
УДК 539.25:620.187

**ФОРМИРОВАНИЕ И ЭНЕРГИЯ ОБОРВАННЫХ, МАЛОУГЛОВЫХ,
МЕЖБЛОЧНЫХ ГРАНИЦ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МОДУЛЕМ
И ЗНАКОМ ВЕКТОРА РАЗОРИЕНТИРОВКИ
В НАНОТОНКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУРАХ
ГЕКСАГОНАЛЬНОГО СЕЛЕНА**

© 2020 г. В. Б. Малков^{a, *}, **И. В. Николаенко^b**, **Г. П. Швейкин^b**,
В. Г. Пушин^{c, d}, А. В. Малков^e, Б. В. Шульгин^c, О. В. Малков^e

^aИнститут высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^bИнститут химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^cУральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

^dИнститут физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^eЗАО НПЦ «РОСНА», Екатеринбург, Россия

*e-mail: mvb@ihte.uran.ru

Поступила в редакцию 05.07.2019 г.

После доработки 29.07.2019 г.

Принята к публикации 25.08.2019 г.

С помощью анализа картин изгибных экстинкционных контуров, присутствующих на электронно-микроскопических изображениях нанотонких (~80 нм) пространственных диссипативных структур, исследуются процессы формирования оборванных, малоугловых, межблочных границ в нанотонких пространственных диссипативных структурах гексагонального селена с упругим ротационным искривлением решетки вокруг [001]. Обнаружен эффект изменения знака вектора разориентировки вдоль оборванных, малоугловых, межблочных границ кручения. С учетом изменения вдоль межблочной границы и модуля, и знака вектора разориентировки развивается модель формирования оборванных, малоугловых, межблочных границ кручения в нанотонких пространственных диссипативных структурах гексагонального селена, решетка которых испытывает упругое ротационное искривление. Выводится формула для расчета энергии оборванных, малоугловых, межблочных границ кручения, сформировавшихся в нанотонких пространственных диссипативных структурах, вдоль которых изменяются и модуль, и знак вектора разориентировки.

Ключевые слова: межблочная граница, электронная микроскопия, изгибные экстинкционные контуры, диссипативная структура, селен

DOI: 10.31857/S0235010620050072

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в процессе формирования в аморфных пленках нанотонких пространственных диссипативных структур (ПДС) гексагонального селена – нанотонких кристаллов гексагонального селена с упругим ротационным искривлением решетки вокруг [001] после стадии закалки нанотонких ПДС [1, 2]; в центре, первоначально бездислокационной, ромбовидной, нанотонкой ПДС, может зародиться оборванная, малоугловая, межблочная граница, развитие которой происходит путем ее удлинения [3–6]. Зарождение оборванной, малоугловой, межблочной границы кручения в центральной части нанотонкой ромбовидной ПДС гексагонального селена, обусловлено релаксацией неоднородного упругого ротационного искривления решетки нано-

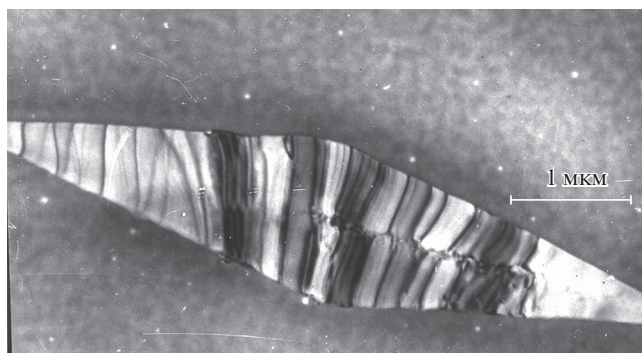


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение нанотонкой ромбовидной ПДС гексагонального селена с оборванной, малоугловой, межблочной границей кручения.

тонкой ПДС вокруг $[001]$ в части нанотонкой ПДС [4–7]. Исследования разориентировок решетки на различных этапах формирования оборванных, малоугловых, межблочных границ в нанотонких ПДС [4–6], проведенные с помощью метода изгибных контуров [8], позволили установить, что оборванные, малоугловые, межблочные границы являются границами кручения с изменяющимся вдоль границы модулем вектора разориентировки $|\omega|$ [4–6]. При этом вопрос об изменении знака вектора разориентировки ω оставался открытым.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Электронно-микроскопические изображения ромбовидных нанотонких ПДС гексагонального селена с упругим ротационным искривлением решетки вокруг $[001]$, совпадающего по направлению с короткой диагональю ромбовидной нанотонкой ПДС, без межблочных границ, характеризуется системой изгибных экстинкционных контуров параллельных $[001]$ [7]. Появление систем изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопических изображениях нанотонких ПДС гексагонального селена, обусловлено, неоднородным упругим ротационным искривлением их решетки вокруг $[001]$ [1–7]. Образование оборванной границы кручения приводит к сдвигу параллельно расположенных изгибных контуров в одном из соседних блоков нанотонкой ПДС по отношению к изгибным контурам в другом блоке (рис. 1). Для границ кручения, знак вектора разориентировки ω которых оставался неизменным, оставался неизменным и порядок чередования изгибных экстинкционных контуров вдоль межблочной границы [4–6].

В результате исследования оборванных, межблочных границ кручения, сформировавшихся в нанотонких ПДС гексагонального селена, с помощью методов просвечивающей электронной микроскопии, в том числе с помощью метода изгибных контуров [4–6, 8] и способа диагностики эффекта изменения знака вектора разориентировки вдоль межблочных границ [9], обнаружены оборванные, малоугловые, межблочные границы с изменяющимся вдоль границы порядком чередования изгибных контуров. В соответствии с выводами, полученными в [9], для данных границ имеет место эффект изменения знака вектора разориентировки ω . Рассмотрим электронно-микроскопические изображения нанотонкой ПДС (рис. 2), в которой в результате формирования оборванной, малоугловой границы (E_1 и E_2 – точки начала и конца оборванной границы, соответственно) (рис. 3) произошел сдвиг параллельно расположенных изгибных контуров с изменением порядка их чередования. Оборванная граница делит

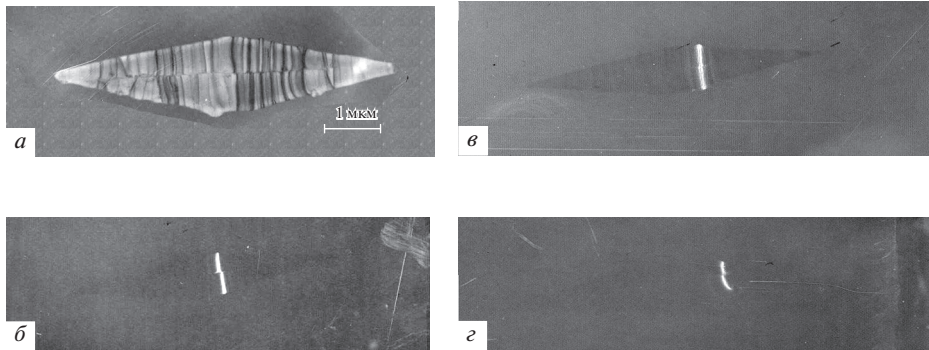


Рис. 2. Микрофотографии нанотонкой ромбовидной ПДС гексагонального селена с оборванной, малоугловой, межблочной границей кручения, знак вектора разориентировки $\vec{\omega}$ вдоль которой изменяется: *a* – светлополюсное изображение; *б, в, г* – темнопольные изображения нанотонкой ПДС в рефлексах $(\bar{2}0\bar{1})$, $(\bar{2}00)$, $(\bar{2}01)$ соответственно.

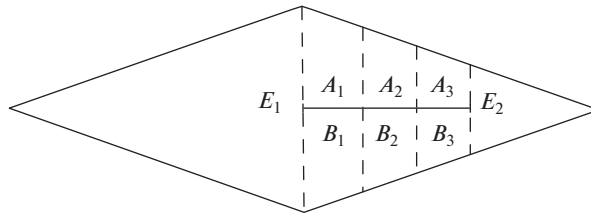


Рис. 3 Схема нанотонкой ПДС гексагонального селена с оборванной, малоугловой, межблочной границей кручения.

ромбовидную ПДС на различающиеся по ориентировке блоки *A* и *B*, которые по порядку чередования контуров можно разделить на три, в общем случае, неравные области 1, 2 и 3 (рис. 3). На рис. 2*a*, в области $(A_1 B_1)$, контур $\overline{h_1 k_1 l_1}$ блока *A* отстаёт от соответствующего контура $\overline{h_1 k_1 l_1}$ блока *B*, что хорошо видно на темнопольном изображении нанотонкой ромбовидной ПДС, полученном в рефлексе $\bar{2}0\bar{1}$ (рис. 2*б*). В области $(A_2 B_2)$ контуры $\overline{h_2 k_2 l_2}$ расположены друг над другом, что подтверждается темнопольным изображением нанотонкой ПДС, полученном в рефлексе $\bar{2}00$ (рис. 2*в*). В области $(A_3 B_3)$ изгибной экстинкционный контур $\overline{h_3 k_3 l_3}$ блока *A* опережает соответствующий контур $\overline{h_3 k_3 l_3}$ блока *B*, о чем свидетельствует темнопольное изображение ромбовидной ПДС, полученное в рефлексе $\bar{2}01$ (рис. 2*г*). Положение изгибного контура hkl на электронно-микроскопическом изображении нанотонкой ПДС определяет положение плоскости hkl , находящейся в отражающем положении. Анализ положений изгибных контуров вдоль межблочной границы (рис. 2), сформировавшейся в нанотонкой ПДС гексагонального селена, позволяет сделать вывод: межблочная граница, представленная на рис. 2, является границей кручения с вектором разориентировки $\vec{\omega}$, знак и модуль которого изменяются вдоль границы [9].

Итак, для оборванных границ кручения, порядок чередования изгибных контуров в соседних блоках вдоль которых изменяется, изменяется вдоль границы и знак вектора разориентировки $\vec{\omega}$.



Рис. 4. Изменение вектора разориентировки $\vec{\omega}$ вдоль оборванной, малоугловой, межблочной границы кручения, сформировавшейся в ромбовидной нанотонкой ПДС гексагонального селена.

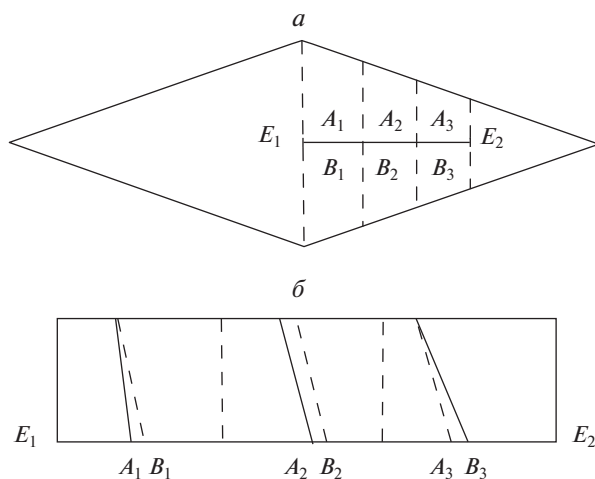


Рис. 5. Схема нанотонкой ПДС гексагонального селена с оборванной, малоугловой, межблочной границей кручения, вектор разориентировки $\vec{\omega}$ вдоль которой изменяется. Условное разделение соседних блоков нанотонкой ПДС A и B на участки $A_1 B_1, A_2 B_2, A_3 B_3$ вдоль границы ($E_1 E_2$) — (а); схема сечения нанотонкой ПДС плоскостью перпендикулярной ее поверхности вдоль границы, линиями, сплошной и пунктирной, условно показано положение произвольно выбранного кристаллографического направления в блоках B и A , соответственно, на участках $A_1 B_1, A_2 B_2, A_3 B_3$ — (б).

Результаты исследования изменения вектора разориентировки $\vec{\omega}$ вдоль оборванной границы кручения представлены на рис. 3. Область ($A_1 B_1$) нанотонкой ПДС, где знак вектора разориентировки $\vec{\omega}$ является положительным, отделена от области ($A_3 B_3$), где знак вектора разориентировки $\vec{\omega}$ является отрицательным, областью ($A_2 B_2$), разориентировка решетки в которой близка к нулю. Как уже отмечалось выше, области 1, 2 и 3 (рис. 3), на которые межблочная граница кручения делит нанотонкую ПДС, в общем случае, неравны; область ($A_2 B_2$), в рассматриваемом примере, мала, и на графике изменения вектора разориентировки $\vec{\omega}$ вдоль оборванной границы кручения (рис. 4) представлена “точкой”.

На рис. 5 представлена схема сечения нанотонкой ромбовидной ПДС вдоль границы $E_1 E_2$, иллюстрирующая искривление решетки нанотонкой ПДС в блоках A и B .

Изменение произвольно выбранного кристаллографического направления в блоке A , нанотонкой ПДС показано пунктирными линиями, в блоке B – сплошными линиями. Разориентировка решетки на границе $E_1 E_2$ обусловлена не разворотом блоков нанотонкой ПДС, как целого в пространстве, а изменением внутреннего изгиба решетки в блоках нанотонкой ПДС. Эффект изменения знака вектора разориентировки $\vec{\omega}$ вдоль оборванных, малоугловых, межблочных границ кручения в нанотонкой ПДС, наблюдается всегда только один раз.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные данные позволяют классифицировать оборванные, малоугловые, межблочные границы кручения, сформировавшиеся в нанотонких ПДС гексагонального селена, как границы разориентации, вдоль которых могут изменяться и модуль, и знак вектора разориентировки $\vec{\omega}$ [10]. Таким образом, характерной особенностью оборванных, малоугловых, межблочных границы кручения, сформировавшихся в нанотонких ПДС гексагонального селена, является изменение не только модуля вектора разориентировки $|\vec{\omega}|$, но и изменение знака вектора разориентировки $\vec{\omega}$ вдоль границы.

В работах по исследованию нанотонких ПДС подобные структурные несовершенства, относящиеся, согласно классификации приведенной в [10], к границам разориентации, до настоящего времени не описывались. Другой характерной особенностью исследованных межблочных границ, является наличие участка с разориентировкой решетки близкой к нулю. На данном участке границы происходит изменение знака вектора разориентировки $\vec{\omega}$. Естественным является вопрос: как формируется граница разориентации, включающая в себя участок с разориентировкой решетки близкой к нулю? Можно предположить, что указанные особенности в разориентировки решетки вдоль исследованных границ обусловлены особенностями механизма их формирования.

В работах [4–6] предложен механизм формирования межблочной границы кручения с изменяющимся модулем вектора разориентировки $|\vec{\omega}|$. В соответствии с данным механизмом образование в исследуемых нанотоках ПДС гексагонального селена обусловлено релаксацией упругого ротационного искривления решетки вокруг $[001]$ в части нанотонкой ПДС. Здесь же [4–6] отмечается, что движущей силой процесса релаксации упругого изгиба решетки нанотонких ПДС является стремление к уменьшению энергии упруго искаженной решетки.

Рассмотрим подробнее релаксационный механизм формирования оборванной границы кручения. При рассмотрении сравним процессы формирования границы кручения с изменяющимся модулем вектора разориентировки $|\vec{\omega}|$ и границы с изменяющимся модулем и знаком вектора разориентировки $\vec{\omega}$. Для оборванной границы кручения с изменяющимся модулем вектора разориентировки $|\vec{\omega}|$ сохраняется порядок чередования изгибных контуров, что можно получить при релаксации упругого изгиба решетки в одном из блоков. Для оборванной границы кручения с изменяющимся модулем и знаком вектора разориентировки $\vec{\omega}$ порядок чередования изгибных контуров не сохраняется, что достигается только при релаксации упругого изгиба решетки нанотонкой ПДС и в блоке A , и в блоке B . При этом, если на первом участке границы ($A_1 B_1$) “раскручивание” решетки нанотонкой ПДС происходит в большей степени в части блока B , на втором участке границы ($A_2 B_2$) релаксация упругого изгиба решетки происходит в блоках A и B в равной степени, то на третьем участке границы ($A_3 B_3$) “раскручивание” решетки нанотонкой ПДС происходит в большей степени в части блока A . В связи с этим, понятно, что для объяснения формирования оборванной границы с изменяющимся модулем и знаком вектора разориентировки $\vec{\omega}$ необходимо

предположить: процесс формирования границы реализуется в два этапа. На первом этапе происходит релаксация упругого изгиба решетки нанотонкой ПДС в одном из соседних блоков, что приводит к формированию границы с изменяющимся модулем вектора разориентировки $|\bar{\omega}|$. На втором этапе происходит релаксация упругого изгиба решетки в другом блоке, что приводит к формированию границы с изменяющимся и модулем, и знаком вектора разориентировки $\bar{\omega}$.

Итак, суперпозицией последовательно реализующихся процессов релаксации упругого изгиба решетки нанотонкой ПДС в каждом из соседних блоков можно объяснить все наблюдаемые в эксперименте особенности разориентировок решетки на оборванных, малоугловых, межблочных границах кручения в нанотонких ПДС гексагонального селена, включая эффект изменения знака вектора разориентировки $\bar{\omega}$.

Изменение знака вектора разориентировки $\bar{\omega}$ вдоль границы кручения является весьма специфическим, отличающим данный тип границ эффектом [9], и существенным образом сказывается на физических величинах, зависящих от значения угла разориентировки решетки на границе. Так, энергия малоугловой границы в кристалле равна [11]:

$$E = E_0\omega(A_0 - \ln \omega), \quad (1)$$

где A_0 и E_0 – константы; ω – угол разориентировки блоков или зерен.

Однако, данная формула не пригодна для вычисления энергии границ, формирующихся в нанотонких ПДС, модуль и знак вектора разориентировки вдоль которых изменяются. Для малоугловой, межблочной границы кручения, сформировавшейся в нанотонкой ПДС, с изменяющимся модулем вектора разориентировки, в работе [6] была получена следующая формула для энергии малоугловой границы:

$$E^\omega = \int_{l_0}^{l_1} E[\omega(l)]dl, \quad (2)$$

где $E[\omega(l)] = E_0\omega(l)[A_0 - \ln \omega(l)]$, где l_0 и l_1 – значения параметра, соответствующие началу и концу границы.

Для исследованных оборванных, малоугловых, межблочных границ кручения, сформировавшихся в нанотонких ПДС гексагонального селена, вдоль которых изменяются модуль и знак вектора разориентировки $\bar{\omega}$ была обнаружена только одна точка, в которой происходит изменение знака вектора разориентировки $\bar{\omega}$. Если точка на малоугловой границе кручения, где $\bar{\omega} = 0$ располагается между l_0 и l_1 , соответствующих началу и концу границы, то формула (2) будет выглядеть следующим образом:

$$E^\omega = \int_{l_0}^0 E[\omega(l)]dl + \int_0^{l_1} E[\omega(l)]dl. \quad (3)$$

Совершенно ясно, что энергия малоугловой границы кручения не может зависеть от того, решетка какого из соседних блоков нанотонкой ПДС повернута относительно решетки другого блока, то есть не может зависеть от знака вектора разориентировки $\bar{\omega}$. В связи с этим формулу (3) необходимо записать следующим образом:

$$E^{|\omega|} = \int_{l_0}^0 E[|\omega(l)|]dl + \int_0^{l_1} E[|\omega(l)|]dl. \quad (4)$$

Наличие двух интервалов в правой части формулы (4) обусловлено различием, в общем случае, поведения $|\omega(l)|$ на участках малоугловой границы кручения нанотонкой ПДС от l_0 до 0 и от 0 до l_1 .

Анализ выражений для энергии малоугловой границы кручения, сформировавшейся в нанотонкой ПДС (1)–(4) позволяет сделать вывод: энергия малоугловых границ с изменяющимися вдоль границы модулем и знаком вектора разориентировки $\vec{\omega}$, формирующихся в нанотонких ПДС, существенно ниже энергии границ с $\vec{\omega} = \text{const}$, формирующихся в нанотонких кристаллах.

ВЫВОДЫ

Анализ взаимного расположения изгибных экстинкционных контуров в соседних блоках нанотонкой ромбовидной ПДС с оборванной, малоугловой, межблочной границей кручения позволил установить:

1. Вдоль оборванных, малоугловых, межблочных границ кручения, сформировавшихся в нанотонких ПДС гексагонального селена, изменяются не только модуль, но и знак вектора разориентировки $\vec{\omega}$.

2. Особенностью оборванных, малоугловых, межблочных границ кручения с изменяющимися вдоль границы знаком вектора разориентировки $\vec{\omega}$, является наличие участка с разориентировкой решетки близкой к нулю, на котором и происходит изменение знака вектора разориентировки $\vec{\omega}$.

3. Формирование оборванных, малоугловых, межблочных границ кручения, с изменяющимися вдоль границы модулем и знаком вектора разориентировки, является результатом суперпозиции процессов релаксации неоднородного упругого ротационного искривления решетки нанотонкой ромбовидной ПДС гексагонального селена вокруг [001], последовательно реализующихся в соседних блоках.

4. Получена формула для вычисления энергии оборванных, малоугловых, межблочных границ кручения, вдоль которых изменяются не только модуль, но и знак вектора разориентировки $\vec{\omega}$.

5. На основании анализа исследования оборванных, малоугловых, межблочных границ кручения с изменяющимися вдоль границы модулем и знаком вектора разориентировки $\vec{\omega}$ сделан вывод: энергия малоугловых границ с изменяющимися вдоль границы модулем и знаком вектора разориентировки $\vec{\omega}$, формирующихся в нанотонких ПДС, существенно ниже энергии границ с $\vec{\omega} = \text{const}$, формирующихся в нанотонких кристаллах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малков В.Б., Николаенко И.В., Швейкин Г.П., Пушин В.Г., Малков А.В., Малков О.В., Шульгин Б.В. Формирование диссипативных структур в аморфной пленке // Докл. Академии Наук. 2018. **478**. № 5. С. 543–545.
2. Малков В.Б., Николаенко И.В., Швейкин Г.П., Пушин В.Г., Малков А.В., Шульгин Б.В., Малков О.В., Плаксин С.В. Способ получения диссипативных структур. Патент РФ 2637396 от 04.12.2017.
3. Болотов И.Е., Кожин А.В., Мельников П.С. Электронно-микроскопическое изучение блокообразования в тонких кристаллах селена в процессе их роста // Изв. АН СССР, сер. физическая. 1977. **41**. № 5. С. 1065–1067.
4. Bolotov I.E., Kolosov V.Yu., Malkov V.B. Application of Bend-Contour Method the Investigation of Block Formation in Thin-Film Crystals // Electron Microscopy. Budapest, 1984. **2**. P. 42–45.
5. Bolotov I.E., Kolosov V.Yu., Malkov V.B. Electron Microscopy Investigation of Crystals Based on Bend-Contour Arrangement 3. Formation of Subgrain Boundaries in Dislocation-Free Crystals of Selenium // Phys. Stat. Sol. (a). 1986. **95**. P. 377–383.
6. Болотов И.Е., Колосов В.Ю., Малков В.Б. Новый тип межблочных границ в тонкопленочных кристаллах селена // Кристаллография. 1986. **1**. № 1. С. 204–206.
7. Малков В.Б., Малков А.В., Малков О.В., Пушин В.Г., Шульгин Б.В., Агалаков С.П. Явление упругого ротационного искривления решетки нанотонких кристаллов гексагонального селена вокруг [001] в рамках несимметричной теории упругости // Сб. докл. Харьковской нанотехнол. Ассамблеи. 2008. **2**. С. 18–23.

8. Bolotov I.E., Kolosov V.Yu. Investigation of Crystals Based on Bend-Contour Arrangement. 1 Relationship between Bend-Contour Arrangement and Bend Geometry // *Phys. Stat. Sol.(a)*. 1982. **69**. № 1. P. 85–96.
9. Малков В.Б. Малков А.В., Пушин В.Г., Стрекаловский В.Н., Малков О.В. Способ диагностики эффекта изменения знака вектора разориентировки вдоль межблочных границ в нанотонких кристаллах. Патент РФ 2534719 от 20.07.2012.
10. Лихачев В.А. Кооперативная пластичность, обусловленная движением границ разориентации и границ раздела фаз // *Изв. Вузов*. 1982. № 6. С. 83–102.
11. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения в металлах. М.: Металлургия, 1983.

FORMING AND ENERGY OF WRAPPED, LOW-TYPE, INTER-BLOCK BORDERS WITH VARIABLE MODULE AND SIGN OF THE DISTORIZATION VECTOR IN NANOTUBE SPATIAL DISTRIBUTIVE STRUCTURES OF THE HEAT-TYPE

V. B. Malkov¹, I. V. Nikolaenko², G. P. Shveykin², V. G. Pushin^{3, 4},
A. V. Malkov⁵, B. V. Shul'gin³, O. V. Malkov⁵

¹*Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia*

²*Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia*

³*Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*

⁴*Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia*

⁵*ZAO NPTs ROSNA, Yekaterinburg, Russia*

By analyzing the patterns of bending extinction contours present on the electron microscopic images of nanotubic (~80 nm) Spatial dissipative structures, the formation of dangling, low-angle, interblock boundaries in nanotin spatial dissipative structures of hexagonal selenium with elastically rotating rotational curvature around [001] is studied. The effect of a change in the sign of the misorientation vector along the torn-off, small-angle, interblock torsion boundaries was discovered. Taking into account the change along the interblock boundary and the modulus and the sign of the misorientation vector, a model for the formation of dangling, low-angle, interblock torsion boundaries in the nano-current spatial dissipative structures of hexagonal selenium, whose lattice undergoes elastic rotational curvature, is developed. A formula is derived for calculating the energy of dangling, small-angle, interblock torsion boundaries formed in nano-current spatial dissipative structures, along which both the modulus and the sign of the misorientation vector change.

Keywords: interfacial boundary, electron microscopy, bending extinction contours, dissipative structure, selenium

REFERENCES

1. Malkov V.B., Nikolayenko I.V., Shveykin G.P., Pushin V.G., Malkov A.V., Malkov O.V., Shul'gin B.V. Formirovaniye dissipativnykh struktur v amorfnoy plenke [Formation of dissipative structures in an amorphous film] // *Dokl. Akademii Nauk*. 2018. **478**. № 5. P. 543–545. [In Russian].
2. Malkov V.B., Nikolayenko I.V., Shveykin G.P., Pushin V.G., Malkov A.V., Shul'gin B.V., Malkov O.V., Plaksin S.V. Sposob polucheniya dissipativnykh struktur [The method of obtaining dissipative structures]. The patent of the Russian Federation № 2637396 dated 04.12.2017. [In Russian].
3. Bolotov I.Ye., Kozhin A.V., Mel'nikov P.S. Elektronno-mikroskopicheskoye izucheniye blokobrazovaniya v tonkikh kristallakh selena v protsesse ikh rosta [Electron-microscopic study of block formation in thin selenium crystals during their growth] // *Izv. AN SSSR*. 1977. **41**. № 5. P. 1065–1067. [In Russian].
4. Bolotov I.E., Kolosov V.Yu., Malkov V.B. Application of Bend-Contour Method the Investigation of Block Formation in Thin-Film Crystals // *Electron Microscopy*. Budapest, 1984. **2**. P. 42–45.
5. Bolotov I.E., Kolosov V.Yu., Malkov V.B. Electron Microscopy Investigation of Crystals Based on Bend-Contour Arrangement 3. Formation of Subgrain Boundaries in Dislocation-Free Crystals of Selenium // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1986. **95**. P. 377–383.
6. Bolotov I.Ye., Kolosov V.Yu., Malkov V.B. Novyy tip mezhblochnykh granits v tonkoplennochnykh kristallakh selena [New type of interblock borders in thin-film crystals of selenium] // *Kristallografiya*. 1986. **1**. № 1. P. 204–206. [In Russian].

7. Malkov V.B., Malkov A.V., Malkov O.V., Pushin V.G., Shul'gin B.V., Agalakov S.P. Yavleniye uprugogo rotatsionnogo iskrivleniya reshetki nanotonkikh kristallov geksagonal'nogo selena vokrug [001] v ramkakh nesimmetrichnoy teorii uprugosti [The phenomenon of the elastic rotational curvature of the lattice of hexagonal selenium nano-thin crystals around [001] in the framework of the asymmetric theory of elasticity] // Sb. dokl. Khar'kovskoy nanotekhnol. Assamblei. 2008. 2. P. 18–23. [In Russian].
8. Bolotov I.E., Kolosov V.Yu. Investigation of Crystals Based on Bend-Contour Arrangement. 1 Relationship between Bend-Contour Arrangement and Bend Geometry // Phys. Stat. Sol(a). 1982. 69. № 1. P. 85–96.
9. Malkov V.B. Malkov A.V., Pushin V.G., Strekalovskiy V.N., Malkov O.V. Sposob diagnostiki effekta izmeneniya znaka vektora razoriyentirovki vdol' mezhblochnykh granits v nanotonkikh kristallakh [A method for diagnosing the effect of a change in the sign of the misorientation vector along the interblock boundaries in nano-thin crystals]. The patent of the Russian Federation № 2534719 dated 20.07.2012. [In Russian].
10. Likhachev V.A. Kooperativnaya plastichnost', obuslovlennaya dvizheniyem granits razoriyentatsii i granits razdela faz [Cooperative plasticity due to the movement of the disorientation boundaries and phase boundaries] // Izv. Vuzov. 1982. № 6. P. 83–102. [In Russian].
11. Novikov I.I. Defekty kristallicheskogo stroeniya v metallakh [Defects of a crystal structure in metals]. M.: Metallurgiya. 1983. [In Russian].