

УДК 621.373.826

Микрообработка стекла фемтосекундным лазером для изготовления микрофлюидных устройств

Мельников Дмитрий Михайлович
Гришкина Юлия Игоревна

melnikovd@bmstu.ru
grishkinayui@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе рассмотрен процесс микрообработки стекла фемтосекундным лазером с целью получения микроструктур для микрофлюидных чипов. Показано, что применение ультракоротких лазерных импульсов позволяет преодолеть ограничения традиционных методов обработки прозрачных материалов, обеспечивая высокую точность и минимальное термическое воздействие. Проведен анализ влияния технологических параметров (энергии импульса, частоты повторения, скорости сканирования) на качество и геометрию каналов.

Ключевые слова: микротекстурирование поверхности, лазерная абляция, фемтосекундный лазер, микрофлюидика, обработка стекла

Femtosecond laser micromachining of glass for the fabrication of microfluidic devices

Melnikov Dmitry Mikhailovich
Grishkina Yuliya Igorevna

melnikovd@bmstu.ru
grishkinayui@student.bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The study examines the process of glass micromachining using a femtosecond laser for the fabrication of microfluidic chips. It is demonstrated that the use of ultrashort laser pulses overcomes the limitations of conventional transparent material processing methods, providing high precision and minimal thermal effects. An analysis of the influence of technological parameters (pulse energy, repetition rate, and scanning speed) on the quality and geometry of the channels is carried out.

Keywords: surface microtexturing, laser ablation, femtosecond laser, microfluidics, glass processing

Введение. Фемтосекундные (ФС) лазеры — это мощный инструмент для микрообработки прозрачных материалов благодаря уникальному сочетанию короткой длительности импульсов и высокой интенсивности излучения. Одной из ключевых характеристик ФС-лазеров является способность минимизировать тепловое воздействие на материал, что особенно важно при работе с прозрачными материалами.

Процессы поглощения в прозрачных материалах под воздействием ФС-лазеров можно описать как нелинейные из-за высокой интенсивности лазерного излучения. В случае многофотонного поглощения несколько фотонов

одновременно поглощаются молекулами материала, что приводит к ионизации и образованию плазмы. При достаточной интенсивности возникает эффект оптического пробоя, который позволяет точно контролировать глубину и форму обработанной поверхности.

Лазерная микрообработка представляет собой процесс лазерной абляции, который заключается в поэтапном удалении материала с поверхности до тех пор, пока не будет достигнута заданная форма, глубина и шероховатость. Глубина аблированного слоя зависит от множества факторов, включая мощность лазерного излучения, скорость обработки, частоту повторения импульсов, а также количество проходов и схему сканирования.

Микрофлюидные чипы находят широкое применение в биомедицине, химическом анализе и микроэлектронике, где требуется прецизионное создание каналов и микроструктур в твердых прозрачных материалах. Стекло является одним из наиболее перспективных материалов для микрофлюидики благодаря его химической инертности, оптической прозрачности и биосовместимости.

Материалы и методы. Для обработки стекла мы выбрали иттербиевую фемтосекундную лазерную установку, изготовленную российской компанией «Авеста-Проект» — AVESTA TETE-10 с мощностью 10 Вт. Фемтосекундные лазеры генерируют ультракороткие импульсы длительностью в несколько фемтосекунд (10^{-15} секунд), что позволяет минимизировать тепловое воздействие на обрабатываемый материал и обеспечить высокую точность и качество обработки (см. таблицу).

Технические характеристики лазерной установки AVESTA TETE-10

Параметр	Значение
Максимальная средняя мощность, Вт	10
Максимальная энергия в импульсе, мкДж	400
Максимальная длительность импульса, фс	<270
Перестройка длительности импульса	<270 фс – 10 пс
Центральная длина волны, нм	1033 ± 3
M^2	<1,15
Диаметр пучка (по $1/e^2$), мм	$3,2 \pm 0,5$
Частота следования импульсов (регулируемая)	одиночный...200 кГц (до 1 МГц по запросу)
Выходная поляризация	линейная, вертикальна
Пространственная мода	TEM ₀₀
Расходимость пучка (полный угол), мрад	<0,6
Стабильность направления пучка, мкрад/°C	<25

Для нашего эксперимента были выбраны образцы предметного стекла СП 7101 толщиной 2 мм, прямоугольной формы (30×80 мм) без какой-либо предварительной обработки. Данный материал представляет собой прозрач-

ный диэлектрик, обладающий уникальными свойствами, которые выгодно отличают его от других материалов, используемых в микрообработке.

Стекло демонстрирует высокие оптические характеристики: отражение, преломление, пропускание и поглощение света, а также обладает широкой полосой пропускания, обеспечивающей прозрачность не только в видимой области спектра, но и за ее пределами. Эти свойства делают его привлекательным для применения в оптике, микроэлектронике и биомедицинских технологиях.

Несмотря на то что на длине волны 1030 нм стекло практически прозрачно и линейное поглощение отсутствует, при облучении фемтосекундными лазерными импульсами в материале происходят нелинейные процессы, такие как многофотонное поглощение и оптический пробой. В результате в объеме материала образуются локальные модифицированные области с измененными оптическими и структурными свойствами.

Результаты эксперимента. При увеличении числа проходов наблюдается постепенное возрастание глубины и площади сечения канала. При низких значениях (10–20 повторов) структура имеет малую глубину и относительно низкую шероховатость. При дальнейшем увеличении числа повторов (30–50) глубина каналов растет, однако эффект начинает насыщаться, а прирост глубины уменьшается. Кроме того, избыточное число повторов может приводить к появлению дефектов (микротрещины, неровности стенок). Данные тенденции хорошо прослеживаются на графиках зависимости площади канала от числа проходов (рис. 2).

При низкой скорости (100–200 мм/с) каналы получаются наиболее глубокими, но поверхность становится более шероховатой из-за длительного взаимодействия импульсов с материалом. В диапазоне средних скоростей (300–600 мм/с) формируются каналы с оптимальным сочетанием глубины и качества стенок. При высоких скоростях (700–1000 мм/с) глубина и площадь сечения уменьшаются, что связано с сокращением времени воздействия, однако качество поверхности при этом выше.

Оптимальные режимы находятся в диапазоне 300–600 мм/с при числе повторов 20–40, где удастся достичь баланса между глубиной канала и качеством его поверхности. При слишком большом числе повторов (>40) дальнейшее увеличение глубины сопровождается ухудшением геометрии и качественных характеристик каналов.

Заключение. В результате проведенных экспериментов установлено, что параметры лазерной обработки — скорость сканирования и число повторов — существенно влияют на геометрию микроканалов в стекле.

Увеличение числа повторов ведет к росту глубины и площади поперечного сечения канала, однако при значениях свыше 40 наблюдается ухудшение качества поверхности. Снижение скорости обработки способствует увеличению глубины канала, но сопровождается ростом шероховатости и риском дефектов. Оптимальные условия для формирования микроканалов, пригодных для применения в микрофлюидных устройствах, находятся в диапазоне скоростей 300–600 мм/с при числе повторов 20–40.

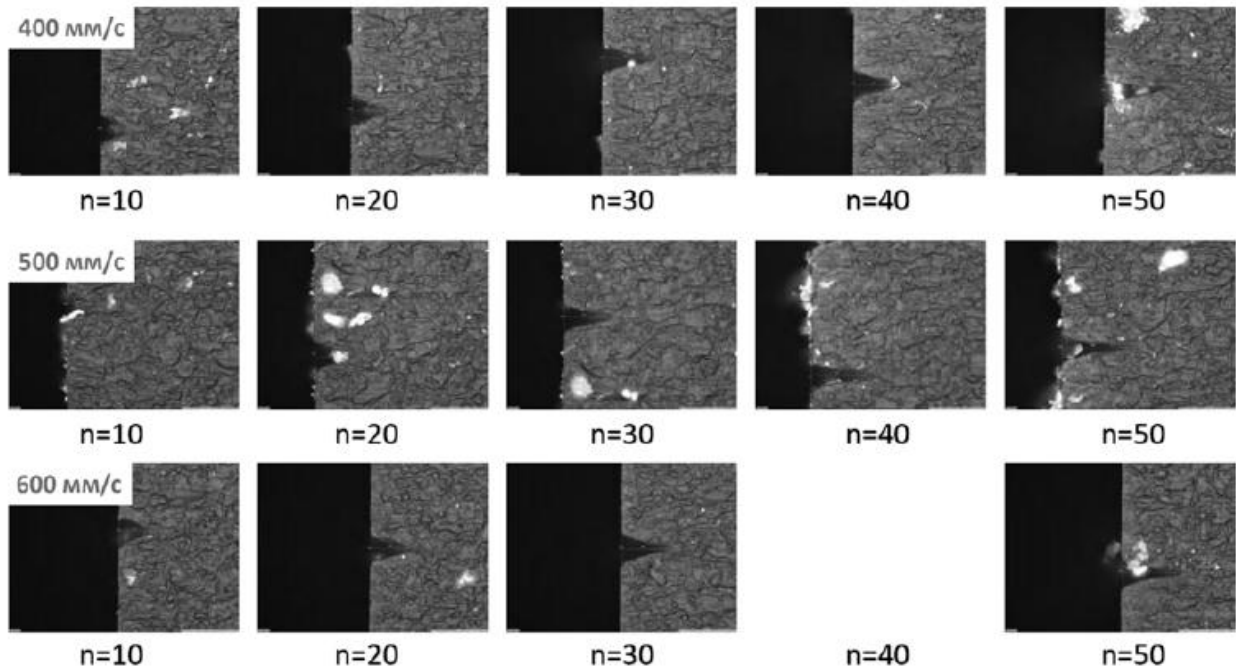
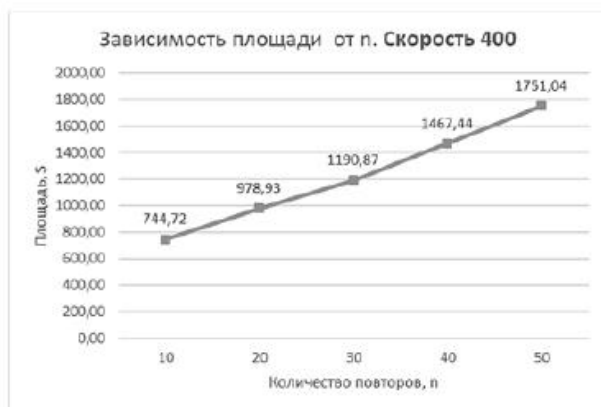
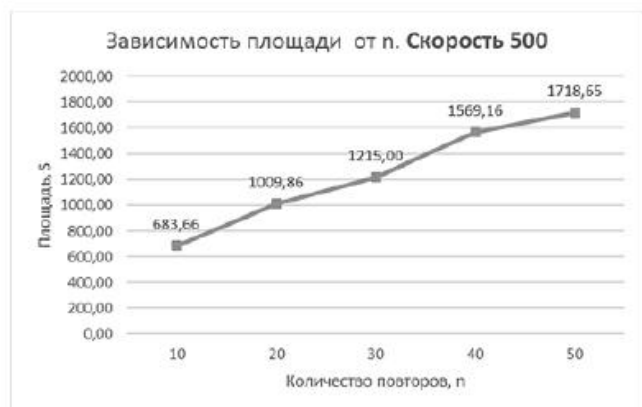


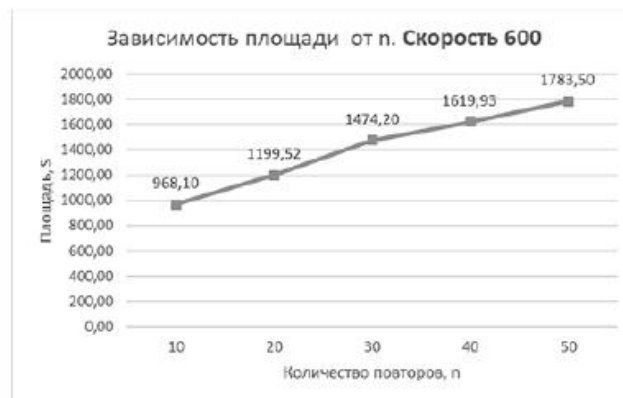
Рис. 1. Поперечные сечения микрофлюидных каналов, сформированных при различных скоростях сканирования и числе проходов



а



б



в

Рис. 2. Зависимость площади поперечного сечения микроканалов от числа проходов при различных скоростях сканирования: скорость 400 мм/с (а), скорость 500 мм/с (б), скорость 600 мм/с (в)

Следует отметить, что шероховатость стенок напрямую влияет на В отличие от полимеров (например, РММА), где глубина абляции ограничивается теплопроводностью материала, в стекле решающую роль играют нелинейные эффекты и образование плазмы. Это объясняет более резкий рост глубины при увеличении числа повторов на малых скоростях.

гидродинамические характеристики микрофлюидных чипов. Повышенная неровность каналов может приводить к турбулентности и нежелательным эффектам при движении жидкости. Поэтому практическая ценность работы заключается не только в демонстрации возможности формирования каналов, но и в подборе режимов, обеспечивающих гладкие стенки без микротрещин.

Таким образом, подбор технологических режимов позволяет управлять параметрами микроструктур и получать каналы с заданными характеристиками для последующего применения в микрофлюидных чипах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Yavas S. Femtosecond laser glass processing. *Industrial Laser Solutions*, 2015, January/February, pp. 23–26. URL: www.industrial-lasers.com (accessed 15.09.2025).
- [2] Balling P., Schou J. Femtosecond-laser ablation dynamics of dielectrics: basics and applications for thin films. *Iopscience*, 2013, vol. 76 (3), art. no. 036502. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/3/036502>
- [3] Osellame R., Hoekstra H.J.W.M., Cerullo G., Pollnau M. Femtosecond laser microstructuring: an enabling tool for optofluidic lab-on-chips. *Laser&Photonics Reviews*, 2011, № 3, pp. 442–463.
- [4] Strickland D., Mourou G. *Compression of amplified chirped optical pulses*. USA, Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, 1985, 3 p.
- [5] Osellame R., Cerullo G., Ramponi R. *Fundamentals of Femtosecond Laser Modification of Bulk Dielectrics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.