

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ

С.С. Алимпиев, В.И. Конов, С.М. Никифоров, Г.Л. Одабашян, С.М. Пименов, Ю.М. Стародумов,
Н.И. Чаплиев, В.Ю. Шевченко

Исследован масс-спектр ионов, образующихся на поверхности мишени из пористого титана под действием излучения импульсного CO_2 лазера, одновременно с регистрацией сигнала приповерхностного свечения. Проведено сравнение облученных и необлученных участков поверхности на электронном микроскопе ISM-840.

При облучении твердых мишеней импульсами CO_2 лазера наблюдается существенное снижение порога оптического пробоя окружающего мишени газа по сравнению с порогами пробоя того же газа в отсутствие мишеней [1]. Современные модели низкорогового оптического пробоя [1–3] рассматривают в качестве инициаторов оптического разряда в газе различные физические процессы на поверхности, происходящие под действием интенсивного импульса света. К экспериментам, направленным на проверку справедливости той или иной модели, относятся исследования приповерхностного свечения [4], эмиссии заряженных частиц [5], масс-спектрометрические исследования [6] и т.д.

В настоящей работе одновременно с регистрацией сигнала приповерхностного свечения проведено исследование масс-спектра ионов, образующихся на поверхности металлической мишени под действием излучения импульсного CO_2 лазера. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Поляризованное излучение одномодового импульсного CO_2 лазера 1 с энергией $\leq 0,5$ Дж в импульсе длительностью по основанию около 1 мкс с помощью зеркала 2 и линзы 3 из NaCl с фокусным расстоянием 17 см через окно из KBr 4 вводилось в вакуумную камеру 5 масс-спектрометра и фокусировалось на поверхность мишени 6 в пятно площадью $3,6 \cdot 10^{-3}$ см². Ослабление энергии осуществлялось калиброванными фильтрами 7 из NaCl. Часть энергии излучения отводилась делительными пластинами 8 из NaCl на пироприемник 9 и фотоприемник 10 для контроля энергии и формы лазерного импульса. Время-пролетный масс-спектрометр 11 выполнен на основе промышленного прибора МСХ-6, в конструкцию которого внесены ряд изменений. В частности, специально сконструированная камера объектов 5 за счет увеличения зазора между эквипотенциальными сетками 12 ионного источника позволяет вводить через держатель 13 в область источника ионов твердую мишень 6. Дополнительное прозрачное окно камеры 14 использовалось для регистрации сигнала приповерхностного свечения с помощью ФЭУ 15, работающего в видимой области спектра. Разрешение прибора по массам $M/\Delta m$ составляло 600 при пропускании 10^{-4} . Схема синхронизации позволяет регулировать с точностью ± 100 нс в широких пределах время задержки между лазерным импульсом и импульсом выталкивающего напряжения, после подачи которого ионы, находящиеся между сетками 12, направляются в ускоряющий промежуток 16 источника ионов и далее во время-пролетную часть 17, где с помощью отклоняющих пластин 18 направляются на приемник ионов 19 (ВЭУ-1). Сигнал с ВЭУ подается через каскад предварительного усиления на цифровой запоминающий осциллограф С9-8. Для анализа нейтральных продуктов лазерной десорбции и испарения используется электронный пучок 20, направленный параллельно плоскости мишени.

Мишени изготавливались в виде пластин из пористого титана размерами $3 \times 3 \times 0,5$ мм³. Пористый титан с сильно развитой поверхностью был выбран в качестве материала мишеней по двум причинам. Во-первых, наличие пор обеспечивает значительную плотность полужолированных металлических областей типа мостиков, выступов, чешуек и т.д. Во-вторых, в приповерхностном слое мишени содержится большое количество адсорбированных газов. Поэтому при облучении таких мишеней мы имели возможность сравнить эффективность двух процессов – лазерной десорбции и лазерного испарения металлических дефектов в реализации низкорогового оптического пробоя.

В экспериментах плотность падающей энергии E изменялась в пределах $0,1$ – 50 Дж/см². Опыты проводились при давлении остаточного газа в камере масс-спектрометра 5×10^{-5} Па, а в контрольных опытах камера наполнялась азотом до 1 атм.

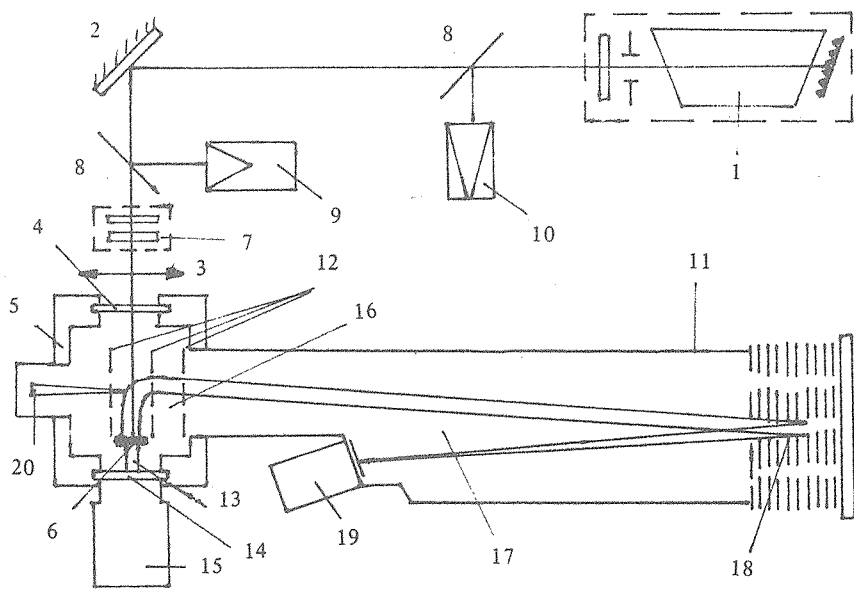


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

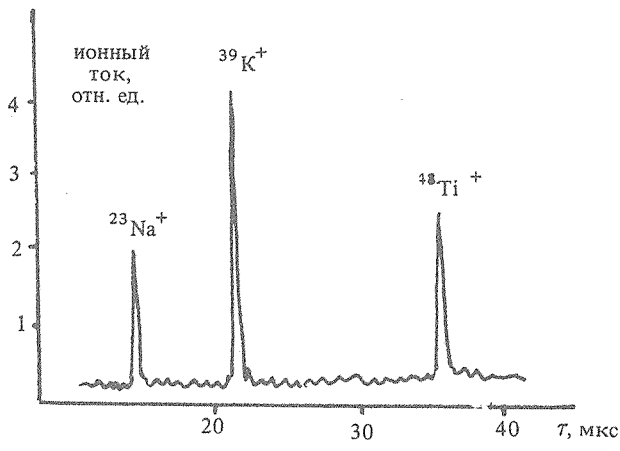


Рис. 2. Характерный масс-спектр ионов при облучении титановой мишени в вакууме.

При облучении свежеприготовленной поверхности мишени в первых нескольких импульсах при плотности энергии $E_s \gtrsim 1$ Дж/см² вблизи поверхности наблюдалась интенсивная вспышка свечения и регистрировался скачок давления в вакуумной камере, что связано с десорбцией газов (кислорода, азота, СО, СО₂, Н₂). В последующих импульсах количество десорбированных газов резко уменьшалось. Затем осуществлялся напуск азота и водорода. После напуска и откачки азота при облучении мишени импульсами с $E_s \cong 10$ Дж/см² сигнал нейтрального азота снижается за 2-3 импульса до уровня фона (в 10-20 раз по сравнению с сигналом в первом импульсе). В то же время очистка поверхности титана от адсорбированного водорода происходит значительно медленнее, и для достижения уровня фона требуются уже сотни импульсов.

Последующие эксперименты были выполнены в условиях лазерной очистки, когда сигнал, связанный с десорбцией газов, не превышал фонового. Типичный масс-спектр в этом случае представлен на

рис. 2. Появление ионов носит пороговый характер по E_s (для ионов K^+ пороговое значение $E_s^0 \cong 6$ Дж/см², для Na^+ $E_s^0 \cong 8$ Дж/см² и для Ti^+ $E_s^0 \cong 10$ Дж/см²). При увеличении E_s интенсивность ионных пиков быстро растет.

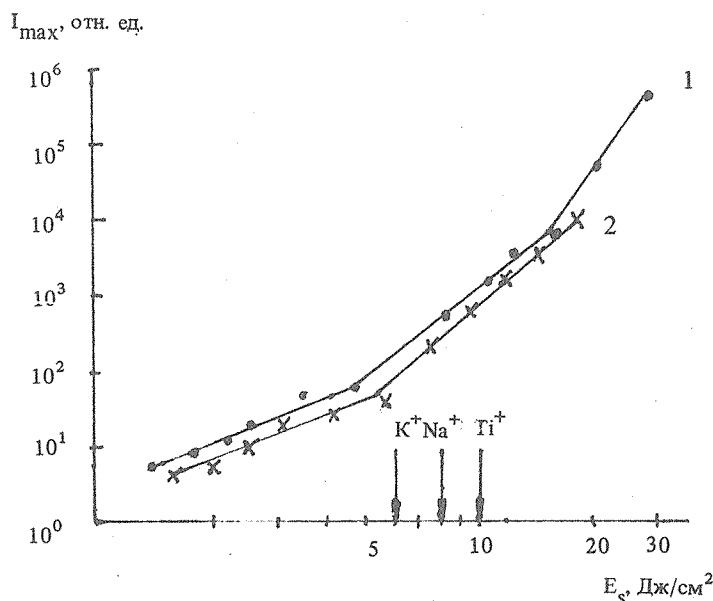


Рис. 3. Зависимость максимума сигнала свечения I_{max} в относительных единицах от плотности лазерной энергии E_s при облучении поверхности титановой мишени в вакууме (1) и в атмосфере азота (2).

На рис. 3 представлена зависимость максимума сигнала свечения I_{max} от плотности лазерной энергии E_s при облучении поверхности мишени в вакууме (кривая 1) и в атмосфере азота (кривая 2). Стрелками указаны значения пороговых плотностей энергии E_s^0 , при превышении которых в масс-спектре появляются линии соответствующих ионов. Анализ полученной зависимости позволяет сделать следующие выводы. Порог появления сигнала свечения (на уровне чувствительности ФЭУ) составляет $\cong 1$ Дж/см² в вакууме и $\cong 1,5$ Дж/см² в атмосфере азота. Зависимость $I_{max}(E_s)$ можно разбить на три участка с различным наклоном: $1 \text{ Дж/см}^2 \leq E_s \leq 5 - 6 \text{ Дж/см}^2$ (участок 1), $6 \text{ Дж/см}^2 \leq E_s \leq 15 - 16 \text{ Дж/см}^2$ (участок 2) и $E_s \geq 16 \text{ Дж/см}^2$ (участок 3). Характерно, что при $E_s > 6$ Дж/см² в масс-спектре появляются линии ионов K^+ и Na^+ , а при $E_s > 10$ Дж/см² — линии Ti^+ . Пробой атмосферного азота наблюдается при $E_s^0 \cong 14$ Дж/см². Отсюда следует, что пробой окружающего мишень газа в исследованном случае наступает тогда, когда в приповерхностной области появляются ионы материала мишени. Участок 2 на кривых 1 и 2 естественно трактовать как участок ионизации примесных атомов, имеющих на поверхности, когда с ростом интенсивности лазерного излучения растет их количество и интенсивность сигнала свечения.

Природа приповерхностного свечения на участке 1 заслуживает отдельного рассмотрения. Можно предположить, что в этом случае приповерхностное свечение обусловлено: а) эмиссией электронов в пристеночную область и их взаимодействием с фоновым и десорбированным газом; б) тепловой люминесценцией отдельных участков поверхности мишени, покрытых окислами и другими неорганическими и органическими соединениями; в) диссоциацией органических молекул, попавших на поверхность мишени; г) нагревом металлических дефектов поверхности до высоких температур.

Нами проведены также исследования облученной и необлученной поверхности мишеней из пористого титана на электронном микроскопе ISM-840. Сравнение облученных и необлученных участков показало, что видоизменений крупномасштабного (10–100 мкм) рельефа поверхности практически не происходит.

Однако на облученных участках на фоне крупномасштабного рельефа проявляются мелкие детали в виде открытых пор, мелких кратеров и т.д. Возможно, что появление таких мелких (~ 1 мкм) дефектов обусловлено взрывной десорбцией газов, скапливающихся в полостях подповерхностного слоя (блистерингом). Такая десорбция может приводить к росту давления газа в пристеночной области и снижению порога его пробоя, что и наблюдалось в первых импульсах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев В. П. и др. Взаимодействие мощного импульсного лазерного излучения с твердыми телами в газах. Радиотехника. Итоги науки и техники, т. 31, М., ВИНТИ, 1983, с. 220.
2. Бонч-Бруевич А. М., Диденко И. А., Капорский Л. Н. Изв. АН СССР, сер. физ., 49, 1096 (1985).
3. Берченко Е. А. и др. Квантовая электроника, 4, 842 (1984).
4. Крутякова В. П., Смирнов В. Н. Письма в ЖЭТФ, 3, 1190 (1977).
5. Domann E. E. et al. Appl. Opt., 25, 1371 (1986).
6. Ковалев В. И. Труды ФИАН, 136, 51 (1982).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 20 ноября 1986 г.