

УДК 539.2

*М. И. МАРКЕВИЧ, А. М. ЧАПЛАНОВ***СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ***Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: a.chaplanov@gmail.com*

Рассмотрены особенности структурных превращений, происходящих в металлических пленках при импульсном лазерном воздействии, и получение наночастиц в жидкостях методом лазерной абляции. Рассмотрены движущие силы рекристаллизации, вопросы роста зерен, образования канавок термического травления, формирования пор. Отмечена перспективность таких исследований в области сверхкоротких импульсов воздействия.

Ключевые слова: структура, тонкие металлические пленки, импульсное лазерное воздействие, рекристаллизация.

*M. I. MARKEVICH, A. M. CHAPLANOV***STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN THIN METAL FILMS AT PULSE LASER EFFECT***Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: a.chaplanov@gmail.com*

Processes occurring in metal films by laser irradiation are reviewed. Driving force of recrystallization, grain growth issues, education grooves of thermal etching, the formation of pores are considered. The preparation of nanoparticles in liquids by laser ablation is also addressed.

Keywords: structure, the thin metal film, pulsed laser effect, recrystallization.

Введение. Импульсный лазерный отжиг – один из способов, позволяющих локализовать энергию в приповерхностной области и снизить термическую нагрузку в системе пленка–подложка. Введение нетрадиционных технологических методов (например, импульсное лазерное воздействие) позволяет изменять физические свойства материала. Традиционные же технологические процессы, основанные на длительных высокотемпературных термических воздействиях, не отвечают данным задачам.

Результаты и их обсуждение. Тонкие металлические пленки, полученные термическим осаждением в вакууме на аморфную или поликристаллическую подложку, большей частью имеют поликристаллическую структуру [1–6].

Кристаллизация тонких пленок протекает в условиях значительного переохлаждения, что способствует образованию большого количества дефектов кристаллической решетки [1–3]. Осажденные пленки обладают высокой свободной энергией и находятся в термодинамически неравновесном состоянии. При осаждении в условиях значительного переохлаждения, когда температура подложки менее 1/3 температуры плавления наносимого материала, в пленке образуется значительное количество вакансий. Их концентрация существенно превышает равновесную концентрацию при температуре осаждения пленки. Концентрация вакансий может достигать значений 0,01–1 ат.% [6–13]. Следовательно, такие пленки имеют как нестабильную структуру, так и нестабильные физические свойства [6–13].

При импульсном фотонном воздействии с длительностью импульса от 10^{-8} до 10^{-3} с и плотностью энергии более 1 Дж/см² в результате высокоскоростного нагрева и последующего отжига металлические пленки переходят в равновесное состояние вследствие перераспределения дефектов кристаллической решетки и уменьшения их концентрации. Процессами, посредством

которых может осуществляться приближение к термодинамически равновесному состоянию, являются

- реакции между точечными дефектами, их аннигиляция;
- исчезновение дислокаций;
- перераспределение дислокаций и образование энергетически выгодных их конфигураций;
- миграция границ зерен;
- уменьшение суммарной площади границ зерен.

Следовательно, при импульсном лазерном отжиге тонких металлических пленок структурные и фазовые превращения протекают в неравновесных условиях, что существенно влияет на кинетику процессов упорядочения кристаллической решетки.

За время действия лазерного импульса на порядки увеличивается концентрация дефектов. Величина последней становится значительно выше термодинамически равновесной концентрации при температуре отжига. При данных условиях имеет место взаимодействие между дефектами, что может привести к их пространственному перераспределению с образованием более крупных дефектов (пор, вакансионных петель и т. д.). Наличие последних создает большие внутренние напряжения и приводит к разрушению пленки [9]. Значительную роль в процессе перераспределения дефектов играют примесные атомы, являясь центрами гетерогенного образования вакансионных комплексов, они могут существенно влиять на кинетику перераспределения вакансий.

Важным является вопрос о типе зарождения вакансионных скоплений (гетерогенное или гомогенное) в тех или иных условиях лазерного отжига.

Образование вакансионных комплексов в зависимости от температуры закалки и чистоты образца в массиве рассмотрено авторами [14]. Они в своей модели изучали процессы образования вакансионных комплексов на примесных атомах с большой энергией связи комплекса вакансия – примесный атом.

Считалось, что примеси, имеющие малую энергию связи с вакансией, не оказывают заметного влияния на образование вакансионных комплексов. Р. Коттерил показал, что в этом случае основным параметром, определяющим вид вакансионного скопления (гетерогенное или гомогенное), является отношение V/I_0 , где I_0 – концентрация примесных атомов; V – концентрация вакансий.

При больших значениях отношения V/I_0 преобладает процесс гомогенного образования вакансионных скоплений, в то время как при малых величинах этого параметра становится преобладающим процесс гетерогенного образования вакансионных комплексов. В тонких поликристаллических пленках в отличие от массивных материалов этот критерий не выполняется, так как плотность границ зерен велика из-за малости их размеров, поэтому границы зерен значительно влияют на процесс перераспределения вакансий в тонких пленках. С целью выяснения влияния границ зерен и поверхности пленки на процесс перераспределения вакансий в пленках, содержащих примесные атомы, проведен машинный эксперимент [3, 4, 6, 7].

Проводилось моделирование процесса блуждания вакансий в пленке с учетом примесных атомов, обладающих большой энергией связи с вакансией. Из результатов работ следует, что увеличение концентрации примеси до 1 % уменьшает среднее число скачков вакансий до стоков. В этом случае оно одинаково для всех исследованных пленок, структурные различия тонких пленок нивелируются, происходит гетерогенное зарождение вакансионных комплексов [2–4, 6, 7].

При уменьшении концентрации примеси до 0,1 ат.% среднее число скачков вакансий до стоков незначительно меняется с варьированием толщины пленки и размера зерна. Это свидетельствует о том, что вакансии в центре зерна задерживаются примесями и образуют устойчивые комплексы, а границы зерна могут достигнуть лишь близлежащие вакансии. Проведенные расчеты показывают, что на перераспределение вакансий в пленках существенное влияние оказывает концентрация примесей. С учетом внутреннего и внешнего поглощения вакансий в тонких пленках металлов (никель, алюминий, золото, серебро, платина, медь) возрастает вероятность процесса гетерогенного зарождения вакансионных комплексов с увеличением концентрации

примесных атомов. Как следует из результатов моделирования, условие гетерогенного образования вакансионных комплексов имеет следующий вид [3, 4, 7, 8]:

$$n_{\text{пр}} < n_{\text{в}} \leq n_{\text{гр}},$$

где $n_{\text{пр}}$ – среднее число скачков вакансий до примесных атомов; $n_{\text{в}}$ – среднее число скачков вакансий до столкновения вакансии с вакансией и образования дивакансии; $n_{\text{гр}}$ – среднее число скачков вакансий до границы зерна. Для мелкодисперсных пленок условие гетерогенного образования вакансионных комплексов можно записать таким образом:

$$n_{\text{пр}} < n_{\text{гр}}.$$

Следовательно, процесс гетерогенного образования вакансионных комплексов в пленках имеет место, когда значение среднего числа скачков вакансий до примесных атомов меньше величины среднего числа скачков вакансий до столкновения друг с другом и одновременно меньше среднего числа скачков вакансий до границы зерна и поверхности пленки.

Результаты исследования изменения концентрации вакансий в тонких пленках никеля в процессе высокоскоростного нагрева представлены на рис. 1, а, б.

Как следует из приведенных зависимостей, при высокоскоростном нагреве равновесная концентрация вакансий в пленках ГЦК-металлов достигается при температурах выше температуры рекристаллизации. Следовательно, при импульсной лазерной обработке структурные превращения происходят при неравновесной концентрации вакансий, что

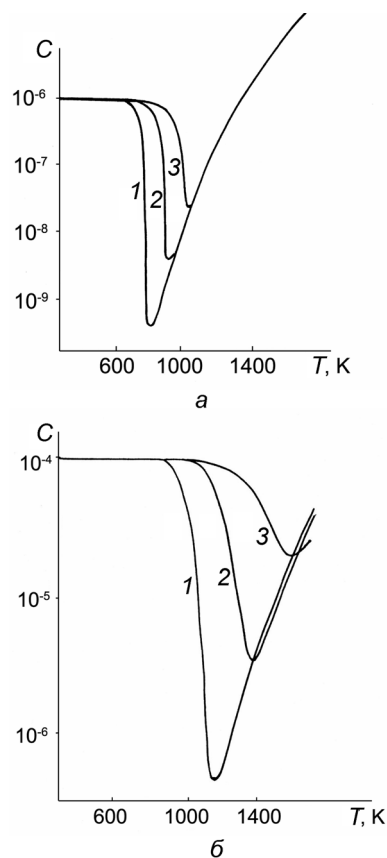


Рис. 1. Изменение концентрации вакансий при нагреве пленок никеля: а – $C_0 = 10^{-6}$; 1 – $Z_0 = 10^6$ град/с; 2 – $Z_0 = 10^7$ град/с; 3 – $Z_0 = 10^8$ град/с; б – $C_0 = 10^{-4}$; 1 – $Z_0 = 10^9$ град/с; 2 – $Z_0 = 10^{10}$ град/с; 3 – $Z_0 = 10^{11}$ град/с; $Z_0 = nK_1$; n – среднее число скачков вакансий до исчезновения в стоках, K_1 – скорость нагрева пленки

влияет на кинетику миграции межзеренных границ в поликристаллических пленках и соответственно на процессы рекристаллизации, а также на закалочные явления при высокоскоростном охлаждении [1–4]. Чем меньшая толщина пленки, тем большая скорость охлаждения необходима для создания в ней неравновесной концентрации вакансий. Для пленок никеля толщиной 500 нм, охлаждаемых с предплавиных температур, для проявления закалочных явлений скорость охлаждения должна составлять примерно 10^4 град/с, а для пленок толщиной 100 нм – более 10^6 град/с. Исследования пленок никеля и меди толщиной 500 нм, обработанных лазерным импульсом длительностью 10^{-3} с с плотностью энергии $2,4$ Дж/см² методами просвечивающей электронной микроскопии на мегавольтном электронном микроскопе, показали, что в пленках присутствует высокая концентрация дислокационных вакансионных петель (рис. 2, а, б). В пленках толщиной 100 нм вакансионных петель не наблюдалось. Следовательно, закалочные явления в тонких пленках, так же как и ряд других физических явлений, имеют размерный характер, т. е. зависят от толщины пленок.

При импульсном отжиге поликристаллических тонких пленок, полученных методами вакуумного осаждения и содержащих неравновесную концентрацию точечных дефектов, наряду с дислокационными петлями из точечных кластеров формируются внутренние поры. Их размеры зависят от длительности импульса и плотности энергии в нем.

На рис. 2, в представлена структура пленки никеля после обработки лазерным импульсом длительностью 10^{-8} с и плотностью энергии $0,2$ Дж/см² [15–17]. Как следует из представленной структуры, в объеме зерна находится высокая концентрации сферических пор, которые сформировались вследствие наличия в пленке высокой неравновесной концентрации точечных дефектов, находящихся в ней при высокоскоростном охлаждении.

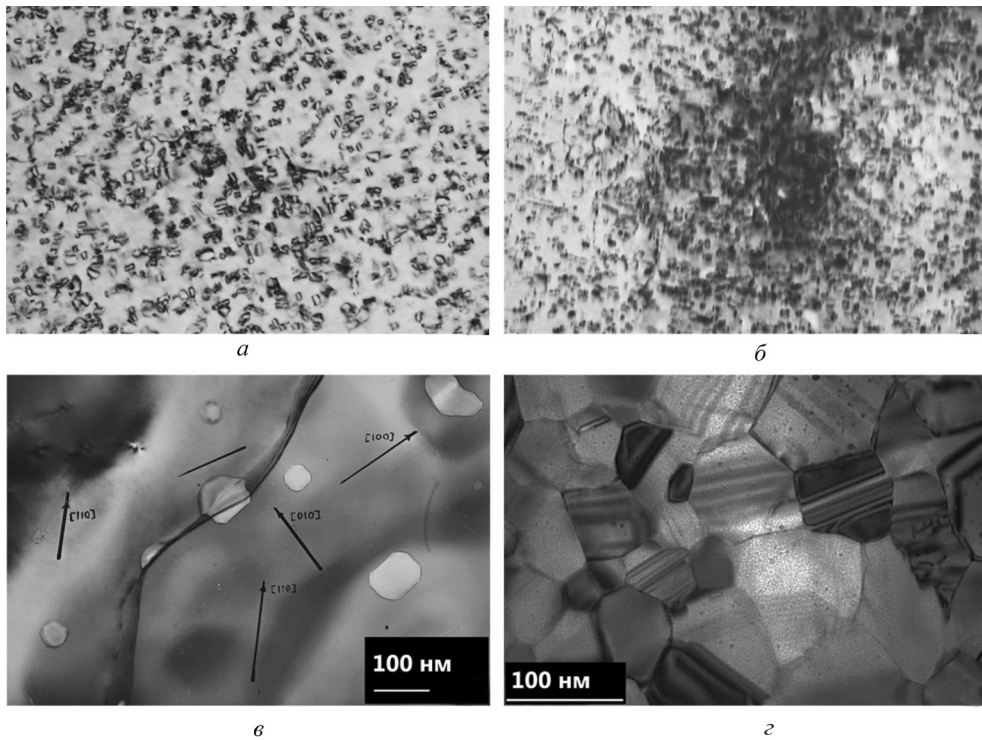


Рис. 2. Дефекты в металлических пленках, образующиеся при импульсном лазерном воздействии: закалочные дислокационные петли в пленках меди (а); никеля при $\tau = 1$ мс, $j = 2,4$ Дж/см² (б); поры в пленках никеля при $\tau = 4$ мс, $j = 1,4$ Дж/см² (в); при $\tau = 20$ нс, $j = 1,4$ Дж/см² (г)

В зависимости от условий синтеза металлических пленок и последующей импульсной лазерной обработки в пленках могут сформироваться поры, имеющие кристаллографическую огранку (рис. 2, в). Как следует из результатов исследований, проведенных методами просвечивающей электронной микроскопии и микродифракции, в зернах, имеющих ориентацию (001) параллельно поверхности пленки, грани образовавшихся пор ориентированы в направлениях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$. Поры, находящиеся на границе зерен, имеют более сложную геометрическую форму. Следует отметить, что в пленках титана ванадия и хрома после импульсной лазерной обработки поры располагаются в основном по границам зерен.

Как известно, рекристаллизация в тонких пленках имеет ряд характерных особенностей [18]. Однако импульсные фотонные методы обработки (до порога плавления) вносят некоторые изменения в процесс рекристаллизации пленок. При рекристаллизации происходит уменьшение свободной энергии системы при миграции большеугловых границ зерен. С учетом специфики структуры тонких пленок (размер зерен, толщина пленки, высокая исходная концентрация вакансий) при рассмотрении явлений рекристаллизации необходимо учитывать изменение свободной энергии границ зерен, свободной поверхностной энергии, развитие канавок термического травления [18 – 21].

Движущая сила рекристаллизации для пленок следующая:

$$F = F_1 + F_2 - F_3,$$

где F_1 – движущая сила, создаваемая энергией межзеренных границ, F_2 – движущая сила, создаваемая за счет разности удельных поверхностных энергий зерен, выходящих на поверхность пленки разными кристаллографическими плоскостями, F_3 – тормозящая сила, возникающая за счет образования канавок термического травления.

Наличие в пленках высокой концентрации вакансий вызывает ускорение всех диффузионных процессов, облегчая как единичные, так и групповые переходы атомов из одного зерна в другое, что увеличивает подвижность границ зерен [18, 20, 21]. Немаловажную роль в этом

играет и уменьшение свободной поверхностной энергии зерен в условиях пересыщения пленок вакансиями, особенно при низких температурах. Создаются благоприятные условия для протекания на первой стадии собирательной рекристаллизации процесса коалесценции путем слияния близлежащих зерен с близкой кристаллографической ориентацией. Затем рост зерен представляет собой миграцию межзеренных границ, причем на начальных стадиях в условиях пересыщения вакансиями увеличивается диффузионная подвижность границ зерен. Наряду с этим присутствие концентрации вакансий в пленках выше равновесного значения снижает удельную свободную энергию границы, что влияет на процесс рекристаллизации [18, 21]. Количественная оценка величины $\gamma_b - \gamma_0$ при степени пересыщения пленки никеля вакансиями до 10^7 и температуре отжига 673 К дает значение $0,21 \cdot 10^{-4}$ Дж/см² [18].

Рассматривая тормозящие силы собирательной рекристаллизации в тонких металлических пленках, следует обратить особое внимание на процессы образования и роста канавок термического травления по границам зерен. В [22] впервые установлено, что термическое травление границ зерен значительно влияет на миграцию межзеренных границ. Для тонких пленок это явление приобретает весьма существенное значение, так как при стационарной термической обработке глубина канавок термического травления становится сравнимой с толщиной пленки и, следовательно, тормозит процесс миграции межзеренных границ [18, 21].

Расчет глубины межзеренной канавки термического травления показал, что ее значение может достигать примерно 25 нм для пленок никеля, обработанных в течение 30 мин при 673 К. Рассмотрев развитие канавки термического травления в тонких пленках металлов при импульсном лазерном воздействии, авторы [18] ввели понятие эффективного времени воздействия и оценили глубину канавки термического травления для импульсных режимов воздействия:

$$h = 0,937m \left[D_s \gamma a^4 t^* / (kT) \right]^{1/4},$$

$$t^* = 2 \tau T(\tau) / T_D,$$

где D_s – коэффициент поверхностной диффузии, γ – удельная поверхностная энергия, k – постоянная Больцмана, $m = 0,1$, $T(\tau)$ – максимальная температура в импульсе, τ – длительность импульса, a – постоянная решетки, T_D – эффективная температура диффузии.

Оценка глубины канавки термического травления для пленки никеля при длительности воздействия 10^{-3} с и максимальной температуре в импульсе 673К составляет примерно 1 нм [18]. Следовательно, образования канавок термического травления по границам зерен практически не происходит. Вследствие этого движущими силами рекристаллизации при импульсном фотонном воздействии являются удельная свободная поверхностная энергия межзеренных границ и разность удельных поверхностных энергий зерен, выходящих на поверхность пленки разными кристаллографическими плоскостями [18, 21].

На рис. 3 представлена структура поликристаллических пленок никеля после импульсной лазерной обработки. Из рисунка следует, что средний размер зерна при импульсной термической обработке значительно выше, чем при стационарном отжиге для одной и той же температуры отжига. Это обусловлено тем, что при импульсном лазерном отжиге на кинетику собирательной рекристаллизации основное влияние оказывают наличие в пленках высокой неравновесной концентрации вакансий и отсутствие канавок термического травления. Все это позволяет проводить импульсный лазерный отжиг при температурах, достигающих $0,9 T_{пл}$, а стационарный отжиг – при температурах не более $0,5 T_{пл}$ вследствие образования и роста канавок термического травления, приводящего к нарушению сплошности пленок [19–21].

Лазерная абляция в жидкостях. Одним из актуальных методов использования импульсного лазерного излучения является получение металлических наночастиц в жидкостях [23–27]. Наночастицы металлов образовывались при воздействии (10–15 мин) импульсного лазерного излучения (лазер LS 2137 Lotis-ТП) на YAG: Nd. Параметры излучения: $E_{имп} = 120$ мДж, $t_{имп} = 20$ нс, $\nu_{след} = 5$ Гц, $D_{фок} = 1$ мм.

Наночастицы, полученные методом лазерной абляции в жидкости, как показывают результаты исследования, проведенного методами просвечивающей электронной микроскопии, могут

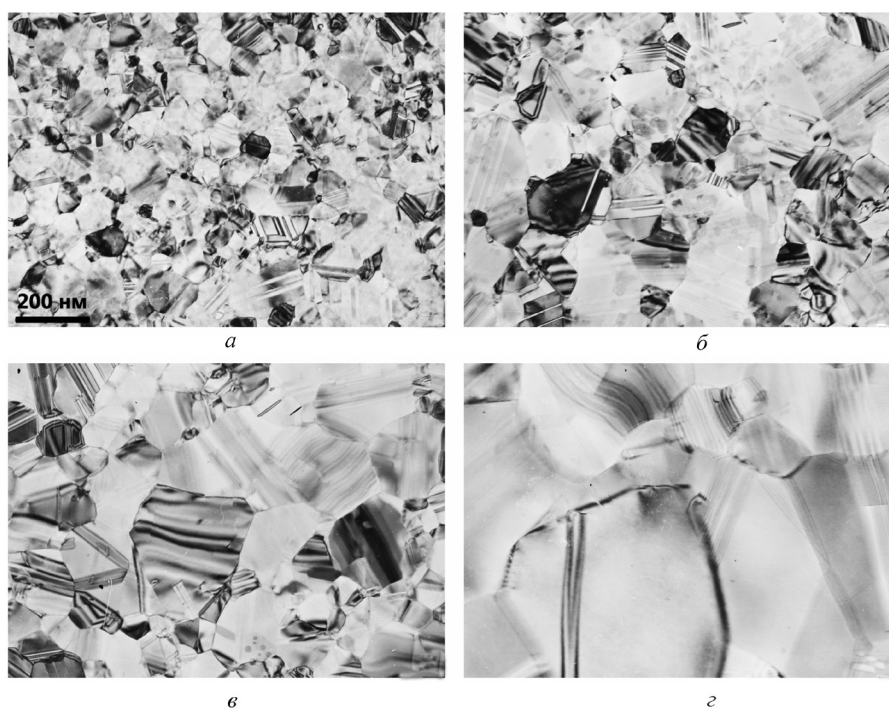


Рис. 3. Структура поликристаллических пленок меди после импульсного лазерного воздействия в вакууме при $\tau = 2$ мс, $j = 2,4$ Дж/см²: *a, б, в, г* – 600 К, 700, 900, 1000 К соответственно

быть как кристаллическими, так и аморфными (рис. 4). Процесс конденсации наночастиц может протекать по двум различным механизмам: пар – жидкость ($п \rightarrow ж$) и пар – кристалл ($п \rightarrow к$) [27, 28]. Образовавшаяся по механизму $п \rightarrow ж$ наночастица может находиться в аморфном состоянии или в дальнейшем кристаллизоваться по механизму ($ж \rightarrow к$). На рис. 4, *a, б* представлены наночасти-

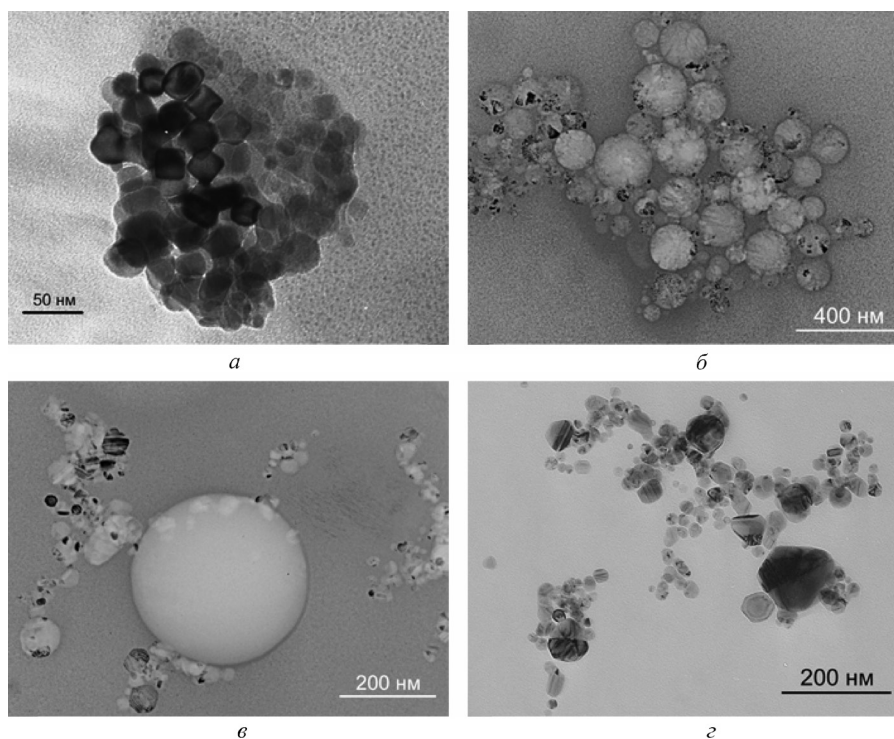


Рис. 4. Наночастицы, образовавшиеся при лазерной абляции в воде: *a* – никель по механизму пар – кристалл, *б* – никель по механизму пар – жидкость – кристалл, *в* – медь по механизму пар – жидкость – кристалл, *г* – медь по механизму пар – кристалл

стицы никеля, полученные лазерной абляцией никелевой мишени в воде [25]. Частицы никеля, кристаллизовавшиеся по механизму $p \rightarrow k$, имеют кристаллографическую огранку, их средний размер составляет примерно 20–25 нм (рис. 4, а). Частицы, образовавшиеся по механизму $p \rightarrow j$, являются аморфными и имеют сферическую форму (рис. 4, б). Средний размер частицы составляет примерно 150 нм. При этом внутри аморфной частицы наблюдаются кристаллические частицы размером примерно 20 нм, которые образовались по механизму $p \rightarrow j \rightarrow k$. Кристаллизация происходит вблизи поверхности аморфной частицы. Механизмы $p \rightarrow j$ и $p \rightarrow j \rightarrow k$ реализуются при формировании наночастиц меди при лазерной абляции в воде (рис. 4, в, г). Таким образом, при лазерной абляции в жидкости могут формироваться как аморфные, так и кристаллические наночастицы в зависимости от режимов лазерного воздействия [27,28].

Заключение. Импульсное лазерное воздействие в широком временном диапазоне (секундные, миллисекундные длительности) ускоряет процесс рекристаллизации тонких металлических пленок. Благодаря высокой концентрации вакансий и отсутствию канавок термического травления, облегчается миграция межзеренных границ, что позволяет формировать равновесную структуру за короткий промежуток времени.

Очевидно, что исследования по рекристаллизации тонких металлических пленок под действием импульсного лазерного излучения должны быть продолжены. Однако уже имеющиеся данные показывают перспективность и важность данного направления исследований.

В процессе лазерного отжига тонких металлических пленок в газовых средах миллисекундной длительности импульса и плотностях мощности до порога плавления в пленках происходят не только собирательная рекристаллизация, но и образование пор, что необходимо учитывать при разработке новых технологий модификации структуры тонких пленок лазерным излучением.

В настоящее время имеются экспериментальные результаты, описывающие размеры, форму и состав наночастиц. Ведутся разработки механизмов получения наночастиц в жидких средах в зависимости от режимов лазерного воздействия.

Список используемой литературы

1. Маркевич, М. И. О закалочных явлениях в тонких пленках никеля / М. И. Маркевич, С. Г. Розин, А. М. Чапланов // Изв. СССР. Сер. «Металлы». – 1986. – № 1. – С. 149–151.
2. Маркевич, М. И. Закалка вакансий в тонких пленках никеля / М. И. Маркевич, А. М. Чапланов // Металлофизика. – 1985. – Т. 7, № 3. – С. 100–103.
3. Расчет миграции вакансий в тонких пленках никеля при их неравновесной концентрации / М. И. Маркевич [и др.] // Металлофизика. – 1983. – Т. 5, № 3. – С. 109–111.
4. Маркевич, М. И. О возможности закалки пленок алюминия при лазерной обработке / М. И. Маркевич, А. М. Чапланов // Физика металлов и металловедение. – 1985. – Т. 60, № 2. – С. 405–408.
5. Либенсон, М. Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние / М. Н. Либенсон. – СПб: Наука, 2007. – 424 с.
6. Маркевич, М. И. Изменение концентрации вакансий в пленках алюминия на подложках при импульсной термообработке / М. И. Маркевич, Э. И. Точицкий, А. М. Чапланов // Физика и химия обработки материалов. – 1987. – № 6. – С. 92–100.
7. Markevich, M. I. On the kinetics of redistribution of vacancies in f.c.c. metals films under high rate heating / M. I. Markevich, I. I. Tochizki, A. M. Chaplanov // Thin Solid Films. – 1989. – Vol. 168, N 3. – P. 363–368.
8. Маркевич, М. И. Импульсная лазерная обработка тонких легированных пленок алюминия / М. И. Маркевич, А. Н. Шибко, А. М. Чапланов // Металлофизика. – 1989. – Т. 11, № 3. – С. 21–24.
9. Термоупругие напряжения в МОП-структурах при импульсном отжиге / М. И. Маркевич [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1992. – № 2. – С. 55–58.
10. Вейко, В. П. Лазерные технологии в микроэлектронике / В. П. Вейко, С. М. Метев. – София: Изд-во Болгарской АН, 1991. – 363 с.
11. Технология тонких пленок: В 2 т. – М.: Сов. Радио. 1977. – Т. 1. – 602 с. – Т. 2. – 768 с.
12. Точицкий, Э. И. Кристаллизация и термообработка тонких пленок / Э. И. Точицкий. – Минск: Наука и техника, 1976. – 376 с.
13. Трусов, Л. И. Островковые металлические пленки / Л. И. Трусов, В. А. Холмянский. – М.: Металлургия, 1973. – 321 с.
14. Коттерил, Р. Дислокация и пластическое течение в кристаллах / Р. Коттерил; пер. с англ. – М.: Металлургия. – 1988. – 267 с.

15. Исследование структуры тонких металлических пленок после воздействия фемтосекундных лазерных импульсов / В. П. Вейко [и др.] // Науч.-техн. вестн. Санкт-Петербургского гос. ун-та информационных технологий, механики и оптики. – 2010. – № 5. – Т. 69. – С. 21–25.
16. Влияние импульсного лазерного воздействия на структуру тонких пленок никеля / В. К. Гончаров [и др.] // Вести Гомельского государственного ун-та им. Ф. Скорины. – 2006. – № 6 (39). – Ч. 1. – С. 58–60.
17. Образование пор в тонких пленках никеля при лазерном воздействии / В. К. Гончаров [и др.] // Неорганические материалы. – 2007. – Т. 43, № 5. – С. 556–559.
18. Чапланов, А. М. Особенности рекристаллизации тонких металлических пленок при стационарном и импульсном отжиге / А. М. Чапланов, М. И. Маркевич // Неорганические материалы. – Т. 39, № 3. – С. 322–324.
19. Маркевич, М. И. Особенности быстрого термического отжига при импульсной световой обработке / М. И. Маркевич, А. М. Чапланов // Физика и химия обработки материалов. – 2002. – № 4. – С. 102–106.
20. Чапланов, А. М. Рекристаллизация в металлических пленках при стационарной и импульсной термообработке / А. М. Чапланов // Физика металлов и металловедение. – 1990. – № 8. – С. 134–141.
21. Маркевич, М. И. Стимулированная собирательная рекристаллизация в тонких пленках ГЦК-металлов при воздействии импульсного лазерного излучения / М. И. Маркевич // Неорганические материалы. – 2000. – Т. 36, № 7. – С. 825–827.
22. Mullins, W. W. Theory of Thermal Growing / W. W. Mullins // J. Appl. Phys. – 1957. – Vol. 8, N 3. – P. 333–341.
23. Markevich, M. I. In sulphurous liquids under action of shock waves / M. I. Markevich, F. A. Piskunov // High Power Laser-Science and Engineering. – Karlovy Vary: Czech R. NATO Advanced study institute, 1995. – P. 49.
24. Markevich, M. I. Pulsed Laser-induced Synthesis of Metal Sulfides in Sulphurous Liquids under Action of Shock Waves / M. I. Markevich, F. A. Piskunov // High Power Lasers-Science and Engineering; ed. by R. Kossowsky, M. Elinek, R. F. Walter. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. – Vol. 7. – P. 561–565.
25. Возможность получения наночастиц никеля в водной среде с помощью лазерного воздействия / В. К. Гончаров [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 2. – С. 206–210.
26. Исследование коллоидных растворов селена, созданных по лазерной технологии / Е. Е. Казилин [и др.] // Перспективные материалы. – 2008. – № 3. – С. 60–63.
27. Формирование коллоидных растворов металлов в воде методом лазерной абляции / В. К. Гончаров [и др.] // Актуальные проблемы физики твердого тела. – Минск, 2009. – С. 381–382.
28. Палатник, Л. С. Ориентированная кристаллизация / Л. С. Палатник, И. И. Папиро. – М.: Металлургия, 1964. – 407 с.

Поступила в редакцию 29.10.2015