

ИЗМЕНЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ СПЕКТРАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ПРИ- ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ УГЛЕРОДНОЙ МИШЕНИ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем
имени А.Н.Севченко» Белорусского государственного университета
Минск, Республика Беларусь, puzyrev@bsu.by

Исследованы временные характеристики свечения эрозионной лазерной плазмы графитовой мишени. Облучение мишени производилось лазером с длиной волны $\lambda = 1064$ нм и длительностью импульса по полуширине $\tau = 20$ нс в вакууме. Оценена яркостная температура плазмы в приповерхностной области лазерной мишени, которая составляет ~ 9800 К. Эксперименты показали, что излучение спектральных линий появляются, когда воздействие лазерного излучения уже закончилось, лазерный факел достаточно остыл и все процессы плазмообразования прошли, а наблюдаются только процессы распада плазмы.

При осаждении углеродных пленок с контролируемым составом на различные подложки целесообразно использовать воздействие на углеродную мишень лазерного излучения в вакууме [1,2]. Это позволяет получать контролируемые технологии нанесения пленок с наперед заданными параметрами. Как известно, условия лазерного воздействия [3] влияют на параметры плазмы, от которой зависят свойства осаждаемой пленки.

Эксперимент. Для воздействия на мишень был использован импульсный YAG:Nd³⁺ лазер LS-2137 фирмы Lotis-TII с длиной волны $\lambda = 1064$ нм и длительностью импульса по полувысоте $\tau = 20$ нс. Мишень устанавливалась под углом 45° к оси лазерного пучка. Измерение проводилось в вакууме при давлении остаточных газов $\sim 10^{-3}$ Па. Мишень вращалась со скоростью 2 об/мин, чтобы предотвратить образование глубокого кратера на поверхности мишени, что может сказаться на пространственной форме эрозионного факела.

Мишень была изготовлена из высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ1.

Все эксперименты проводились при плотности мощности лазерного излучения $5,6 \cdot 10^8$ Вт/см², так как в этом случае осаждаемые пленки на подложках содержат максимальное количество sp^3 – связи углерода.

Измерение временных параметров свечения факела производилось с помощью датчика Silicon Photomultiplier Detectors (SPM 10020) и осциллографа Tektronix TDS2022B. Спектральные свойства плазмы изучались с помощью спектрометра S100-2048 фирмы SOLAR Laser Systems, а также двойного монохроматора ДМР-4.

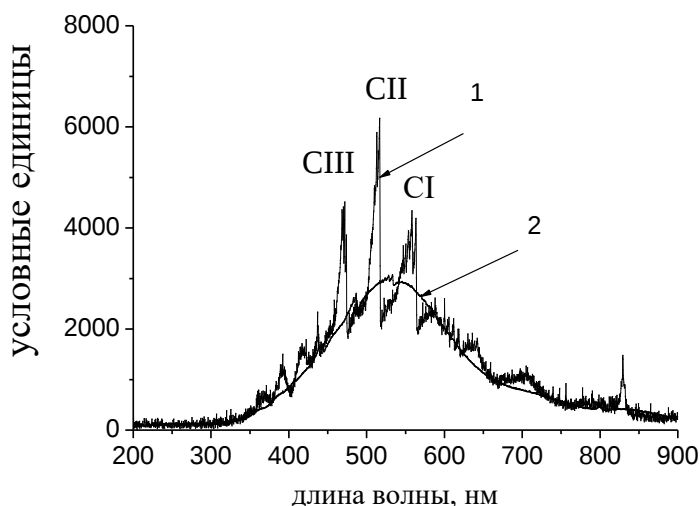


Рисунок 1 – Интегральный спектр по времени свечения графитовой плазмы вблизи поверхности мишени 1 – спектр, 2 – фон, обработанный БИХ (бесконечная импульсная характеристика) фильтром. Плотность мощности воздействующего лазерного излучения $5,6 \cdot 10^8$ Вт/см².

углерода.

Измерение временных параметров свечения факела производилось с помощью датчика Silicon Photomultiplier Detectors (SPM 10020) и осциллографа Tektronix TDS2022B. Спектральные свойства плазмы изучались с помощью спектрометра S100-2048 фирмы SOLAR Laser Systems, а также двойного монохроматора ДМР-4.

Обсуждение результатов.

С помощью спектрометра S100-2048 фирмы SOLAR Laser Systems были получены интегральные во времени спектры углеродной плазмы вблизи поверхности мишени. Типичный спектр приведен на рисунке 1.

Как видно из рисунка спектр представляет собой отдельные спектральные линии углерода и его ионов различной степени кратности на фоне значительного непрерывного

излучения. По форме непрерывного излучения была оценена яркостная температура эрозионной лазерной плазмы графита в вакууме вблизи поверхности мишени. Эта температура в наших условиях составляет ~ 9800 К. Следует заметить, что это температура поверхности плазменного образования. Внутри этого образования находится плотная неидеальная плазма с параметрами значительно большими, чем на ее поверхности.

В некоторых работах [4,5] оценки температуры производят по спектральным линиям спектров, полученных без временного излучения. В настоящей работе внимание было уделено спектральным исследованиям с разрешением во времени. Излучение плазмы для отдельных спектральных линий в зависимости от времени изучалось с помощью двойного монохроматора ДМР-4. С выходной щели монохроматора сигнал подавался на датчик SPM 10020. С датчика сигнал регистрировался осциллографом Tektronix TDS2022B. Результаты экспериментов изображены на рисунках 2, 3, 4.

На рис.2а изображена интенсивность свечения линии CI в области спектра 579,3 нм во времени.

Начало временного отсчета на рисунке совпадает с началом воздействия лазерного импульса. Как видно из этого рисунка свечение начинается с некоторой задержкой по отношению к началу лазерного воздействия. Это связано с процессами поглощения лазерного излучения мишенью, ее нагревом, испарением и процессами ионизации в продуктах разрушения. При этом время свечения эрозионного лазерного факела значительно больше времени лазерного воздействия. Свечение продуктов лазерной эрозии вблизи поверхности мишени начинается ~ 50 нс после начала

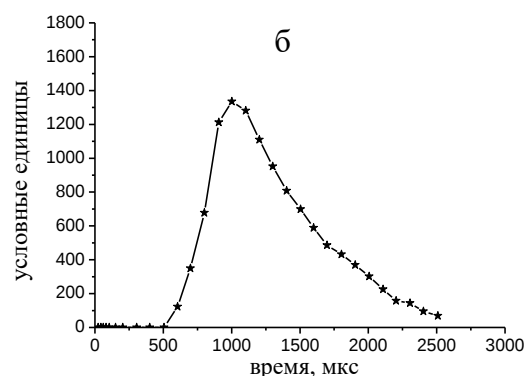
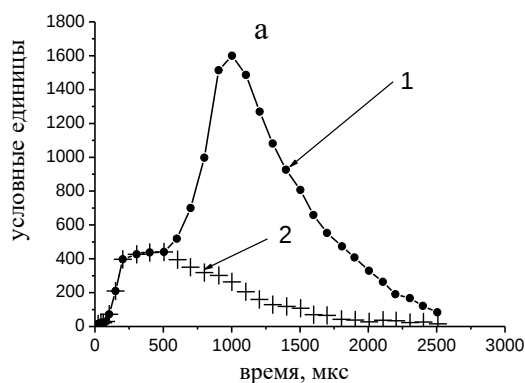


Рисунок 2 - Зависимость от времени свечения плазмы а) 1 – суммарный сигнал свечения линии и фона, 2 – свечение фона в области 530 нм б) – свечение линии 573,9 нм.

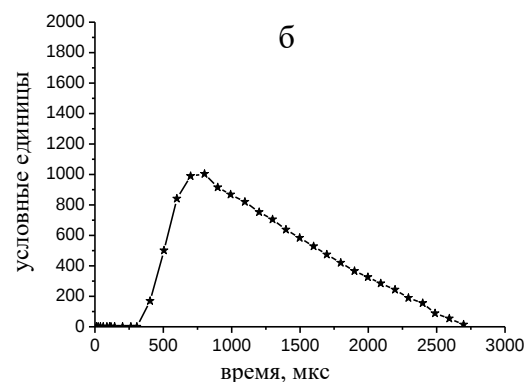
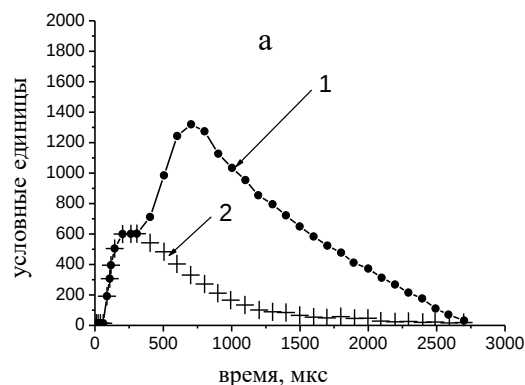


Рисунок 3 - Зависимость от времени свечения плазмы а) 1 – суммарный сигнал свечения линии и фона, 2 – свечение фона в области 579,3 нм б) – свечение линии 514,5 нм.

лазерного воздействия. В последующие ~ 150 нс свечение увеличивается и достигает некоторого максимума и в течение ~ 300 нс мало изменяется. Начиная с ~ 500 нс происходит заметный рост свечения, максимум которого наблюдается в момент времени 1000 нс. После этого интенсивность свечения экспоненциально падает и после 3000 нс практически отсутствует. На этом же рисунке изображено свечение эрозионной лазерной плазмы в области спектра ~ 480 нм, в которой не наблюдается излучения линий, а светиться только непрерывное излучение (см. рисунок 1). Как видно из рисунка 2, а свечение вплоть до 500 нс определяется сплошным спектральным излучением и только после 500 нс наблюдается суммарное излучение линии СИ 579 нм и сплошного излучения. На рисунке 2, б. изображена кривая, полученная путем

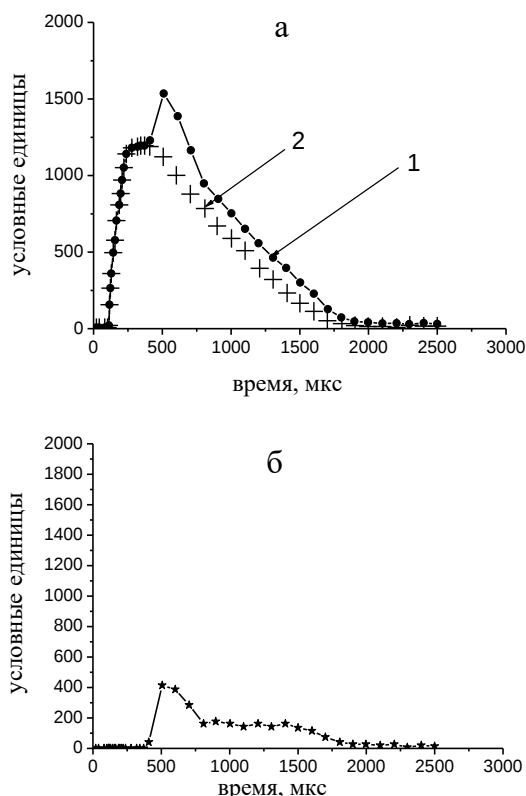


Рисунок 4 - Зависимость от времени свечения плазмы а) 1 – суммарный сигнал свечения линии и фона, 2 – свечение фона б) – свечение линии 465 нм

Такие же эксперименты были проведены и с излучением линии СИ 465 нм и фоном вблизи этой линии. Результаты этих экспериментов изображены на рисунке 4.

Заключение

Таким образом, анализ результатов, изображенных на рисунках 1-4, позволяет обобщить их следующим образом. При воздействии лазерного импульса длительностью 20 нс по полувысоте и плотностью мощности $5,6 \cdot 10^8$ Вт/см² на углеродную мишень происходит задержка начала свечения плазмы по отношению к лазерному излучению. Затем вблизи поверхности мишени формируется плотное облако продуктов разрушения, которое характеризуется интенсивным излучением во всем спектральном диапазоне и близко к излучению абсолютно черного тела. Это позволяет достаточно просто оценить яркостную температуру плазменного облака вблизи мишени в начальной стадии его формирования. В нашем случае она составляет 9800 К. Затем плазменное облако расширяется и остывает и появляется излучение линий ионов. Из рисунков видно, что излучение ионов большей кратности ионизации появляется с меньшей задержкой по отношению к ионам меньшей кратности ионизации.

вычитания кривых на рисунке 2, а. Как видно из рисунка 2 излучение спектральной линии СИ начинается значительно позже, чем излучение непрерывного фона. Это объясняется тем, что при воздействии лазерного импульса на углеродную мишень первоначально вблизи поверхности мишени формируется плотное облако неидеальной плазмы, свечение которой близко к излучению абсолютно черного тела. После некоторого времени, когда плазменное облако расширяется, уменьшая свою плотность, оно охлаждается. В это время появляется излучение спектральных линий.

Аналогичные эксперименты проведены и в других спектральных диапазонах. На рисунке 3 изображены временные зависимости кривых свечения линии СИ 514,5 нм и непрерывного излучения на длине волны ~ 480 нм, где отсутствует излучение спектральных линий, а также изменение во времени излучения СИ 514,5 с вычетом фона.

Результаты эксперимента, изображенного на рисунке 3 аналогичны результатам рисунка 2, отличаясь только значениями характерных временных интервалов и амплитудных значений.

Длительность свечения линий ионов наоборот тем больше, чем меньше кратность ионизации.

Следует заметить, что в некоторых работах [4, 5] производятся измерения параметров лазерной плазмы по линейчатому спектру исходя из интегральных по времени спектров свечения и приписывают эти параметры к времени воздействия лазерного излучения. Однако, как показали наши эксперименты, излучение спектральных линий появляется, когда воздействие лазерного излучения уже закончилось, лазерный факел достаточно остыл и все процессы плазмообразования прошли, а наблюдаются только процессы распада плазмы. Для режима нанесения покрытий на различные материалы, как раз такие процессы определяют многие параметры пленок. Это обосновывается тем, что средняя скорость продуктов разрушения составляет ~ 10 км/с, а расстояние от мишени до подложки ~ 10 см.

Список литературы

1. Chrisey, D.B. Pulsed Laser Deposition of Thin Films [Text] / D.B.Chrisey, G.K.Hubler. - New York: John Wiley & Sons Inc.,1994.
2. Bonelli, M. Pulsed laser deposition of diamondlike carbon films on polycarbonate [Text] / M.Bonelli, A.Miotello, P Mosaner // J.Appl.Phys. – 2003. – V. 93. – P. 859-865
3. Гончаров, В.К. Влияние структуры источника углерода на фазовый состав углеродных пленок, осаждаемых лазерно-плазменным методом [Текст]/ В.К.Гончаров, Г.А.Гусаков, М.В.Пузырев, М.П. Самцов // В "Новые материалы: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка" Сб. трудов 9-ой международной научно-технической конференции. – Минск, 2010. С.192-193.
4. Unnikrishnan, V.K. Measurements of plasma temperature and electron density in laser induced copper plasma by time-resolved spectroscopy of neutral atom and ion emissions [Текст] / V.K.Unnikrishnan, A.Kamlesh, V.B.Kartha, C.Santhosh, G.P.Gupta, B.M.Suri // Pramana – journal of physics. – 2010. – Vol. 74, N 6. – P. 983–993.
5. Kubkowska, M. Characterisation of laser-produced tungsten plasma using optical spectroscopy method [Текст]/ M.Kubkowska, P.Gasior, M.Rosinski, J.Wolowski, M.J.Sadowski, K.Malinowski, E.Skladnik-Sadowska // Eur. Phys. D. – 2009. – Vol. 54. – P. 463–466.