

Явления на поверхности и их влияние на процессы приповерхностного низкопорогового плазмообразования при импульсном высокоэнергетическом лазерном воздействии

Минько Л.Я., Чивель Ю.А.

Институт Молекулярной и Атомной Физики НАН Беларуси
220072, Беларусь, г. Минск, пр. Ф.Скарины 70

Аннотация Экспериментально изучено изменение состояния поверхности в процессе воздействия импульсного лазерного излучения и влияние возникающих поверхностных структур на процессы приповерхностного плазмообразования.

1. Введение

К настоящему времени установлена и подтверждена эрозионная природа начального плазмообразования у поверхности твердых тел при импульсном лазерном воздействии (см. например Гречихин Л.И., Минько Л.Я., 1967; Брунов В.В. и др., 1986; Минько Л.Я. и др., 1988). Пороговые параметры приповерхностного плазмообразования существенно зависят от длительности, длины волны, интенсивности воздействующего ЛИ и условий воздействия.

В данной работе предоставлены результаты исследований пороговых зависимостей плазмообразования и влияния состояния поверхности на процессы начального разрушения поверхности и плазмообразования в широком диапазоне длин волн и длительностей импульсов воздействующего ЛИ.

2. Эксперимент

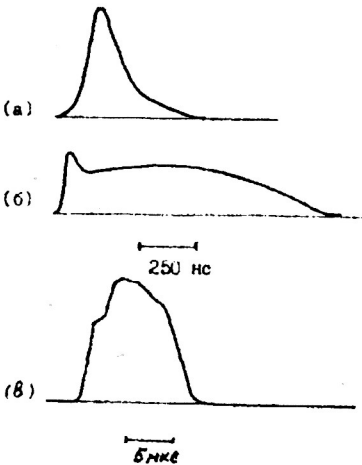


Рис.1. Формы импульсов лазерного излучения а - Nd лазера, б - CO₂-лазера, в - родаминового лазера.

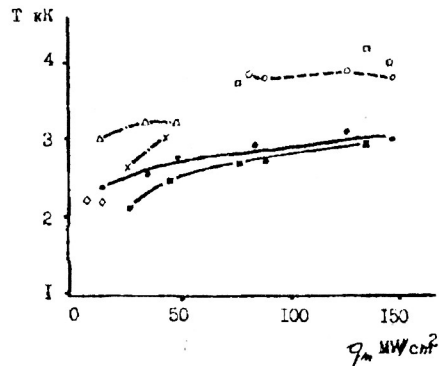


Рис.2. Зависимость температуры поверхности в пятне облучения в момент начала разрушения (● - D16T, ■ - Zn, ○ - Bi), температуры поверхности в момент плазмообразования (○ - D16T, □ - Zn) от максимальной плотности мощности ЛИ.

Эксперименты были выполнены при атмосферном давлении и в вакууме с использованием лазерной системы на неодимовом стекле, генерирующей моноимпульсы длительностью ~ 40 нс и 300 нс (рис. 1). Ряд экспериментов выполнен на электроионизационном CO_2 -лазере с длительностью импульса ~ 1 мкс и родаминовом лазере с длительностью импульса ~ 10 мкс (рис. 1).

В качестве мишеней использовались механически полированные образцы из алюминия А99, дюралюминия Д16Т, цинка, висмута, индия. Контроль состояния поверхности в процессе воздействия и определение пороговых характеристик плазмообразования осуществлялось посредством измерения динамических характеристик зеркальной, диффузной, рассеянной компонент отраженного ЛИ, температуры поверхности и давления на поверхности в пятне облучения с временным разрешением $\sim 10^{-8}$ с. Использовались датчики давления в режиме "генератора тока". Калибровка датчиков давления осуществлялась с помощью лазерной ударной трубки. Состояние поверхности до и после воздействия изучалось методами оптической и растровой электронной микроскопии, проводился рентгеноструктурный анализ поверхностного слоя материалов.

3. Результаты и обсуждение

Исследования морфологии и распределения дефектов на поверхности механически полированных образцов показали, что основная масса дефектов с характерным размером $\sim 0,5 \div 1$ мкм и концентрацией $\sim 10^6 \div 10^7$ см⁻² это царапины, оставленные зернами абразива и частицы абразива (Al_2O_3) внедренные в поверхность. Плотность дефектов достаточно высока и можно предположить, что высота неровностей рельефа также ~ 1 мкм при периоде $1-10$ мкм. Проведенные комплексные эксперименты позволили выявить особенности начального разрушения поверхности. Показано, что локальность повреждений в области пятна облучения в испарительных режимах в большей степени определяется неравномерностью облучения, нежели распределением дефектов, что можно было предполагать, имея ввиду высокую их концентрацию. Установлено, что независимо от длительности лазерных импульсов ($\tau_{1/2}=40-300$ нс, $\lambda=1,06$ мкм) в процессе воздействия, до момента плазмообразования яркостная температура поверхности достигает значений $3000^\circ-4000^\circ\text{K}$ (рис.2). Нарастание заметного поглощения в парах начинается при этом уровне температур. Переход паров из состояния практически полной прозрачности в сильнопоглощающую плазму в зависимости от крутизны фронта импульса ЛИ происходит за времена $\sim 10^{-8}$ с ($\tau=40$ нс) и $\sim 10^{-7}$ с ($\tau=300$ нс). На развитие плазмообразования в парах существенное влияние оказывает боковая волна разрежения. При переходе от квазиодномерного к трехмерному разлету паров, а это наблюдается при пятнах облучения $\leq 0,2$ мм ($\tau_n \sim 300$ нс) происходит увеличение времени задержки плазмообразования (Ефремов В.В. и др., 1988) и пороговых для плазмообразования плотностей мощности ЛИ (рис.3).

Ранее (L.Ya. Min'ko, Yu.A. Chivel, 1993) нами установлено "взрывное" разрушение поверхности металлов за времена $\sim 10^{-8}$ с с выбросом частиц конденсированной дисперсной фазы и появлением на поверхности микроструктур размером 1-10 мкм с термоизолированными фрагментами размером ≤ 1 мкм. Для ряда металлов разрушение имеет место при температурах поверхности ниже точки кипения в области температур $\geq 2000^\circ\text{K}$ (рис. 2). Показано, что такое низкопороговое разрушение обусловлено объемной неоднородностью твердого тела. Пороги плазмобразования в этих условиях определяются уже не только начальным состоянием поверхности, но и возникшей поверхностной структурой с характерной для металлов плотностью $\sim 10^6 \text{ см}^{-2}$.

При воздействии ЛИ микрочастица или теплоизолированный дефект на поверхности существенно повлияет на плазмобразование в том случае, если их нагрев и испарение протекают быстрее осно-

вы металла. Согласно экспериментальным данным, размеры выбрасываемых частиц < 1 мкм. Расчеты времени нагрева частиц до $T_{\text{кип}}$, времени ее испарения с учетом высокой поглощательной способности частиц размером $\lambda > d > \lambda/6$ ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$) при интенсивностях ЛИ в диапазоне пороговых для плазмобразования значений $\sim 10^8 \text{ Вт/см}^2$ ($\tau_{\text{и}} = 40 \text{ нс}$; $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$) и $\sim 10^7 \text{ Вт/см}^2$ ($\tau_{\text{и}} = 300 \text{ нс}$; $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$) показали, что испарение произойдет за времена соответственно $\sim 10^{-8}$ с и $\sim 10^{-7}$ с, на переднем фронте импульса ЛИ, что хорошо согласуется с экспериментом. На локальный характер испарения указывают и результаты измерений давления в испарительных режимах воздействия излучения Nd-лазера с $\tau_{\text{и}} = 40 \text{ нс}$. Измеренные значения амплитуды импульсного давления в пятне облучения значительно меньше значений полученных из предположения о равновесном характере фазового перехода в пределах пятна облучения.

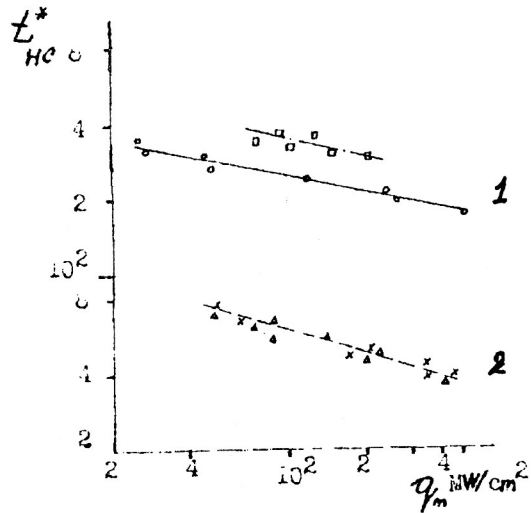


Рис.3. Время начального плазмобразования на дюралюминиевой мишени в воздухе в зависимости от максимальной плотности мощности ЛИ (1,06 мкм):

1. $\tau_{\text{и}} = 300 \text{ нс}$

○ - диаметр пятна облучения - 4 мм

□ - диаметр пятна облучения - 0,25 мм

2. $\tau_{\text{и}} = 40 \text{ нс}$:

△ - диаметр пятна - 4 мм

x - диаметр пятна - 0,25 мм

Перекрытие отдельных облачков пара, возникших на микро неоднородностях, при скорости звука в паре $\sim 10^5$ см/с произойдет за $\sim 10^{-8}$ с и в дальнейшем геометрия течения, влияющая на порог плазмообразования будет определяться размером всего пятна, что и подтверждается экспериментом (рис.3).

По результатам измерений времени задержки плазмообразования были рассчитаны пороговые параметры:

мгновенная плотность мощности в момент плазмообразования и удельные энергетические затраты на плазмообразование E^*/S (рис.4). Установлено, что в условиях воздействия импульсов ЛИ длительностью < 1 мкс плазмообразование носит нестационарный характер, т.е. имеет место при интенсивностях ЛИ превосходящих пороговые и условием плазмообразования является превышение некоторой плотности E^*/S , необходимой вероятно для испарения дефектов. Зависимость времени плазмообразования от максимальной плотности мощности ЛИ q_m в этом случае хорошо описывается степенной зависимостью $t \approx \beta \sqrt{\tau/q_m}$. Для длинных импульсов, плазмообразование носит квазистационарный характер и плазма возникает в струе паров с установившейся структурой. При сформированной газодинамической структуре паровой струи для плазмообразования необходимо превышение некоторой пороговой плотности мощности ЛИ q_m , что особенно ярко проявляется для импульсов сложной формы.

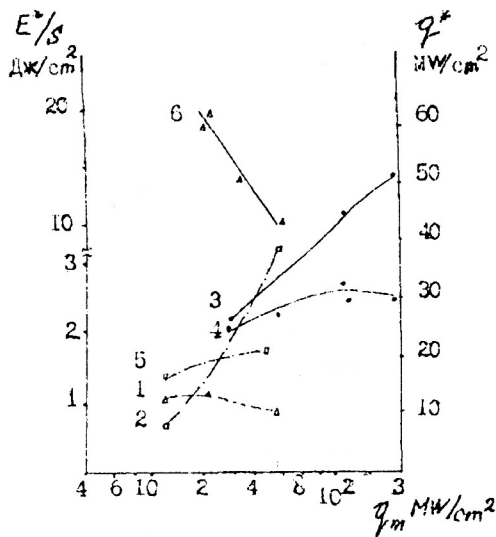


Рис.4. Зависимость параметров плазмообразования от максимальной плотности мощности ЛИ:

1. q^* - 1- Д16Т ($\lambda=0,59$ мкм - родамин),
- 2- Д16Т ($\lambda=1,06$ мкм; $\tau_i=300$ нс)
- 3- In ($\lambda=10,6$ мкм; $\tau_i=1$ мкс)
2. E^*/S : 4,5,6 - Д16Т ($\lambda=1,06$ мкм), In ($\lambda=10,6$ мкм), Д16Т ($\lambda=0,59$ мкм)

Литература

- Гречихин Л.И., Минько Л.Я.: 1967, ЖПС, т.14, 720
 Брунов В.В., Горбунов А.А., Конов В.И.: 1986, ЖПС. т.44, 845.
 Минько Л.Я., Чумаков А.Н., Чивель Ю.А.: 1988, Квант.электроника, т.15, 1619.
 L.Ya.Min'ko, Yu.A.Chivel: 1993, Proc. ICPIG XXI, vol 1, 135.
 L.Ya.Min ko, Yu.A.Chivel: 1996, Proc. SPIE, vol.2713, 361.
 Ефремов В.В., Минько Л.Я., Чивель Ю.А., Чумаков А.Н., 1988, Тез. докл. III Всес. конф. "Взаим. изл., плазм. и электр. потоков с веществом, 172