

УДК 533.924

ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ НА СТЕКЛА ЧЕРЕЗ ДИАФРАГМЫ НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА

© 2024 г. В. Н. Колокольцев^{а,*}, В. Я. Никулин^{б,**}, П. В. Силин^б, И. В. Боровицкая^а,
Е. Н. Перегудова^б, А. И. Гайдар^с, Л. И. Кобелева^а, А. М. Мезрин^д, А. А. Ерискин^б

^а Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

^б Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

^с Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, Москва, Россия

^д Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

* e-mail: v.kolokoltsev@yandex.ru

** e-mail: nikulinvy@lebedev.ru

Поступила в редакцию 15.06.2023 г.

После доработки 20.12.2023 г.

Принята к публикации 28.12.2023 г.

Представлены результаты экспериментов по осаждению на силикатных стеклах тонких пленок тугоплавких металлов: молибдена, тантала и вольфрама. Использовался метод получения пленок, основанный на осаждении металлосодержащей плазмы, образующейся при воздействии на поверхность фольги из тугоплавких металлов мощных плазменных и ионных импульсов. В качестве генератора таких импульсов была использована установка типа плазменный фокус, позволяющая получать ионные пучки и плазменные потоки с плотностью потока энергии в диапазоне 10^{10} – 10^{12} Вт/см². С помощью металлических диафрагм с диаметром отверстий: 2.5, 3.5 и 4.5 мм выделялась наиболее интенсивная центральная часть ионно-плазменного потока. Получены пленки металлов: Мо, Та и W размерами $\varnothing$ 3–5 мм на поверхности стекол. Металлические пленки характеризуются хорошей адгезией, так как сплавляются с поверхностью стекла. Обнаружено нарушение планарности пленок из-за ухода расплавленных частиц металла под поверхность стекла. Пленки имеют неоднородный рельеф, что объясняется наличием металлических частиц микронных размеров в потоке плазмы.

Ключевые слова: плазменный фокус, ионный пучок, плазменная струя, тонкая пленка, метод осаждения тонких пленок

DOI: 10.31857/S0367292124030055, **EDN:** RGFLJG

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время допустимая температура нагрева больших интегральных схем достигла своего предела ~ 150 °C [1, 2]. Традиционно используемые материалы — кремний, медь и алюминий — исчерпали свои возможности [3]. По этой причине этим материалам подбирается замена из более тугоплавких металлов и различных термостойких изоляционных материалов [4, 5]. Среди кандидатов часто рассматриваются тугоплавкие металлы — вольфрам, молибден, тантал и ряд других металлов [6, 7].

Однако технология получения тонких электропроводящих дорожек и электрических контактов на новых термостойких изоляционных материалах при сборке интегральных схем становится очень сложной. Часто при производстве интегральных схем приходится напылять композиционные слои из различных металлов, чтобы получить хорошие

электрические контакты и адгезию [8]. Существуют различные методы осаждения тонких пленок металлов на поверхность изоляционных материалов [9, 10]. Все они в различной степени используются при изготовлении интегральных схем, однако поиск новых способов осаждения металлических пленок более простых и надежных остается актуальным.

Целью работы было получение пленок тугоплавких металлов: молибдена, тантала и вольфрама размером 3–5 мм на подложках из силикатных стекол с использованием высокопоточной электроразрядной установки типа плазменный фокус.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Установка плазменный фокус

Получение пленок тугоплавких металлов: Мо, Та и W на стеклянных пластинках выполняли на электроразрядной установке типа плазменный фокус

ПФ-4 ФИАН [11]. В работах [11–14] показано, что установки данного типа позволяют получать пучки ионов с энергией несколько десятков килоэлектрон-вольт и высокоскоростные ($>10^7$ см/с) плазменные струи с плотностью потока энергии, превышающей 10^{10} Вт/см². При воздействии таких пучков на поверх-

ность мишени из тугоплавких металлов за счет абляции возможно получение плазменных сгустков, содержащих ионы и атомы материала мишени. Образованная таким образом металлосодержащая плазма может быть осаждена на поверхности диэлектрической подложки с образованием тонкой металлической пленки.

Установка плазменный фокус ПФ-4 (ФИАН, Россия) [11] представляет собой электроразрядное устройство с медными коаксиальными электродами: анодом и катодом, размеры которых в диаметре соответственно равны 30 мм и 50 мм. В аноде имеется конусное отверстие $\varnothing \sim 9$ мм и глубиной ~ 7 –8 мм. Анод и катод отделены друг от друга цилиндрическим изолятором из вакуумно-плотной керамики.

Для электрического разряда применялся 3.5 кДж емкостной накопитель энергии при рабочем напряжении ~ 12 кВ. Характерное время нарастания разрядного тока составляло ~ 3 мкс при максимальном токе ~ 300 кА. Рабочими газами были азот и аргон при давлении в разрядной камере ~ 1 Торр. Напряжение от конденсаторного накопителя энергии поступало на анод через управляемый газонаполненный разрядник (рис. 1).

2.2. Принцип работы установки плазменный фокус

В начальной стадии ПФ-разряда в области изолятора разрядной системы формируется токово-плазменная оболочка (ТПО), движущаяся затем под действием пондеромоторных сил вдоль анода и сходящаяся на оси системы с образованием короткоживущей (время жизни порядка 10^{-7} с), плотной ($N_e = 10^{18} - 10^{21}$ см⁻³) и высокотемпературной ($T_e = 100 - 1000$ эВ) плазмы (пинча), распадающейся на более поздних стадиях разряда. Последовательные фазы движения ТПО показаны на рис. 1.

В момент максимального сжатия ТПО и распада пинча на производной разрядного тока регистрируется короткий импульс, который называют особенностью (рис. 2). В это же время наблюдается образование плазменной струи и пучка быстрых ионов, движущихся от анода вдоль оси системы ПФ (рис. 3).

Механизм образования плазменных струй и ионных пучков до сих пор мало изучен. Предполагается, что струи могут возникать как вследствие нецилиндричности ТПО, так и из-за развития перетяжек на пинче. В работе [11] была зарегистрирована скорость плазменной струи на уровне 5×10^7 см/с при ее плотности 10^{19} см⁻³.

В случае использования в качестве рабочего газа аргона при указанных параметрах энергия, переносимая струей плазмы, составляет величину более 1 кДж, а плотность потока энергии при длительности плазменного импульса 50 нс на мишени не менее 10^{10} Вт/см².

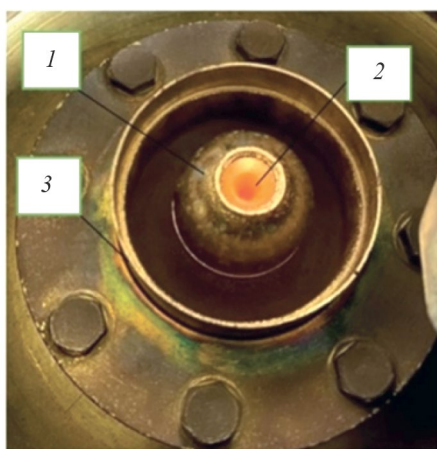
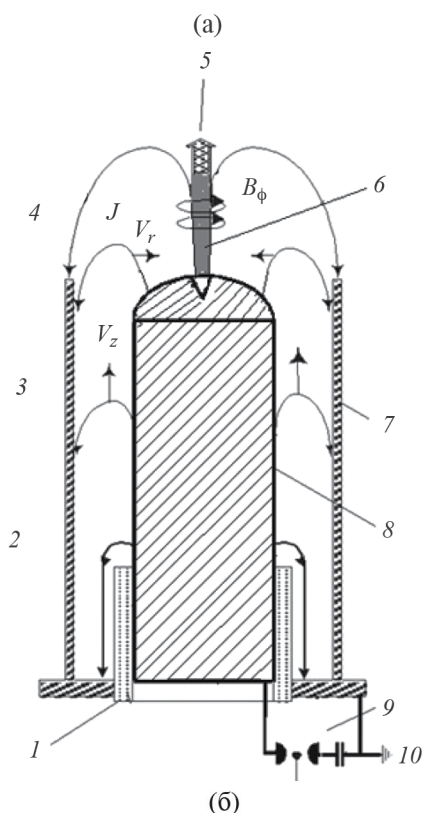


Рис. 1. а — Схема установки ПФ-4 и последовательные фазы движения ТПО: 1 — изолятор, 2 — фаза пробоя и формирования токово-плазменной оболочки (ТПО), 3 — фаза ускорения ТПО, 4 — фаза радиального сжатия, 5 — ионный пучок и плазменный поток, 6 — пинч, 7 — внешний электрод (катод), 8 — внутренний электрод (анод), 9 — разрядник, 10 — конденсаторная батарея.; б — анодный узел установки ПФ-4: 1 — анод; 2 — конусное отверстие; 3 — катод.

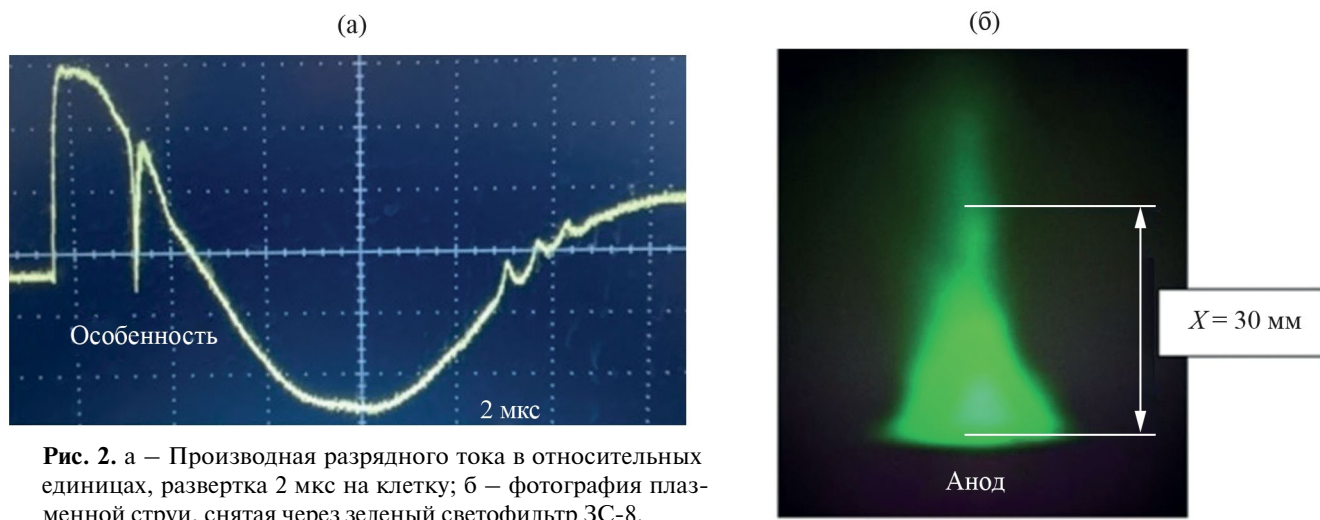


Рис. 2. а — Производная разрядного тока в относительных единицах, развертка 2 мкс на клетку; б — фотография плазменной струи, снятая через зеленый светофильтр 3С-8.

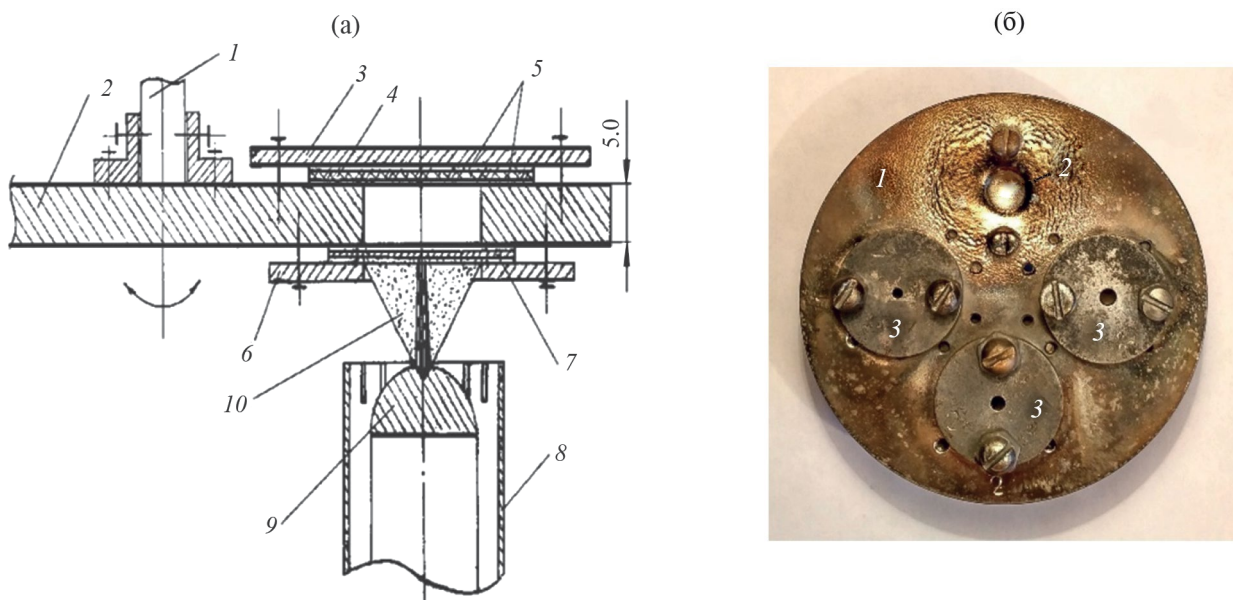


Рис. 3. Схема осаждения пленок металлов на стеклянные подложки: а — 1 — шток держателя образцов; 2 — диск держателя образцов из нержавеющей стали X18H10T; 3 — прижимная пластинка из стали X18H10T; 4 — стеклянная подложка; 5 — мягкие прокладки; 6 — диафрагма из стали X18H10T; 7 — мишень (металлическая фольга); 8 — катод; 9 — анод; 10 — струя плазмы; б — держатель образцов в сборке с металлической фольгой: 1 — стальной диск $\varnothing$ 100 мм, толщиной 5 мм; 2 — контрольная мишень из титана; 3 — диафрагмы.

В работе [13] отмечалось, что плотность потока энергии, создаваемой ионным пучком, может достигать величины $\sim 10^{12}$ Вт/см². Воспроизводимость параметров ионно-плазменного пучка (энергии, направления движения) контролировалась путем регистрации амплитуды особенности на производной разрядного тока (рис. 2а), а также фотографированием плазменной струи в оптическом диапазоне длин волн (рис. 2б).

Экспериментально установлено, что наличие особенности на производной разрядного тока свидетельствует о формировании плотного пинча, плаз-

менной струи и ионного пучка на оси ПФ. Замечено, что большей амплитуде особенности соответствует большая энергия ионно-плазменной струи и яркость ее свечения (рис. 2б) [12, 14].

Для получения металлосодержащей плазмы использовали фольгу тугоплавких металлов — Мо и W толщиной 20 мкм и фольгу Та толщиной 5 мкм. Их размеры были 15 × 15 мм. Исходя из данных, приведенных в справочнике [15] по теплоте сублимации металлов: Мо (582 кДж/моль), W (770 кДж/моль) и Та (745 кДж/моль), можно получить оценку необходи-

мой энергии для сублимации фольги: W — 150 Дж, Ta — 30 Дж, Mo — 75 Дж. Учитывая энергию ионного пучка и плазменной струи, приведенные выше, можно считать, что условия абляции фольги тугоплавких металлов будут выполняться.

2.3. Осаждение пленок тугоплавких металлов через диафрагмы

Для осаждения пленок тугоплавких металлов: Mo, Ta и W размером $\varnothing$ 3—5 мм изготавливались подложки из силикатных стекол размером 20×20 мм из фотопластинок толщиной 2—3 мм. Перед осаждением пленок металлов стекла промывали этанолом и дистиллированной водой. Диафрагмы из нержавеющей стали типа X18H10T имели отверстия: 2.5, 3.5 и 4.5 мм. Схема осаждения пленок тугоплавких металлов на стеклянные подложки через диафрагмы дана на рис. 3а. Здесь же приведено фото держателя образцов на три мишени рис. 3б. Держатель образцов на три мишени крепился на штоке в вакуумной камере (рис. 3а). Расстояние от поверхности фольги до анода установки ПФ во всех опытах было равно 30 мм.

Перед облучением фольги ионно-плазменным пучком через диафрагмы выполняли контрольное облучение плазмой мишень из титана (рис. 3б). Экспериментально подбирали режим облучения плазмой по амплитуде особенности на производной разрядного тока, чтобы достигалось плавление и испарение фольги. После этого поворотом держателя образцов устанавливали мишени на оси установки ПФ и облучали одним импульсом плазмы. Ввиду того, что амплитуда особенности и соответственно энергия плазменного потока могли меняться от им-

пульса к импульсу, мы делали выборку результатов воздействия плазмы на мишень из 3—5 образцов.

2.4. Методики измерений свойств металлических пленок

Свойства металлических пленок изучали на оптическом микроскопе Leika DM, растровом микроскопе EVO-40 со встроенным рентгеновским микроанализатором, оптическом профилометре 3D-модели Neox фирмы Sensobar-Tech, SL и цифровом профилометре XP-200 фирмы AMBIOS. Адгезию металлических пленок на поверхности стеклянных пластинок проверяли методом истирания.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Получение пленок тантала

На рис. 4а показана пленка Ta, полученная на стеклянной подложке через диафрагму $\varnothing$ 2.5 мм. На рис. 4б показана эта же пленка, снятая на сканирующем электронном микроскопе EVO-40 в характеристическом спектре Ta. Видно, что на поверхности пленки имеются отдельные крупные фрагменты фольги, а также присутствует множество мелких частиц размером от единиц до десятков микрон.

Как видно на рис. 5а, относительная концентрация Ta в пленке может изменяться от 40 до 100%, что указывает на сильно неоднородную структуру поверхности. На поверхности пленки также наблюдается значительное количество неконтролируемых примесей: калий, кальций, магний и алюминий, которые поступают в пленку при плавлении стеклянной подложки. Сканирование профиля поверхности пленки

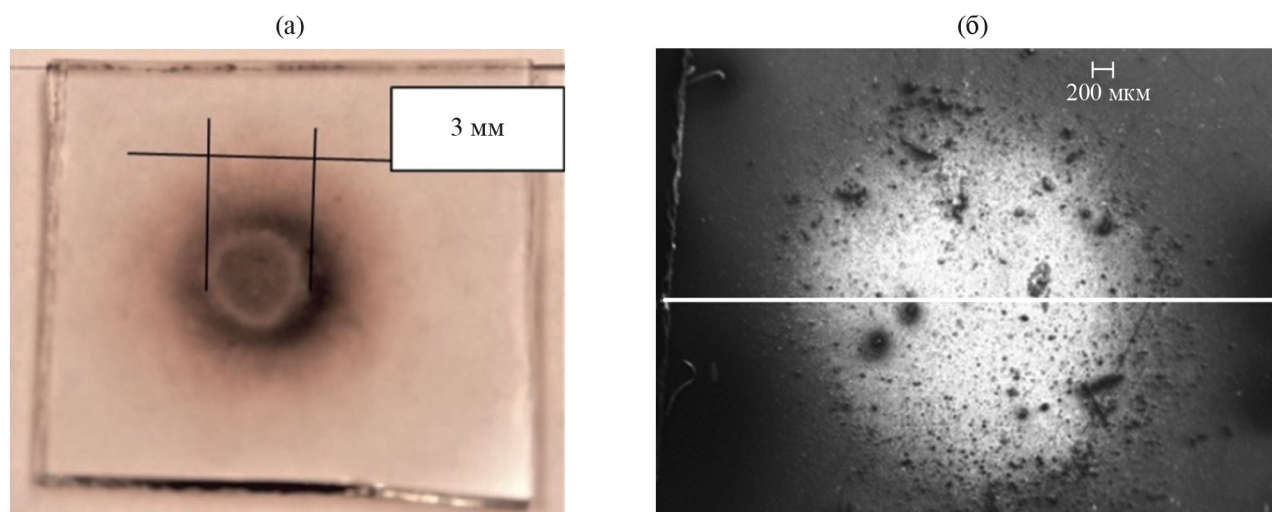


Рис. 4. а) — Танталовая пленка на поверхности стеклянной пластинки, осажденная через диафрагму с отверстием $\varnothing$ 2.5 мм. Рабочий газ аргон. Особенность 80 отн. ед.; б) — Фото пленки в характеристическом спектре Ta, снятое на сканирующем микроскопе EVO-40, увеличение 49×. Линией отмечено направление сканирования пленки при измерении относительной концентрации Ta и элементного состава (рис. 5).

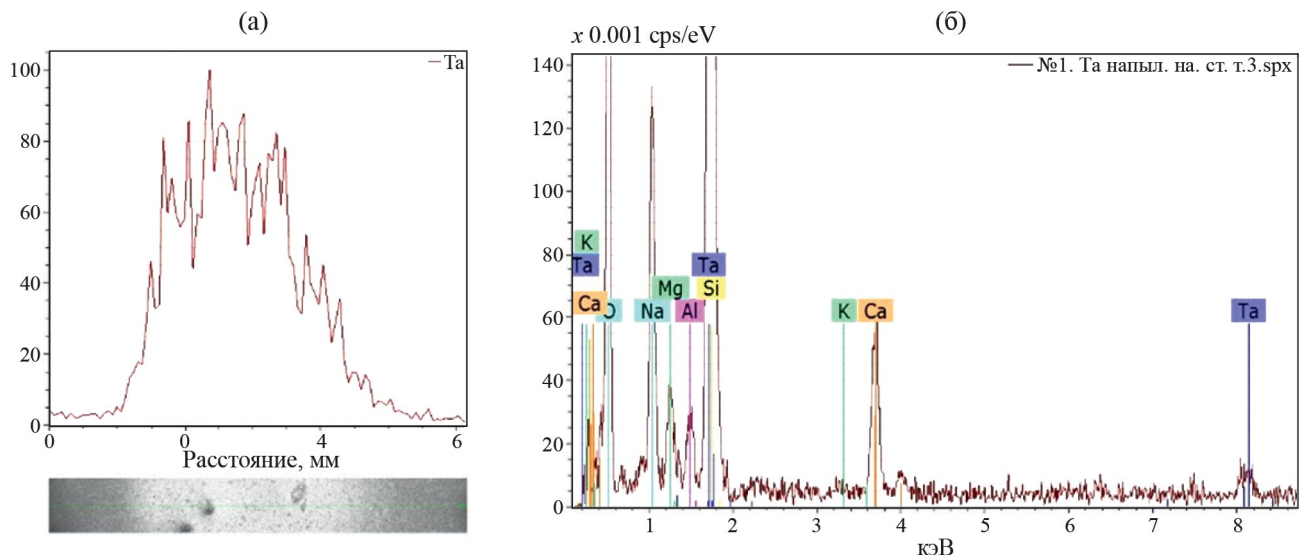


Рис. 5. а) — Относительная концентрация Ta в области осаждения пленки; б) — элементный состав пленки, полученный растровым микроскопом EVO-40.

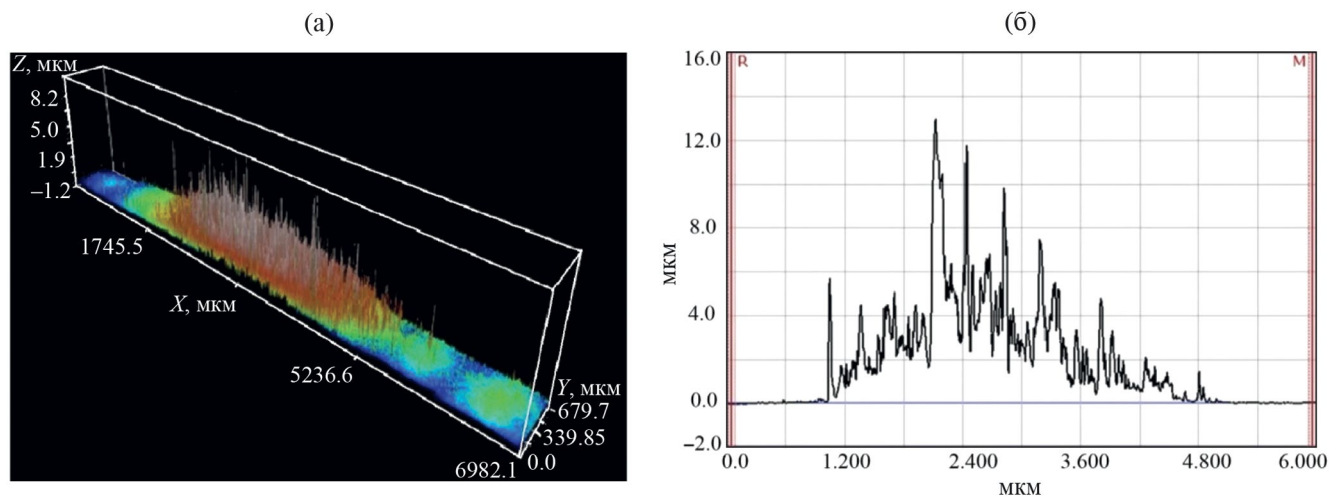


Рис. 6. Профиль поверхности пленки Ta, измеренный в срединной части области напыления (см. рис. 4б): а) — получен с помощью оптического профилометра фирмы Sensobar-Tech SL; б) — получен с помощью цифрового профилометра фирмы AMBIOS XP-200.

на оптическом профилометре (3D-модель S Neox фирмы Sensobar-Tech SL) и цифровом профилометре (XP-200 фирмы AMBIOS) также указывает на неоднородную структуру поверхности (рис. 6).

Как видно, средняя толщина танталовой пленки лежит в пределах 4—6 мкм. Поверхность пленки имеет сильно неоднородную текстуру, что связано с осаждением частиц Ta размером от долей до единиц микрон.

3.2. Осаждение пленок молибдена

На рисунке 7а показана пленка Mo, осажденная на стеклянную пластинку через диафрагму с отвер-

ствием $\varnothing 3.5$ мм. Микроструктура поверхности пленки представлена на рис. 7б. На поверхности пленки осаждаются крупные частицы Mo, кроме того, имеются отдельные фрагменты фольги. Это означает, что при толщине фольги 20 мкм энергии плазменной струи (особенность 130 отн. ед.) было недостаточно для полной абляции фольги. Этот вывод подтверждается данными микроструктурных исследований (рис. 8).

Беспорядочное распределение частиц Mo в плоскости пленки может быть связано с неоднородным распределением плотности энергии в плазменной струе (см. рис. 2б). При более высокой плотности

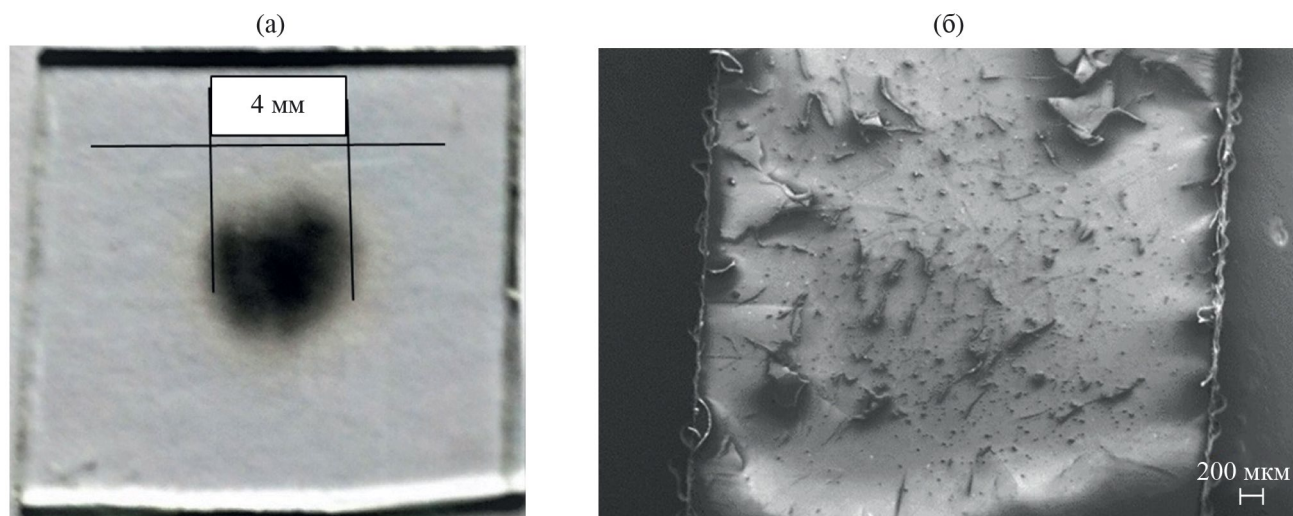


Рис. 7. а) — Пленка молибдена, осажденная на стеклянную пластинку через диафрагму с отверстием $\varnothing$ 3.5 мм. Рабочий газ аргон. Особенность 130 отн. ед.; б) — Микроструктура поверхности пленки молибдена, снятая сканирующим микроскопом EVO-40.

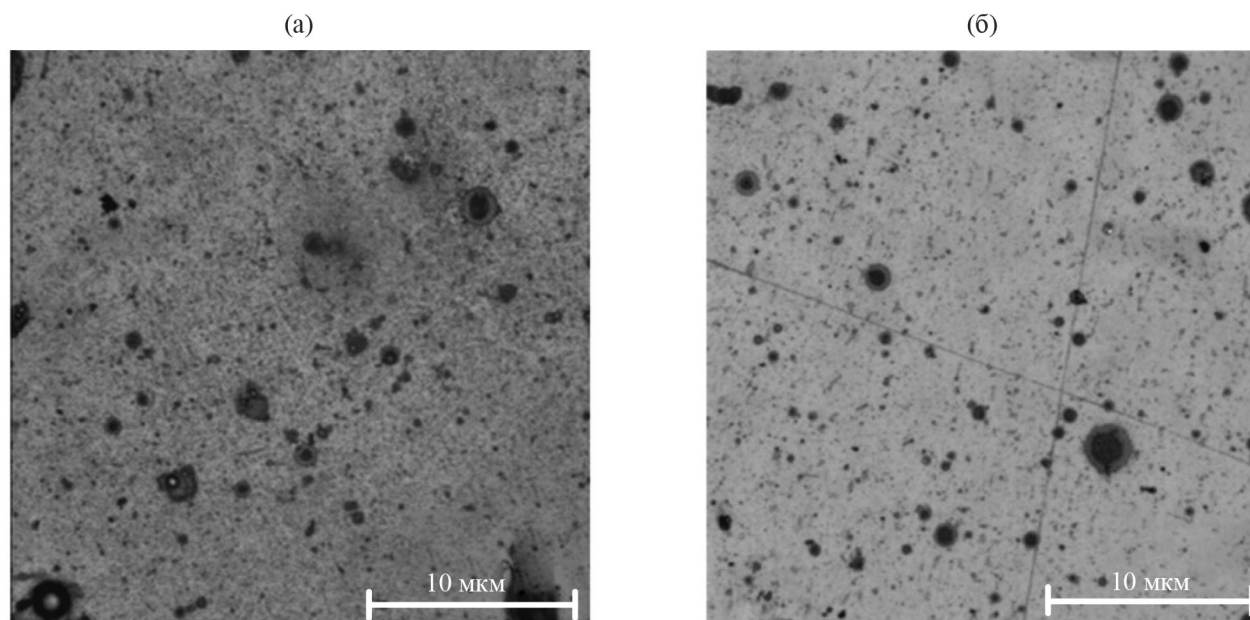


Рис. 8. Микроструктура поверхности пленки Мо, полученная с помощью микроскопа Leica DM: напыление пленки в центральной области (а), на краю пленки (б).

энергии в центре ионно-плазменной струи на стекле образуется кратер глубиной ~ 0.35 мкм (рис. 9а). Поэтому получение планарных пленок Мо на силикатных стеклах при данных условиях эксперимента и высоких энергиях плазменных потоков не представляется возможным. Профиль распределения частиц Мо в центре кратера показан на рис. 9б.

Как видно, наблюдается большой разброс частиц по размерам от долей до десятков мкм, что также приводит к большим флуктуациям толщины пленки.

Анализ элементного состав пленок Мо указывает на большое число сторонних примесей: Mg, Ca, K, Al и др., которые поступают с поверхности стекла и анодного узла установки.

3.3. Осаждение пленок вольфрама

На рис. 10а показана пленка вольфрама на стеклянной пластинке, осажденная через диафрагму с отверстием $\varnothing$ 15 мм и фольга W после воздействия импульса Ar плазмы (рис. 10б).

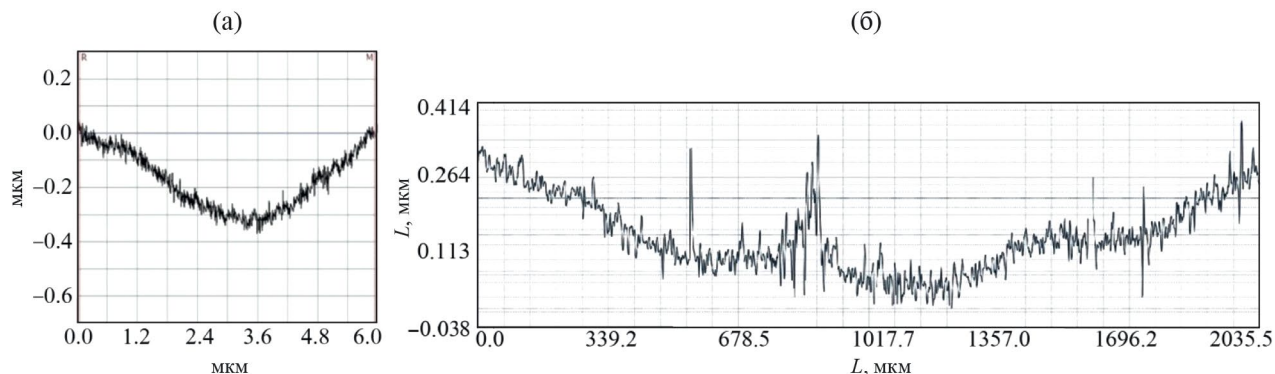


Рис. 9. а) – Образование кратера глубиной 0.35 мкм на стеклянной пластинке при осаждении пленки молибдена. Особенность 130 отн. ед. б) – Профиль распределения частиц Мо в центре кратера. Получен на цифровом профилометре XP-200 фирмы AMBIOS.

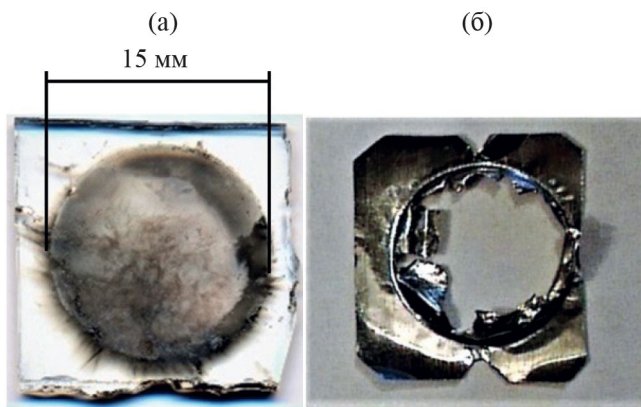


Рис. 10. а) – Осаждение пленки W на стеклянную подложку толщиной 1.5 мм через диафрагму с отверстием $\varnothing$ 15 мм. Рабочий газ аргон. Особенность 80 отн. ед. Расстояние от анода до мишени 30 мм; б) – Фольга W после воздействия импульса плазмы Ag.

Как видно на рис. 10б, энергии плазменной струи (амплитуда особенности 80 отн. ед.) недостаточно для полной абляции W-фольги, в результате на поверхности стекла осаждаются крупные капли W и отдельные фрагменты фольги. При амплитуде особенности 280 отн. ед. и уменьшении расстояния от анода до мишени с 30 мм до 16 мм плотность потока энергии ионно-плазменной струи достигает величины, при которой наблюдается практически полная абляция W-фольги толщиной 20 мкм. Однако при этом происходит разрушение стеклянных подложек толщиной 3 мм (рис. 11а).

При осаждении W-пленок при тех же параметрах ионно-плазменного пучка на более тонкие стеклянные подложки толщиной 1.5 мм разрушения подложек не наблюдалось, но при этом пленки, сплавляясь со стеклом, уходили глубоко под поверхность стекла (рис. 12а).

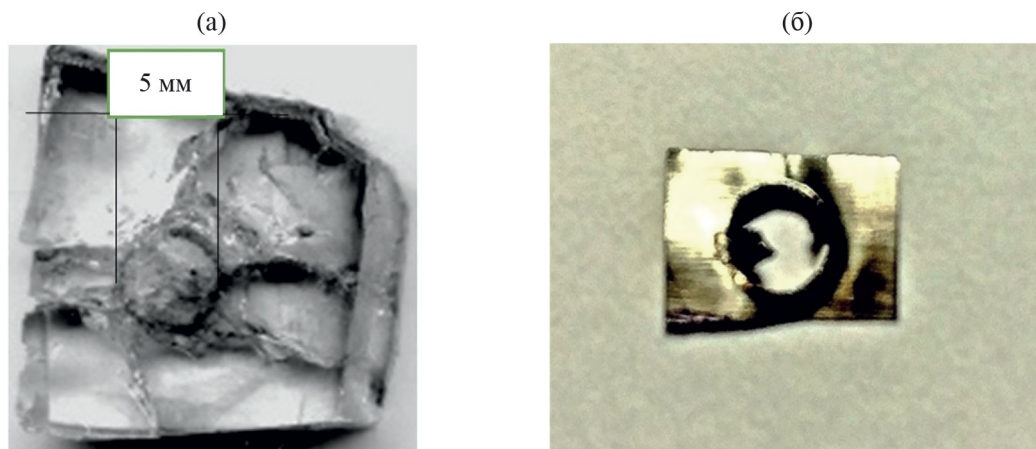


Рис. 11. а) – Осаждение пленки вольфрама на стеклянную подложку толщиной 3 мм через диафрагму с отверстием $\varnothing$ 4.5 мм. Расстояние от мишени до анода — 16 мм. Рабочий газ азот. Особенность 280 отн. ед.; б) – Фольга W толщиной 20 мкм после воздействия плазменной струи.

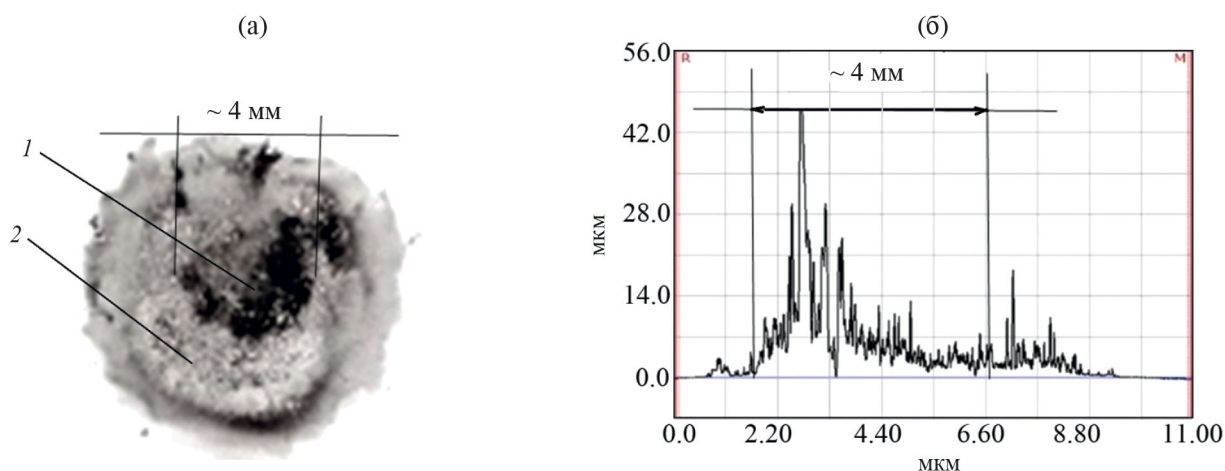


Рис. 12. а) — Осаждение пленки вольфрама на стеклянную подложку толщиной 1.5 мм через диафрагму с отверстием $\varnothing$ 4.5 мм. 1 — пленка вольфрама; 2 — пенное стекло. Расстояние от анода до мишени 15 мм. Рабочий газ азот. Особенность 230 отн. ед. б) — Профиль пленки W по диаметру области осаждения, полученный с помощью цифрового профилометра XP-200 фирмы AMBIOS.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Из представленных результатов эксперимента видно, что получение однородных пленок тугоплавких металлов: Мо, Та и W на поверхности силикатных стекол представляет значительные трудности. Это связано, прежде всего, с низкой температурой плавления стекла ($\sim 800^\circ\text{C}$). При температуре плавления фольги металлов: Мо (2623°C), Та (2996°C) и W (3695°C) стекло расплавляется частицами металла, и значительная их часть при высокой скорости плазменного потока $\sim 10^7$ см/с и более уходит под поверхность стекла.

Пленки металлов на поверхности стекол образуются из частиц с размерами от долей до десятков микрон, в результате формируется сильно неоднородный рельеф на поверхности пленок. Пленки металлов имеют высокую адгезию с поверхностью стекол. Применение диафрагм позволяет получать пленки металлов небольших размеров $\varnothing$ 3—5 мм на поверхности стекол, однако качество пленок сравнительно низкое.

На поверхности пленок металлов присутствует большое количество сторонних примесей, которые необходимо удалять, используя дополнительные методы очистки поверхности. Лучших результатов можно добиться, используя более тугоплавкие подложки более простого состава, например из керамики — диоксид алюминия ($T_m = 2044^\circ\text{C}$), диоксид циркония ($T_m = 2715^\circ\text{C}$).

Существуют более тугоплавкие керамики на основе нитридов и карбидов металлов с температурой плавления $\sim 4000^\circ\text{C}$. Возможно, что при использовании таких керамики в качестве подложек, проб-

лем с подбором толщины металлической фольги и энергии плазменного потока при осаждении более качественных пленок через диафрагмы не будет.

Однако все эти вопросы требуют дополнительных исследований. Применение стекол в современной микроэлектронике весьма ограничено, и в данной работе они использовались как модельный материал.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выяснено, что на установках плазменного фокуса с энергией в несколько килоджоулей, используя металлические диафрагмы с различным диаметром отверстий, можно получать тонкие пленки тугоплавких металлов: Мо, Та и W небольших размеров $\varnothing$ $\sim$ 3—5 мм на диэлектрических подложках (стеклах).

Полученные таким способом пленки металлов характеризуются высокой адгезией с поверхностью стекла. Однако качество пленок на поверхности стекол получается невысоким. В значительной степени это связано с низкой температурой плавления подложки (стекла). Предполагается, что применение более тугоплавких керамики позволит получать пленки металлов более высокого качества, пригодные для использования в качестве контактных площадок в микросхемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушинский И. П., Морозов Г. В. Технологическое проектирование микросхем СВЧ. М.: МГТУ, 2001.
2. Chalapathy R. B. V., Ramakrishna Reddy K. T. // Adv. Mater. Sci. Technol. 1998. V. 1. P. 1.
3. Технология тонких пленок. Справ. Т. 1 / Ред. Л. Майселл, Р. Глэнг. М.: Советское радио, 1977. С. 664.

4. Пичугин В. Ф. Материаловедение поверхности и тонких пленок. Томск: ТПУ, 2008. С. 173.
5. Родунер Э. Размерные эффекты в наноматериалах. М.: Техносфера, С. 352.
6. Палатник Л. С. Материаловедение в микроэлектронике. М.: Энергия, 1977. С. 280.
7. Епифанов Г. И., Мома Ю. А. Физические основы конструирования и технология РЭА и ЭВА. М.: Советское радио, 1979. С. 352.
8. Технология тонких пленок. Справ. Т. 2 / Ред. Л. Майселл, Р. Глэнг. М.: Советское радио, 1977. С. 768.
9. Behrisch R. Sputtering by Particle bombardment: Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies. Berlin: Springer, 2007.
10. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 328.
11. Polukhin S. N., Nikulin V. Ya., Silin P. V. // Plasma Phys. Rep. 2022. V. 48. P. 346.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X22040110>
12. Nikulin V. Ya., Kolokoltsev V. N., Silin P. V., Polukhin S. N. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2019. V. 46. P. 360.
<https://doi.org/10.3103/S1068335619110083>
13. Bondarenko G. G., Borovitskaya I. V., Pimenov V. N., Gribov V. A., Paduch M., Gaidar A. I., Paramonova V. V., Morozov E. V. // Russ. Metall. 2017. P. 928.
<https://doi.org/10.1134/S0036029517110064>
14. Kolokoltsev V. N., Maslyaev S. A., Borovitskaya I. V., Nikulin V. Ya., Silin P. V., Peregodova E. N. // J. Phys.: Confer. Ser. 2020. V. 1647. P. 012017.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1647/1/012017>
15. Физические величины. Справ. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 289.

Deposition of Thin Refractory-Metal-Films onto Glasses through Diaphragms at Plasma Focus Facility

© 2024 V. N. Kolokoltsev^{a,*}, V. Ya. Nikulin^{b,**}, P. V. Silin^b, I. V. Borovitskaya^a, E. N. Peregodova^b, A. I. Gaidar^c, L. I. Kobeleva^a, A. M. Mezrin^d, A. A. Eriskin^b

^a Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334, Russia

^b Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia

^c Institute of Advanced Materials and Technologies, Moscow, 115054, Russia

^d Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russia

* e-mail: v.kolokoltsev@yandex.ru

** e-mail: nikulinvy@lebedev.ru

The results of experiments are presented on the deposition onto silicate glasses of thin refractory metal-films: molybdenum, tantalum and tungsten. The technique used for manufacturing films was based on the deposition of metal-containing plasma formed when exposing the surface of foils made of refractory metals to high-power plasma and ion pulses. For generation of such pulses, the facility of plasma focus type was used, which makes it possible to obtain ion beams and plasma flows with the energy flux density in the range of 10^{10} — 10^{12} W/cm². The most intense central part of the ion-plasma flow was separated using metal diaphragms with aperture diameters of 2.5, 3.5, and 4.5 mm. Metal Mo, Ta and W films with dimensions of $\varnothing$ 3—5 mm were obtained on the surfaces of glasses. Metal films are characterized by good adhesion, since they coalesce with the glass surface. It was discovered that the planarity of films becomes violated due to the drift of molten metal particles under the glass surface. The relief of films is non-uniform, which can be explained by the presence of micrometer-sized metal particles in the plasma flow.

Keywords: plasma focus, ion beams, plasma jets, thin films, techniques for thin films deposition