

## **ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА, СВЕРЛЕНИЕ МИКРООТВЕРСТИЙ В ЖАРОПРОЧНЫХ И ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ ПИКОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Рамазанов А.Х.<sup>1</sup>, Ким В.В.<sup>2\*</sup>, Искандаров Н.Э.<sup>2\*</sup>, Турсункулов О.М.<sup>2\*</sup>, Иботов У.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный университет Узбекистана, Физический факультет,

<sup>2</sup>ГП Учебно-экспериментальный Центр Высочайших Технологий

\*mik750594@yahoo.com

Современная промышленность требует разработки стабильных и производительных методов сверления микроотверстий в различных конструкционных материалах. К традиционным методам можно отнести механическую обработку при помощи сверл, прокалывание специальными иглами, электрохимические методы и электроэрозионную обработку. Данные методы имеют серьезные ограничения в скорости обработки и в варьировании заданного диаметра отверстий при микронных масштабах. К настоящему времени во многих отраслях промышленности на смену традиционным методам сверления отверстий при изготовлении приборных жиклеров, металлических фильер для вытяжки тонких синтетических волокон, изготовления охлаждающих отверстий в турбинных лопатках "горячей" зоны деталей камер сгорания турбореактивных двигателей и многих других пришли лазерные методы, отличающиеся

высокой скоростью и производительностью. К примеру, при использовании 300нс импульсов лазера на неодимовом стекле, позволяет сократить время сверления сапфирового стекла с 30мин до 1сек [1].

Авторы данной работы ставили целью выяснить механизмы массо- и энергопереноса при сверлении микроотверстий в металлических фольгах тугоплавких металлов молибдена и тантала пикосекундными лазерными импульсами. В качестве объектов исследований использовались металлические фольги толщиной менее 0.5 мм и с высокими температурами плавления и кипения – тантал,  $t_{пл}(Ta)=3290^{\circ}K$ ,  $t_{кип}(Ta)=5731^{\circ}K$  и молибден,  $t_{пл}(Mo)=2890^{\circ}K$ ,  $t_{кип}(Mo)=4885^{\circ}C$ . Столь жаропрочные материалы трудно поддаются обработке традиционными методами, в тоже время для сфокусированного лазерного импульса при пиковых мощностях свыше  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> подобные факторы не являются препятствием.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из пикосекундного твердотельного лазера с диодной накачкой PL2231-50 фирмы EKSPLA с основным излучением на длине волны  $\lambda_c=1.06\mu m$ , длительностью импульса 28пс и максимальной энергией в импульсе до 40мДж. Кратные гармоники можно получить преобразованием на нелинейных кристаллах. Максимальная частота следования импульсов 50Гц. Для фокусировки используется кварцевая линза с фокусным расстоянием 75мм. Для сдвигов образцов используется микрометрический столик с шагом 10мкм. Исследование микроотверстий проведено с помощью сканирующего электронного микроскопа EVO-MA10.



Рисунок 1. Экспериментальная установка для сверления микроотверстий.

Цифрами обозначены: 1 – лазерный источник, 2 – стойка с фокусирующей линзой, 3 – крепежная головка, 4 – 3-х координатная стойка с микрометрическими винтами.

Преимущество пикосекундного лазера состоит в том, что микромеханическая обработка основана на абляции материала в тонком приповерхностном слое без существенного теплообмена с окружающим материалом вне лазерного пучка [2]. Важным условием для сверления микроотверстий является возможность сфокусировать огромные плотности мощности в максимально малое пятно. Ограничивающим фактором является дифракция пучка. Для оценки пятна сфокусированного излучения на различных длинах волн использовалось известное соотношение:

$$D_{\lambda} = 1,22\lambda F/a$$

$D_{\lambda}$  – предельный дифракционный диаметр пятна.

Для лазера на различных длинах волн с фокусирующей линзой  $F=75$ мм и шириной пучка  $a=5$ мм, было проведено исследование, сравнили расчетные значения с полученными в эксперименте. Для этого измерялся диаметр ожога на поверхности металла при воздействии 1-2 импульсов, результаты

$\lambda$ , нм	$D_{\lambda}$ , мкм	$D_{exp}$ , мкм
1064	19,47	40-50
532	9,73	20-30
355	6,49	15-20
266	4,86	7-10

Таблица 1.

$\lambda$ , нм	$I_{exp}$ , Вт/см <sup>2</sup>
1064	$4 \times 10^{14}$
532	$1 \times 10^{15}$
355	$1,2 \times 10^{15}$
266	$1,6 \times 10^{15}$

Таблица 2.

дополнительных поперечных мод в пучке. Таким образом, для получения наименьших по диаметру отверстий, выгодно использовать излучение 4-ой гармоники. Для оценки режима массо- и энергопереноса приведем расчет максимальных плотностей мощности на поверхностях мишеней по формуле:

$$I = Q/(t_p S)$$

Где  $Q$  – энергия в импульсе,  $t_p$  – длительность импульса и  $S$  – площадь фокального пятна. Для 4-х гармоник получим результаты в таблице 2. При подобных плотностях реализуется сценарий, при котором основной вклад в массоперенос дает абляция материала без прохождения стадий расплава и испарения [3].

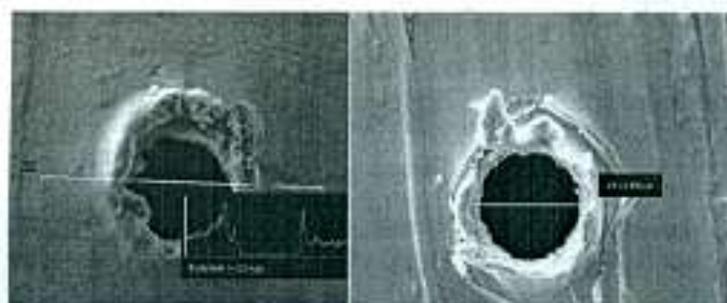


Рисунок 2. Отверстия в молибденовой и танталовой фольге с толщиной 100 и 200 мкм, на 4-ой гармонике с  $\lambda_e=266$ нм и различными энергиями в импульсе. Наименьший диаметр порядка 10мкм.

в 5 раз, диаметр сфокусированного пятна на основном излучении порядка 50мкм, а на 4-ой гармонике менее 10мкм. При этом площадь в 25 раз меньше и хотя, в силу преобразования, энергия в импульсе четвертой гармоники много меньше, но плотность мощности больше. При этом число импульсов, требующееся для пробития, было практически одинаковым и равнялось 13-16 импульсам на отверстие для 100мкм фольг и 25-30 импульсам на отверстие для 200мкм фольг вне зависимости от типа материала. Небольшие отклонения объясняются переменной толщиной материала. Учитывая отсутствие продувания зоны воздействия каким либо рабочим газом, данные эксперимента показывают, что основным механизмом массопереноса материала является абляция. Результаты работы получены в рамках проектов БФ2-027 и ПЗ-20170919163.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е.Д Вакс и др. Практика прецизионной лазерной обработки. Москва: Техносфера, 2013. – 696с.

представлены таблице 1. Как видно из таблицы наибольший диаметр получается при облучении на длине волны основного излучения, а наименьшее отклонение от теоретического предела на наиболее коротковолновой части. Как показывает практика, достижению дифракционного предела препятствует несовершенство фокусирующей оптики и наличие

В результате экспериментов было получено, что отверстия наименьшего диаметра в металлах получаются на излучении 4-ой гармоники (рис. 2). Что согласуется с теоретическими расчетами, поскольку возможность фокусировки в пятно наименьшего диаметра прямо пропорциональна длине волны излучения. Разница для основного излучения и четвертой гармоники составляет более чем