

ФОРМИРОВАНИЕ КРАТЕРА НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА, ОБЛУЧАЕМОГО ПОВТОРЯЮЩИМИСЯ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Н.А.БОСАК, С.В.ВАСИЛЬЕВ, А.Ю.ИВАНОВ, В.И.НЕДОЛУГОВ,
Л.Я.МИНЬКО, А.Н.ЧУМАКОВ.

Институт молекулярной и атомной физики Национальной Академии наук
Беларуси, 220082 Минск, Беларусь
E-mail: lrpd@imaph.bas-net.by

Резюме. Экспериментально и теоретически исследованы особенности формирования кратера на металлических мишенях при лазерном воздействии в режиме повторяющихся лазерных импульсов.

Расширение сферы применения лазерной обработки материалов требует подробного изучения механизмов воздействия мощных световых потоков на поверхности твердых тел. Целью настоящей работы является исследование формирования рельефа как внешней (наплавленной), так и внутренней зоны кратера на поверхности металлов (In, Pb, Sn), облучаемых повторяющимися относительно короткими (несколько десятков наносекунд) гладкими лазерными импульсами с $q \sim 10^9$ Вт/см².

Схема экспериментальной установки для исследования формирования кратеров на поверхности твердых тел, была подобна использованной в работе Васильева С.В. и др. (1995). В качестве источника воздействующего на образец излучения был применен модуль, созданный на основе лазера ГОС - 1001 ($\lambda = 1,06$ мкм). Для получения моноимпульсного и импульсно - периодического режима генерации применялись крупногабаритные пассивные затворы из фтористого лития с F_2^- - центрами окраски (Басиев Т.Т. и др., 1982; Минько Л.Я., Чумаков А.Н. и Босак Н.А., 1990). Управление частотой повторения лазерных импульсов в диапазоне 5 - 50 кГц осуществлялось изменением уровня накачки и оптической плотности пассивных затворов. Длительность отдельного лазерного импульса определялась параметрами резонатора и характеристиками используемого затвора (Минько Л.Я. и др., 1990) и составляла $\tau = 80$ нс. Излучение лазерного модуля при помощи фокусирующей системы направлялось на поверхность исследуемого образца. Сменные отражающие системы, включающие призму полного внутреннего отражения, позволяли направлять световой пучок на образец под произвольным углом, в том числе по нормали, как вертикально (снизу вверх или сверху вниз), так и горизонтально. Для получения на образце относительно однородного пятна фокусировки лазерного излучения (ЛИ) с резкими границами диаметром $d = 2,0$ мм использовалась диафрагма

диаметром 10 мм, изображение которой строилось на поверхности мишени. Часть лазерного излучения, отраженная от передней грани стеклянного клина, направлялась на измеритель энергии ИМО-2Н; световой поток, отраженный от задней грани клина, направлялся на коаксиальный фотоэлемент ФК-19, что позволяло визуализировать временную форму лазерного импульса при помощи осциллографа С8-14. Энергия одного импульса ЛИ изменялась в пределах от 2 до 6 Дж; временная форма его была близка к гауссовой; средняя плотность мощности излучения в отдельном импульсе составляла примерно $(0,8 - 2,5) \cdot 10^9$ Вт/см². Суммарная энергия лазерного импульса варьировалась от 4 Дж (моноимпульс) до 150 Дж ($n=35$ импульсов).

Для определения рельефа облучаемого образца нами использовался метод проекции полос, который реализовывался на установке, описанной в работе Васильева С.В. и др., (1993), позволявшей определять глубину (во внешней зоне - высоту) h любой точки кратера по отношению к необлученной плоской поверхности мишени с погрешностью, не превышающей 50 мкм. Обнаружено, что внутренняя или "отрицательная" зона кратера (откуда металл в ходе воздействия лазерного излучения выносился) имеет достаточно гладкую и ровную куполообразную поверхность (значительно более гладкую, чем в работе Васильева С.В. и др. (1995), причем как глубина зоны, так и ее диаметр возрастают с увеличением n (рис. 1). Внешняя, или "положительная" зона (на которую вынесенный металл наплавлен) имеет форму, близкую к округлой. Следует отметить, что при воздействии ЛИ на вещество горизонтально или сверху вниз для $n > 6 - 8$ внешняя зона представляет собой набор выбросов ("блинов") толщиной от 50 до 250 мкм, наплавленных друг на друга. Значение n , начиная с которого наблюдается формирование "стопы" выбросов, определяется энергиями (и отношением энергий) n -го и $(n-1)$ -го пиков. При воздействии лазерного излучения снизу вверх формирование "стопы" не наблюдалось. На краю каждого округлого выброса имелся небольшой (высотой ≤ 100 мкм) буртик.

На "внешних" выбросах (в случае воздействия снизу вверх - на периферии единственного "блина"), а также на поверхности образца за пределами наиболее крупного округлого выброса имеются наплавленные "лучи". Исследования поверхности кратера при помощи оптического микроскопа показали, что указанные лучи представляют собой цепочки отдельных достаточно крупных (диаметром от 100 до 500 мкм) капель. Более мелкие капли наблюдаются и вне лучей, в том числе и на поверхности внешней зоны кратера.

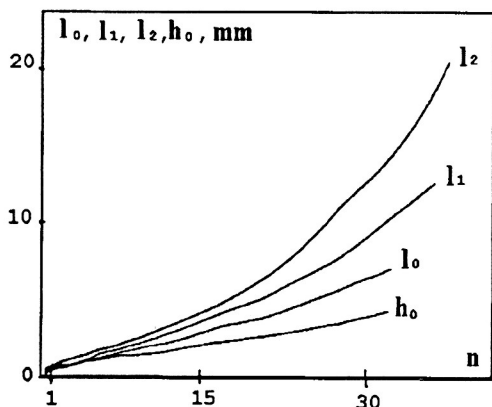


Рис.1. Зависимость поперечного размера наиболее крупного выброса l_1 , зоны отжига на поверхности мишени l_2 , внутренней зоны кратера l_0 и глубины кратера h_0 от числа пиков n в импульсе ЛИ.

Отметим, что размеры внешней зоны растут значительно быстрее, чем глубина и особенно диаметр внутренней зоны. При этом масса внешней зоны кратера составляет примерно 80% от массы вынесенного материала. Обращает внимание и то, что при воздействии ЛИ на образец снизу вверх размеры внешней зоны примерно в 1,5 раза больше, чем при воздействии в горизонтальном направлении и сверху вниз. Все это подтверждает, что при рассматриваемом режиме воздействия световых импульсов на вещество внутренняя зона образуется за счет "выплескивания" (вытекания) материала из ванны расплава, а не за счет испарения и тем более не за счет разбрызгивания (суммарная масса капель составляет менее 1% от массы вынесенного вещества).

Для выяснения причин формирования кратеров с указанными формами нами был проведен расчет изменения температуры T индиевого образца, облучаемого лазерными импульсами с использованными в эксперименте параметрами. Показано, что T быстро возрастает до значения превышающего температуру плавления индия и довольно быстро; при подаче через ~ 20 мкс 2-го лазерного импульса временная зависимость ΔT остается такой же, меняется только T_0 . Таким образом, после подачи 8 лазерных импульсов температура мишени до подачи следующего импульса не опускается ниже температуры плавления индия.

На наш взгляд, данные экспериментальных исследований и результаты расчетов свидетельствуют о следующем механизме формирования кратера. Первый лазерный импульс прогревает, но не расплавляет металл. При подаче 2-го импульса ~ 2 мг металла плавится и выплескивается за пределы пятна фокусировки излучения (о выплескивании, а не о ламинарном вытекании говорит наличие буртика на периферии каждого выброса). Такие же выбросы производятся 3-м, 4-м, 5-м пиками, причем из-за более высокой начальной температуры и малой

глубины лунки масса выплескиваемого металла с каждым разом увеличивается. Поэтому диаметр каждого следующего "блина" превышает диаметр предыдущего; кроме того, из-за большой теплопроводности индия ($\sim 48 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) металл перемешивается и выравнивается по высоте. Так формируется внешняя зона кратера при $n \leq 6-8$.

Направление расположенных на поверхности наиболее крупного выброса и за его пределами "лучей" определяется градиентом освещенности в облучаемой зоне мишени, что согласуется с данными работы Васильева С.В. и др. (1995). Вероятно, механизм их образования аналогичен указанному в этой работе. Капли, вылетевшие под углами, отличающимися от оптимального, а также имеющие малые начальные скорости, не вылетали за пределы плазменного облака и в течение всего времени полета подвергались действию лазерного излучения. Металл в каплях частично испарялся, капли уменьшались и дробились. Поэтому центральная зона кратера имеет более гладкую поверхность, чем периферийная.

Таким образом, при воздействии лазерного излучения на металлы в режиме повторяющихся лазерных импульсов кратер формируется в основном путем многократного выплескивания расплава из облучаемой зоны мишени. Форма внешней зоны кратера определяется временной зависимостью температуры в освещенной области мишени и условиями вытекания металла - глубиной лунки, поверхностной энергией и направлением воздействия излучения на образец.

ЛИТЕРАТУРА

- Басиев Т.Т., Воронько Ю.В., Мирон Б.С. и др.: 1982, *Изв. АН СССР. Сер. Физич.*, **46**, 1600.
- Васильев С.В., Иванов А.Ю., Ляликов А.М.: 1993, *Квантовая электроника*, **20**, 616.
- Васильев С.В., Иванов А.Ю., Ляликов А.М.: 1995, *Квантовая электроника*, **22**, 830.
- Ельяшевич М.А., Минько Л.Я., Романов Г.С., Станкевич Ю.А., Чивель Ю.А., Чумаков А.Н.: 1985, *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **49**, 1132.
- Минько Л.Я., Чумаков А.Н., Босак Н.А.: 1990, *Квантовая электроника*, **17**, 1480.