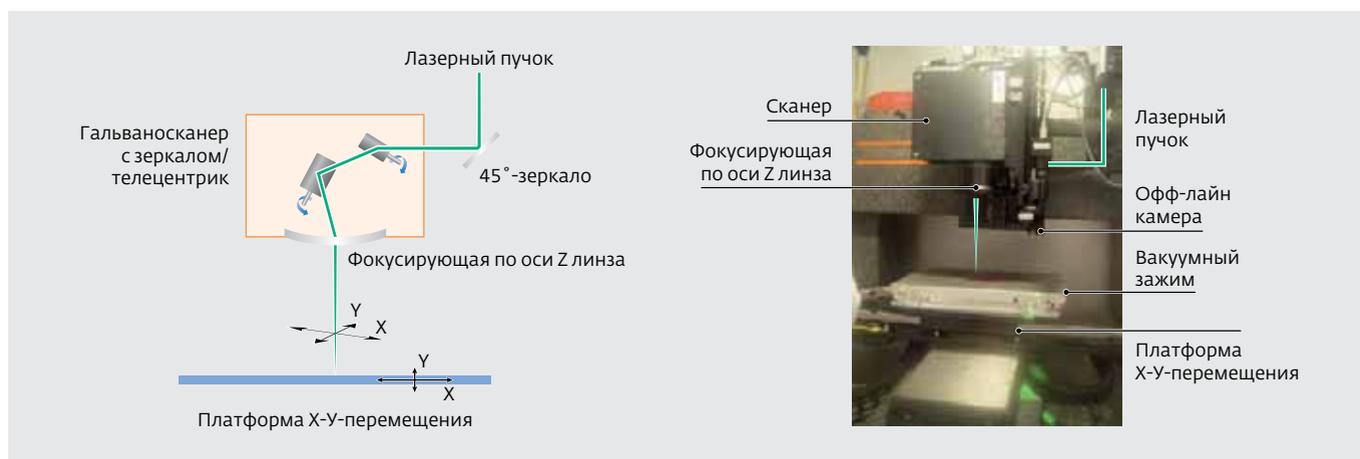


Рис.3. Типичная установка для доставки излучения PS-лазера в зону обработки детали

PS-лазеров – высокая частота (1 МГц и выше) следования импульсов со средней мощностью в несколько десятков ватт и отличное качество пучка – обеспечивают их широкое использование в промышленных масштабах. Самые мощные PS-лазеры производства LUMERA Laser вырабатывают мощность более 75 Вт при частоте повторения 1 МГц.

ВВЕДЕНИЕ

Впервые "холодная абляция" была открыта и описана группой Р.Сринивасана около 30 лет назад в работе [1], где он структурировал полиэтилен-терефталат (ПЭТФ) с помощью УФ-излучения и наноимпульсного ArF-эксимерного лазера. Механизм абляции рассматривался как сильное поглощение излучения внутри тонкого слоя материала за короткий промежуток времени

(что объясняло причину необходимого совмещения УФ-света и наносекундных импульсов). Согласно предположениям, это вызывало нарушение связей и немедленное "взрывное испарение" материала. Известно было, что такие процессы широко применяют для удаления органических тканей, особенно для коррекции близорукости в офтальмологии [2], структурирования фоторезиста [3] и абляции полимеров в печатных платах [4]. Однако подобный процесс дает не очень хорошие результаты при обработке других материалов, как, например, стекло, керамика или металл. К счастью, появление ультракороткоимпульсных (УКИ) лазеров с длительностью импульса от 10 до 15 пс позволило преодолеть подобные ограничения, ведь эти лазеры могли обеспечить настолько высокую пиковую мощность, что появлялось многофотонное поглощение. Эффект от его появления

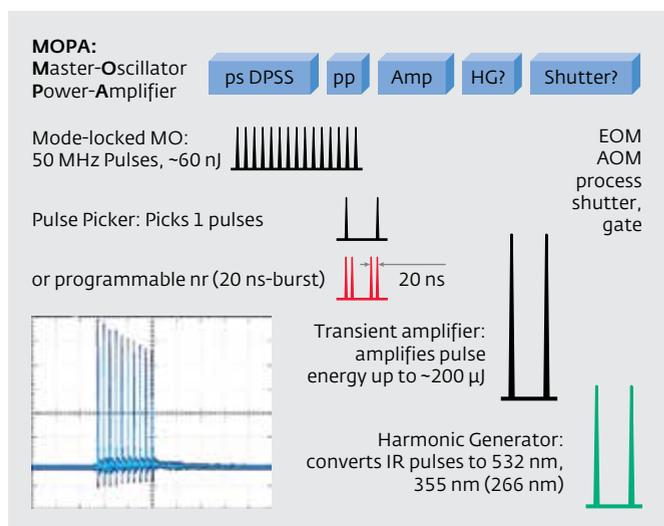


Рис.4. Принцип работы лазеров серии RAPID

практически исключает линейную зависимость от интенсивности процесса поглощения материала и влияние на него длины волны излучения. Кроме того, высокая напряженность электрического поля световой волны PS-лазера, превосходящая напряженность кулоновского поля, удерживающего электрон в атоме, заставляет легкие электроны покинуть атомы. Электрон приобретает движение вдоль распространения световой волны, и новый режим взаимодействия света с веществом приводит к тому, что в материале почти не сохраняется остаточное тепло. Таким образом, практически любой материал можно обработать почти без побочных тепловых эффектов. По этой причине УКИ-лазеры очень хорошо подходят для высокоточной обработки термочувствительных материалов. Впечатляющая разница между обработкой нано- и пикосекундными импульсами продемонстрирована на примере



Рис.5. Сверхскоростной (Hyper RAPID) 75-Вт лазер (слева) генерирует PS- импульсное излучение средней мощности более 75 Вт (длительность импульса 10 пс, максимальная частота следования импульсов 12 МГц) и обеспечивает идеальное качество луча: каустика (в центре) и профиль луча (справа), измерения на длине волны $\lambda = 532$ нм

абляции тонкопленочного материала (рис.1). А рис.2 иллюстрирует различие в качестве поверхности твердых материалов, структурированных этими же инструментами.

УСТРОЙСТВО РАБОЧЕЙ УСТАНОВКИ

В соответствии с описанным механизмом действия излучения УКИ-лазеров на материалы практически все материалы могут быть обработаны подвижным PS-лазерным излучением на высоком качественном уровне! Если плотность энергии на поверхности мишени превышает определенный порог, то каждый импульс, как правило, удаляет слой толщиной от 10 до 100 нм. Этот порог мало меняется в интервале плотностей от 0,1 до 2 Дж/см² в зависимости от типа материала, длины волны и длительности импульса лазера. Имея пятно диаметром 25 мкм с энергией в импульсе 10 мкДж, можно легко добиться такой плотности энергии, что она превысит порог абляции. При взгляде на величину абляции, приходящуюся на один импульс, может создаться впечатление, что удаление материала идет очень медленно. Однако, используя лазер с мегагерцевой частотой повторения импульсов и средней мощностью 50 Вт, можно за одну минуту удалить от 6 до 60 мм³! Такая высокая частота следования импульсов и высокая средняя мощность, с одной стороны, требуют быстрого перемещения луча, способного обеспечить высокую скорость обработки, а с другой – этого же требует необходимость избегать накопления остаточного тепла. Таким образом, конструкция лазерной установки должна обеспечить быстрое сканирование головки с телецентрическим объективом в комбинации с координатным столом, перемещающимся в X-Y(-Z)-направлениях (рис.3). Современные сканирующие головки позволяют перемещать фокус со скоростью до 20 м/с.

ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК

Конструкция типowego высоко-мощного PS-лазера (рис.4) решена в стандартной конфигурации МОРА: задающий генератор импульса – генератор последовательности импульсов – каскад оптических усилителей мощности (Master-Oscillator Power-Amplifier). LUMERA выпускает серию твердотельных лазеров с диодной накачкой и синхронизацией мод – LUMERA RAPID Series. Твердотельный лазер этой

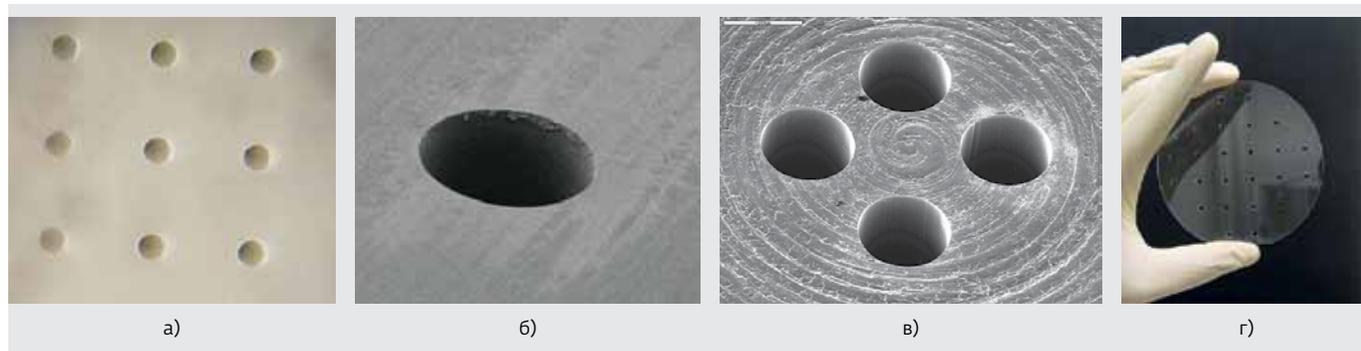


Рис.6. Примеры сверления отверстий в различных материалах ($\lambda=1064$ нм, $P=50$ Вт): а) – отверстия диаметром 100 мкм в керамике Al_2O_3 (толщина 1 мм, скорость: отверстие/с); б) – отверстие диаметром 150 мкм в кремнии (толщина 200 мкм, скорость: пять отверстий/с); в) – отверстия диаметром 250 мкм в нержавеющей стали (толщина 300 мкм, одно отверстие за 5 с); г) – отверстия диаметром 3 мм в боросиликатном стекле (толщина 0,5 мм, около 10 с на одно отверстие)

серии (DPSSL) генерирует последовательность 60 нДж-импульсов длительностью 7 пс с частотой 50 МГц. С помощью электрооптического модулятора (ЕОМ) из последовательности импульсов выбирается отдельный импульс. Этот "индивидуальный" импульс затем усиливается в многоходовом усилителе, при этом его мощность может достигать 250 мкДж. Выбором импульса можно получить и так называемый пакетный режим импульсов, – это небольшая группа импульсов с расстоянием между каждым импульсом всего 20 нс. Тогда единичный импульс (в данном случае 250 мкДж мощности) делится, например, на десять импульсов с соответственно меньшей мощностью в импульсе. Работа с излучением на высших гармониках (532 и 355 нм) легко доступна пользователям прибора – программа обеспечивает переключение излучателя

на нужную длину волны с помощью простого нажатия кнопки.

На фирме LUMERA уже выпущено 247 таких лазеров, их надежная работа позволила приборам перешагнуть порог лабораторных испытаний и выйти на промышленные площадки. Лазеры обеспечивают превосходное качество луча (в TEM_{00} режиме качество луча $M^2 < 1,5$), высокую повторяемость от импульса к импульсу и стабильность средней мощности (интенсивность шумов, вычисляемая через среднее квадратичное значения спектральной плотности мощности – RMS – на частоте 1 МГц составляет значение меньше 1%). Лазеры показывают отличную пространственную стабильность луча (расходимость луча < 50 мкрад/°С) во всем диапазоне PRF (Pulse repetition frequency), частот следования импульсов или число импульсов в единицу времени.

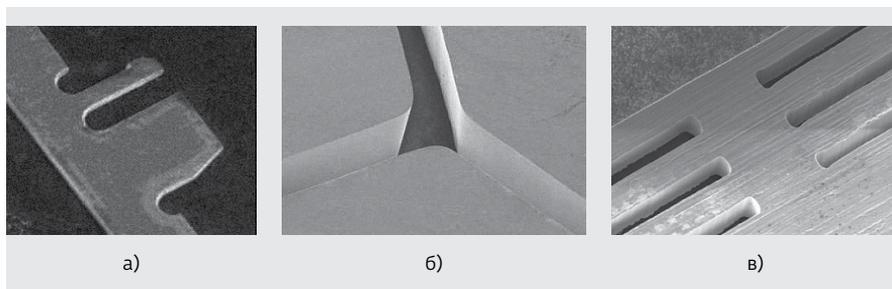


Рис.7. Вырезание сложных контуров: а) объемная полоса, б) прорезь 15 мкм в пластине серебра толщиной 20 мкм, в) канавки 30 мкм в вольфраме толщиной 100 мкм

Эту меру используют в различных технических устройствах во избежание путаницы с единицей частоты в герцах или "циклов в секунду". Пикосекундные лазеры LUMERA (рис.5) имеют высокую выходную мощность, достигающую 80 Вт на основной длине волны $\lambda=1064$ нм.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Описанные выше свойства PS-лазеров определяют ту нишу в производстве, для которой они наиболее всего подходят – это высокоточная обработка небольших структур из твердых, хрупких или термически чувствительных материалов. Следующий ряд рисунков (рис.6–9) иллюстрирует промышленные применения пикосекундных лазеров. С помощью таких лазеров практически в любом материале можно просверлить (или лучше вырезать) очень чистые и точные отверстия (рис.6). Конечно, с помощью PS-лазеров можно получать не только круглые отверстия, но и отверстия сложной конфигурации, которые невозможно сформировать с такой высокой точностью никакими иными технологическими методами (рис.7).

Примером практического приложения сверления PS-лазером стало производство инжекторов для дизельных двигателей (рис.8). Для изготовления инжектора необходимо просверлить форсунки

в деталях сложной формы, выполненных из нержавеющей стали толщиной 1 мм. Три конических отверстия должны быть выполнены с очень высокой точностью, при том что их диаметры с глубиной должны меняться от 60 мкм до 120 мкм (см. рис.7). Для этой операции используют PS-лазер с удвоенной частотой ($\lambda=532$ нм) и выходной мощностью 25 Вт. Сверление одного отверстия занимает 5 с, на один инжектор требуется три

таких отверстия, так что одна деталь может быть завершена в течение 15 с. Или вот, пример других приложений: структурирование и сверление панелей солнечных батарей, сверление печатных плат, нарезка микроэлектронных пластин (wafers), резка закаленного стекла и армированных волокон полимеров (углепластиков).

PS-лазеры также идеально подходят для поверхностного структурирования и для 2,5D обработки. На рис.9 представлены рельефные поверхности, сформированные в различных материалах PS-лазером.

Было отмечено, что несколько пикосекундных импульсов, подаваемых с наносекундным отрывом (пакетный режим) не только повышают по существу скорость абляции, но и улучшают качество микрообработки, например шероховатость поверхности глухих отверстий. Это видно на примере (рис.10) обработки кремния: использование серии из шести последовательных импульсов вместо одного высокомоощного импульса не только увеличивает в 8 раз абляцию, но и значительно улучшает качество поверхности обрабатываемой области.

Как было показано выше, для PS-лазеров уже создано большое количество промышленных приложений, и число задач, где удаление тонких слоев или небольших объемов материала создает

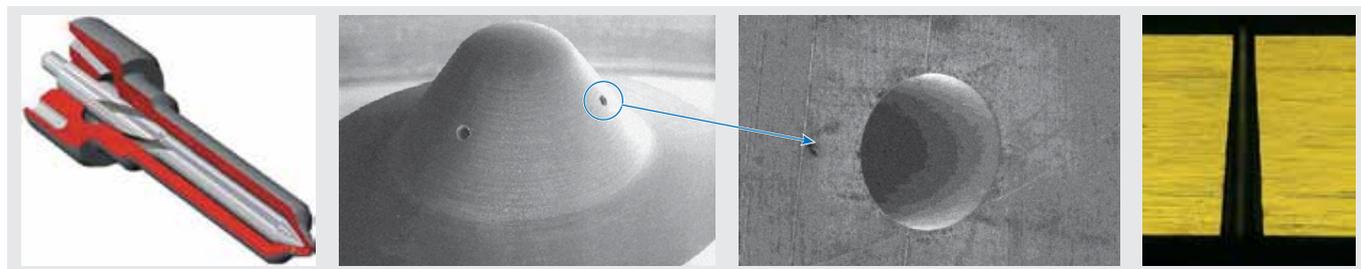


Рис.8. Лазерное сверление дизельных форсунок (фото ExOne)

высокую ценность производимого продукта, стремительно растет! В то же время за последние пять лет стоимость одного фотона снизилась в 10 раз, что превращает PS-лазеры в очень экономичный инструмент, который в одиночку способен конкурировать в цене за выбор инструмента обработки со многими другими. Хотя первоначальные инвестиции для внедрения в производство PS-лазеров достаточной мощности и качества пучка выше, чем для наносекундных лазеров, однако они составляют лишь около 0,25 евро/мин в совокупной стоимости владения. PS-лазер способен почти в течение одной минуты удалить 20 мм³ любого материала, трудно поддающегося машинной обработке, имеющего практически любую жесткость, например, кубического нитрида бора или алмаза, сапфира, стекла или керамики!

ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

Сегодня 50-Вт промышленные PS-лазеры стали уже обычным делом и даже привычны лазеры бóльшей мощности, до 75 Вт, а вскоре с появлением лазеров серии HYPER RAPID возможно появление 100-Вт устройств. Тем не менее, существуют приложения, которые требуют еще более высокой



Рис.9. 2,5 D изображения (рельефы) в различных материалах

мощности, например задачи структурирования больших поверхностей. Где используются такие структурированные поверхности? Например, в тиснении поверхности цилиндров для широкоформатной печати или тиснении цилиндров, служащих для изготовления конструкций подсветки ЖК-дисплеев, или для производства изделий из искусственной кожи и т.д. Такие цилиндры, выполненные из стали, обычно имеют диаметр в несколько десятков сантиметров, длиной от одного до нескольких метров и весом от 7 до 10 тонн. Поверхность, предназначенная

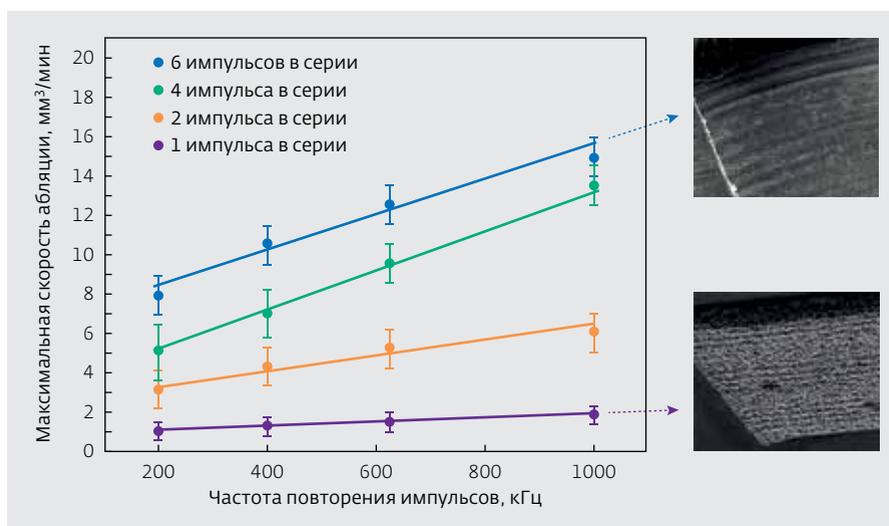


Рис.10. Эффект режима серийной обработки кремния: распределение энергии импульса в последовательности из шести импульсов с 20-нс интервалом увеличивает скорость абляции (слева) и улучшает качество поверхности (справа)

для структурирования – никель, алюминий или сталь. В финансируемых правительством R&D проектах [5, 6, 7] Национального немецкого консорциума лазерных производителей (LUMERA Laser [8], EdgeWave [9]), системных интеграторов (Schepers [10], Saueressig [11]) и Института (Фраунгоферовский институт лазерных технологий [12]) были исследованы процессы, влияющие на увеличение точности и скорости для лазерного структурирования таких рулонов PS-лазерным тиснением. На рис.11 показан цилиндр, у которого алюминиевая поверхность была структурирована с недостижимыми ранее качеством и точностью 80-Вт PS-лазером с частотой повторения импульсов 1 МГц. Время, затраченное на весь производственный цикл, составило около 10 часов [6].

Для доступных сегодня мощных PS-лазеров по экономическим причинам максимальная длина цилиндров ограничена размером около 1 м. Тем не менее, в проекте [6, 13] были также исследованы концепции усиления PS-лазера до более высокой мощности. В лабораторном эксперименте [14] уже был продемонстрирован лазер со средней мощностью, превышающей даже 1 кВт.



Рис.11. Тиснения на цилиндре, структурированные PS-лазером (слева); поверхность с Ni-покрытием (справа) (с любезного разрешения Schepers)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

PS-лазеры уже доказали свой промышленный потенциал в достижении некоторых производственных задач, решаемых в режиме 24/7 (работа 7 дней в неделю по 24 часа в сутки). Существует широкий ряд конкретных приложений, где небольшие структуры могут быть сформированы только с использованием PS-лазеров. Почти каждый материал можно обрабатывать с очень высокой точностью и по разумной цене со скоростью от 6 до 60 мм³ в минуту с такой производительностью, которая необходима в большинстве случаев. Лазерные эксперты, а также аналитики рынка ожидают, что PS-лазеры станут доминирующей технологией

в области лазерной обработки материалов, а рынок таких излучателей в ближайшие годы будет быстро расти.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Srinivasan R., Leigh W.J.** Ablative photodecomposition: action of far-ultraviolet (193 nm) laser radiation on poly(ethylene-terephthalat) films. – J. Am. Chem. Soc., 1982, №104 (24), p. 6784.
2. **Marshall J., Trokel S., Rothery S.** Photoablative reprofiling of the cornea using an excimer laser: Photorefractive keratotomy. – Lasers Ophthalmol., 1986, № 1; p.21-48.
3. **Wojnarowski R.J., Eichelberger C.W.** Excimer Patterning of a Novel Resist – US Pat 4,780,177 1988.



4. **Bachmann F.** Large scale industrial application for excimer lasers: via hole drilling by photo-ablations. – Proc. SPIE, 1990, v. 1361, p.18.
5. <http://www.ot-mabrilas.de/pikoflat>
6. **Brüning S., Hennig G., Eifel S., Gillner A.** Ultrafast scan techniques for 3D micrometer structuring of metal surfaces with high repetitive ps-laser pulses. – Lasers in Manufacturing, Munich, 2011.
7. **Knappe R., Brüning S., Gillner A.** Kleinste Strukturen auf großen Flächen. – Laser Technik Journal, 2011, v. 8, № 4, p.24.
8. <http://www.lumera-laser.com>
9. <http://www.edge-wave.de>
10. <http://www.schepers-digilas.de>
11. <http://www.saueressig.de>
12. <http://www.ilt.fraunhofer.de>
13. **Li D., Du K.** Picosecond laser with 400 W average power and 1 mJ pulse energy. – Proc. SPIE, 2011, 7912, 79120N.
14. **Mans T., Rußbüldt P., Weitenberg J.** Yb:KYW INNOSLAB-Amplifier. – Conference on Lasers and Electro-Optics 2009 and the European Quantum Electronics Conference. CLEO Europe – EQEC 2009, Munich, paper CA3_2 (2009) nm, cutting speed 10 mm/s).

MICROMACHINING WITH PICOSECOND LASERS

Friedrich Bachmann, Dirk Müller, Bernhard Klimt, Ralf Knappe,
LUMERA Laser GmbH, Kaiserslautern, Germany

Picosecond lasers are poised to change the world of micromachining. Picosecond lasers allow a new level of precision micromachining through unparalleled quality in a variety of applications such as microelectronics, semiconductor, and photovoltaic industries. Focused picosecond pulses of approximately <15ps and with appropriate energy are well suited to avoid undesirable thermal side effects like burrs, re-crystallization and micro-cracks. The material interaction is almost material unspecific because micromachining with ps-pulses does not rely on the linear absorption process making ps-pulses a universal machining tool for all kinds of materials. The multi-photon process utilized provides strong absorption even in transparent media. Economic industrial-scale throughput is realized by applying the appropriate energy at a high repetition rate. Therefore, ps-lasers should have an average power of several tens of watts, a pulse repetition frequency up to and higher than 1 MHz and an excellent beam quality. The most powerful ps-lasers from LUMERA LASER provide more than 75 W with 1 MHz repetition rate. The RAPID laser product family has for the particular application the right power at each up to MHz repetition frequency. Within a minute 10 mm³ or more of any hard or difficult to machine material can be removed. Glass machining with ps pulses leads to ablation rates of >50mm³/min.

INTRODUCTION

"Cold ablation" has been discovered for the first time by R.Srinivasan et.al. about 30 years ago [1], when he described the structuring of poly(ethylene-terephthalate) using UV radiation and ns-pulses of an ArF-excimer laser. The ablation mechanism has been explained as a strong absorption within a thin material layer within a very short time (that's why UV light and ns-pulses have been mandatory). This triggers a bond breaking and immediate "explosive evaporation". Such processes have been widely used for ablation of organic tissue especially for correction of myopia in the ophthalmology [2], structuring of photo-resist [3] and ablation poly-mers in printed circuit boards [4]. The process, however, did not work very well for other materials like e.g. glass, ceramics or metals. Fortunately, the emergence of ultra-short pulse lasers with pulse duration of 10 to 15 ps, ameliorates this limitation as these lasers can provide such high peak power densities, that multi-photon absorption takes place. This makes the process almost independent from the wavelength and the linear absorption properties of the material. Furthermore, the large electric field of a ps-laser strips the low mass electrons off the atoms and charged atoms left behind undergo a Coulomb explosion so fast such that almost no residual heat is deposited into the material and thus, almost any material can be machined with almost no

thermal side effects. For this reason ultra-short (ps) pulse lasers are very well suited for highly precise machining of thermally sensitive materials. Fig. 1 (Ablation of thin (4 µm) Cr-film on a photo-lithographic mask by ns- and ps-laser) shows impressively the difference between ablation of material by ns- and ps-pulses for a thin film application, whereas in Fig. 2 comparison of machining of an embossing tool by ns- (top) and ps-laser (bottom) in terms of contour precision (left), accuracy (middle) and surface quality (right) the difference for structuring a solid material of an embossing tool is depicted.

SETUP OF THE WORKSTATION

According to this process, practically all materials can be machined with ps-laser radiation at a high quality level! If the energy density at the target surface exceeds a certain threshold, each pulse will typically ablate a layer of 10 to 100 nm thickness. The threshold varies only slightly in the range from 0,1 to 2 J/cm², depending on the type of material, the wavelength and the pulse length of the laser. The energy density of the above mentioned ablation threshold can be easily reached in a 25 µm diameter spot and with pulse energy of 10 µJ. The ablation volume per pulse may allow the impression that material removal is very slow; however, utilizing a laser with a MHz pulse repetition rate and an average power of 50 W can ablate



6 to 60 mm³/min! Such high repetition rates and high average powers require a fast moving of the beam to provide high machining speed on one hand, but also to avoid residual heat accumulation on the other. Therefore, fast scanning heads with a telecentric f- θ -lens in combination with x-/y-/z- table are typically used as shown in Fig.3 (typical set-up for the ps-laser beam delivery the machining stage and to the sample). Modern scanning heads allow movement of the focus at a speed as high as 20 m/s.

THE LASER SOURCES

A scheme of a typical picosecond laser setup is presented in Fig. 4 (The principle of the RAPID-Series). In general, high power picosecond lasers are designed in a Master-Oscillator Power-Amplifier (MOPA) configuration. In the LUMERA RA-PID Series a mode-locked diode pumped solid state laser (DPSSL) generates 60 nJ pulses with a duration of 7 ps at a repetition frequency of 50 MHz. An electro-optic modulator (EOM), called the "pulse-picker", selects individual pulses at frequencies as high as 1 MHz from this pulse train. This "individual" pulse is then amplified in a multi-pass amplifier and can be amplified to as high power as 250 μ J. The pulse-picker can also select a so called pulse burst, i.e. a small group of pulses with a distance of only 20 ns; in this case, the 250 μ J of a "single pulse" are split to e.g. ten pulses with a resp. lower power per pulse. Higher harmonics (532 nm and 355 nm) are also easily available (and software switchable by the push of a button).

Running reliably in 24/7 production ps-lasers have stepped over the threshold into industrial manufacturing floors! They provide excellent beam quality (TEM₀₀ mode, M²<1.5), high pulse-to-pulse and average power stability (<1% RMS at 1 MHz repetition rate), an excellent pointing stability (<50 μ rad/°C in full PRF range) and a high output power (up to 80 W at fundamental wavelength, 1064 nm), Fig. 5 (Hyper RAPID 75 W laser (left) generates > 75 W average power with 10 ns pulses at a maximum repetition rate of 2 MHz and with an ideal beam quality. Caustics is shown in the middle and a beam profile measurement at 532 nm is shown on the right).

APPLICATIONS

Because of the properties described above, picosecond lasers are best suited for highly accurate machining of small structures on hard, brittle or thermally sensitive materials. In the following (Fig. 6 to 9) practical examples are given. With picosecond lasers in almost any material very clean and accurate holes can be drilled (or better cut) as shown in Fig.6 (Examples for hole drilling in different materials (1064 nm, 50 W): a) 100 μ m diam. holes in 1 mm thick Al₂O₃-ceramics; 1 hole / sec; b) 150 μ m diam. hole in 200 μ m thick silicon, 5 holes / sec; c) 250 μ m diam. holes in 300 μ m stainless steel, 5 sec / hole; d) 3 mm diam. holes in 0.5 mm borosilicate glass, about 10 sec / hole).

Of course not only round holes can be cut by ps-lasers, but also complex structures, which cannot be achieved by any other process with such high accuracy (Fig. 7. Cutting of complex contours: a) CuBe; b) 15 μ m slots in 20 μ m thick silver; c) 30 μ m slots in 100 μ m tungsten). A practical application for such hole drilling application is the manufacturing of injection nozzles for diesel engines: In fact, 3 tapered holes, 60 μ m to 120 μ m in diameter, must be drilled with a very high accuracy in a 1 mm stainless steel part as shown in Fig. 8 (Laser drilling of diesel injectors (Courtesy of ExOne)). A ps-laser, frequency doubled to 532 nm with an output power of 25 W is employed for this application. It takes 5 sec per hole and three such holes are at one injector, so that one part can be finished within 15 seconds. Other applications are e.g. structuring and drilling of solar cells, via-hole drilling on printed circuit boards, dicing of wafers, cutting of hardened glass and fiber enforced polymers.

Picosecond lasers are also perfectly suited for the structuring of surfaces and for 2,5D machining. This is shown in Fig. 9

(2,5D contours in different materials: glass, mammoth tusk and Tungsten Carbide), where surface contours, generated by ps-laser in different materials are presented. It has been observed that several picosecond pulses with a nanosecond scale separation (burst mode) not only will improve the ablation rate substantially, but also the micromachining quality, e.g. the surface roughness of blind holes. This is shown in Fig. 10 (The effect of burst mode (machining of silicon): splitting the energy of a pulse into a pulse train of 6 pulses with 20 ns distance increases the ablation rate (left) and improves the surface quality (right)), where such data for machining of silicon are depicted: Using a burst with 6 pulses instead of one pulse with high power increases the ablation rate by a factor of 8 and improves the surface quality of the machined area considerably.

As shown above, there is already a large number of industrial applications for picosecond lasers, and the number of applications where removal of thin, small volumes creates high value in the product is rapidly increasing! At the same time the cost per photon has dropped by a factor of 10 within the past 5 years, making the picosecond laser a very economical tool and one capable of competing with many other machining choices on a cost-per-part basis. Although the initial investment for a picosecond laser of adequate power and beam quality is higher than a nanosecond one the total cost of ownership is only about 0,25 €/min. Within a minute 20 mm³ or more of almost any hard or difficult-to-machine material, such as cubic boron nitride or diamond, sapphire, glass or ceramics can be removed!

RESEARCH TOPICS AND FUTURE DEVELOPMENT

Today 50 W industrial lasers have become routine and even higher power up to 75 W (and soon 100 W) are possible with the HYPER RAPID series. However, there are applications which require an even higher power, e.g. applications where very large surfaces must be structured. One example are large printing or embossing cylinders, which are used among others for the manufacturing of the backlight structures for LCD displays or for generation of artificial leather structures etc. Such cylinders are made from steel, typically have a diameter of several 10 cm, a length of one to several meters and a weight of 7 to 10 tons. A surface of Nickel, Aluminum or steel is provided for the structuring. In a government funded national German R&D project [5, 6, 7] a consortium of laser manufacturers (LUMERA [8], EdgeWave [9]), System-Integrators (Schepers [10], Saueressig [11]) and an Institute (Fraunhofer Institute for Laser Technology [12]) have investigated the increase of precision and speed for laser structuring of such embossing rolls by ps laser. Fig. 11 (embossing cylinder, structured with a ps-laser (left); Ni coated surface (right) (by courtesy of Schepers)) shows a cylinder where an Al-surface has been structured by an 80 W ps-laser at 1 MHz repetition rate with an unprecedented quality and accuracy. Manufacturing time was about 10 hours [6].

For the laser power available today, for economical reasons the maximum length of the cylinders is limited to about 1 m. However, amplifier concepts for higher power ps-laser have also been investigated in the project [6; 13] and even more than 1 kW average power has already been demonstrated in the laboratory [14].

CONCLUSION

Picosecond-lasers have already proven their industrial capability in several applications in manufacturing environment in a 24/7 use. Many specific applications where small structures are required can only be performed with ps-lasers. Almost every material can be machined with very high precision and at reasonable rates between 6 and 60 mm³/min, so that in most cases the required throughput can be reached. Laser experts as well as market analysts expect ps-lasers to be a dominating technology in the laser materials processing field and a fast growing market in the upcoming years.