

04;07;12

Влияние давления воздуха на пространственные и эмиссионные характеристики лазерного факела алюминия в припороговом режиме абляции

© М.П. Чучман, А.К. Шуайбов, Л.В. Месарош

Ужгородский национальный университет,
88000 Ужгород, Украина
e-mail: ishev@univ.uzhgorod.ua

(Поступило в Редакцию 22 апреля 2010 г.)

Представлены результаты исследования пространственных характеристик лазерной плазмы алюминия при интенсивности лазерного излучения $(3.8-4.8) \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ и остаточном давлении воздуха 6.7–133.3 Па. Установлено, что длительность свечения плазмы алюминия составляет $50 \mu\text{s}$ и снижается с уменьшением плотности мощности лазерного излучения. Максимум свечения наблюдается при $t = 1.4 \mu\text{s}$ и возрастает с увеличением энергии лазерного излучения. Определены характерные размеры излучающей области лазерного факела.

Введение

Алюминий используется в качестве отражающих покрытий для металлических зеркал из-за того что он обладает высоким и стабильным коэффициентом отражения в широком спектральном диапазоне [1]. Технология получения слоев нитрида галлия включает в себя нанесение промежуточных слоев AlN на поверхность подложки в атмосфере азота. Бинарное полупроводниковое соединение AlN является почти идеальным материалом подложки для эпитаксиального выращивания тонких пленок GaN с точки зрения близости параметров решетки и коэффициентов теплового расширения, высокой теплопроводности и стойкости к окислению. Эти аспекты приводят к принципиальной возможности выращивания пленок GaN с минимальными механическими напряжениями [2].

Высокая кристаллографическая совершенство образцов AlN была продемонстрирована в работах [3,4]. Подложки AlN более пригодны к использованию в некоторых полупроводниковых устройствах микроэлектроники, например, в сверхвысокочастотных транзисторах, где используются высокие изоляционные свойства соединения AlN [5]. Основной областью применения нитридов алюминия являются люминесцентные источники света с высокой эффективностью излучения [6].

Буферный слой AlN наносят методом термического испарения алюминия, в паровой фазе которого преобладает атомарная составляющая, или методом импульсного лазерного напыления [7,8]. В продуктах лазерной эрозии алюминия возможно формирование наночастиц [9,10], которые при осаждении на подложку формируют конденсат AlN с необходимыми свойствам.

Эффективность испарения алюминиевой мишени сильно зависит от давления азота в вакуумной камере и от процессов эрозии металлической мишени под действием лазерного излучения [11].

За последнее время проведен ряд исследований лазерной плазмы алюминия, которая образуется при по-

мощи импульсов генерации неодимового лазера длительностью 20 ns и расширяется в вакууме. Процессы образования нитридов алюминия изучены недостаточно полно. Особый интерес представляет синтез наноструктур на основе нитридов металлов третьей группы для их использования в нанoeлектронике. Получение качественных тонких слоев нитридных соединений заданного состава составляет значительную технологическую проблему [12,13]. При исследовании лазерного факела возникает ряд трудностей вследствие малого интервала времени существования и малых размеров плазмы, что требует использования методов диагностики с высоким временным и пространственным разрешением. Изучение характеристик лазерного факела алюминия позволяет более обоснованно подбирать режим распыления мишени с целью синтеза наноструктур с заданными свойствами.

В настоящей работе излучались осциллограммы свечения лазерной плазмы алюминия при разных остаточных давлениях воздуха в вакуумной камере и мощностях излучения неодимового лазера. Исследования проведены при пороговых значениях мощности лазерного излучения вследствие наиболее эффективной абляции материала мишени алюминия в этом режиме. Исследованы пространственные характеристики лазерного факела алюминия в воздухе.

Условия и техника эксперимента

Лазерная плазма формировалась посредством действия импульсно-периодического излучения лазера „ЛТИРСН-4“ $((3.8-4.8) \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2, 1.6 \mu\text{m}, 20 \text{ ns}, 12 \text{ Hz})$ на мишень. В качестве мишени использовался образец особо чистого алюминия. Фокусировка лазерного излучения на поверхность мишени осуществлялась длиннофокусной линзой ($F = 50 \text{ cm}$) в пятно диаметром 0.4–0.5 mm.

Энергия несфокусированного лазерного излучения в импульсе достигала 20–30 мДж. Мишень располагалась в вакуумной камере при давлении остаточных газов 8–53 Па.

Отбор излучения осуществлялся со всего участка свечения плазмы при помощи импульсного фотоэлектронного умножителя ФЭУ „FOTON“, сигнал регистрировался при помощи осциллографа S1-99. Погрешность измерения составляет 10%.

Фотографии зарегистрированы при помощи цифровой фотокамеры с разделением 1200×1600 пикселей.

Пространственные характеристики лазерной плазмы

Эксперименты проводились для исследования влияния изменения мощности в пределах $(3.8\text{--}4.5) \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ на интенсивность излучения лазерной плазмы алюминия. Также изучалось влияние изменения давления воздуха и мощности лазерного излучения на длительность интегрального по длинам волн (200–700 нм) излучения лазерной плазмы алюминия. Для этого подобраны такие условия эксперимента, которые позволяют получать зависимости

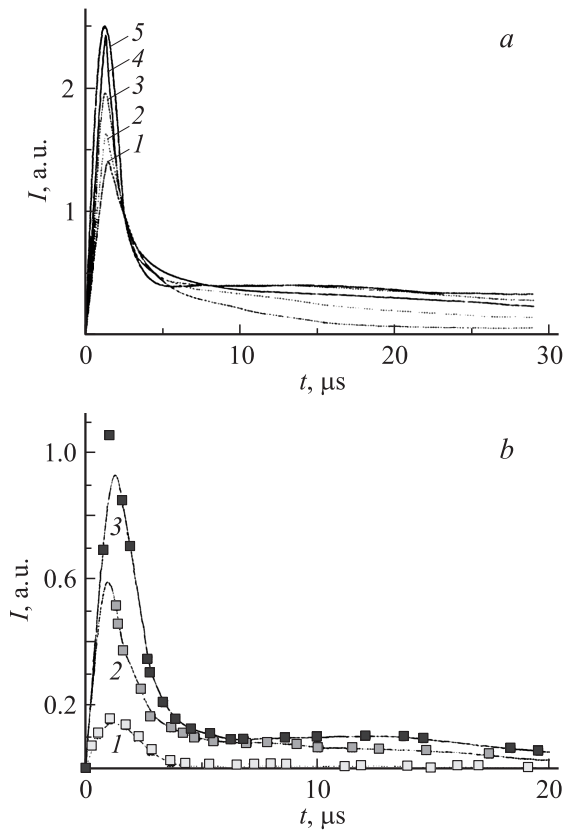


Рис. 1. Осциллограммы свечения лазерной плазмы алюминия при разных значениях: *a* — давления в вакуумной камере (I — 53, 2 — 27, 3 — 24, 4 — 19, 5 — 11 Па); *b* — мощности излучения лазера (I — $2 \cdot 10^8$, 2 — $3.8 \cdot 10^8$, 3 — $4.8 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$).

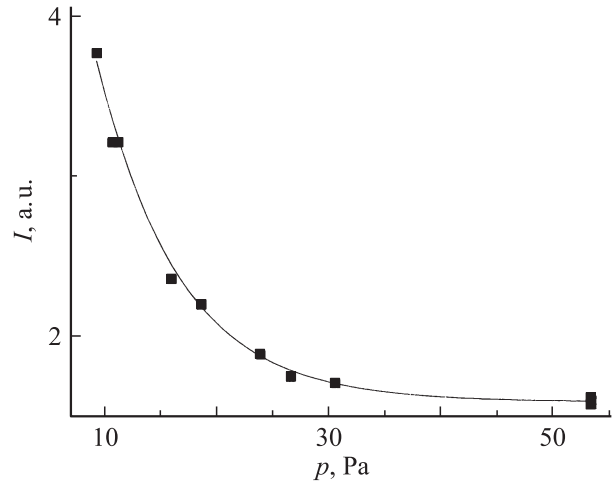


Рис. 2. Зависимость интегральной интенсивности излучения плазмы лазерного факела от давления в вакуумной камере. Кривая — аппроксимация экспериментальных данных экспонентой.

интенсивности всей области излучения плазмы от времени $I(t)$.

При таких условиях для определения длительности излучения лазерной плазмы построены осциллограммы рис. 1, которые показывают, что длительность свечения плазмы составляет порядка $50 \mu\text{s}$ для мощности $4.8 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ и уменьшается до $30 \mu\text{s}$ при мощности $3.8 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$. Максимум наблюдается при $1.4 \mu\text{s}$ и отображает возникновение наибольшего количества излучающих частиц в лазерном факеле. Подобное время наблюдения максимума излучения ($1.2 \mu\text{s}$), которое принадлежит атомам на расстоянии 5 мм от мишени при давлении воздуха 133 Па, было обнаружено и в работе [14]. Из рисунков следует, что с увеличением энергии лазерного импульса возрастает интенсивность излучения лазерной плазмы. При небольших давлениях и повышенных мощностях наблюдается повторное увеличение интенсивности в области от 10 до $14 \mu\text{s}$ (см. рис. 1).

В работе [9] представлена осциллограмма излучения спектральной линии атома алюминия (396 нм). Из нее видно, что длительность излучения составляет больше $8 \mu\text{s}$ на расстоянии 1.8 см от мишени. Максимумы наблюдаются при времени 0.23 и $1.1 \mu\text{s}$. Приведенные в [9] результаты получены при давлении воздуха $2 \cdot 10^{-2}$ Па и мощности лазерного излучения $3 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$.

На рис. 2 отражено влияние давления воздуха в вакуумной камере на интенсивность излучения плазмы. Интенсивность излучения лазерной плазмы алюминия при разных остаточных давлениях воздуха в вакуумной камере с увеличением давления уменьшается по закону $I \sim e^{-p}$. Наибольшая интенсивность наблюдается при давлении 11 Па, а наименьшая — при $p = 53$ Па.

Такая зависимость объясняется тем, что при низких давлениях взаимодействие лазерного факела с остаточными газами проявляется меньше. Поскольку основным

Характеристические размеры излучающей области лазерного факела

Давление, Па	Мощность, 10^8 W/cm ²	Общие размеры		Яркая часть		Ядро факела	
		длина, см	ширина, см	длина, см	ширина, см	длина, см	ширина, см
6.7	4.4	2.6	1.8	0.94	0.56	0.31	0.13
13.3	4.4	1.5	1.1	0.72	0.4	—	—
66.7	4.4	0.94	0.85	0.72	0.63	—	—
133.3	4.4	0.79	0.75	—	—	—	—
9	3.8	2.8	2.4	0.9	0.3	0.2	0.2
9	4.8	2.8	2.6	1.1	0.5	0.3	0.2
53	3.8	0.7	0.56	0.24	0.2	—	—
53	4.8	1	0.93	6.4	0.54	—	—

процессом в лазерной плазме является рекомбинация, то увеличение давления приводит к уменьшению количества рекомбинирующих ионов (из-за взаимодействия с молекулами окружающего газа и передачи им определенного количества энергии). Соответственно интенсивность излучения лазерной плазмы уменьшается. Рекомбинационные процессы проходят быстрее за счет увеличения эффективности обмена энергией между частицами внутри лазерного факела, когда его расширению препятствует внешний газ. Поэтому длительность излучения с ростом давления уменьшается.

Для анализа пространственной структуры лазерной плазмы сделаны фотографии, представленные на рис. 3. Плазма, которая возникает возле поверхности мишени алюминия, излучает в синей области спектра, что является подтверждением того, что наиболее интенсивные спектральные линии атомов и ионов алюминия лежат именно в этом спектральном диапазоне.

На основании фотографий возможно оценить характеристические размеры излучающей области лазерного факела (см. таблицу). С увеличением давления отдельные области лазерного факела алюминия становятся

трудно различимыми. При давлении 13.3 Па невозможно четко различить ядро факела, а с увеличением давления до 133.3 Па плазма сжимается в одно яркое пятно. Общие размеры факела при давлении воздуха 133.3 Па становятся подобными наиболее яркой части плазмы алюминия при давлении 6.7 Па в вакуумной камере. Данные фотографии подтверждают осциллографические измерения, а также показывают, что интенсивность излучения лазерного факела возрастает с увеличением энергии, которая поступает на мишень.

Лазерный факел начинает ошугито расширяться после прекращения действия лазерного излучения [9]. Эксперименты по фотографированию плазмы [9] проводились при мощности лазерного излучения $3 \cdot 10^9$ W/cm² и давлении воздуха 20 Па. При времени 100 ns размер факела увеличивался относительно предыдущего размера при 75 ns и он становился более удлиненным. На других стадиях разлета удлинение еще больше и наблюдается взаимодиффузия частиц лазерной плазмы с частицами окружающего газа. Так же как в наших измерениях, при высоких давлениях факел преобразуется в яркое пятно с трудно различимыми областями.

В работе [9] также показано, что при давлении воздуха 20 и 173 Па в начальные моменты времени (до 100 ns) плазма находится возле мишени на расстоянии до 0.5 см и имеет хорошо различимые границы. Наибольшая интенсивность лазерного факела алюминия наблюдается на расстоянии 1 см от мишени. Это означает, что на этом участке наибольшая концентрация излучающих частиц. Излучающая составляющая лазерного факела при времени 300 ns и больше концентрируется на границе области наблюдения плазмы. При низких давлениях и больших временах наблюдения граница факела размывается.

Исходя из результатов работы [9], где фотографирование проводилось с экспозицией 2 ns, можно объяснить разделение лазерного факела на характеристические области, которые приведены в таблице. При давлении 20 Па наиболее яркая часть лазерного факела алюминия наблюдается до 150 ns и отображает одномерное расширение. Дальше частицы начинают концентрироваться на границе видимой части лазерного факела, которая представляет его общие размеры.

Автор работы [15] приводит значение длины факела углерода. При давлении 13.3 Па гелия и мощности ла-

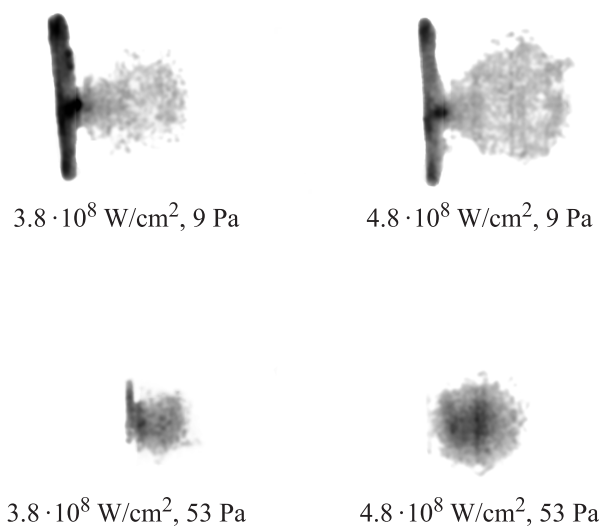


Рис. 3. Фотографии лазерной плазмы алюминия при разных мощностях излучения неодимового лазера.

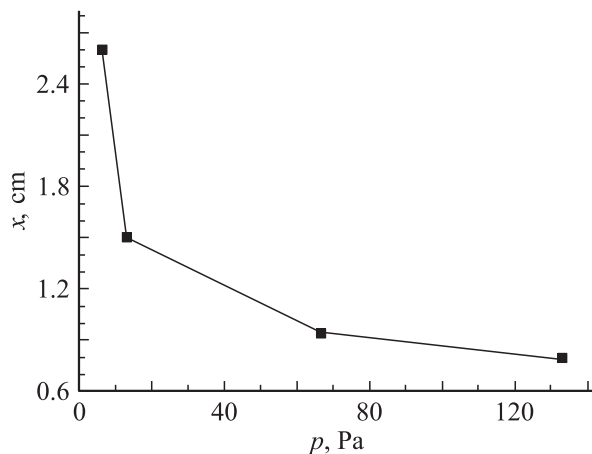


Рис. 4. Зависимость длины лазерного факела алюминия от давления в вакуумной камере при плотности мощности неодимового лазера $4.8 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$.

зерного излучения $81 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ она составляет 2.6 см. В работе [9] длина лазерного факела алюминия составляла 2.8 см при давлении 20 Па и мощности лазерного излучения $3 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$. В наших измерениях длина лазерного факела алюминия достигала 2.6 см при давлении 6.7 Па мощности излучения лазера $4.8 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$.

Аналогичные сравнения проведем для больших значений давления. В работе [9] для лазерного факела алюминия при давлении 133 Па длина составляла 18 см, а для углерода при таком же давлении — 1.7 см [15]. Наши результаты измерения длины лазерного факела при давлении 133 Па и мощности излучения $4.8 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ составляют 0.79 см.

Обработка фотографий позволила построить график зависимости длины лазерного факела от давления воздуха в вакуумной камере при мощности излучения $4.8 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$. На рис. 4 отражено резкое уменьшение размеров лазерного факела ($x < 1 \text{ cm}$) при увеличении давления в вакуумной камере до десятков паскалей. Хотя припороговый режим абляции и характеризуется незначительным выбросом мелкодисперсной капельной фазы, что дает возможность более точного контроля толщины напыляемой пленки, но для улучшения состава пленки в результате образования продуктов химических реакций в плазме давление химически активного газа в вакуумной камере не должно превышать 20 Па. В противном случае подложку придется размещать на очень близких расстояниях от мишени. Соотношение полученных нами значений длины лазерного факела при разных значениях давления хорошо совпадает с результатами работ [9,15]. Как следует из зависимости (рис. 4) и данных работ [9,15], характер расширения лазерной плазмы алюминия и углерода очень похож.

Заключение

В данной работе изучены осциллограммы свечения лазерной плазмы алюминия при разных остаточных

давлениях воздуха в вакуумной камере и мощностях излучения неодимового лазера. Установлено, что длительность свечения плазмы алюминия составляет $50 \mu\text{s}$ и снижается с уменьшением плотности мощности лазерного излучения. Максимум свечения наблюдается при $1.4 \mu\text{s}$, а его высота возрастает с увеличением энергии лазерного импульса.

При помощи фотографий лазерного факела алюминия в воздухе при разных значениях давления 6.7–133.3 Па и мощности излучения неодимового лазера $(3.8\text{--}4.8) \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ определены характеристические размеры излучающей области лазерного факела. Обнаружено хорошее совпадение полученных нами результатов с литературными данными. Полученные результаты будут полезны для оптимизации условий напыления пленок алюминия и нитрида алюминия.

Авторы выражают благодарность доц. И.Э. Качеру и аспиранту Г.Е. Ласлову за помощь в обработке фотографий и обсуждение результатов эксперимента.

Список литературы

- [1] Рабек Я. Экспериментальные методы в фотохимии и фотофизике. М.: Мир, 1985. 68 с.
- [2] Сукач Г.О., Кидалов В.В., Ревенко А.С., Чобанюк В.М., Фрейк Д.М. // Фізика і хімія твердого тіла. 2007. Т. 8. С. 227–239.
- [3] Liu L., Edgar J.H. // Mater. Sci. and Eng. Rep. 2002. Vol. 37. P. 61–127.
- [4] Schowalter L.J., Rojo J.C., Slack G.A., Shusterman Y., Wang R., Bhat I., Arunmozhi G. // J. Cryst. Growth. 2000. Vol. 211. P. 78–81.
- [5] Okumura H., Hamaguchi H., Koizumi T., Balakrishnan K., Ishida Y., Arita M., Chichibu S., Nakanishi H., Nagatomo T., Yoshida S. // J. Cryst. Growth. 1998. Vol. 189–190. P. 390–394.
- [6] Danylyk Y., Romanov D., McCullen E. // Mat. Res. Soc. Proc. 2003. Vol. 743. P. 725–728.
- [7] Sánchez-García M.A., Calleja E., Monroy E., Sánchez F.J., Calle F. // J. Cryst. Growth. 1999. Vol. 201–202. P. 415–418.
- [8] Grzegory I., Bockowski M., Lucynik B. // J. Mater. Sci. Semicond. Process. 2001. Vol. 4. P. 535–541.
- [9] Harilal S.S., Bindhu C.V., Tillack M.S. // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. P. 2380–2389.
- [10] Albert O., Roger S., Glinec Y., Loulergue J.C., Etchepare J., Boumer-Beborgne C., Perriere J., Millon E. // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90. P. 456–462.
- [11] Nica P., Vizureanu P., Agop M., Gurlui S., Focsa C. // Jpn. J. Appl. Phys. 2009. Vol. 48. P. 066 001.
- [12] Чучман М.П., Шуайбов А.К. // Фізика плазми. 2008. Т. 34. С. 340–346.
- [13] Котлярчук Б.К., Попович Д.І., Середняцький А.С. // Фізика і хімія твердого тіла. 2004. Т. 5. С. 481–484.
- [14] Сухов Л.Т. Лазерный спектральный анализ. Новосибирск: Наука, 1990. 143 с.
- [15] Harilal S.S. // Appl. Surface Sci. 2001. Vol. 172. P. 103–109.