

УДК 621.7

Получение микроканалов в стекле для микрофлюидных чипов с помощью фемтосекундной лазерной абляции

Середина Варвара Александровна

seredina.2005@inbox.ru

Михайлова Анна Валерьевна

anna.mek2005@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе исследовано влияние параметров фемтосекундного лазерного излучения (длина волны 1035 нм, длительность импульса 270 фс) на процесс формирования микрофлюидных каналов в силикатном стекле. Экспериментально определено пороговое значение плотности энергии, необходимое для абляции материала, и установлены зависимости геометрических характеристик каналов от параметров обработки. Показано, что глубина каналов достигает насыщения при определенной плотности энергии, а увеличение количества проходов лазера снижает порог абляции. Метод фемтосекундной лазерной абляции подтвердил свою эффективность для изготовления микрофлюидных структур с контролируемой геометрией.

Ключевые слова: микрофлюидика, фемтосекундный лазер, лазерная абляция, силикатное стекло, микроканалы, плотность энергии, порог абляции

Obtaining microchannels in glass for microfluidic chips using femtosecond laser ablation

Seredina Varvara Alexandrovna

seredina.2005@inbox.ru

Mikhailova Anna Valeryevna

anna.mek2005@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper studies the influence of femtosecond laser radiation parameters (wavelength 1035 nm, pulse duration 270 fs) on the process of microfluidic channel formation in silicate glass. The threshold energy density required for material ablation was experimentally determined, and the dependences of the geometric characteristics of the channels on the processing parameters were established. It was shown that the channel depth reaches saturation at a certain energy density, and an increase in the number of laser passes reduces the ablation threshold. The femtosecond laser ablation method has proven its efficiency for the fabrication of microfluidic structures with controlled geometry.

Keywords: microfluidics, femtosecond laser, laser ablation, silicate glass, microchannels, energy density, ablation threshold

Введение. Микрофлюидика — это междисциплинарная область, изучающая движение жидкостей в микроскопических каналах, интегрированных в небольшие устройства (микрочипы). По сравнению с обычным лабораторным оборудованием, эти системы обладают ключевыми преимуществами: крайне низкий расход образцов и реактивов, высокая чувствительность анализа, ма-

лые габариты и энергопотребление. Конструктивно базовый микрофлюидный чип представляет собой две герметично соединенные пластины, одна из которых содержит сеть микроканалов и функциональные компоненты (реакторы, клапаны), а другая является защитным покрытием [1].

Микрофлюидный чип для создания капель состоит из двух склеенных пластин. Его внутренняя структура зависит от конкретных задач. В данном случае для генерации капель используется специальное сопло (канал-перекрестие), где два несмешивающихся потока жидкости (например, масло и вода) встречаются и формируют капли. Их размер (от 80 до 210 мкм) контролируется скоростью потоков: чем быстрее течет масло относительно воды, тем мельче капли.

Для изготовления таких чипов чаще всего используются прозрачные полимеры из-за их дешевизны и простоты обработки. Однако для работы с агрессивными химикатами лучше подходит стекло благодаря своей химической стойкости и оптической прозрачности. Чипы из кварца применяют реже из-за высокой стоимости.

Создание микроскопических каналов на поверхности материала (подложки) требует методов, которые активно на нее воздействуют, например, с помощью света, лазера, химических реакций или литья. Эти процессы изменяют свойства поверхности, формируя нужную структуру [2].

Чтобы подключить к чипу внешние трубки, выводы каналов выводят на его торец или поверхность, располагая их в линию или по кругу. Для этого используют специальные коннекторы и переходники (интерфейсы), которые обеспечивают точное и простое соединение.

Соединение двух пластин чипа (герметизация) — критически важный этап. Для стеклянных чипов применяют: высокотемпературные методы (до 1000 °C) — они надежные, но требуют идеально гладких поверхностей и не подходят для чипов с чувствительными элементами, и низкотемпературные методы (склеивание, анодное связывание) — они более универсальны, так как позволяют герметизировать пластины с уже нанесенными электродами или покрытиями и менее чувствительны к чистоте поверхности [3].

Одним из наиболее перспективных методов изготовления дорожек в чипах является лазерная абляция. Ключевыми преимуществами лазерной абляции являются высокая точность с допусками до ± 5 мкм, возможность создания сложных 3D-структур, а также бесконтактный характер обработки, что исключает возникновение механических напряжений в материале. Этот метод позволяет формировать каналы глубиной от десятков до сотен микрометров без использования масок и литографических процессов, требуя при этом малого количества материала и являясь экологически чистым. Однако основными недостатками выступают необходимость в сложном оптическом оборудовании и высококачественном лазерном источнике для обеспечения стабильности процесса. Таким образом, лазерная абляция оптимальна для изготовления прототипов и сложных микрофлюидных устройств, особенно на оптически прозрачных материалах, но при массовом производстве без

должной автоматизации она может проигрывать в скорости химическому травлению и механической обработке [4].

Материалы и методы. Для проведения экспериментов по излучению процесса лазерной абляции силикатного стекла для получения микрофлюидных каналов, использовалась установка на основе фемтосекундного импульсного генератора и регенеративного усилителя.

Для изучения микроструктуры полученных образцов и измерения конусности каналов использовался металлографический микроскоп Olympus GX51. Для изучения структуры каналов в поперечном сечении использовался метод лазерного скрайбирования [5]. Для изменения фокусного расстояния использовалась линейная система перемещения с шаговым двигателем фирмы STANDA модель 8MT167M-25LS, диапазон перемещения 25 мм с шагом 1,25 мкм. Скорость перемещения задавалась при помощи контроллера модели 8SMC5-USB.

Эксперименты проводились на образцах предметных силикатных стекол 1×25×75 мм.

Экспериментальная часть. Было проведено исследование, как плотность энергии лазера влияет на ширину и качество микроканалов, создаваемых в стекле. Использовался фемтосекундный лазер с длиной волны 1035 нм, длительностью импульса 270 фс и частотой повторения 60 кГц. Образец толщиной 1 мм закреплялся на позиционирующем столике, а лазерный луч фокусировался на его поверхности.

Была проведена серия опытов, в которых мощность лазера последовательно изменялась от 3 до 10 Вт с шагом 0,5 Вт.

Для измерения глубины каналов проводилась вторая серия экспериментов. При постоянной частоте (60 кГц) и скорости сканирования (1000 мм/с) средняя мощность лазера варьировалась от 1,5 до 10 Вт. Каждое испытание повторялось пять раз для обеспечения статистической достоверности.

Результаты исследования (рис. 1) позволили определить минимальную плотность энергии (порог абляции), необходимую для начала обработки материала, и установить зависимость диаметра зоны абляции от подаваемой энергии.

Было рассчитано пороговое значение плотности энергии для одиночного импульса по формуле

$$F_{\text{пор}} = \frac{4P}{\pi d_{\text{л}}^2 f}, \quad (1)$$

где $d_{\text{л}}$ — диаметр лазерного пятна.

Диаметр зоны абляции рассчитывался по уравнению

$$d_a^2 = 2d_{\text{л}}^2, \quad (2)$$

где F — плотность энергии.

Данные по влиянию плотности энергии на глубину каналов представлены на рис. 2. Эксперимент показал, что после достижения определенного уровня энергии глубина каналов перестает увеличиваться. Также было уста-

новлено, что с ростом количества проходов лазера (числа повторов) пороговая плотность энергии, необходимая для абляции, снижается.

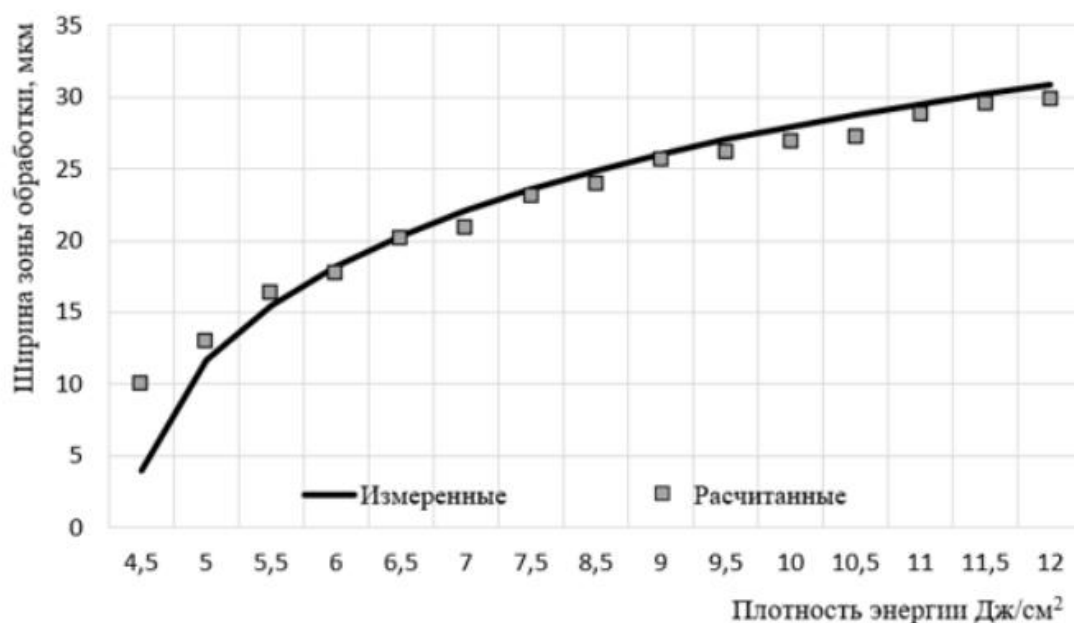


Рис. 1. Результаты эксперимента по определению влияния плотности энергии на ширину зоны обработки

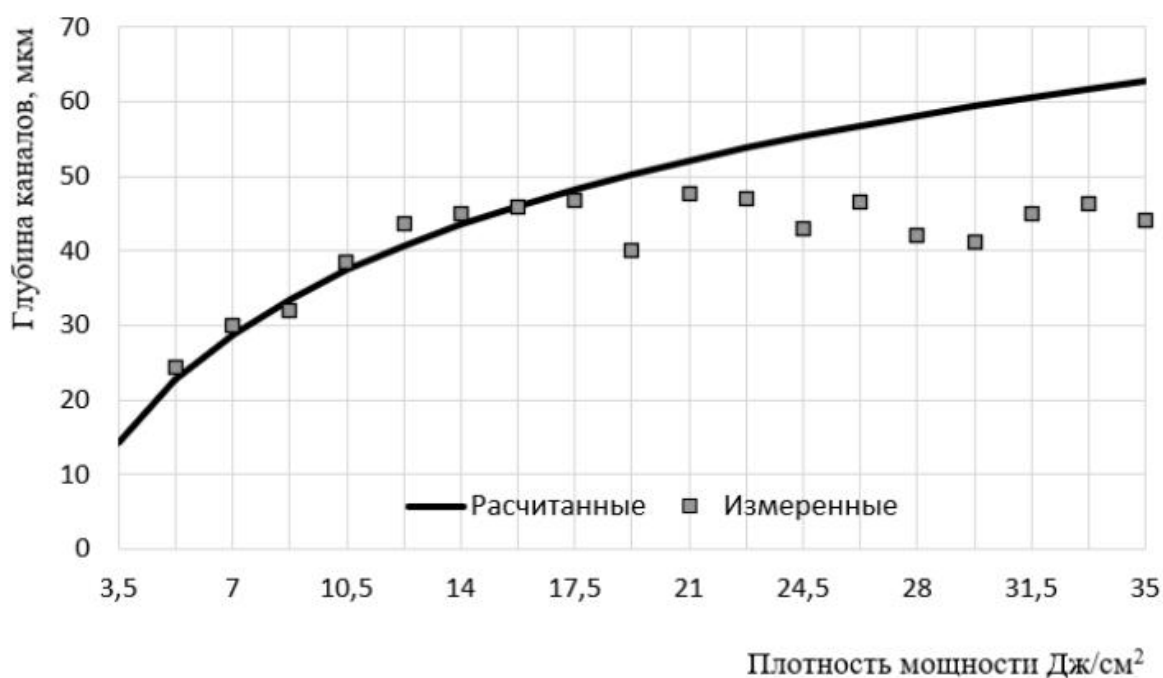


Рис. 2. Результаты эксперимента по изучению влияния плотности энергии на глубину каналов

Выводы. Проведенное экспериментальное исследование позволило сделать следующие выводы:

1) Метод лазерной абляции продемонстрировал свою высокую эффективность и точность для прямого изготовления микрофлюидных каналов в силикатном стекле. Ключевыми преимуществами метода являются бескон-

тактность, отсутствие механических напряжений в материале и возможность создания каналов с высоким разрешением.

2) Экспериментально установлены и количественно определены ключевые параметры процесса фемтосекундной лазерной абляции стекла. Определено пороговое значение плотности энергии, необходимое для инициации нелинейной абляции материала.

3) Установлена зависимость геометрических характеристик микроканалов (диаметра и глубины) от параметров лазерного воздействия. Диаметр зоны абляции имеет логарифмическую зависимость от соотношения плотности энергии к ее пороговому значению.

4) Обнаружено, что глубина канала не увеличивается бесконечно с ростом плотности энергии, а достигает предела (насыщения) после определенного значения, что является важным фактором для управления геометрией каналов.

5) Показано влияние количества проходов (повторов) лазера: увеличение числа проходов снижает пороговую плотность энергии, необходимую для абляции. Это открывает возможность управления процессом обработки не только за счет мощности, но и за счет многократного сканирования.

Таким образом, фемтосекундная лазерная абляция является высококонтролируемым и гибким методом для разработки и изготовления сложных микрофлюидных структур в стекле, позволяя точно управлять их морфологией путем подбора параметров лазерного излучения (мощности, количества проходов, скорости сканирования).

Список источников

- [1] Евстапов А. А. Микрофлюидные чипы для биологических и медицинских исследований. *Российский химический журнал*, 2011, № 2, с. 99–110.
- [2] Родченкова В., Шахнович И. Микрофлюидные чипы — конструктор для разработчика. *Аналитика*, 2017, № 3, с. 60–69.
- [3] Гарифуллина И.Ш., Солнышкина О.А., Батыршин Э.С. Изготовление стеклянных микрофлюидных чипов для исследования процессов вытеснения в пористых средах. *Приборы и техника эксперимента*, 2024, № 5, с. 10–17.
- [4] Bondarenko A.G., Ramos-Velazquez A., Shmalko A.V. Surface microfluidics elements fabrication by CO₂-laser writing on glass: challenges and perspectives. *Optical and quantum electronics*, 2023, vol. 55, № 379.
- [5] Малов И.Е. *Разработка технологии управляемого термораскалывания листового стекла излучением твердотельного лазера*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2000, 185 с.

A13

**Реновационные
технологии
в машиностроении**

