

УДК 621.373.826

Оптимизация качества и производительности фемтосекундной микрообработки изменением фокусного расстояния

Родимкин Никита Игоревич^(*)

rodimkinni@student.bmstu.ru

Александров Андрей Романович

aleksandrovar@bmstu.ru

Шупенев Александр Евгеньевич

ash@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено влияние фокусного расстояния (30–75 мм) на параметры фемтосекундной лазерной микрообработки. Показано, что уменьшение фокусного расстояния до 30 мм приводит к уменьшению диаметра пучка и ширины реза при одновременном увеличении плотности мощности, что повышает прецизионность обработки. И наоборот, при увеличении фокусного расстояния возрастает ширина реза и снижается интенсивность излучения, что ограничивает точность, но повышает стабильность процесса. Таким образом, продемонстрировано, что выбор фокусного расстояния является инструментом управления балансом между качеством и производительностью. Результаты могут быть использованы при оптимизации режимов микрообработки в микроэлектронике и приборостроении.

Ключевые слова: фемтосекундная микрообработка, фокусное расстояние, диаметр пучка, плотность мощности

Введение. Фемтосекундная лазерная микрообработка обеспечивает высокую точность и минимальное термическое воздействие, однако влияние фокусного расстояния на процесс изучено недостаточно [1, 2]. В работе исследовано воздействие линз с фокусным расстоянием 30–75 мм на микрообработку металлов. Проанализированы изменения плотности мощности и геометрии пучка. Цель — определение оптимальных параметров для баланса точности и производительности обработки.

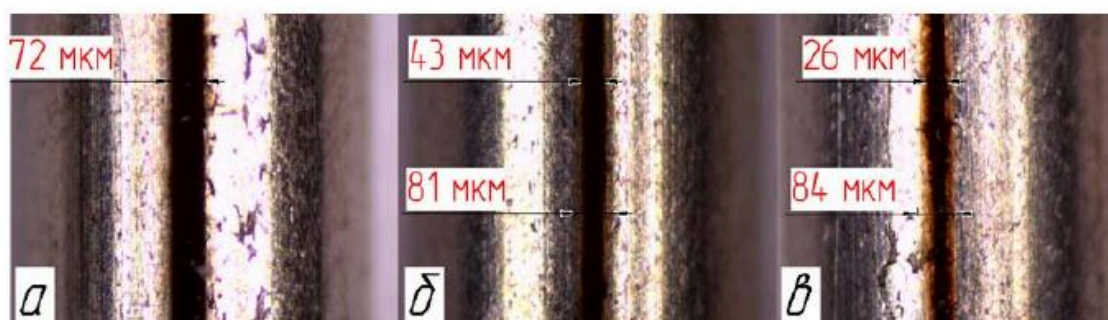
Методы и материалы; результаты. Эксперименты выполнены на фемтосекундном лазерном комплексе «Тета-10» (ООО Авеста Проект, Россия) с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 254 фс. Позиционирование образцов осуществлялось с использованием прецизионного трехкоординатного позиционера с линейными двигателями и разрешением 0,1 мкм. В качестве объектов исследования использовались трубчатые заготовки из нержавеющей стали AISI304 диаметром 2 мм и толщиной стенки 200 мкм. Фокусировка излучения проводилась объективами с следующими фокусными расстояниями: 30, 40, 50, 60, 75 мм. В серии из десяти экспериментов исследовано влияние фокусного расстояния линз (30–75 мм) при двух уровнях энергии импульса: 20 и 40 мкДж. Полученные данные для режима с энергией 40 мкДж (см. таблицу) демонстрируют уменьшение диаметра пучка от 62,5 мкм при фокусном расстоянии 75 мм до 25 мкм при 30 мм. Соответственно, плот-

ность мощности возрастала от 51,3 до 321 ТВт/м², что сопровождалось уменьшением ширины реза и формированием более четкой геометрии канала. Наибольшие различия в морфологии реза зафиксированы именно при 40 мкДж, что связано с более выраженной ролью плотности мощности в этих условиях. Для режима с энергией 20 мкДж характерные зависимости сохранялись, однако эффекты проявлялись менее наглядно.

Результаты серии экспериментов при энергии импульса 40 мкДж

№	Фокусное расстояние, мм	Диаметр пучка, мкм	Плотность мощности, ТВт/м ²
1	75	62,5	51,3
2	60	50	80,3
3	50	41,7	116
4	40	33,3	181
5	30	25	321

Полученные результаты демонстрируют ключевую роль фокусного расстояния в фемтосекундной микрообработке (рисунок). Уменьшение фокусного расстояния повышает плотность мощности, обеспечивая четкие границы реза, но увеличивает риск локального термического повреждения. Увеличение фокусного расстояния снижает прецизионность, но повышает стабильность процесса. Сравнение энергетических режимов показало, что при 20 мкДж зависимости сохраняются, но выражены слабее из-за недостаточной энергии для формирования контрастных структур. При 40 мкДж влияние оптики проявляется наиболее отчетливо, позволяя регулировать баланс между качеством и производительностью обработки.



Ширина реза и ширина реза с дефектной зоной в зависимости от фокусного расстояния:
а — 75 мм, б — 50 мм, в — 30 мм

Заключение. Оптимальные результаты при энергии 40 мкДж достигнуты с линзой 60 мм, обеспечившей стабильный профиль реза. Дальнейшее уменьшение фокусного расстояния сокращало ширину реза, но увеличивало зону термического воздействия. Таким образом, повышение прецизионности

требует тщательного подбора энергии импульса к фокусному расстоянию для достижения высокого качества обработки.

Список источников

- [1] Chichkov B.N., Momma C., Nolte S., von Alvensleben F., Tünnermann A. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1996, vol. 63 (2), pp. 109–115.
- [2] Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. *Nature Photonics*, 2008, vol. 2 (4), pp. 219–225.