

04; 07

© 1992

СНИЖЕНИЕ ПОРОГА ОБРАЗОВАНИЯ ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РЕЗОНАНСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Д.В. Г а й д а р е н к о, А.Г. Л е о н о в

Впервые о наблюдении резонансного снижения порога образования плазмы в парах облучаемой лазером металлической (натриевой) мишени сообщалось в [1]. Эффект аналогичен неоднократно наблюдавшейся ранее резонансной лазерной ионизации в стационарных парах и объясняется „нагревом“ электронов в столкновениях с возбужденными атомами [2]. Следует отметить, что резонансное плазмообразование может играть существенную роль во многих технологических процессах: создании ионных источников, лазерных атомизаторов, напылении тонких пленок, микроанализе поверхности и т. д.

В работе [3] высказано предположение, что образование плазмы на поверхности алюминия под действием излучения эксимерного лазера на молекуле $XeCl$ ($\lambda = 308$ нм) также носит резонансный характер из-за близости длины волны лазера к длине волны перехода $3P_{1/2} - 3D_{3/2}$ в атоме Al (308.2 нм), что объясняет относительно малую величину порога пробоя. В данной работе приводятся результаты исследований, подтверждающих выдвинутую гипотезу. Эксперименты проводились с использованием перестраиваемого лазера на красителе, возбуждаемого второй гармоникой $YAG: Nd^{3+}$ лазера. Излучение лазера на красителе удваивалось по частоте, при этом длина волны второй гармоники могла изменяться в интервале 290–330 нм. Длительность импульса после удвоения составляла 18 нс, спектральная ширина – 0,025 нм, а его энергия могла достигать 1 мДж. УФ излучение лазера фокусировалось кварцевыми линзами на полированную алюминиевую мишень, помещенную в вакуумную камеру ($P \approx 10^{-5}$ мм рт. ст.) в пятно площадью $5 \cdot 10^{-5}$ см².

В экспериментах определялись пороги образования плазмы экстраполяцией к нулевым значениям зависимостей интенсивностей спектральных линий однократно заряженного иона алюминия от энергии лазерного импульса для разных длин волн падающего излучения по методике [4]. Спектральными методами с 4-х наносекундным разрешением измерялись также в зависимости от длины волны и параметра эрозионной плазмы: плотность электронов (по штарковскому уширению спектральной линии Al 11 466,3 нм) и их температура – по относительным интенсивностям ряда линий Al 11.

На рис. 1 представлена зависимость пороговой интенсивности образования плазмы I_t от длины волны УФ излучения. Величина $I_t \approx 250$ МВт/см², соответствующая резонансу, хорошо согласуется с величиной порога пробоя (220 МВт/см²), полученной в работе

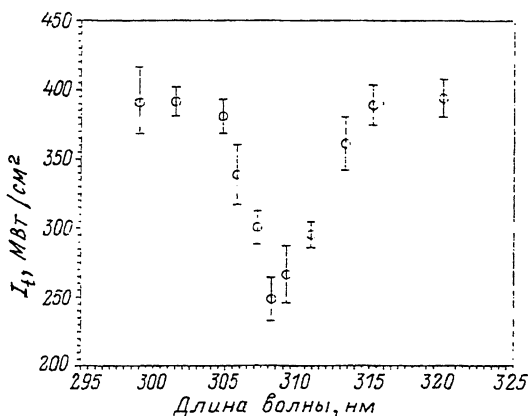


Рис. 1. Зависимость порога плазмообразования от длины волны лазерного излучения.

[4] для эксимерного $XeCl$ -лазера с несколько большей длительностью импульса. Как следует из приведенного графика, пороговые интенсивности в резонансе и вдали от него отличаются примерно в 1.5 раза, а полуширина резонансной кривой $\Delta\lambda$ составляет ≈ 5 нм. Относительно большая ширина связана, по-видимому, с полевым уширением вследствие насыщения резонансного перехода [1]. Необходимо учитывать также, что в результате расщепления $3P$ и $3D$ уровней Ar существуют три перехода с близкими длинами волн (308.22, 309.27 и 309.84 нм). Это обстоятельство, возможно, объясняет некоторую асимметрию полученной резонансной кривой и дает свой вклад в величину $\Delta\lambda$.

Резонансный характер имеет и зависимость концентрации электронов от длины волны лазера при интенсивностях падающего излучения, близких к пороговым (см. рис. 2, кривая 1), определенная на расстоянии $R \approx 0.15$ мм от поверхности мишени с задержкой 40 нс относительно начала лазерного импульса. Дальнейшее же увеличение интенсивности приводит к сглаживанию резонансной зависимости (рис. 2, кривые 2, 3). Вероятно, это объясняется следующими обстоятельствами: сильная зависимость плотности паров от интенсивности излучения является причиной резкого увеличения с ростом I скорости неселективных по длине волны процессов, приводящих к нагреву электронов, заселению низколежащих уровней атома Ar и их последующей ионизации. Отметим, что в исследуемом диапазоне длин волн энергии кванта ($\hbar\omega \approx 4$ эВ) достаточно для фотоионизации даже самого нижнего возбужденного уровня Ar , что еще более увеличивает скорость ионизации паров. Поэтому при некоторой интенсивности полная ионизация может быть достигнута за время лазерного импульса и в случае нерезонансного облучения. Небольшая величина отношения пороговых интенсивностей в резонансе и вдали от него также является следствием этих процессов.

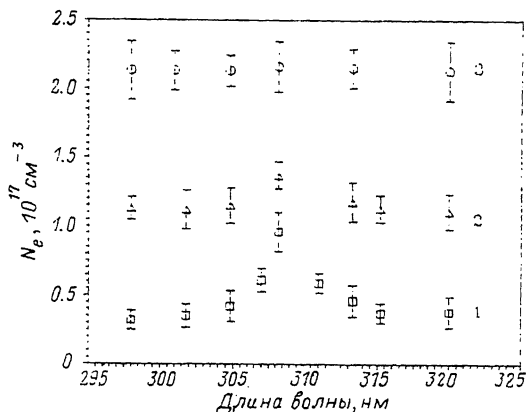


Рис. 2. Зависимость плотности электронов от длины волны лазерного излучения. 1 - $I = 480 \text{ МВт/см}^2$, 2 - $I = 540 \text{ МВт/см}^2$, 3 - $I = 600 \text{ МВт/см}^2$.

Сглаживание резонансной кривой выхода ионов с ростом интенсивности лазерного излучения отмечалось и в [5] в экспериментах по лазерному допороговому травлению поверхности *GaAs*.

Следует отметить, что из-за возможности двухступенчатой ионизации атома алюминия в области резонанса образование плазмы должно наблюдаться при значительно меньших интенсивностях, чем это было зафиксировано в экспериментах. Нам неизвестны данные о сечении фотоионизации $3D$ уровней алюминия, однако оценка по порядку величины для водородоподобного атома [6] дает значение $\sigma^* \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$. Тогда полная ионизация паров *Al* за время лазерного импульса τ будет достигаться при интенсивностях $I = \hbar\omega/\sigma^*\tau \approx 2 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ (время возбуждения $3D$ уровней при данном I много меньше, чем τ , поскольку соответствующее сечение много больше σ^*), что на порядок меньше измеренного (см. рис. 1). Поэтому зарегистрированное минимальное значение I_t в резонансе отражает скорее предельную чувствительность измерительной аппаратуры, чем реальный порог из-за экспоненциальной зависимости плотности паров вблизи поверхности от интенсивности падающего излучения.

В противоположность данным о плотности электронов их температура T_e оказывается практически постоянной в исследуемом диапазоне длин волн и слабо растет с увеличением интенсивности лазерного пучка (от 1.2 до 1.6 эВ в диапазоне $450 \div 600 \text{ МВт/см}^2$). Только при относительно малых интенсивностях $I \approx 450 \div 500 \text{ МВт/см}^2$ наблюдается небольшое увеличение T_e в окрестности резонанса, не превышающее, однако, ошибки эксперимента ($\approx 20\%$).

Таким образом, в данной работе прямыми экспериментами подтверждено предположение о резонансном характере образования плазмы на поверхности алюминия под действием излучения *HeCl*

лазера. Вследствие большой ширины резонансных кривых описанный эффект, по-видимому, может достаточно часто проявляться при исследовании взаимодействия излучения лазеров видимого и ультрафиолетового диапазона с поверхностью твердого тела. Резонансный механизм образования эрозионного факела также может оказаться полезным в лазерном микроанализе для обнаружения малых примесей в веществе масс-спектрометрическими и дистанционными спектральными методами, и в других применениях.

Авторы благодарны А.В. Бражникову за помощь в проведении экспериментов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Г а й д а р е н к о Д.В., Л е о н о в А.Г. // Письма в ЖЭТФ. 1991. Т. 53. С. 290.
- [2] К а с ь я н о в В.А., С т а р о с т и н А.Н. // Химия плазмы, 1990. В. 16. С. 67.
- [3] Г а й д а р е н к о Д.В., Л е о н о в А.Г., Ч е х о в Д.И. Тез. УШ Всесоюз. конф. по взаимодействию оптического излучения с веществом. Л., 1990.
- [4] Г а й д а р е н к о Д.В., Л е о н о в А.Г., Ч е х о в Д.И. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. С. 75.
- [5] W a n g L., B o r t h w i c k I.S., J e n n i n g s R. et al. // Appl. Phys. B. 1991. Т. 53. С. 34.
- [6] Р а й з е р Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.

Московский физико-технический
институт

Поступило в Редакцию
15 июня 1992 г.