

УДК 541.138.3

**ПЕНТАГОНАЛЬНЫЕ КРИСТАЛЛЫ МЕДИ
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ:
СТРОЕНИЕ, МОДЕЛИ И МЕХАНИЗМЫ ИХ
ОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА¹**

© 2006 А.А. Викарчук, И.С. Ясников, О.А. Довженко, Е.А. Талалова,
М.Н. Тюрьков²

В работе показано, что методом электроосаждения можно получить многообразие кристаллов меди, имеющих одну или шесть осей пентагональной симметрии. Рассмотрены особенности их строения и возможные механизмы образования и роста. Доказывается, что различные пентагональные кристаллы, сформировавшиеся при электрокристаллизации, имеют единую дисклинационную природу.

Введение

Частицы с пентагональной симметрией, запрещенной законами классической кристаллографии, интенсивно изучаются на протяжении последних десятилетий. Наиболее полное обобщение результатов исследований, проведенных за последние полвека по структуре и свойствам малых частиц с пентагональной симметрией, представлено в обзорах [1, 2]. Обширная библиография данных обзоров однозначно свидетельствует о повышенном интересе к исследованию этих уникальных физических объектов. Микрокристаллы меди с пентагональной симметрией впервые были обнаружены в 1957 г. [3], и в настоящее время пятерная симметрия обнаружена практически у всех ГЦК-металлов при различных видах кристаллизации. Однако наибольших размеров такие кристаллы достигали лишь при электролитическом способе их получения [4, 5]. В частности, нам удалось создать пентагональные кристаллы размером до 300 мкм [4, 5].

В настоящее время имеется два существенно отличающихся подхода к объяснению механизма появления в электроосажденных ГЦК-металлах пен-

¹Представлена доктором физико-математических наук профессором А.В. Покоевым.

²Викарчук Анатолий Алексеевич, Ясников Игорь Станиславович (yasn@infopac.ru), Довженко Ольга Александровна, Талалова Елена Алексеевна, Тюрьков Максим Николаевич, кафедра общей и теоретической физики Тольяттинского государственного университета, 445667, Россия, Самарская область, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

тагональных кристаллов. Первый предполагает, что рост их начинается с двумерных зародышей, второй — из трехмерных [6, 7]. Предложены также модели пентагональных кристаллов, полученных методом напыления, состоящие из неправильных декаэдров [8]. Все эти модели противоречат друг другу и не могут объяснить ряд новых экспериментальных фактов [4, 5], в частности, самого факта существования довольно крупных кристаллов с пятерной симметрией. Из энергетических соображений следует, что пентагональные малые частицы устойчивы лишь до некоторого критического размера (~ 100 нм) [9, 10]. При создании указанных моделей совершенно не использовались дисклинационные представления, хотя в работах [2, 9, 10] обосновывается эффективность применения дисклинационного подхода для анализа неоднородной упругой деформации в пентагональных малых частицах и при описании их структурно-чувствительных свойств. Показано также, что дисклинации являются неотъемлемым атрибутом пятерной симметрии в малых частицах [2, 9]. Наличие дисклинаций в более крупных пентагональных кристаллах (иногда на три порядка больше критического) является дискуссионным.

Задачей настоящей работы было исследование происхождения и особенностей внутреннего строения сравнительно крупных пентагональных кристаллов, формирующихся при электрокристаллизации меди и имеющих разнообразную внешнюю форму, с целью обоснования или опровержения идеи о дисклинационной природе таких объектов.

1. Методика эксперимента

Для получения пентагональных кристаллов, медных покрытий и пленок из них использовался обычный серноокислый электролит меднения (без добавок), приготовленный на бидистиллате из химически чистых компонентов и содержащий $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (250 г/л) и H_2SO_4 (90 г/л). Осаждение меди проводили при температуре электролита от 20 до 50° С, как в гальваностатическом режиме при плотности катодного тока $j_K = 0,01 \dots 10$ А/м², а также в режиме реверсии тока (плотность тока в катодных импульсах $j_K = 1 \dots 3$ А/м², в анодных — $j_A = 0,4 \dots 1,0$ А/м²), так и в потенциостатическом режиме при значениях перенапряжения на катоде $\eta = 0,02 \dots 0,05$ В ($\eta = \varphi - \varphi_0$), которое при электрокристаллизации характеризует отклонение потенциала катода от его равновесного значения φ_0 . В качестве подложки использовали полированную нержавеющую сталь с предварительно нанесенным на нее тонким покрытием толщиной около 10 мкм. Покрытие представляло собой либо электролитическую поликристаллическую медь с четко выраженной аксиальной текстурой $\langle 110 \rangle$, либо ионно-плазменное напыление нитрида титана. Предполагалось, что на подложке первого типа будет реализован слоистый механизм роста из двумерных зародышей, в то время как вторая, индифферентная подложка должна способствовать образова-

нию трехмерных кластеров. С этой же целью электроосаждение меди проводилось на грань (110) монокристалла меди и платиновую подложку. Для исследования структуры и морфологии поверхности полученных кристаллов и покрытий из них использовали просвечивающую (ПРЭМ-200), сканирующую (JSM-6500FE, Hitachi S-3500H) электронную микроскопию, электронографию (ЭР-100) и металлографию (оптические микроскопы МИМ-7, Zeiss Axiotech). Шлифы из покрытия изготавливали в поперечном направлении, а также со стороны электролита и со стороны подложки.

2. Результаты экспериментов, их обсуждение

Варьируя условия электроосаждения и тип подложки, нам удалось получить пентагональные кристаллы меди с поперечными размерами от 1 до 300 мкм и разным габитусом. Наблюдаемые пентагональные кристаллы по форме их роста и размерам (d — тангенциальное, l — нормальное направление к подложке) мы охарактеризовали следующим образом.

1. Конусообразные кристаллы ($l/d \cong 2 - 5$; рис. 1, а), развившиеся из двумерных зародышей, которые образовались на атомных плоскостях (110) меди и имеют одну ось симметрии 5-го порядка.

2. Дискообразные кристаллы ($l/d \cong 0,2 - 0,5$; рис. 1, б), сформировавшиеся на индифферентной подложке предположительно из трехмерных декаэдрических кластеров и имеющие одну ось симметрии 5-го порядка.

3. Кристаллы, сформировавшиеся на индифферентной подложке предположительно из трехмерных икосаэдрических кластеров в виде бакеболов (икосаэдронов) ($l/d \cong 1$; рис. 1, в) или звездчатых многогранников Каспера ($l/d \cong 1$; рис. 1, г).

4. Пятилепестковые конфигурации ($l/d \cong 1$; рис. 1, д), соорганизованные вокруг пентагональной призмы, предположительно образовавшиеся с декаэдрических кластеров

5. Кристаллы - "ежи" ($l/d \cong 1$; рис. 1, е), сформировавшиеся предположительно из икосаэдрических кластеров (многолепестковые конфигурации).

6. Дендриты с пятерной симметрией ($l/d \cong 0,2 - 0,5$; рис. 1, ж).

7. Морфологическое семейство нитевидных кристаллов, включающее в себя:

а) пентагональные "шайбы" без полости ($l/d \cong 1$; рис. 1, з) и "гайки" с полостью внутри ($l/d \cong 1$; рис. 1, и);

б) пентагональные "призмы" без полости ($l/d \cong 5 - 20$; рис. 1, к) и "микротрубки" с полостью внутри ($l/d \cong 5 - 20$; рис. 1, л);

в) "усы" или "нанотрубки" ($l/d \cong 20 - 100$; рис. 1, м, н).

Каждый из указанных видов образуется в довольно узком диапазоне плотностей тока или перенапряжений на катоде и на подложках определенного типа. Мы предполагаем, что все эти кристаллы имеют дисклина-

ционную природу и сформировались с одного центра кристаллизации. Для них характерно наличие одной или шести осей симметрии пятого порядка, двойниковых субграниц раздела и некой генетической причины, способствующей самоорганизации кристалла в процессе роста (рис. 1 о, п, р).

Рассмотрим подробнее возможные механизмы формирования пентагональных кристаллов при электрокристаллизации меди.

Конусообразные кристаллы (рис. 1, а), имеющие пятерную симметрию, вырастают из двумерных зародышей, образовавшихся на атомной плоскости 110 монокристалла меди или на некотором расстоянии от индифферентной подложки. Когда сформирован медный слой с текстурой $\langle 110 \rangle$, они вытянуты вдоль направления $\langle 110 \rangle$. Электронограммы свидетельствуют о том, что границы раздела секторов в таком кристалле двойниковые, причем четыре из них перпендикулярны к плоскости (110), а одна наклонена к ней под углом $35^\circ 16'$. Модель образования таких кристаллов детально описана в работе [11]: на подложке в виде атомных плоскостей меди 110 возможно образование из двумерных зародышей микрокристалла, содержащего оборванную и наклоненную к подложке двойниковую границу типа $\langle 110 \rangle (111)$, имеющую ростовое происхождение, эквивалентную по своему упругому полю напряжений частичной дисклинации мощностью $\omega = 70^\circ 32'$ (рис. 2 а, б). В процессе роста кристалла создаются энергетические и кинетические предпосылки для двойникового по двум плоскостям 111, имеющимся в кристалле и перпендикулярным к плоскости (110), при этом часть упругой энергии релаксирует (рис. 2 а, в). Двойникование приводит к переориентации недеформированной части кристалла, что создает условие для дальнейшего двойникового по двум плоскостям 111. При этом кристалл разбивается на пять секторов, разделенных между собой двойниковыми границами, сходящимися на 7-градусной частичной дисклинации (рис. 2, а, г). Одна из границ имеет ростовое происхождение и наклонена к плоскости подложки, а четыре другие границы раздела образуются деформационным путем в процессе последующего роста кристалла. Они перпендикулярны к подложке. Реализуется энергетически оправданная схема преобразования 70-градусной частичной дисклинации в 7-градусную с обрывающимися на ней пятью двойниковыми границами ($E_{70} \rightarrow E_7 + 5\gamma_{111}$) [12].

Убедительным экспериментальным доказательством дисклинационного происхождения пентагонального кристалла при его росте в процессе электрокристаллизации является обнаруженное нами явление расщепления узла, в котором сходятся пять двойниковых границ, на два (рис. 2, д). Энергия дисклинации в кристалле зависит от его размера R и вектора Франка ω ($E \sim \omega^2 R^2$), поэтому энергетически выгодно последующее расщепление 7° частичной дисклинации ($\omega = 7^\circ 20'$) на две ($\omega^2 > \omega_1^2 + \omega_2^2$) с излучением по одной из границ раздела 111 $\langle 110 \rangle$ дислокаций. При расщеплении исходной дисклинации продукты деления оказываются эффективно ближе к свободной поверхности кристалла. Смещение оси частичной дисклинации требует излучения дислокаций и приводит к уменьшению длины двойнико-

вых границ, а в итоге - к снижению упругой энергии системы (рис. 2, д). Экспериментально обнаруженные пентагональные ямки травления на периферии оборванной двойниковой границы (рис. 2, б) и поэтапный характер двойникового в микрокристалле (рис. 2, в, г) также свидетельствует о наличии там высокоэнергетического дефекта - 7° частичной дисклинации.

Все остальные виды пентагональных кристаллов меди (рис. 1, б-н) были получены на бесструктурных, индифферентных подложках, как мы предполагаем, из трехмерных кластеров путем варьирования перенапряжения на катоде в потенциостатическом режиме или плотности тока в гальваностатическом режиме.

Электронно-микроскопические исследования показывают [5], что рост кристаллов на таких подложках всегда начинается из сферических или полусферических островков роста (рис. 3, а), имеющих некристаллическое строение (рис. 3, б) и хорошо наблюдаемых на микрофотографиях при размерах более 100 нм (рис. 3 а, б). При достижении некоторого критического размера (0,3...1,0 мкм) островки роста приобретают огранку и превращаются в микрокристаллы (рис. 3, в) с разнообразной внешней формой (габитусом). В процессе роста до размеров порядка 3...5 мкм преимущественное развитие получают лишь кристаллы, имеющие икосаэдрическую, декаэдрическую или форму звездчатых многогранников (рис. 3, г), содержащие внутри двойниковые границы раздела (рис. 1, п, р). В итоге, из сферических островков роста, затем из разнообразных микрокристаллов вырастают два типа пентагональных кристаллов: с одной и шестью осями симметрии 5-го порядка (рис. 1 б, в, г).

Рассмотрим подробнее возможный механизм образования медных пентагональных кристаллов с одной осью симметрии пятого порядка на примере дискообразных кристаллов (рис. 1, б).

Мы предполагаем, что при низких перенапряжениях ($\eta \approx 30$ мВ) на индифферентной подложке вначале образуется трехмерный кластер, имеющих декаэдрическое расположение атомов (рис. 3, д). В настоящее время доказано, что малые декаэдрические или икосаэдрические частицы более устойчивы, чем обычные кристаллические зародыши, причем при малых размерах энергетически выгодной для них является сферическая форма [2]. Таким образом, в нашем случае из трехмерных декаэдрических кластеров формируются островки роста сферической формы (рис. 3, е). На следующем этапе роста в островке происходит перегруппировка атомов из некристаллической декаэдрической структуры в кристаллическую с образованием дефекта кристаллического строения в виде дисклинации мощностью $\omega = \pi/3$ (рис. 3, ж). Этому способствуют: сравнительно малая энергия дисклинации в кристаллах размером менее 0,1 мкм, высокое внутреннее давление за счет поверхностного натяжения и малого радиуса частицы, а также уменьшение поверхностной энергии за счет появления у островка огранки. При увеличении размеров кристаллов до 1...3 мкм, упругая энергия, связанная с дефектом, релаксирует, путем образования двойниковых границ

(рис. 3, з). Дисклинация мощностью $\omega = \pi/3$ преобразуется в процессе роста кристалла в пентагональный кристалл, содержащий частичную дисклинацию в $7^\circ 20'$ и пять обрывающихся на ней двойниковых границ, причем ни одна из них особо не выделена, по энергетической схеме $E_{60} \rightarrow E_7 + 5\gamma_{111}$ [12]. Схема образования и роста совершенного пентагонального кристалла с одной осью симметрии пятого порядка из декаэдрического кластера (рис. 1, б) при низких перенапряжениях показана на рис. 3, д–з. Внешние грани (со стороны электролита) таких кристаллов являются плотноупакованными плоскостями типа (111), сходящимися в одной вершине, причем вдоль двойниковых границ наблюдаются ”канавки”, образующие входящий угол на двойниковых границах (рис. 1, б). Наличие такого угла способствует преимущественному росту всего пентагонального кристалла вдоль направления $\langle 110 \rangle$, а направления $\langle 112 \rangle$ являются предпочтительными для роста каждого сектора в кристалле.

При увеличении перенапряжения на катоде до значений $\eta \approx 35 \dots 40$ мВ уже при малых размерах (около 1 мкм) у растущих дискообразных кристаллов наблюдаются отклонения от декаэдрической формы. В этих условиях преимущественный рост получают участки, растущие вдоль двойниковых границ и осей пятого порядка. Таким путем из микрокристалла с декаэдрической симметрией, имеющего размер порядка 1 мкм, вырастает пятилепестковое образование размером 10...15 мкм (рис. 1, д; 3, и). Каждый лепесток содержит двойниковую границу, но все они организованы вокруг одного общего центра кристаллизации в виде пентагональной призмы (рис. 1, д; 3, и).

Дальнейшее повышение перенапряжения в потенциостатическом режиме ($\eta \approx 50 \dots 60$ мВ) или плотности тока в гальваностатическом режиме ($j \approx 5$ А/дм²) приводит к тому, что формируются островки роста сложного габитуса, из которых затем образуются дендриты с пятерной симметрией (рис. 1 ж).

По аналогичному механизму из икосаэдрических кластеров возможно образование устойчивых пентагональных кристаллов в виде бакеболов (икосаэдронов) (рис. 1, в) или звездчатых многогранников Каспера (рис. 1, г). Для сохранения сплошности материала и устранения дефицита угла в таких пентагональных кристаллах необходимо введение шести частичных дисклинаций, или так называемой дисклинации Маркса—Иоффе. Поэтому бакеболы (икосаэдроны) (рис. 1, в) и звездчатые многогранники Каспера (рис. 1, г) содержат частичную дисклинацию мощностью $0,48\pi$ с обрывающимися на ней двойниковыми границами и имеют шесть осей симметрии пятого порядка.

Для пентагональных кристаллов, сформировавшихся из икосаэдрических кластеров, активными центрами кристаллизации являются выходы дисклинаций, т.е. именно вышеуказанные шесть осей симметрии пятого порядка. Вследствие этого, при высоких перенапряжениях в потенциостатическом режиме ($\eta \approx 35 \dots 40$ мВ) или при высоких плотностях тока в галь-

ваностатическом режиме ($j \approx 1 \dots 3 \text{ А/дм}^2$) из них в свободном состоянии, по аналогии с декаэдрическими пятилепестковыми образованиями, должна была бы расти малая частица с двенадцатью лепестками. Поскольку икосаэдрическая малая частица находится на подложке, то на практике реализуются не все направления роста, а обычно девять-десять из них. Поэтому, при таких условиях электроосаждения, мы наблюдаем кристаллы-"ежи", состоящие из 9...10 радиальных фрагментов, организованных вокруг одного центра роста (рис. 1 е). Каждый фрагмент содержит двойниковую границу и вытянут вдоль направления двойникования $\langle 112 \rangle$, которое в ГЦК-металлах и является направлением преимущественного роста.

Пентагональная симметрия рассмотренных видов кристаллов однозначно свидетельствует о дисклинационном механизме их формирования, а тот факт, что такие кристаллы могут вырасти до размеров в сотни микрон, можно объяснить релаксацией полей упругих напряжений, связанных с дефектом дисклинационного типа различными способами. При увеличении размеров отдельных пентагональных кристаллов до 80...100 мкм нами были экспериментально подтверждены следующие основные каналы релаксации внутренних полей упругих напряжений, которые теоретически были основаны на работах [2, 9] (рис. 6), а именно:

- а) образование внутри секторов пентагональных кристаллов структурных дислокаций, компенсирующих упругое поле дисклинации (рис. 4, а);
- б) образование в пентагональном кристалле открытого сектора вместо двойниковой границы (рис. 4, б);
- в) образование внутри пентагонального кристалла объемного дефекта клиновидной формы, состоящего из тонких двойниковых прослоек (рис. 4, в);
- г) образование внутри пентагонального кристалла новой фазы с отсутствием пентагональной симметрии (рис. 4, г);
- д) расщепление ядра дисклинации пентагонального кристалла на две дисклинации меньшей мощности (рис. 4, д);
- е) сдвиг ядра дисклинации от центра пентагонального кристалла (рис. 4, е).

Обнаруженные в экспериментах пути релаксации внутренних полей упругих напряжений также указывают на дисклинационное происхождение пентагональных кристаллов. Именно многообразие возможных путей релаксации упругой энергии, связанной с дисклинацией, позволяет кристаллу вырасти до достаточно больших размеров, сохраняя пятерную симметрию.

Кроме вышерассмотренных форм роста пентагональных кристаллов (рис. 1, а – ж) нами было выявлено морфологическое семейство нитевидных пентагональных микро- и нанокристаллов (рис. 1, з – н).

Пентагональные "шайбы" (рис. 1, з) и "призмы" (рис. 1, к) без полости внутри растут вдоль направления $\langle 110 \rangle$. Их рост происходит последовательным дискретным присоединением к кристаллу пентагональных слоев (террас), растущих параллельно подложке. Координированность нараста-

ния террас (рис. 1, з, к) и сохранение направления роста говорят о наличии внутренней согласованности в отложении слоев, их структурной связи, о наличии генетической причины такого роста. Вероятно, в список причин входит и частичная дисклинация мощностью $\Omega = 7^\circ 20'$, и пять обрывающихся на ней двойниковых границ.

Возможность формирования полости в пентагональных кристаллах была предсказана, исходя из дисклинационных представлений, В.И. Владимировым [13], и затем подтверждена экспериментально А.Е. Романовым в работе [14]. В ней сообщалось о получении пентагональных кристаллов CdTe, имеющих внутреннюю полость, ограниченную плоскостями с четкими кристаллографическими индексами. Проведенные нами эксперименты также подтвердили возможность роста пентагональных кристаллов с полостью в виде "гаек" (рис. 1, и) и "микротрубок" (рис. 1, л), возникающих при электроосаждении меди. В работах [15, 16] нами предложена модель формирования и эволюции полости в пентагональных микротрубках на основе неравновесной термодинамики и теории открытых систем [17]. В частности нами показано, что появление полости в пентагональном кристалле (рис. 5, а, б), его рост, образование перемычек (рис. 5, в), расположенных перпендикулярно граням внутренней полости и дальнейшее преобразование полого нитевидного пентагонального кристалла в монокристалл можно трактовать как эволюцию внутренней структуры кристалла, которая самоорганизуется таким образом, чтобы сохранить стационарное состояние в процессе роста кристалла. При этом образование перемычек (рис. 5, в) можно трактовать как одно из возможных направлений релаксации упругой энергии, связанной с дефектом дисклинационного типа.

Заключение

Пентагональная симметрия, особенности строения и экспериментально обнаруженные каналы релаксации упругой энергии однозначно говорят о дисклинационной природе пентагональных кристаллов, формирующихся в процессе электрокристаллизации. Дальнейшее исследование кристаллов, имеющих оси симметрии пятого порядка, которые запрещены законами классической кристаллографии, позволит решить ряд вопросов теории прочности и пластичности, в частности, изучить влияние одиночных дисклинаций на свойства твердых тел, проверить теоретические модели релаксации упругой энергии, связанной с дисклинациями, выявить механизмы образования и роста таких кристаллов, разработать технологии получения пленок, покрытий и порошков, состоящих из пентагональных частиц, кристаллов и трубок.

Кристаллы с пятерной симметрией обладают специфическими свойствами. В них нарушен дальний порядок. Они содержат дисклинации и двойни-

ковые границы раздела. В них запрещено трансляционное скольжение дислокаций, четко выражена текстура и, соответственно, анизотропия свойств. Можно предположить, что покрытия, пленки и фольги из таких кристаллов в силу специфических особенностей их строения будут также обладать необычными свойствами, поэтому изучение пентагональных кристаллов сейчас весьма актуально и представляет не только чисто научный, но и практический интерес, т.к. открывает новые возможности для создания материалов с уникальными свойствами. В частности, пентагональные кристаллы в виде "микротрубок" (рис. 1, л), "ежей" (рис. 1, е) и дендритов (рис. 1, ж), имеющие развитую свободную поверхность, можно использовать для изготовления фильтров, сосудов для хранения сжиженных газов, катализаторов и т. п. Пентагональные микротрубки с перемычками, расположенными перпендикулярно граням внутренней полости (рис. 5, в), которые являются ребрами жесткости для такой микротрубки, могли бы применяться в качестве микрозондов и микрощупов в атомно-силовой микроскопии при исследовании морфологии поверхности физических объектов и визуализации наноструктур. Исследования в данном направлении продолжаются в настоящее время.

Литература

- [1] Hofmeister, H. Forty Years Study of Fivefold Twinned Structures in Small Particles and Thin Films / H. Hofmeister // *Crystal Research and Technology*. – 1998. – V. 33. – №1. – P. 3–25.
- [2] Pentagonal symmetry and disclinations in small particles / V.G. Gryaznov [et al.] // *Crystal Research and Technology*. – 1999. – V. 34. – № 9. – P. 1091–1119.
- [3] Segall, R.L. Unusual Twinning in Annealed Copper / R.L. Segall // *Journal of Metals*. – 1957. – V. 9. – P. 50.
- [4] Викарчук, А.А. Пентагональные кристаллы меди, многообразие форм их роста и особенности внутреннего строения / А.А. Викарчук, А.П. Воленко // *Физика твердого тела*. – 2005. – Т. 47. – Вып. 2. – С. 339–344.
- [5] Викарчук, А.А. Формы роста пентагональных кристаллов, образующихся при электроосаждении меди, и особенности их внутреннего строения / А.А. Викарчук, А.П. Воленко, И.С. Ясников // *Сборник трудов XLIII Международного семинара "Актуальные проблемы прочности"*. – Витебск, 2004. – Т. 1. – С. 258–264.
- [6] Пангаров, Н.А. Ориентация кристаллитов при электроосаждении металлов / Н.А. Пангаров, // *Материалы сборника "Рост кристаллов"*. – Т. 10. – М.: Наука, 1974. – С. 71–97.
- [7] Froment, M. Structure et cristallogenese des deposits electrolytiques de nickel / M. Froment, C. Mourin // *J. Microscope*. – 1968. – V. 7. – P. 39–50.

- [8] Shozo, I. Multiply Twinned Particles at Earlier Stages of Gold Film Formation on Alkali Halide Crystals / I. Shozo, Shiro Ogawa // *Journal of Physical Society of Japan*. – 1967. – V. 22. No. 6. – P. 1365–1374.
- [9] Грязнов, В.Г. Пентагональная симметрия и дисклинации в малых частицах / В.Г. Грязнов, А.М. Капрелов, А.Е. Романов // *Материалы сборника трудов "Дисклинации и ротационная деформация твердых тел"*. – Л.: Изд-во ФТИ АН СССР, 1986. – С. 47–83.
- [10] Лихачев, В.А. Континуальная теория дефектов / В.А. Лихачев, А.Е. Волков, В.Е. Шудегов // Л.: Изд-во Ленинград. Ун-та, 1986. – 232 с.
- [11] Викарчук, А.А. Дисклинационная модель формирования кристаллов с пятерной симметрией при электроосаждении ГЦК-металлов / А.А. Викарчук, А.П. Воленко, А.Ю. Крылов, И.С. Ясников // *Машиностроитель*. – 2003. – №7. – С. 30–34.
- [12] Witt, R. De Partial disclinations / R. De Witt // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. – 1972. – V. 5. – P. 529–534.
- [13] Владимиров, В.И. Дисклинации в кристаллах / В.И. Владимиров, А.Е. Романов // Л.: Наука, 1986. – 224 с.
- [14] Voids and channels in pentagonal crystals / A. E. Romanov, I. A. Polonsky, V. G. Gryaznov [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. – 1993. – V. 129. Iss. 3–4. – P. 691–698.
- [15] Термодинамика образования полости в нитевидных пентагональных кристаллах в процессе электроосаждения меди / И.С. Ясников [и др.] // *Вестник Самарского Государственного технического университета*. – 2004. – №27. – С. 196–200.
- [16] Ясников, И.С. Термодинамика образования полости в пентагональных кристаллах в процессе электроосаждения меди / И.С. Ясников, А.А. Викарчук // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2005. – Т. 69. – № 9. – С. 1378–1382.
- [17] Пригожин, И.Р. Введение в термодинамику необратимых процессов / И.Р. Пригожин. – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 160 с.

Поступила в редакцию 13/I/2006;
в окончательном варианте — 13/I/2006.

**THE COPPER PENTAGONAL CRYSTALS
OF ELECTROLYTIC ORIGIN: STRUCTURE, MODELS
AND MECHANISMS OF FORMATION AND GROWTH³**

© 2006 A.A. Vikarchuk, I.S. Yasnikov, O.A. Dovzhenko, E.A. Talalova,
M.N. Tyurkov⁴

In the paper the method of electrodeposition is used to obtain the multitude of the copper crystals having one or six pentagonal symmetry axes. Features of their structure and probable mechanisms of formation and growth are considered. It is proved that various pentagonal crystals formed during electrodeposition have the similar disclination structure.

Paper received 13/I/2006.

Paper accepted 13/I/2006.

³Communicated by Dr. Sci. (Phys. & Math.) Prof. A.V. Pokoev.

⁴Vikarchuk Anatoly Alexeyevich, Yasnikov Igor Stanislavovich (yasn@infopac.ru), Dovzhenko Olga Alexandrovna, Talalova Elena Alexeyevna, Tyurkov Maxim Nickolaevich, Togliatti State University, Togliatti, 445667, Russia.

ПРИЛОЖЕНИЕ

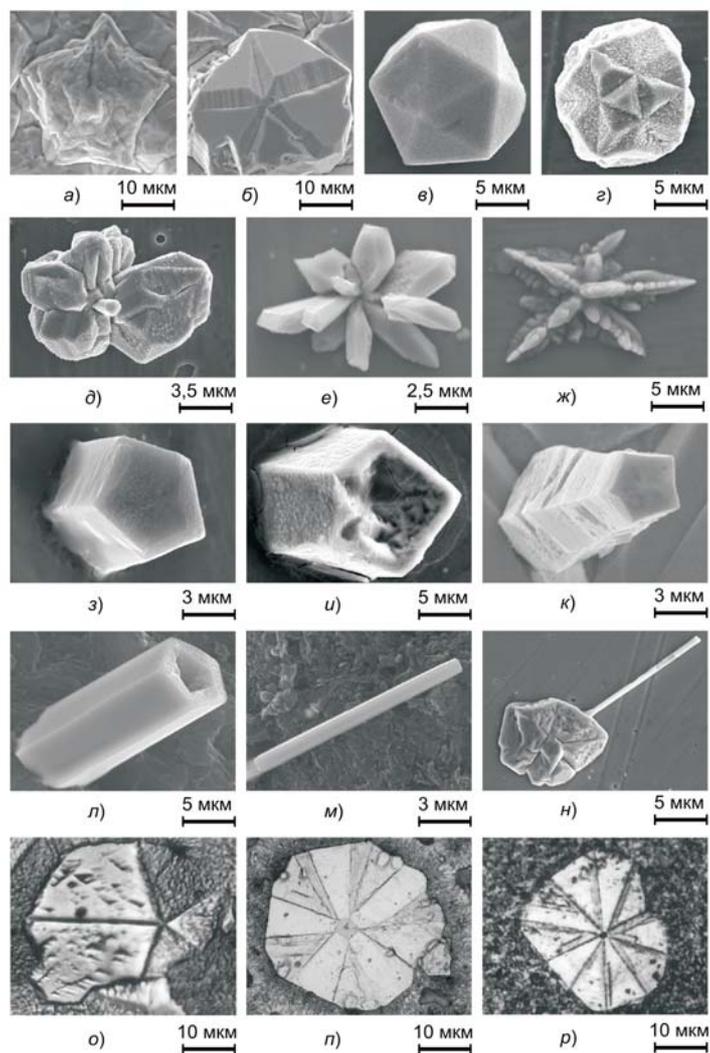


Рис. 1. Многообразие форм роста пентагональных кристаллов меди (а-н) и фигуры травления пентагональных кристаллов меди с одной (о) и шестью (п, р) осями симметрии пятого порядка: о) шлиф со стороны электролита; п), р) шлиф со стороны подложки

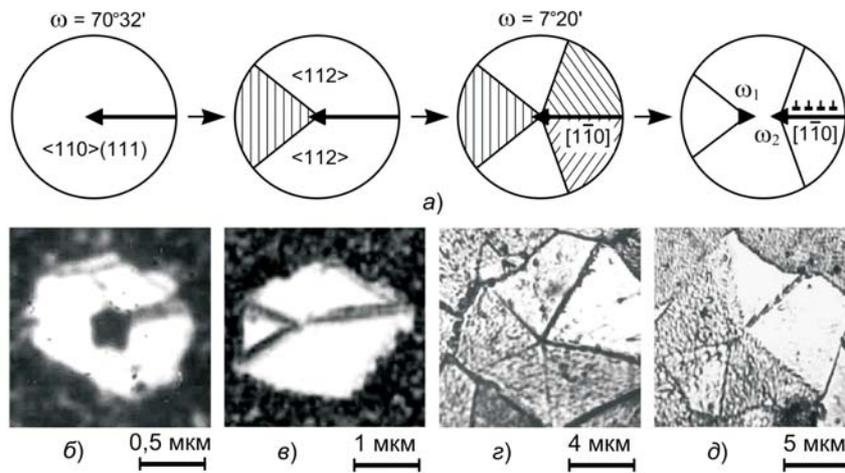


Рис. 2. Эволюция образования, роста и последующего расщепления узла, где сходятся двойниковые границы пентагональных кристаллов, выросших из двумерных зародышей: а) схема эволюции; б) – д) результаты эксперимента

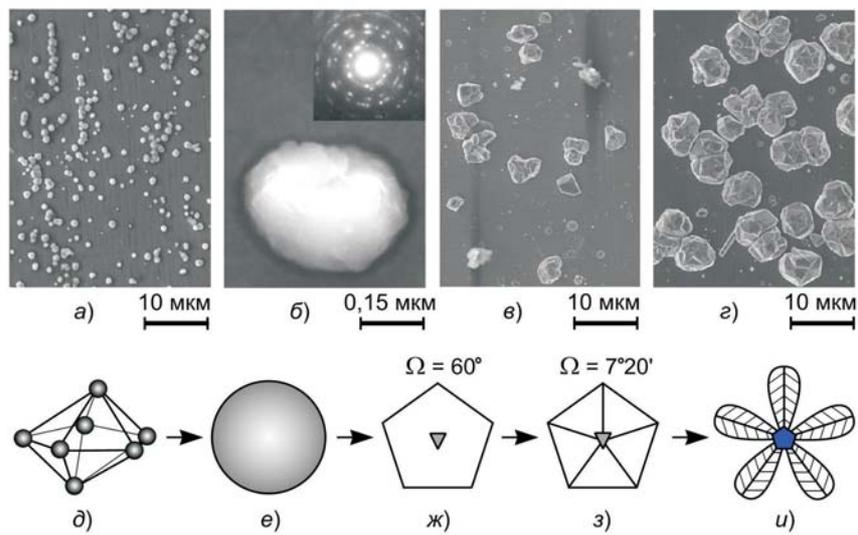


Рис. 3. Кинетика роста пентагональных кристаллов из некристаллических кластеров на индифферентной подложке (а-г) и схема эволюции пентагонального кристалла, выросшего на индифферентной подложке из декаэдрического кластера и имеющего одну ось симметрии пятого порядка (д-и)

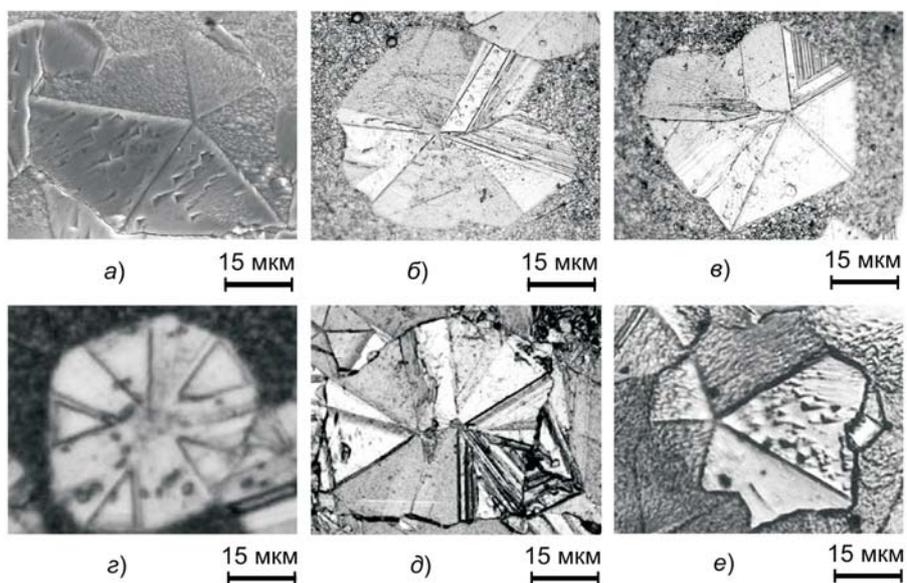


Рис. 4. Выявленные в экспериментах механизмы релаксации внутренних полей упругих напряжений в пентагональных кристаллах

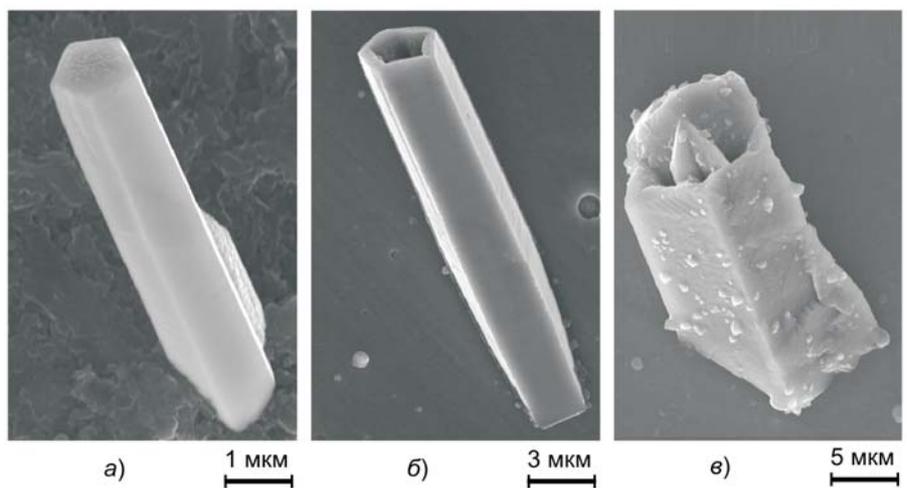


Рис. 5. Эволюция нитевидного пентагонального микрокристалла в процессе его роста при электрокристаллизации меди