УДК 621.373.533.9

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЛАЗЕРНОМ ИСТОЧНИКЕ ИОНОВ АЛЮМИНИЯ С УПРАВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ НАНОПЛЕНОК

В. К. ГОНЧАРОВ[1)]***, М. В. ПУЗЫРЕВ***[1)]***, В. Ю. СТУПАКЕВИЧ***[2)]

[1)]*НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» БГУ, ул. Курчатова, 7, 220108, г. Минск, Беларусь*
[2)]*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь*

Рассмотрены физические процессы в лазерном источнике ионов алюминия для нанесения нанопленок. Обоснована электрическая схема источника ионов с двумя независимыми друг от друга источниками питания. Ионный источник представляет собой мишень и воздействующее на нее лазерное излучение, подложку и сетку, расположенные между ними. Заряженные частицы (электроны и ионы) из эрозионного лазерного факела движутся на подложку, на которую осаждается нанопленка за счет потока ионов алюминия. Методом контроля электронного и ионного токов экспериментально найдены условия, при которых после сетки на подложку движутся заряженные частицы, преимущественно в виде ионов. Проведены исследования временных характеристик ионных потоков в промежутке сетка – подложка при разных постоянных положительных потенциалах сетки по отношению к подложке и различных плотностях мощности воздействующего лазерного излучения. В наших экспериментах расстояние мишень – сетка составило 6 см, расстояние сетка – подложка равнялось 6 см, прозрачность сетки – 86 %. В качестве материала лазерной мишени использовался алюминий марки А7. Плотность мощности лазерного излучения изменялась в интервале (от 2,54 до 5,41) $\cdot 10^8$ Вт/см^2. Показано, что технологическими режимами осаждения нанопленок можно управлять с помощью положительного потенциала на сетке по отношению к подложке, изменяя величину ионного потока на подложку и его длительность. Кроме того, режимами осаждения нанопленок можно управлять, изменяя плотность мощности воздействующего лазерного излучения и сопротивление утечки зарядов с подложки.

Ключевые слова: эрозионная лазерная плазма; алюминиевая мишень; плазменный источник ионов.

Образец цитирования:
Гончаров В. К., Пузырев М. В., Ступакевич В. Ю. Физические процессы в лазерном источнике ионов алюминия с управляемой энергией для нанесения нанопленок // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 3. С. 79–87.

For citation:
Goncharov V. K., Puzyrev M. V., Stupakevich V. Y. Physical processes in a laser source of aluminum ions with the controlled energy for nanofilm deposition. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 3. P. 79–87 (in Russ.).

Авторы:
Виктор Константинович Гончаров – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий лабораторией лазерной плазмодинамики.
Михаил Валентинович Пузырев – кандидат физико-математических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории лазерной плазмодинамики.
Валерий Юзефович Ступакевич – старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета.

Authors:
Victor Goncharov, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the laboratory of laser plasma dynamics.
Mikhail Puzyrev, PhD (physics and mathematics), docent; leading researcher of the laboratory of laser plasma dynamics.
puzyrev@bsu.by
Valery Stupakevich, senior lecturer at the department of information systems and technologies, physico-technical faculty.
tv_sad@grsu.by

PHYSICAL PROCESSES IN A LASER SOURCE OF ALUMINUM IONS WITH THE CONTROLLED ENERGY FOR NANOFILM DEPOSITION

V. K. GONCHAROV[a], *M. V. PUZYREV*[a], *V. Y. STUPAKEVICH*[b]

[a]*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University, Kurčatava Street, 7, 220108, Minsk, Belarus*
[b]*Yanka Kupala State University of Grodno, Ažeška Street, 22, 230023, Grodno, Belarus*
Corresponding author: M. V. Puzyrev (puzyrev@bsu.by)

The physical processes in a laser source of aluminum ions for deposition of nanofilms have been considered. The electric scheme of an ion source with two power supplies has been substantiated. Power supplies were independent of each other. The ion source represented a target that was exposed to the effect of laser radiation, the substrate and a grid located between them. From the erosive a laser plume, the charged particles (electrons and ions) moved to the substrate. Aluminum nanofilm was formed on the substrate due to the flux of aluminum ions. The conditions under which the charged particles moving to the substrate after the grid were represented mainly by ions have been found experimentally. The time characteristics of the ion flux within the grid-substrate space have been determined at various constant positive potentials of the grid with respect to the substrate and at several power densities of laser radiation. In our experiments, the target-grid distance was 6 cm, the grid-substrate distance was 6 cm, the grid transparency was 86 %. The laser target was made of aluminum (Al 1070). The power density of laser radiation was varying as (from 2.54 to 5.41) $\cdot$ 10^8 W/cm^2. It has been shown that the technological regimes of nanofilm deposition may be controlled using a positive potential at the grid relative to the substrate by changes in the ion flux to the substrate and in its duration. Besides, deposition of nanofilms may be controlled by changes in the power density of laser radiation and by resistance of the charge leakage from the substrate.

Key words: erosive laser plasma; aluminum target; plasma ion source.

Введение

При достижении веществом размеров хотя бы по одной координате 100 нм и менее [1] оно приобретает свойства наноматериалов, которые изменяют свои характеристики по сравнению с массивными образцами не только в зависимости от физических свойств вещества, но и от размеров. В настоящее время многие модификации различных материалов включают в себя тонкопленочные покрытия толщиной 100 нм и менее вплоть до нескольких нанометров. Характеристики таких покрытий можно менять, варьируя их толщину. По функциональному назначению такие покрытия связаны практически со всеми разделами физики – механикой, электричеством, магнетизмом и оптикой.

Одним из методов нанесения нанопленок на различные материалы (подложки) является лазерно-плазменный [2; 3]. Он имеет несколько преимуществ перед другими методами. Во-первых, это возможность получать плазму практически из любого вещества, во-вторых, – стерильность, т. е. при нанесении пленок в вакууме лазерное излучение не вносит дополнительных примесей в осаждаемое покрытие. Кроме того, лазерно-плазменный метод позволяет относительно легко автоматизировать процесс нанесения пленок.

Для изменения режимов нанесения пленок лазерно-плазменным методом варьировали плотность мощности воздействующего на мишень лазерного излучения и расстояния от лазерной мишени до подложки. Это несколько затрудняет автоматизацию процесса ввиду сложной пространственной структуры эрозионного лазерного факела в вакууме [4]. В [5] был предложен лазерно-плазменный источник ионов с регулируемой энергией для создания пленок, в котором для нанесения покрытий используется поток ионов из эрозионного лазерного факела. В этом источнике с помощью воздействия лазерного излучения на мишень получается плазма. Между источником плазмы (лазерной мишенью) и подложкой, где происходит осаждение пленки, помещается сетка, на которую подается отрицательный потенциал по отношению к мишени, и от сетки к подложке идет поток преимущественно из ионов. Подавая на сетку различный положительный потенциал по отношению к подложке, можно легко регулировать энергию ионов для создания пленок на различные подложки и тем самым управлять технологическими режимами нанесения покрытий. В [5] рассмотрены некоторые физические процессы в промежутке мишень – сетка для графитовой мишени. Однако сложные плазмодинамические процессы в таком источнике ионов изучены недостаточно полно.

Цель настоящей работы – исследовать физические процессы в лазерно-плазменном источнике ионов алюминия с регулируемой энергией для нанесения нанопленок.

Экспериментальное оборудование

Для воздействия на мишень был использован YAG : Nd^{3+}-лазер LS-2137 фирмы «ЛОТИС ТИИ» (Беларусь) с длиной волны λ, равной 1064 нм, и длительностью импульса на полувысоте $\tau = 20$ нс. Мишень устанавливалась под углом 45° к оси лазерного луча. Эксперименты проводились в вакууме при давлении остаточных газов, равном приблизительно 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; она была изготовлена из технически чистого алюминия марки А7. Контроль временных характеристик проводился с помощью осциллографа Tektronix TDS 2022B (США).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Общая схема эксперимента представлена на рис. 1. Взаимное расположение мишени, сетки, подложки и лазерного луча значительно зависит от объема и формы вакуумной камеры. В настоящих экспериментах расстояние мишень – подложка составляло 12 см, а сетка располагалась между ними, т. е. на расстоянии 6 см от поверхности мишени.

Это расстояние определяется некоторыми факторами, в частности формированием в эрозионном лазерном факеле двойного электрического слоя, и способом подвода энергии лазерного излучения к поверхности мишени. В [6] проведены зондовые измерения потенциалов в эрозионном лазерном факеле, сформированном в вакууме. Было показано, что уже на расстоянии 2,5 см от поверхности мишени формируется двойной электрический слой, когда удобно разделять электронные и ионные потоки. Расположить сетку ближе чем на 2,5 см к поверхности мишени затрудняет подвод лазерного излучения к мишени.

В условиях экспериментов [6] достаточно было подать на сетку отрицательный потенциал 5 В, чтобы после сетки поток заряженных частиц состоял преимущественно из ионов. При увеличении расстояния мишень – сетка до 6 см достаточно было подать на сетку 10 В.

Однако все эксперименты проводились с небольшой плотностью мощности воздействующего излучения. В настоящей работе ставилась задача провести исследования при максимально возможных в наших условиях плотностях мощности лазерного излучения. При этом в эрозионном лазерном факеле увеличиваются концентрация заряженных частиц и их первоначальные скорости, двойной электрический слой может сформироваться позже, и поэтому расстояние мишень – сетка было увеличено до 6 см. Расстояние мишень – подложка влияет на размер площади наносимой пленки. В нашем случае оно ограничивается размерами камеры. При расстоянии мишень – подложка, равном 12 см, удается наносить равномерную пленку размером ~5 × 5 см.

Формирование ионного потока в промежутке сетка – подложка при подаче тормозящего потенциала для электронов лазерной плазмы на сетку рассматривалось в нескольких вариантах: заземленная мишень, заземленная подложка и заземленная сетка. В результате экспериментов и анализа их результатов авторы пришли к выводу, что наиболее приемлемым вариантом при этом является вариант с заземленной сеткой. В других случаях имеется динамическая связь процессов, происходящих в промежутках мишень – сетка и сетка – подложка.

Таким образом, была обоснована электрическая схема лазерно-плазменного источника ионов с регулируемой энергией, представленная на рис. 1.

Сопротивления величиной 390 Ом, изображенные на рис. 1, являются сопротивлениями как нагрузки, с которых снимаются сигналы на осциллографы (ОСЦ1 и ОСЦ2), так и утечки зарядов с мишени и подложки.

Анализ эквивалентной схемы (см. рис. 1) показал, что при любых физических процессах в промежутках мишень – сетка и сетка – подложка независимо от подаваемых напряжений U_1 и U_2 источники питания автономны.

Первоначально был рассмотрен вариант, когда на сетку по отношению к лазерной мишени подавался различный отрицательный потенциал U_1, а на промежуток сетка – подложка потенциал не подавался, т. е. $U_2 = 0$. Результаты эксперимента приведены на рис. 2.

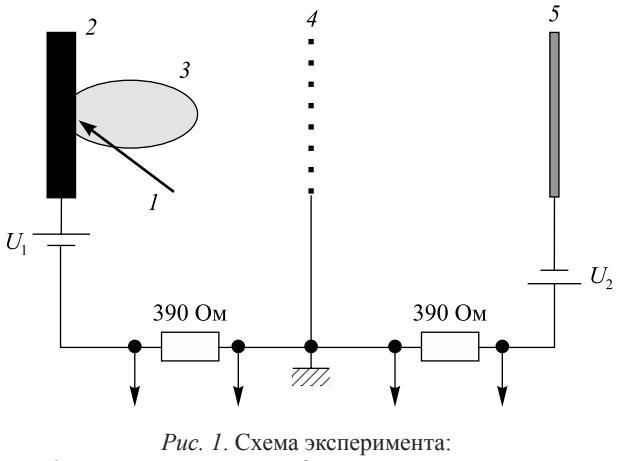


Рис. 1. Схема эксперимента:
1 – лазерное излучение; *2* – алюминиевая мишень;
3 – эрозионный факел; *4* – сетка; *5* – подложка

Fig. 1. Experimental scheme: *1* – laser radiation;
2 – aluminum target; *3* – erosive plume;
4 – grid; *5* – substrate

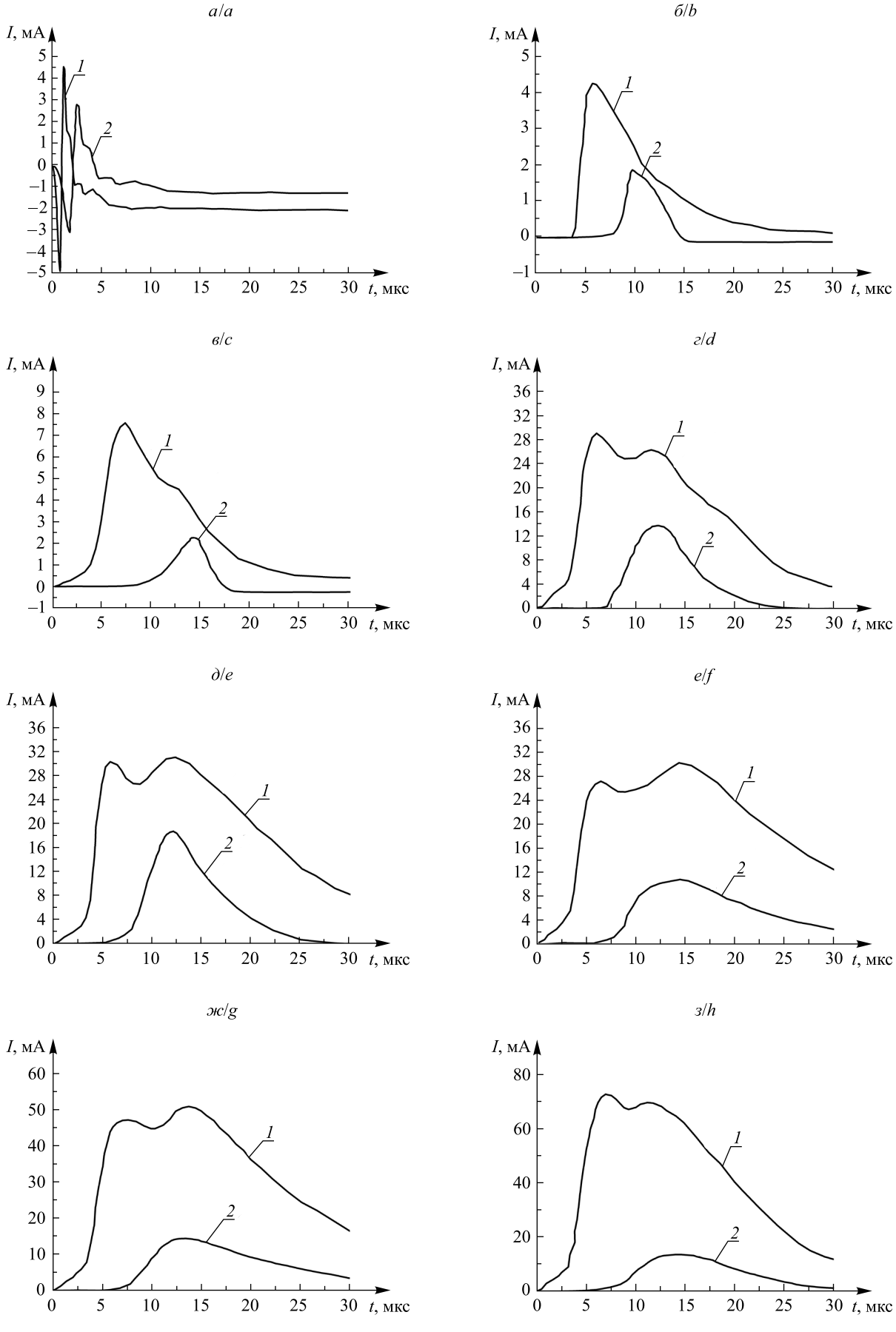


Рис. 2. Зависимость тока (*I*) сетки (*1*) и подложки (*2*) от потенциала между сеткой (–) и мишенью (+):
а – 0 В; *б* – 10; *в* – 20; *г* – 30; *д* – 50; *е* – 100; *ж* – 200; *з* – 400 В

Fig. 2. The grid (*1*) and substrate (*2*) current (*I*) as a function of the potential between the grid (–) and the target (+):
a – 0 V; *b* – 10; *c* – 20; *d* – 30; *e* – 50; *f* – 100; *g* – 200; *h* – 400 V

Если потенциал на сетке по отношению к мишени $U_1 = 0$, то на сетку приходят сначала более быстрые электроны, а затем более медленные ионы (см. рис. 2, *а*). На подложке при этом тоже сначала наблюдаются электроны, а затем приходят ионы.

При подаче на сетку напряжения, отрицательного по отношению к мишени, равного 10 В, электроны не доходят до сетки, и на ней регистрируется только положительный сигнал ионного тока (см. рис. 2, *б*). На подложке при этом фиксируется импульс ионного тока. В конце этого импульса наблюдается небольшой по амплитуде, но длительный импульс обратного тока ионов, отраженных от положительно заряженной подложки за счет ионов переднего фронта.

При подаче на сетку потенциала, отрицательного по отношению к мишени, равного 20 В, у сигнала на спаде появляется «горбинка» (см. рис. 2, *в*). Это связано с увеличением обратного тока электронов к мишени после прохождения ионами сеточного пространства и усилением отрицательного постоянного потенциала сетки по отношению к электронам в связи с уменьшением экранирующего действия ионами постоянного потенциала сетки. При этом на подложке наблюдается импульс ионного тока, у которого задняя часть срезана обратным током ионов по механизму, описанному выше.

В случае подачи на сетку потенциала, отрицательного по отношению к мишени, величиной 30 В обратный ток электронов возрастает (см. рис. 2, *г*) в связи с увеличением отрицательного потенциала на сетке при уменьшении экранировки сеточного потенциала после пролета ионов через сетку. При этом необходимо отметить, что все эти процессы (с обратным током электронов) происходят в промежутке сетка – мишень и никак не влияют на процессы в промежутке сетка – подложка.

При отрицательном потенциале 30 В ионы попадают на подложку с большей энергией, за счет этого исчезает отсечка ионного тока на подложку (см. рис. 2, *г*). В случае увеличения отрицательного потенциала до 50 В и более (см. рис. 2, *д*, *е*, *ж*, *з*) форма кривых объясняется вышесказанным.

Было показано, что в наших условиях при подаче отрицательного потенциала на сетку по отношению к мишени $U_1 = -10$ В поток заряженных частиц на подложку состоит преимущественно из ионов, поэтому следующие эксперименты проводились при таком потенциале на сетке по отношению к мишени. Со второго источника питания U_2 на сетку подавались различные потенциалы, положительные по отношению к подложке. Эти эксперименты проводились при плотности мощности воздействующего лазерного излучения $2{,}86 \cdot 10^8$ Вт/см^2. Их результаты приведены на рис. 3. Без подачи потенциала на сетку по отношению к подложке, т. е. $U_2 = 0$, первоначальный ионный поток определяется условиями (потенциалом) на сетке. Однако с течением времени на подложке по отношению к сетке появляется положительный потенциал за счет ионного тока и сигнал на подложке определяется как прямым током ионов, так и обратным. Через некоторое время ионы на подложке нейтрализуются через нагрузочное сопротивление и сигнал на подложке становится равным нулю (см. рис. 3, *а*, кривая *1*).

При подаче на сетку по отношению к подложке потенциала 0,5 В отрицательная часть импульса подложки уменьшается (см. рис. 3, *а*, кривая *2*). Это происходит за счет некоторого увеличения скорости ионов в промежутке сетка – подложка.

Если потенциал на сетке по отношению к подложке достигает 1 В, обратный ток ионов полностью исчезает (см. рис. 3, *а*, кривая *3*).

В наших условиях при подаче на сетку отрицательного по отношению к подложке потенциала 1,5 В сигнал на подложке приобретает сложную форму (см. рис. 3, *б*, кривая *4*). Первоначально он определяется потоком ионов, свободно летящих в ускоряющем отрицательном поле подложки. Затем за счет заряда подложки ионами происходит частичная экранировка постоянного отрицательного потенциала подложки и ионы уже летят с меньшей скоростью, чем первоначально: они скапливаются у поверхности подложки и происходят некоторая стабилизация процессов прихода ионов на подложку из промежутка сетка – подложка и нейтрализация заряда подложки через ее сопротивление (см. рис. 3, *б*, кривая *4*).

Когда потенциал сетки по отношению к подложке достигает 2 В, ток во второй половине импульса увеличивается (см. рис. 3, *б*, кривая *5*). Еще нагляднее это проявляется при потенциале на сетке по отношению к подложке 5 В (см. рис. 3, *б*, кривая *6*) и потенциале 10 В (см. рис. 3, *б*, кривая *7*).

При увеличении положительного потенциала на сетке по отношению к подложке до 20 и 30 В происходит такое ускорение ионов в промежутке сетка – подложка, что даже более медленные ионы ускоряются так, что достигают подложки. Импульс ионного тока в целом становится шире. Это происходит из-за влияния частичной экранировки постоянного потенциала подложки (см. рис. 3, *б*, кривая *8*; рис. 3, *в*, кривая *9*).

В случае увеличения потенциала сетки по отношению к подложке до 50 В заметной экранировки уже нет (см. рис. 3, *в*, кривая *10*). Импульс ионного тока увеличивается по амплитуде, что хорошо видно при дальнейшем увеличении положительного потенциала сетки по отношению к подложке (см. рис. 3, *в*, кривые *11–13*). Кроме того, на рис. 3 видно, что при увеличении постоянного положительного потенциала сетки по отношению к подложке скорость ионного потока увеличивается и ионы быстрее достигают подложки.

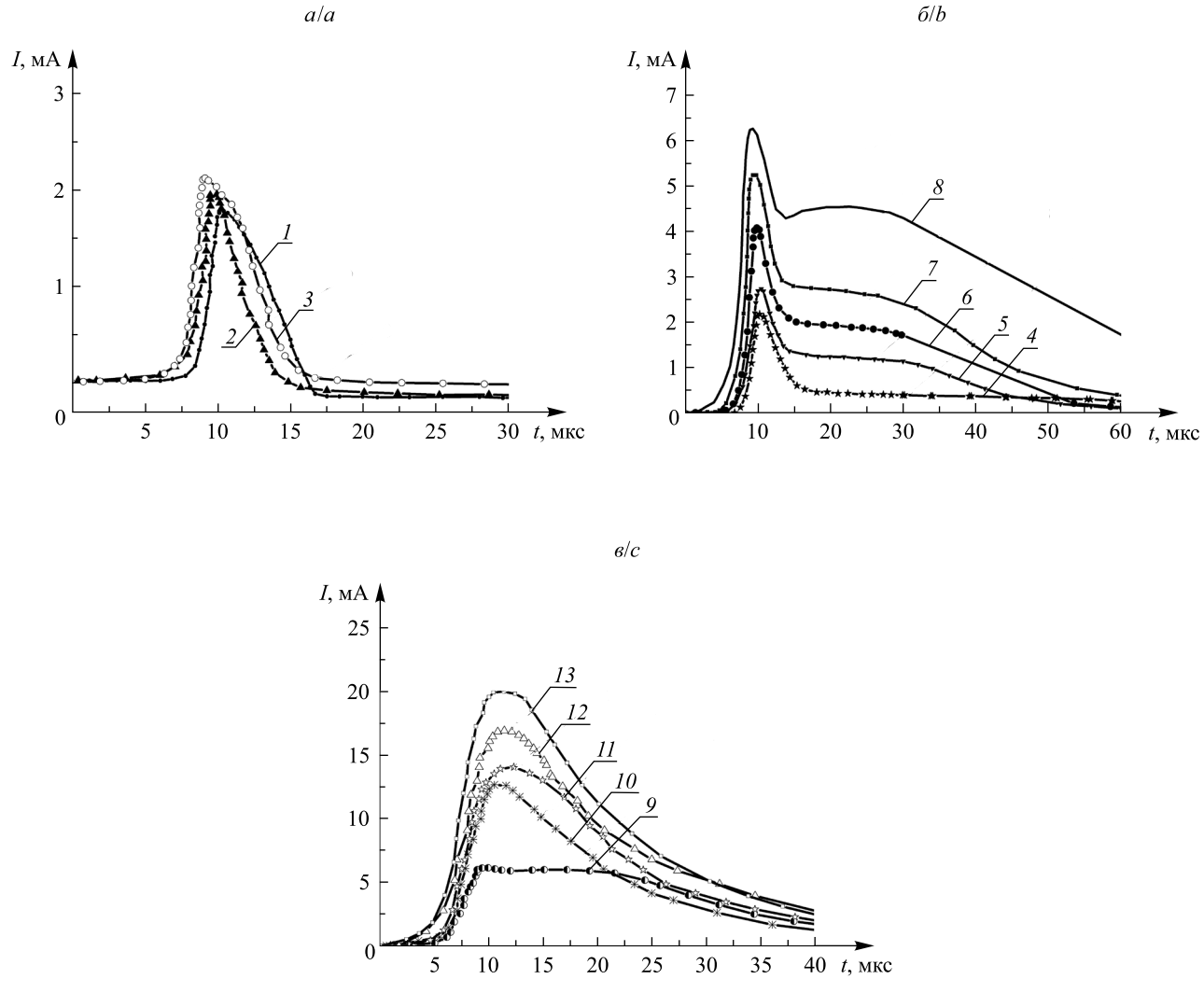


Рис. 3. Зависимость тока подложки от времени
при различных положительных потенциалах сетки по отношению к подложке:
1 – 0 В; *2* – 0,5; *3* – 1; *4* – 1,5; *5* – 2; *6* – 5; *7* – 10; *8* – 20; *9* – 30; *10* – 50; *11* – 100; *12* – 200; *13* – 400 В.
Промежуток сетка – мишень имеет постоянный отрицательный потенциал
на сетке по отношению к мишени, равный 10 В

Fig. 3. The substrate current versus time at various positive potentials of the grid relative to the substrate:
1 – 0 V; *2* – 0.5; *3* – 1; *4* – 1.5; *5* – 2; *6* – 5; *7* – 10; *8* – 20; *9* – 30; *10* – 50; *11* – 100; *12* – 200; *13* – 400 V.
The grid – target interval has a constant negative potential on the grid relative to the target 10 V

Эти эксперименты показали, что режимы нанесения пленок на подложки можно регулировать с помощью изменения положительного по отношению к подложке постоянного потенциала, подаваемого на сетку.

Все эти эксперименты были проведены при плотности мощности излучения $2{,}86 \cdot 10^8$ Вт/см^2. Однако при изменении плотности мощности воздействующего на мишень лазерного излучения меняются условия ионизации плазмы и, меняя концентрацию заряженных частиц, можно регулировать и режимы нанесения пленок на подложку. В связи с этим были проведены эксперименты с различной плотностью мощности воздействующего на мишень лазерного излучения.

Поскольку при больших плотностях мощности лазерного излучения увеличивается ионизация в плазме, то для задержки электронов в промежутке мишень – сетка было увеличено постоянное отрицательное напряжение, подаваемое на сетку, по отношению к мишени до 30 В.

Исследования проводились для трех различных положительных потенциалов на сетке по отношению к подложке: 50; 200 и 400 В. Такие измерения выполнялись при разных энергиях лазерного импульса: $2{,}54 \cdot 10^8$ Вт/см^2; $2{,}86 \cdot 10^8$; $3{,}34 \cdot 10^8$; $3{,}66 \cdot 10^8$; $5{,}41 \cdot 10^8$ Вт/см^2.

Результаты экспериментов приведены на рис. 4.

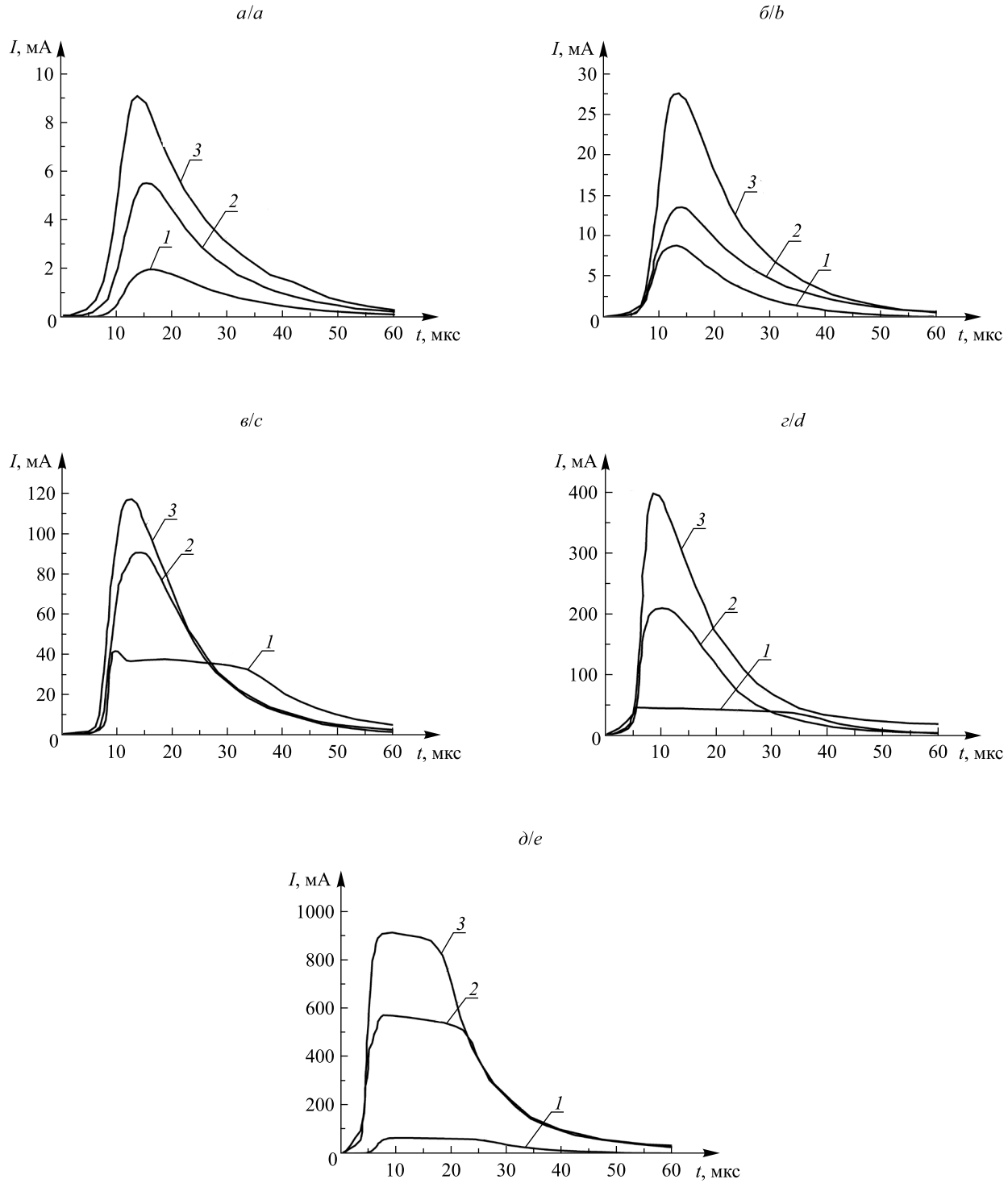


Рис. 4. Зависимость тока на подложке от времени при различных плотностях мощности лазерного излучения и разных ускоряющих потенциалах между сеткой и подложкой (отрицательный потенциал на подложке): *а* – 2,54 · 10^8 Вт/см^2; *б* – 2,86 · 10^8; *в* – 3,34 · 10^8; *г* – 3,66 · 10^8; *д* – 5,41 · 10^8 Вт/см^2; *1* – 50 В; *2* – 200; *3* – 400 В. Промежуток сетка – мишень имеет постоянный отрицательный потенциал на сетке по отношению к мишени, равный 30 В. Сопротивление утечки в цепи сетка – подложка составляет 390 Ом

Fig. 4. The substrate current versus time at various power densities of laser radiation and various accelerating potentials between the grid and the substrate, with a negative potential on the substrate: *a* – 2.54 · 10^8 W/cm^2; *b* – 2.86 · 10^8; *c* – 3.34 · 10^8; *d* – 3.66 · 10^8; *e* – 5.41 · 10^8 W/cm^2; *1* – 50 V; *2* – 200; *3* – 400 V. The grid – target interval has a constant negative potential on the grid relative to the target 30 V. The leakage resistance in a grid – substrate circuit is 390 Ω

При малых плотностях мощности воздействующего лазерного излучения до $2{,}54 \cdot 10^8$ Вт/см^2 ионные потоки, поступающие на подложку, зависят от приложенного потенциала к промежутку сетка – подложка (см. рис. 4, *а*). При этом временная форма импульсов близка к временной форме лазерной плазмы.

При увеличении плотности мощности лазерного излучения до $2{,}86 \cdot 10^8$ Вт/см^2 качественные результаты аналогичны предыдущему случаю, однако заметно значительное увеличение ионного потока на подложку (см. рис. 4, *б*).

В случае воздействия лазерного излучения плотностью мощности $3{,}34 \cdot 10^8$ Вт/см^2 на алюминиевую мишень при потенциале между сеткой и подложкой 50 В наблюдается резкое изменение временной формы ионного тока (см. рис. 4, *в*, кривая *1*). После достижения максимума ионный ток на подложку не спадает по экспоненциальному закону, а некоторое время стабилизируется во времени. Это может быть связано с тем, что поток ионов вследствие большей ионизации увеличивается, и он начинает экранировать постоянный отрицательный потенциал, подаваемый на подложку по отношению к сетке. Наступает момент, когда число подлетающих к подложке ионов сравнивается с числом ионов, нейтрализованных через сопротивление утечки. После того как интенсивность ионного потока на подложку снижается из-за распада плазменного факела, общий ионный поток на подложку уменьшается вплоть до нуля.

При увеличении постоянного потенциала на промежутке сетка – подложка эффект стабилизации ионного тока пропадает, так как в этом случае потенциал подложки при таких потоках ионов трудно компенсировать (см. рис. 4, *в*, кривые *2*, *3*). В этом случае ионный поток на подложку существенно больше, чем в предыдущих случаях.

В случае воздействия на алюминиевую мишень лазерного излучения плотностью мощности $3{,}66 \cdot 10^8$ Вт/см^2 форма импульсов ионного тока на подложку похожа на предыдущий случай, однако величины токов существенно увеличиваются (см. рис. 4, *г*).

При воздействии на алюминиевую мишень лазерного излучения плотностью мощности $5{,}41 \cdot 10^8$ Вт/см^2 ионные потоки обладают такой величиной, что при этом стабилизация ионного тока наблюдается даже при постоянном потенциале на промежутке сетка – подложка, составляющем 400 В (см. рис. 4, *д*). Это объясняется большим потоком ионов на подложку.

Скорость нейтрализации заряда с подложки определяется сопротивлением нагрузки, внутренним сопротивлением источника питания, емкостью подложки и паразитной индуктивностью конструкционных и проводящих элементов.

Для подтверждения нашего предположения о стабилизации тока при прохождении через подложку был проведен эксперимент по снижению сопротивления нагрузки, через которую происходит нейтрализация ионного заряда подложки с 390 до 30 Ом. Результат такого эксперимента приведен на рис. 5 при потенциале на подложке 400 В и плотности мощности воздействующего лазерного излучения $5{,}41 \cdot 10^8$ Вт/см^2.

Как видно из рис. 5, при уменьшении сопротивления разрядного контура ограничение ионного тока отсутствует, а токи при этом значительно увеличиваются.

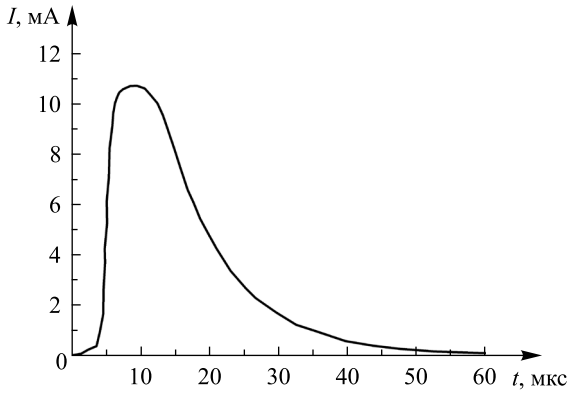


Рис. 5. Зависимость тока подложки от времени при плотности мощности воздействующего лазерного излучения $5{,}41 \cdot 10^8$ Вт/см^2. Промежуток сетка – мишень имеет постоянный отрицательный потенциал сетки по отношению к мишени, равный 30 В. Ускоряющий потенциал между сеткой и подложкой (положительный потенциал на сетке) равен 400 В. Сопротивление утечки в цепи сетка – подложка составляет 30 Ом

Fig. 5. The substrate current versus time at the power density $5.41 \cdot 10^8$ W/cm^2. The grid – target interval has a constant negative potential on the grid relative to the target 30 V. The accelerating potential between the grid and the substrate, with a negative potential on the substrate, is 400 V. The leakage resistance in a grid – substrate circuit is 30 Ω

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что из эрозионной лазерной плазмы при подаче отрицательного потенциала на сетку по отношению к мишени можно получить поток заряженных частиц, состоящий преимущественно из ионов.

Найдена электрическая схема питания двумя источниками промежутков мишень – сетка и сетка – подложка с общей заземленной сеткой. При этом оба источника питания являются независимыми.

Электронные потоки в промежутке мишень – сетка не влияют на режимы управления ионными потоками в промежутке сетка – подложка.

Таким образом, технологические режимы нанесения пленок можно регулировать отрицательным потенциалом на сетке по отношению к мишени, получая при этом потоки ионов; изменяя величину положительного потенциала на сетке по отношению к подложке, можно менять величину ионного потока на подложку. Кроме того, режимы нанесения различных пленок можно регулировать изменением плотности мощности воздействующего лазерного излучения и сопротивления утечки зарядов с подложки.

Использование источника ионов с регулируемой энергией дает возможность комплексной обработки подложки. При больших скоростях ионов происходит травление поверхности подложки, при умеренных – создание псевдодиффузионного слоя, и при уменьшении скорости ионов можно получать пленки различной толщины с высокой адгезией.

Библиографические ссылки

1. *Авадельказим О. О., Бай Ч., Капица С. П.* Нанонаука и нанотехнологии : энциклопедия систем жизнеобеспечения. М., 2011.

2. *Chrisey D. B., Hubler G. K.* Pulsed Laser Deposition of Thin Films. New York, 1994.

3. *Bonelli M., Miotello A., Mosaner P.* Pulsed laser deposition of diamondlike carbon films on polycarbonate // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. P. 859–865.

4. *Гончаров В. К., Пузырев М. В., Ступакевич В. Ю.* Пространственные и временные характеристики эрозионного факела на графитовой мишени в вакууме // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2016. № 1. С. 79–83.

5. *Гончаров В. К., Василевич А. Е., Пузырев М. В. и др.* Лазерно-плазменный источник ионов с регулируемой энергией для нанесения нанопленок // Электроника-инфо. 2016. № 11. С. 54–57.

6. *Гончаров В. К., Гусаков Г. А., Пузырев М. В. и др.* Зондовые исследования эрозионного плазменного факела углерода в вакууме // Физика и диагностика лабораторной и астрофизической плазмы : тр. XI Белорус.-серб. симп. (Минск, 15–19 дек. 2016 г.). Минск, 2016. С. 4–7.

References

1. Avadelkarim O. O., Bai Ch., Kapitsa S. P. [Nanoscience and nanotechnologies : encyclopedia of life support systems]. Moscow, 2011 (in Russ.).

2. Chrisey D. B., Hubler G. K. Pulsed Laser Deposition of Thin Films. New York, 1994.

3. Bonelli M., Miotello A., Mosaner P. Pulsed laser deposition of diamondlike carbon films on polycarbonate. *J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 93. P. 859–865.

4. Goncharov V. K., Puzyrev M. V., Stupakevich V. Yu. Spatial and temporal characteristics of the graphite-target erosive laser plume in the vacuum. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2016. No. 1. P. 79–83 (in Russ.).

5. Goncharov V. K., Vasilevich A. E., Puzyrev M. V., et al. [Laser plasma source of ions with control energy for deposition nanofilms]. *Elektronika-info*. 2016. No. 11. P. 54–57 (in Russ.).

6. Goncharov V. K., Gusakov G. A., Puzyrev M. V., et al. [Probe investigations of the carbon erosive plasma plume in vacuum]. *Physics and diagnostics of laboratory and astrophysical plasmas* : proc. of the XI Belarusian-Serbian symposium (Minsk, 15–19 Dec., 2016). Minsk, 2016. P. 4–7 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 07.06.2017.
Received by editorial board 07.06.2017.