

МИКРОМОРФОЛОГИЯ И ФРАКТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РОСТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРИСТАЛЛОВ ПАРАТЕЛЛУРИТА

С.В. Молчанов, С.А. Третьяков, И.А. Каплунов, А.М. Иванов, В.С. Степанов,
В.П. Цветков, И.В. Цветков, С.А. Михеев

*ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»,
170100, Россия, Тверь, ул. Желябова, 33
kaplunov.ia@tversu.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.787

Аннотация: Исследовалось влияние условий роста монокристаллов парателлурита на боковую поверхность выращенных буль, а также возможность оценки качества кристаллов, исходя из значений и динамики параметров шероховатости и фрактальных параметров ювенильных поверхностей. При близких технологических условиях были выращены два кристалла, отличающиеся между собой структурным качеством. Их боковые поверхности были исследованы с помощью оптического интерференционного профилометра NanoMap 1000WLI и программного обеспечения SPIP и Gwyddion, в результате чего получены профили, значения параметров шероховатости и фрактальные параметры поверхностей кристаллов вдоль направления роста. В результате были сделаны выводы, что при условиях, соответствующих формированию устойчивых потоков в расплаве шероховатость поверхности на всем протяжении кристалла менее 5 мкм, а параметр фрактальной энергии может быть использован как маркер качества и однородности кристаллов.

Ключевые слова: монокристаллы парателлурита, ювенильная поверхность, параметры шероховатости, фрактальные параметры.

1. Введение

Монокристаллы парателлурита, широко применяемые в современной акустооптике, выращиваются методом Чохральского из расплава [1-5]. Структурное качество выращиваемых кристаллов во многом зависит от условий роста, влияющих на гидродинамику процесса. Не смотря на то, что регулируемые параметрами являются такие простые характеристика как скорость вытягивания и вращения кристалла, а также регулировка температуры, её снижение с целью отведение скрытой теплоты плавления в процессе кристаллизации, сам процесс роста происходит в сложной системе гидродинамического равновесия, характеризующейся условиями равенства вынужденной и естественной конвекций при вращении растущего кристалла, нижней его части, фронта кристаллизации, в расплаве [6]. На необработанных боковых поверхностях цилиндрических буль парателлурита, так же как и на других кристаллах, практически всегда имеются периодические или квазипериодические неровности профиля – выступы, чередующиеся с впадинами, а так же присутствуют неровности, не имеющие структурированности [7]. Данные профили отражают изменения кинетики кристаллизации, происходящие в процессе роста. Таким образом, исследования микроморфологии ростовой поверхности могут позволить произвести оценку влияния условий роста на

механические напряжения и дефекты структуры приповерхностного слоя.

Для описания гидродинамики в процессе роста используются известные критерии гидродинамического подобия [6, 8, 9]. Главным условием для выращивания качественных монокристаллов является наличие ламинарных течений, холодных и горячих потоков в расплаве, и отсутствие турбулентных. Потоки, сформированные естественной конвекцией являются вертикальными и замкнутыми, обусловлены температурным градиентом в расплаве и характеризуются критерием Грасгофа:

$$Gr = g\beta\Delta TH^{3/2}(D-d)^{3/2}/\nu^2, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, β – коэффициент объемного расширения расплава, ΔT – разность температур на дне тигля и на поверхности расплава, H – глубина расплава в тигле, D – диаметр тигля, d – диаметр кристалла, ν – кинематическая вязкость расплава. Потоки сформированные вынужденной конвекцией возникают вследствие вращения выращиваемого кристалла и направлены от центра тигля к его краям, характеризуются критерием Рейнольдса (2):

$$Re = \frac{\omega \cdot r^2}{\nu} \frac{H}{2(R-r)} \frac{\ln(1+2r/H)}{\ln[1+r/(R-r)]}, \quad (2)$$

где ω – скорость вращения кристалла, r и R – радиусы кристалла и тигля соответственно. Перемешивание данных потоков создает турбулентные течения в расплаве, а ламинарными они становятся при условии равенства влияния вынужденной и естественной конвекций на общую гидродинамику, математически данное условие описывается как [6]:

$$Gr = (Re)^2. \quad (3)$$

Практически данное условие наблюдается в виде вихрей Тейлора (см. рис. 1), устойчивые потоки в количестве 2-4 штук, вращающиеся вокруг кристалла с некой периодичностью, зависит от размеров кристалла и тигля, а также геометрических особенностей теплового узла.

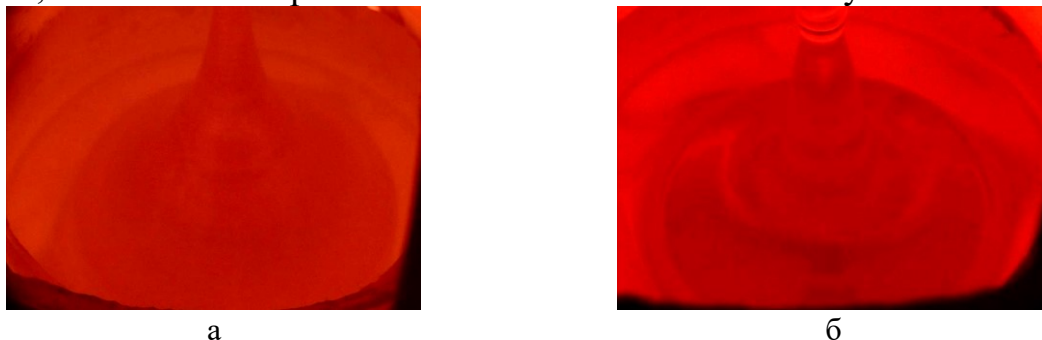


Рис. 1. Вихри Тейлора на поверхности расплава в количестве – два (а), три (б).

Вследствие вращения кристалла и потоков вокруг него и образуется структура на боковой поверхности кристалла в процессе роста,

морфология которой зависит от устойчивости потоков.

2. Образцы для исследований

Для исследований были выращены два монокристалла парателлурита в направлении [110] при близких технологических условиях (см. рис. 2).



Рис. 2. Монокристаллы парателлурита: а – № 1, б – № 2.

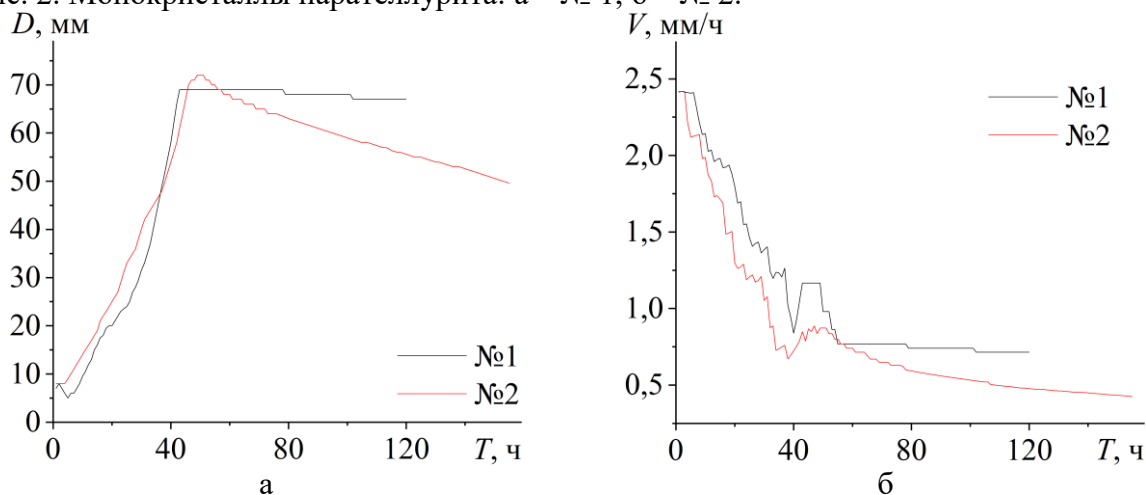


Рис. 3. Зависимости диаметра кристаллов D (а) и скорости роста V (б) от времени в течении процессов выращивания.

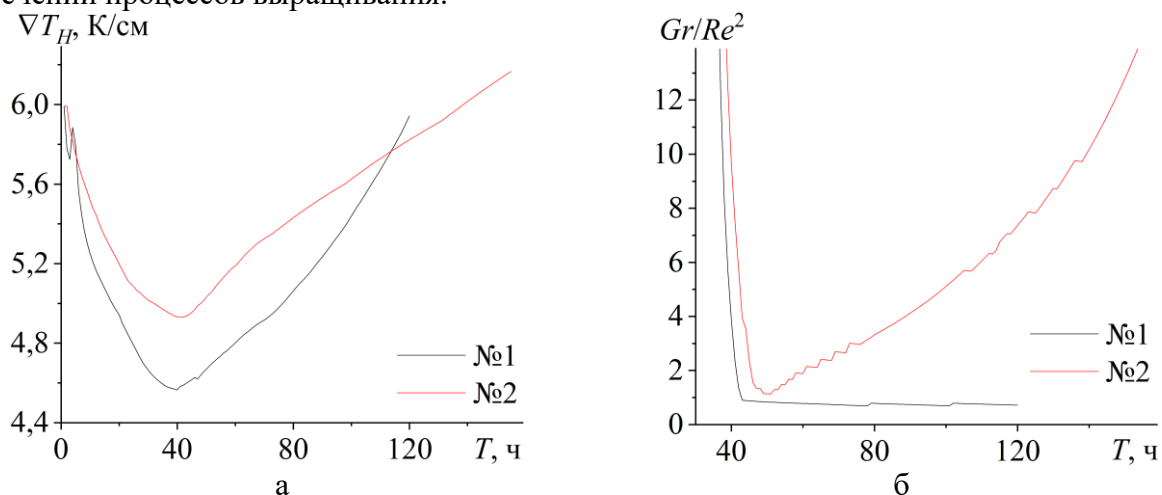


Рис. 4. Зависимости осевого температурного градиента в расплаве ∇T_H (а) и соотношения критериев подобия $Gr/(Re)^2$ (б) от времени в процессе выращивания.

Кристалл № 1 – 1425 г, 50 мм высота в «цилиндрической» части;

кристалл № 2 – 1450 г, 51 мм высота в «цилиндрической» части. Однако качественная оценка показала, что кристалл № 1 имеет повышенное оптическое рассеяние на дефектах структуры (дислокациях и дислокационных дефектах) и в нем присутствуют свили средних размеров (5-10 мм) в краевых зонах, вблизи боковой поверхности. У кристалла № 2 наблюдается пониженное оптическое рассеяние, отсутствуют свили средних размеров; в малом количестве обнаружены мелкие свили (до 5 мм). Из этого следует что кристалл №2 наиболее пригодным для изготовления элементов акустооптических устройств. Данное отличие по качеству обусловлено отклонениями в диаметре «цилиндрической» части в процессе вытягивания кристалла (см. рис. 3 а), что приводит к разным скоростям роста (см. рис. 3 б), так как данная скорость зависит не только от скорости поднятия штока, но и от скорости падения уровня расплава. Чем больше диаметр, тем больше скорость роста, при одинаковых параметрах, установленных на оборудовании, применяемом на ростовых установках. Всё это привело к различным температурным условиям (см. рис. 4 а) и динамике гидродинамических критериев (см. рис. 4 б) в расплаве. Если представить уравнение (3) в виде отношения числа Грасгофа к числу Рейнольдса в квадрате и сравнивать его с 1, то по полученным расчетам можно увидеть, что кристалл № 1 пересек границу равновесия естественной и вынужденной конвекций, в то время как кристалл № 2 на протяжении всего процесса рос в условиях превалирования естественной конвекции расплава.

С данных кристаллов были срезаны боковые поверхности различной кристаллографической ориентации для дальнейших профилометрических исследований (см. рис. 5).

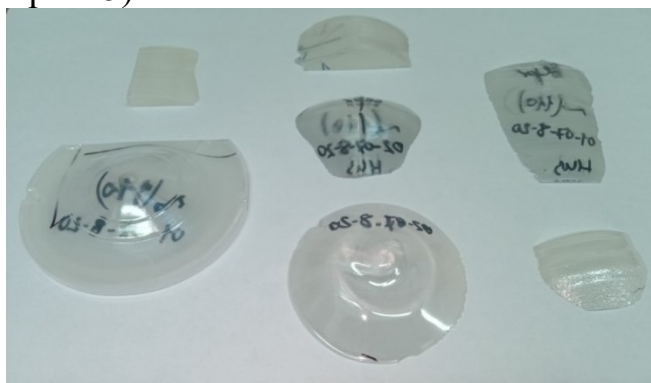


Рис. 5. Образцы боковых поверхностей монокристаллов парателлурифта.

3. Профилометрические исследования ростовых поверхностей

Для исследований рельефа использовался оптический профилометр NanoMap WLI1000 со специализированным программным обеспечением SPIP [10]. С помощью данного прибора были получены 3D и 2D профили ростовых поверхностей вдоль направления роста (см. рис. 6-7). Визуально

для кристалла №1 наблюдается неоднородность в профиле, на поверхности присутствует как гладкие участки, так и неравномерные по высоте периодические структуры. В то же время, для кристалла №2 структура поверхности выглядит наиболее упорядоченной с явной периодичностью на протяжении всего процесса.

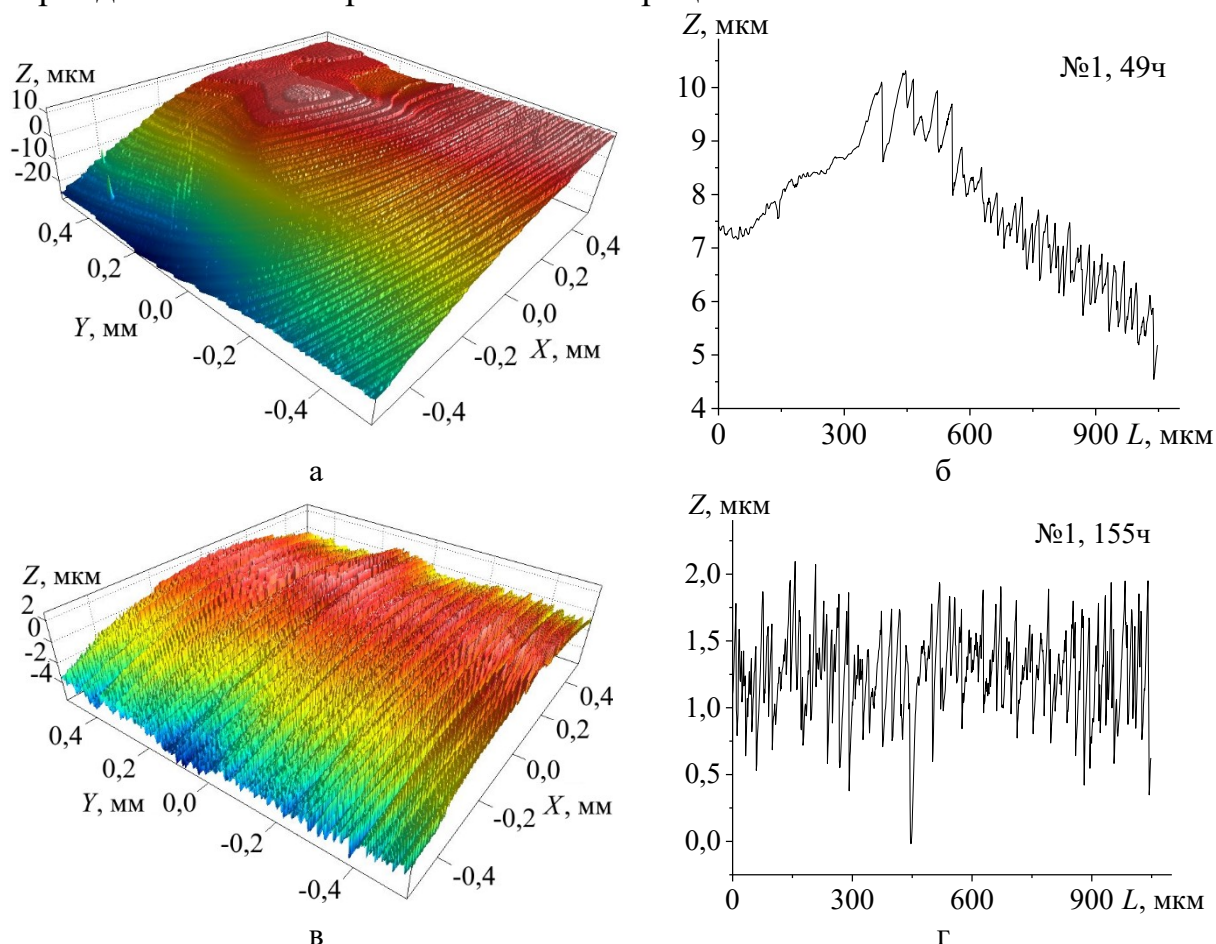


Рис. 6. Кристалл №1. 3D профиль (а) и 2D профиль по направлению роста (б), соответствующие временной отметке процесса 49 часов и 3D профиль (в) и 2D профиль по направлению роста (г), соответствующие временной отметке процесса 115 часов.

Для численного сравнения профилей образцов были проведены Фурье-анализ и рассчитаны параметры шероховатости в точках, соответствующих временным отметкам роста (см. рис. 8). Фурье-анализ показал, что для образца №1 присутствует 3-4 фактора, влияющих на формирование поверхности, что, в свою очередь, свидетельствует о нестабильности потоков в расплаве вокруг кристалла. Для кристалла №2 Фурье-анализ показывает наличие малых периодичностей с небольшой интенсивностью, самый первый пик, соответствующий частоте – $1 \cdot 10^{-5} \text{ нм}^{-1}$, является артефактом и соизмерим с линейными размерами 2D профиля. Таким образом, не смотря на то, что в процессе №2 присутствовала нестабильность потоков, её вклад был меньше чем в процессе №1.

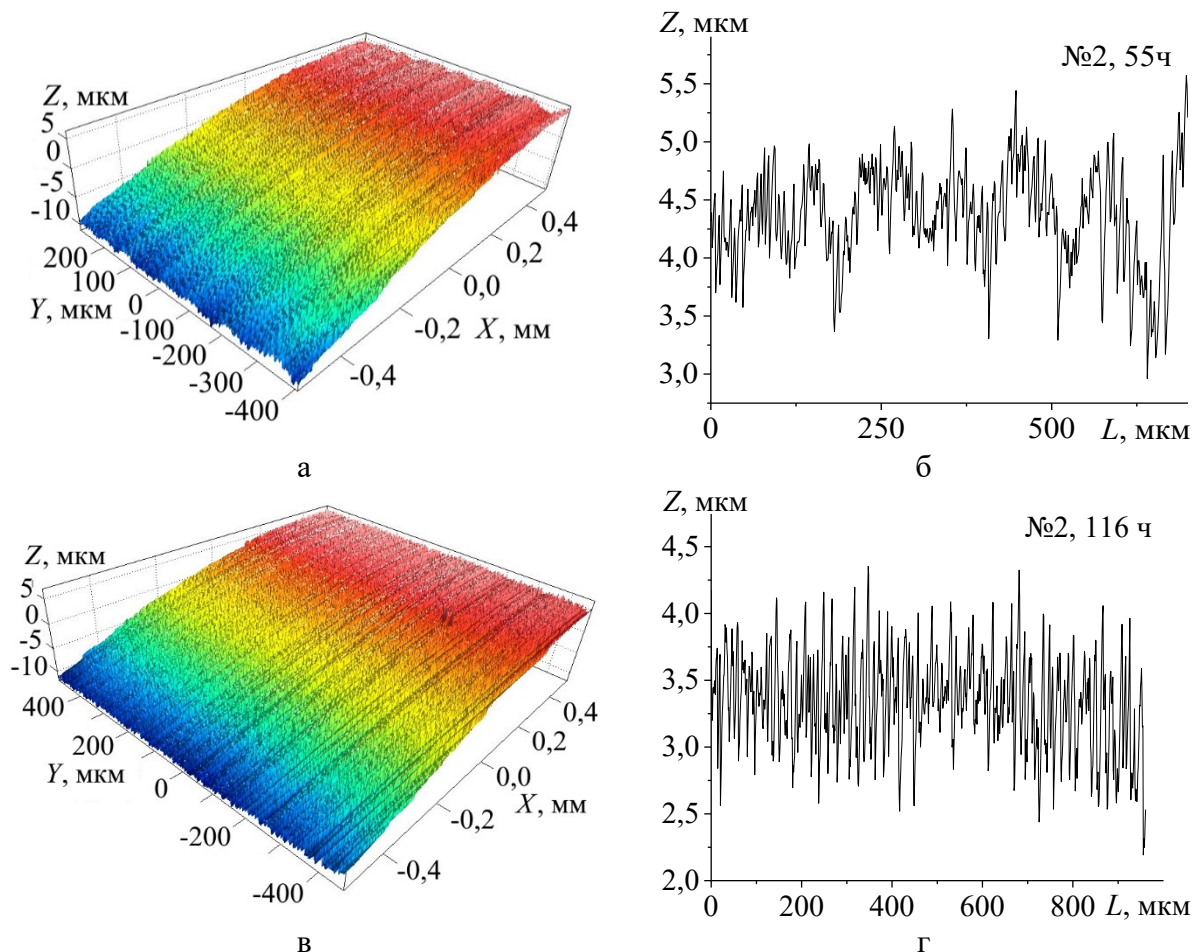


Рис. 7. Кристалл № 2. 3D профиль (а) и 2D профиль по направлению роста (б), соответствующие временной отметке процесса 55 часов и 3D профиль (в) и 2D профиль по направлению роста (г), соответствующие временной отметке процесса 116 часов.

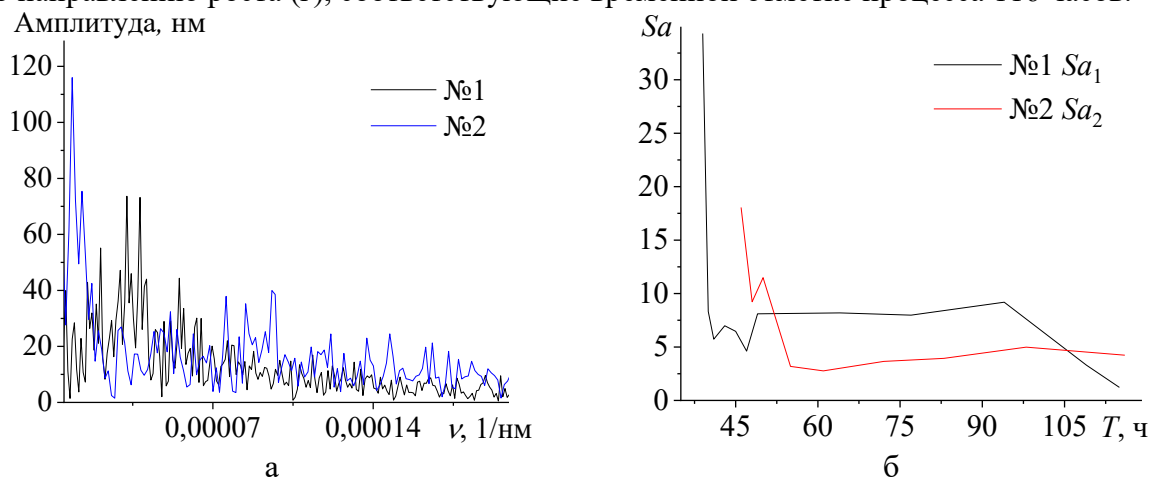


Рис. 8. Фурье анализ поверхности кристалла, взятый по 2D профилю в направлении роста в момент после выхода на максимальный диаметр (а) и параметр шероховатости Sa , рассчитанный для поверхностей согласно временным отметкам (б).

Данный факт так же подтверждается равномерностью значений параметров шероховатости поверхности и тем что Sa_2 больше Sa_1 на протяжении почти всей поверхности вдоль направления выращивания.

4. Фрактальные параметры поверхностей

Так же были проведены расчеты фрактальной размерности поверхностей кристаллов по 3D профилям вдоль направления роста (см. рис. 9). Анализ рис. 8 б и данной фрактальной зависимости (временной ход кривых) отражает в явном виде связь экспериментально измеренного параметра шероховатости и рассчитанного значения D . Кристалл № 2 более высокого оптического качества в основной цилиндрической части слитка (время роста более 55 часов) характеризуется более высокими значениями фрактальной размерности (см. рис. 9) и меньшими значениями параметра шероховатости (см. рис. 8 б). Объяснением данной зависимости может служить тот факт, что кристалл № 2 рос при более стабильных гидродинамических условиях и на рельефе боковой поверхности в меньшей степени проявилось влияние турбулентных потоков.

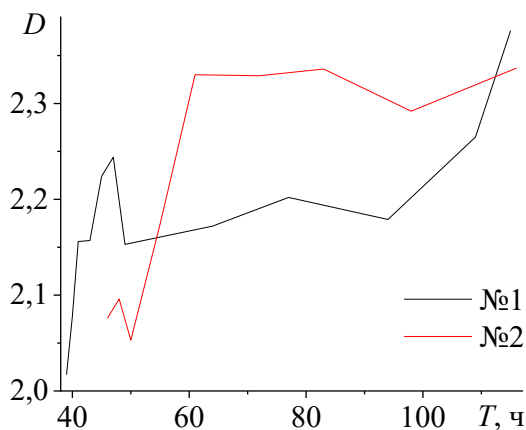


Рис. 9. Зависимость фрактальной размерности поверхностей D вдоль направления роста от времени процесса T .

Степень относительного уклонения δ боковой поверхности кристаллов от фрактала может быть оценена по формуле:

$$\delta = \frac{1}{10} \sum_{k=0}^9 \frac{|\log N_k - \log \Gamma + D \cdot \log h_k|}{\log N_k}, \quad (4)$$

где D – фрактальная размерность фрактального множества, Γ – его D -мерный (фрактальный) объем, N – число кубиков размерами сторон h , которыми можно покрыть исследуемую поверхность.

Результаты измерений при помощи программы Gwyddion [11] и разработанного авторами комплекса программ [12-14] показали, что значение δ для первого кристалла в среднем 0,032, а для второго кристалла 0,023. Выполненные нами оценки показывают высокую степень близости структуры боковой поверхности исследуемых кристаллов парателлурифта к фрактальным поверхностям.

Анализ динамики фрактальной структуры боковой поверхности кристаллов можно провести на основе модели фрактальной

термодинамики [15], это направление изучения фрактальных систем, являющееся примером более общей концепции применения методов тропической математики к проблемам термодинамики различных динамических систем, предложенной и развиваемой В.П. Масловым [16].

Для анализа структуры боковой поверхности парателлурита можно использовать фрактальную энтропию S_f по аналогии со статистической физикой и фрактальную температуру T_f , являющуюся функцией фрактальной размерности D [17]

$$S_f = \ln \Gamma, T_f = a \cdot \left(\frac{1}{n-D} - \frac{1}{n} \right). \quad (5)$$

Из (5) следует, что при $D = 0$ значение $T_f = 0$. В нашем случае $n = 3$, поскольку поверхность кристалла вкладывается в трехмерное пространство. Параметры S_f и T_f представляют собой фрактальные параметры состояния.

Поскольку фрактальные параметры Γ и D связаны между собой, то между фрактальной энтропией S_f , и фрактальной температурой T_f должна быть функциональная зависимость отражающая структуру динамической системы, описываемой данным фракталом. Характер этой зависимости и определяет фрактальное уравнение состояния (ФУС). В связи с тем, что $S_f = 0$ при $T_f = 0$, то конкретный вид ФУС можно выбрать в виде [12]:

$$S_f = A \cdot T_f^\gamma. \quad (6)$$

Величина показателя степени γ определяется как индекс ФУС.

Наряду с фрактальными энтропией и температурой можно использовать фрактальный параметр состояния E_f – фрактальную энергию на основе соотношения [12]:

$$dE_f = T_f dS_f. \quad (7)$$

Подставляя (6) в (7) и интегрируя полученное выражение имеем [12]:

$$E_f = \frac{\gamma}{1+\gamma} T_f \cdot S_f = \frac{\gamma}{1+\gamma} A T_f^{1+\gamma}. \quad (8)$$

Коэффициент a в формуле (5) нами взят равным 207 [12] из соображений приведения в соответствие фрактальной и абсолютной шкал температур. Используя полученные данные и формулу (5), получена зависимость фрактальных термодинамических параметров T_f и S_f из которой следует, что индексы ФУС для первого и второго кристаллов γ равны соответственно 0,1875 и 0,1575. Предстепенные коэффициенты A при этом отличаются от их среднего значения для первого кристалла 14,0228 не более чем на 0,025431, а для второго, со средним значением $A = 16,47086$, не более чем на 0,053637. Проведенные нами оценки параметров ФУС A и

γ показали, что степенной характер зависимости фрактальных параметров состояния боковой поверхности кристалла парателлурита S_f и T_f выполняется с точностью порядка 10^{-3} . Все это дает основание для успешного применения фрактальной термодинамики при анализе структуры боковых поверхностей кристаллов.

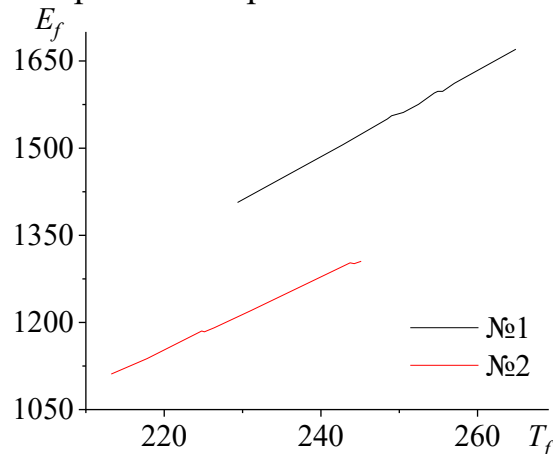


Рис. 10. $E_f T_f$ диаграмма кристаллов парателлурита № 1 и № 2.

Фрактальная энергия E_f боковой поверхности S кристаллов парателлурита является носителем уникальной информации о структуре кристаллов. Используя формулу (8) вычислены значения параметра E_f для различных значений T_f . Диаграмма $E_f T_f$, отражающая функциональную зависимость этих параметров, представлена на рис. 10, т.е. уравнения ФУС для кристаллов № 1, 2 парателлурита на этапах роста их цилиндрических частей. При этом кривая первого кристалла располагается на $E_f T_f$ – диаграмме существенно выше кривой для второго кристалла. Это отвечает более совершенной структуре кристалла № 2, что характеризуется низким оптическим рассеянием излучения и отсутствием существенных оптических аномалий. При этом средние значения \bar{E}_f соответственно равны для первого кристалла 1560,27 и 1214,56 для второго кристалла.

5. Заключение

Выращивание монокристаллов в условиях удержания равенства влияний вынужденной и естественной конвекций в расплаве с формированием соответствующих ламинарных потоков приводит к возникновению колебательных процессов при движении расплава и отрицательно сказывается на структурном качестве материала, так как слои монокристалла растут при превалировании разных типов конвекций. Влияние неустойчивости гидродинамических потоков в расплаве выражается в виде неоднородности профиля по значениям параметров шероховатости и фрактальной размерности боковой ростовой поверхности

монокристалла. Стабильные гидродинамические потоки при выращивании кристалла обуславливают низкие значения параметров шероховатости и высокое структурное качество материала.

Фрактальные параметры, относящиеся в том числе к фрактальной термодинамике [12], могут быть использованы для оценки качества кристаллов в методах неразрушающего контроля при разработке соответствующего математического и аналитического аппарата.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006) с использованием ресурсов ЦКП Тверского государственного университета.

Библиографический список:

1. **Veber, P.** TeO₂ liquid phase: Viscosity measurements and evaluation of the thermal conductivity from crystal growth experiments / P. Veber, J. Mangin // *Materials Research Bulletin*. – 2008. – V. 43. – I. 11. – P. 3066-3073. DOI: 10.1016/j.materresbull.2007.11.018.
2. **Arnaboldi, C.** Production of high purity TeO₂ single crystals for the study of neutrinoless double beta decay / C. Arnaboldi, C. Brofferio, A. Bryant et al. // *Journal of Crystal Growth*. – 2010. – V. 312. – I. 20. – P. 2999-3008. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2010.06.034.
3. **Kokh, A.E.** Growth of TeO₂ single crystals by the low temperature gradient Czochralski method with nonuniform heating / A.E. Kokh, V.S. Shevchenko, V.A. Vlezko, K.A. Kokh // *Journal of Crystal Growth*. – 2013. – V. 384. – P. 1-4. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2013.08.027.
4. **Kaplunov, I.A.** Indices of faces developing on Czochralski-grown paratellurite crystals / A.I. Kolesnikov, I.A. Kaplunov, E.I. Sokolova et al. // *Crystallography Reports*. – 2019. – V. 64. – I. 1. – P. 168-173. DOI: 10.1134/S1063774519010115.
5. **Lukasiewicz, T.** Czochralski growth of TeO₂ single crystals under conditions of forced convection in the melt / T. Lukasiewicz, A. Majchrowski // *Journal of Crystal Growth*. – 1992. – V. 116. – I. 3-4. – P. 364-368. DOI: 10.1016/0022-0248(92)90645-Y.
6. **Колесников, А.И.** Влияние условий роста на распределение дефектов в чистых и легированных монокристаллах парателлурифта: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 02.00.04 защищена 30.01.97: утв. 24.06.02 / Колесников Александр Игоревич. – Тверь: ТвГУ, 1996. – 231 с.
7. **Каплунов, И.А.** Микроморфология поверхности монокристаллических слитков германия, выращенных из расплава / И.А. Каплунов, А.И. Колесников, А.И. Иванова и др. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2015. – № 6. – С. 89-94. DOI: 10.7868/S0207352815060128.
8. **Простомологов, А.И.** Разработка и применение методов моделирования в технологиях выращивания монокристаллов из расплава: дис. ... д-ра тех. наук: 05.27.06 защищена 21.10.2004: утв. 24.06.02 Простомологов Анатолий Иванович. – Москва: Институт механики РАН, 2004. – 362 с.
9. **Винокуров, В.В.** Численное моделирование гидродинамики расплава и теплообмена в методе Чохральского: дис. ... канд. ф.-м. наук: 01.02.05 защищена 12.12.12: утв. 24.06.02 / Винокуров Владислав Викторович. – Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2012. – 252 с.
10. SPIP User's Guide. – Режим доступа: [www.url: http://www.imagemet.com/WebHelp6/Default.htm](http://www.imagemet.com/WebHelp6/Default.htm). – 22.08.2023.
11. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. – Режим доступа: [www.url: http://gwyddion.net](http://gwyddion.net). – 22.08.2023.
12. **Paramonova, E.K.** Fractal thermodynamics of the states of instantaneous heart rhythm / E.K. Paramonova, S.A. Mikheev, V.P. Tsvetkov, I.V. Tsvetkov // *Russian Journal of Mathematical Physics*. – 2021. – V. 28. – I. 2. – P. 251-256. DOI: 10.1134/S1061920821020096.
13. **Мейсурова, А.Ф.** Анализ фрактальных параметров листьев сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria*) в рекреационных зонах города Твери методами мультифрактальной термодинамики / А.Ф. Мейсурова, В.П. Цветков, И.В. Цветков, А.А. Нотов // *Вестник ТвГУ. Серия Биология и экология*. – 2022. – № 1(65). – С. 180-193. DOI: 10.26456/vtbio245.
14. **Paramonova, E.K.** Fractal thermodynamics, big data and its 3D visualization / E.K. Paramonova, A.N. Kudinov, S.A. Mikheev et al. // *Proceedings of the 9th International Conference «Distributed Computing*

and Grid Technologies in Science and Education» (GRID'2021), Dubna, 5-9 July 2021. – Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 2021. – P. 38-42.

15. Tél, T. Fractals, multifractals, and thermodynamics an introductory review / T. Tél, // *Zeitschrift für Naturforschung A*. – 1988. – V. 43. – № 12. – P. 1154-1174 DOI: 10.1515/zna-1988-1221.

16. Маслов, В.П. Двухфлюидная картина надкритических явлений / В.П. Маслов // *Теоретическая и математическая физика*. – 2014. – Т. 180. – № 3. – С. 394-432. DOI: 10.4213/tmf8658.

17. Tsvetkov, V.P. Modeling the multifractal dynamics of COVID-19 pandemic / V.P. Tsvetkov, S.A. Mikheev, I.V. Tsvetkov et al. // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2022. – V. 161. – Art. № 112301. – 9 p. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112301.

References:

1. Veber P., Mangin J. TeO₂ liquid phase: Viscosity measurements and evaluation of the thermal conductivity from crystal growth experiments, *Materials Research Bulletin*, 2008, vol. 43, issue 11, pp. 3066-3073. DOI: 10.1016/j.materresbull.2007.11.018.

2. Arnaboldi C., Brofferio C., Bryant A. et al. Production of high purity TeO₂ single crystals for the study of neutrinoless double beta decay, *Journal of Crystal Growth*, 2010, vol. 312, issue 20, pp. 2999-3008. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2010.06.034.

3. Kokh A.E., Shevchenko V.S., Vlezko V.A., Kokh K.A. Growth of TeO₂ single crystals by the low temperature gradient Czochralski method with nonuniform heating, *Journal of Crystal Growth*, 2013, vol. 384, pp. 1-4. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2013.08.027.

4. Kolesnikov A.I., Kaplunov I.A., Sokolova E.I. et al. Indices of faces developing on Czochralski-grown paratellurite crystals, *Crystallography Reports*, 2019, vol. 64, issue 1, pp. 168-173. DOI: 10.1134/S1063774519010115.

5. Lukaszewicz T., Majchrowski A. Czochralski growth of TeO₂ single crystals under conditions of forced convection in the melt, *Journal of Crystal Growth*, 1992, vol. 116, issue 3-4, pp. 364-368. DOI: 10.1016/0022-0248(92)90645-Y.

6. Kolesnikov A.I. *Vliyaniye usloviy rosta na raspredeleniye defektov v chistykh i legirovannykh monokristallakh paratellurita* [Influence of growth conditions on the distribution of defects in pure and doped paratellurite single crystals], Cand. phys.-math. sci. diss.: 02.00.04, Tver, TSU Publ., 1996, 231 p. (In Russian).

7. Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Ivanova A.I. et al. Surface micromorphology of germanium single crystal boules grown from melt, *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2015, vol. 9, issue 3. pp. 630-635. DOI: 10.1134/S102745101503026X.

8. Prostomolotov A.I. *Razrabotka i primeneniye metodov modelirovaniya v tekhnologiyakh vyrashchivaniya monokristallov iz rasplava* [Development and application of modeling methods in technologies for growing single crystals from a melt], Dr. phys.-math. sci. diss.: 05.27.06, Moscow, Institute of Mechanics RAS, 2004, 362 p. (In Russian).

9. Vinokurov V.V. *Chislennoye modelirovaniye gidrodinamiki rasplava i teploobmena v metode Chokhralskogo* [Numerical modeling of melt hydrodynamics and heat transfer using the Czochralski method], Cand. phys.-math. sci. diss.: 12.12.12, Novosibirsk, Institute of Thermophysics named after. S.S. Kutateladze SB RAS, 2012, 252 p. (In Russian).

10. SPM User's Guide. Available at: [www.url: http://www.imagemet.com/WebHelp6/Default.htm](http://www.imagemet.com/WebHelp6/Default.htm). (accessed 22.08.2023).

11. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. Available at: [www.url: http://gwyddion.net](http://gwyddion.net). (accessed 22.08.2023).

12. Paramonova E.K., Mikheev S.A., Tsvetkov V.P., Tsvetkov I.V. Fractal thermodynamics of the states of instantaneous heart rhythm, *Russian Journal of Mathematical Physics*, 2021, vol. 28, issue 2, pp. 251-256. DOI: 10.1134/S1061920821020096.

13. Meysurova A.F., Tsvetkov V.P., Tsvetkov I.V., Notov A.A. Analiz fraktal'nykh parametrov list'yev snyti obyknovennoy (Aegopodium podagraria) v rekreatsionnykh zonakh goroda Tveri metodami mul'tifraktal'noy termodinamiki [Analysis of fractal parameters of the leaves of the common honey (Aegopodium podagraria) in recreational areas of the city of Tver using multifractal thermodynamics methods], *Vestnik TvGU. Seriya Biologiya i ekologiya [Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology]*, 2022, no. 1(65), pp. 180-193. DOI: 10.26456/vtbio245 (In Russian).

14. Paramonova E.K., Kudinov A.N., Mikheev S.A. et al. Fractal thermodynamics, big data and its 3D visualization, *Proceedings of the 9th International Conference «Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education» (GRID'2021)*, Dubna, Russia, July 5-9, 2021, Dubna, Joint Institute for Nuclear Research, 2021, pp. 38-42.

15. Tél T. Fractals, multifractals, and thermodynamics an introductory review, *Zeitschrift für Naturforschung A*, 1988, vol. 43, no. 12, pp. 1154-1174 DOI: 10.1515/zna-1988-1221.
16. Maslov V.P. Two-fluid picture of supercritical phenomena, *Theoretical and Mathematical Physics*, 2014, vol. 180, issue 3, pp. 1096-1129. DOI: 10.1007/s11232-014-0202-x.
17. Tsvetkov V.P., Mikheev S.A., Tsvetkov I.V. et al. Modeling the multifractal dynamics of COVID-19 pandemic, *Chaos, Solitons & Fractals*, 2022, vol. 161, art. no. 112301, 9 p. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112301.

Original paper

**MICROMORPHOLOGY AND FRACTAL PARAMETERS OF GROWTH SURFACES OF
SINGLE CRYSTALS OF PARATELLURITE**

S.V. Molchanov, S.A. Tretyakov, I.A. Kaplunov, A.M. Ivanov, V.S. Stepanov, V.P. Tsvetkov,
I.V. Tsvetkov, S.A. Mikheev
Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.787

Abstract: This paper presents studies of the influence of growth conditions of paratellurite single crystals on the side surface of grown boules and the possibility of assessing the quality of crystals based on the values and dynamics of the roughness parameters and fractal parameters of juvenile surfaces. Two single crystals were grown under similar technological conditions and differing from each other in structural quality. Their lateral surfaces were studied using the optical interference profilometer NanoMap 1000WLI employing SPIP and Gwyddion softwares. As a result, roughness parameters of profiles, and fractal parameters of crystal surfaces along the growth direction were obtained. It was concluded that under conditions corresponding to the formation of stable flows in the melt, the values of the surface roughness over the entire length of the crystal is less than 5 μm , and the fractal energy parameter can be used as a marker of the quality and homogeneity of crystals.

Keywords: *paratellurite single crystals, untreated crystal surface, roughness parameters, fractal parameters.*

Молчанов Сергей Вячеславович – младший научный сотрудник Управления научных исследований ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет»

Третьяков Сергей Андреевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет»

Кaplунoв Иван Александрoвич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет»

Иванoв Алексей Михайлович – ведущий программист кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет»

Степанoв Валерий Сергеевич – младший научный сотрудник Управления научных исследований ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет»

Цветков Виктор Павлович – д.ф.-м.н., заведующий кафедрой общей математики и математической физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет»

Цветков Илья Викторович – д.т.н., профессор кафедры экономики предприятия и менеджмента, ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет»

Михеев Сергей Александрович – к.ф.-м.н., доцент кафедры общей математики и математической физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет»

Sergey V. Molchanov – Junior Researcher, Management of Scientific Research, Tver State University

Sergey A. Tretyakov – Ph. D., Docent, Applied Physics Department, Tver State University

Ivan A. Kaplunov – Dr. Sc., Professor, Head of the Applied Physics Department, Tver State University

Aleksey M. Ivanov – Lead Programmer, Applied Physics Department, Tver State University

Valeriy S. Stepanov – Junior Researcher, Management of Scientific Research, Tver State University

Victor P. Tsvetkov – Dr. Sc., Head of the Department of General Mathematics and Mathematical Physics, Tver State University

Ilya V. Tsvetkov – Dr. Sc., Professor, Department of Enterprise Economics and Management, Tver State University

Sergey A. Mikheev – Ph. D., Docent, Department of General Mathematics and Mathematical Physics, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 29.08.2023; после рецензирования/revised: 05.10.2023; принята/accepted: 07.10.2023.