

Виртуальная учебная лаборатория «Выращивание монокристаллов»

В.К. Прокофьева, В.М. Трояновский, Чжо Наинг Сое

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

troy40@mail.ru

На примере процесса выращивания монокристалла показано, как применение электронного компонента в самостоятельной работе студентов может повысить уровень изучения сложного физического процесса. В работе сформулированы требования к виртуальной лаборатории, создаваемой на основе описания процесса выращивания монокристалла по методу Чохральского. Обоснована необходимость учета динамических связей при рассмотрении каналов управления. Приведены схема и формульные соотношения, позволяющие с использованием теории случайных процессов отслеживать во времени и количественно оценивать все плавные изменения диаметра растущего кристалла, а также влияние помех. Описаны средства автоматизации разработки программы виртуальной лаборатории и особенности визуализации с использованием элементов мультимедиа и цветовой динамики. Применение среды разработки Excel+VBA, подключение функций API операционной системы Windows, специальной структуры данных, использование моделирования и анимации позволяют увидеть вращение кристалла и тигля, динамику роста кристалла, а также подготовительные процедуры всего процесса. Разработанная программа может использоваться при подготовке студентов к работе в реальной лаборатории.

Ключевые слова: электронный компонент; компетенция; критерии оценивания; монокристалл; виртуальная лаборатория; визуализация; моделирование; динамика

Для цитирования: Прокофьева В.К., Трояновский В.М., Чжо Наинг Сое. Виртуальная учебная лаборатория «Выращивание монокристаллов» // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 4. – С. 420–428. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-420-428

Virtual Training Laboratory «Growing a single crystal»

V.K. Prokofieva, V.M. Troyanovsky, Kyaw Naing Soe

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

troy40@mail.ru

Abstract: Nowadays, the problems of increasing the effectiveness of the students studying the complex microelectronic processes in the light of a competent approach to education, enhancing the role of self-education and distant

learning are urgent. The process and equipment of the single crystal growing by the Czochralski method has been described. The necessity of taking into account the dynamic links in the examination of the control channels has been substantiated. The scheme and formulas, which allow using the theory of random processes for time tracking and quantifying all smooth changes in the diameter of a growing crystal, as well as the interference effect, have been presented. The development tools for virtual laboratory and visualization functions using the multimedia elements and color dynamics have been described. The application of the development environment Excel + VBA, the connection of functions of the Windows operating system API, special data structures, the use of modeling and animation permit to show the crystal and crucible rotation, the crystal growth dynamics, as well as preparatory procedures of the whole process. The developed program can be used in the students' preparation for work in a real laboratory as well as for distant training.

Keywords: electronic component; competence; evaluation criteria; single crystal; virtual laboratory; visualization; modeling; dynamics

For citation: Prokofieva V.K., Troyanovsky V.M., Kyaw Naing Soe. Virtual Training Laboratory «Growing a single crystal». *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 420–428. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-420–428

Введение. Микроэлектроника – сложный научно-производственный комплекс, охватывающий исследование, конструирование, производство и применение микроэлектронных изделий [1]. Подготовка высококвалифицированных специалистов включает в себя изучение материалов (материаловедение), технологических процессов микроэлектроники, оборудования. На сегодняшний день успехи информационных технологий, внедрение компетентностного подхода в образование, повышение роли самообразования позволяют говорить об активной инновационной деятельности высших учебных заведений России [2].

Применение компьютерных технологий обучения, интерактивных мультимедиа, веб-технологий способствовало формированию современных электронных компонентов в образовательном процессе и стиранию граней между обучением на расстоянии и обучением непосредственно в аудитории. Как отмечено в [2], применение электронных технологий обучения в вузе позволяет обогатить содержание учебных дисциплин новыми дидактическими материалами, формирует у студентов навыки целеполагания, самостоятельного мышления, инициативность и ответственность за выполняемую работу, повышает привлекательность изучаемого материала. Определяющую роль в решении этих проблем играет учебно-методическое обеспечение или электронные образовательные ресурсы, среди которых особое место занимают компьютерные тренажеры и виртуальные лаборатории, основанные на математических моделях изучаемых процессов. Следует отметить, что «методические аспекты электронного обучения отстают от развития технических средств» [2] и «компетентностный подход предполагает ориентацию на практическую составляющую обучения, главенствующее место в нем отводят практике и самостоятельной работе. Учебно-познавательная деятельность организуется посредством моделирования реальных ситуаций, где предоставляется возможность выбора траектории освоения нового знания» [3].

В НИУ «МИЭТ» в августе 2017 г. на основании приказа ректора создан Институт перспективных материалов и технологий, важнейшая миссия которого – развитие инновационной деятельности в области материалов и технологий функциональной элек-

троники, производственной безопасности и технологической экологии микроэлектроники. Один из базовых процессов микроэлектронного производства – выращивание монокристаллов. На примере этого процесса прослеживается, как применение электронного компонента способствует повышению уровня изучения одного из трудоемких процессов микроэлектроники.

Виртуальная лаборатория «Выращивание монокристаллов». Один из распространенных методов получения слитков сверхчистого полупроводника – выращивание монокристаллов из расплава по способу Чохральского [5–7]. Основная идея метода следующая: небольшую монокристаллическую затравку вводят неглубоко в расплав и затем медленно вытягивают из расплава. В процессе выращивания монокристалла растущий кристалл и тигель с расплавом вращают в противоположных направлениях. Установки и правила проведения лабораторной работы по выращиванию монокристалла по методу Чохральского в условиях специализированной лаборатории МИЭТ описаны в [4]. Именно их необходимо представить при создании виртуальной лаборатории.

Как свидетельствует анализ литературы, моделирование процесса выращивания монокристаллов из расплава является нелинейной задачей, сопряженной со многими внешними (контролируемыми и неконтролируемыми) факторами. В частности, в [7–9] рассмотрены основные процессы выращивания кристаллов из расплава и построения моделей управления формой, температурой и скоростью вытягивания кристаллов из расплава. В [5] приведена схема, отражающая процессы, наблюдаемые при росте кристаллов, во взаимосвязи с их физическим и математическим описаниями.

Таким образом, в виртуальную лабораторию, создаваемую в соответствии с концепцией производства, основанной на знаниях [10] и методике [11], необходимо ввести определенные программы моделирования процессов и предоставить интерактивные средства управления процессом роста монокристалла.

Вспомогательный (справочный) режим работы виртуальной лаборатории должен предоставлять пользователям доступ к расширенному текстовому описанию установки и процесса.

Прежде всего, целесообразно обеспечить визуализацию и демонстрацию основных этапов процесса – вытягивание и вращение (рис. 1).

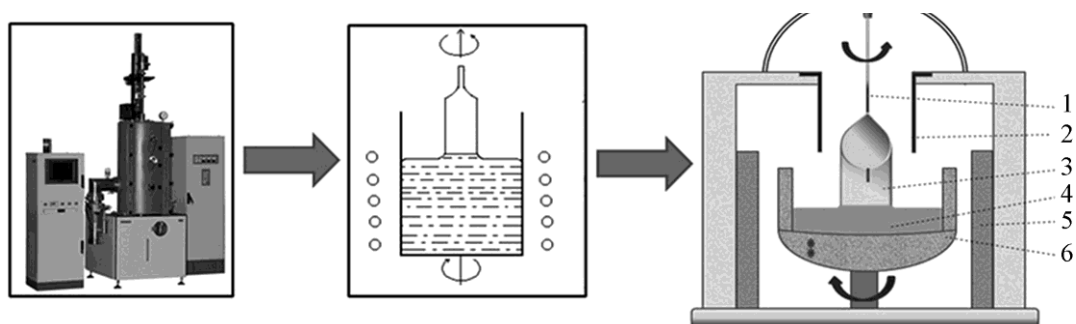


Рис. 1. От реальной установки к схеме процесса и к визуализации: 1 – затравка; 2 – теплозащита; 3 – растущий кристалл; 4 – расплав; 5 – нагреватель; 6 – тигель

Fig. 1. From the real installation to the process diagram and to the visualization: 1 – priming; 2 – heat protection; 3 – growing crystal; 4 – melt; 5 – heater; 6 – crucible

Существующие методы современных программных сред позволяют легко воспроизвести на экране вид таких элементов установки, как тигель, нагреватель, расплав, растущий кристалл, теплозащита, затравка и др. Несложно программным путем реализовать иллюзию вращения кристалла и тигля, а также рост кристалла, если его диаметр

не изменяется. Последовательность команд управлением оборудованием, таких как закрепить затравку, загрузить тигель, закрыть вакуумную камеру, подать напряжение на нагреватель, ввести в расплав затравку, выдержать затравку в расплаве в течение 5 мин, включить вращение затравки и тигля, начать подъем затравки и другие, реализуется в режиме контроллерного управления [11].

Однако в задании к реальной лабораторной работе, кроме этого, требуется [4] проследить за изменением формы и размера растущего кристалла в зависимости от скорости вытягивания, температуры расплава, скорости вращения затравки (верхний шток), скорости вращения тигля. И здесь уже не обойтись без теории управления.

Проблемы моделирования процессов роста монокристалла и управления процессом. Обобщающая схема процессов роста монокристалла по версии [5] содержит двенадцать разнородных категорий. При описании модели управления температурой в ходе выращивания кристаллов в [8] используются четырнадцать параметров; в формуле для описания зависимости диаметра кристалла d от скорости вытягивания V и температуры расплава T – шесть параметров, причем два из них – инварианты, содержащие от трех до пяти параметров.

Для получения выражения, лежащего в основе программы управления требуемыми технологическими параметрами, в [7, 8] используется линейная аппроксимация зависимостей «на узловых точках выращивания кристалла». Однако при таком подходе никак не учитывается динамика процессов в канале управления, что приводит к значительным погрешностям в регулировании процесса и к необходимости последующих «корректировок программного закона изменения температуры после выращивания от четырех до пяти кристаллов заданной марки, что является трудоемким процессом» [8].

Отметим, что скорость вытягивания кристалла нельзя изменить мгновенно: для этого потребовались бы бесконечно большие ускорение и сила, а динамика канала управления приводом никак далее не учитывается. Последнее приводит к существенным динамическим ошибкам (результаты моделирования показаны на рис. 2).

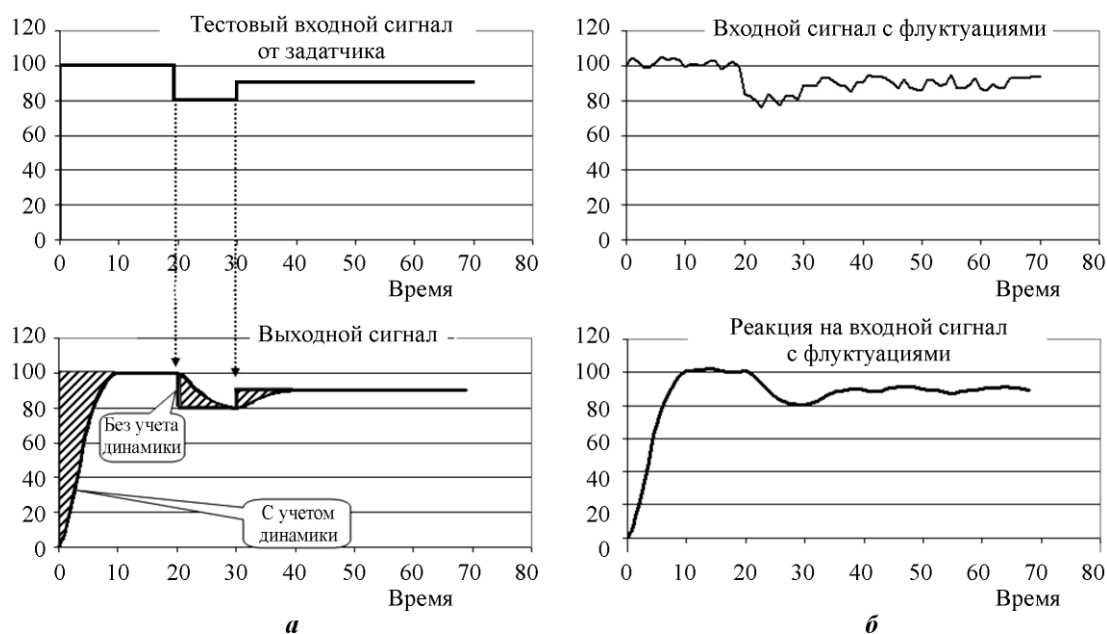


Рис.2. Влияние динамических свойств канала на формируемый сигнал при детерминированном (а) и случайном (б) входных сигналах
 Fig.2. Effect on the dynamic properties of the channel signal generated at deterministic (a) and random (b) input signals

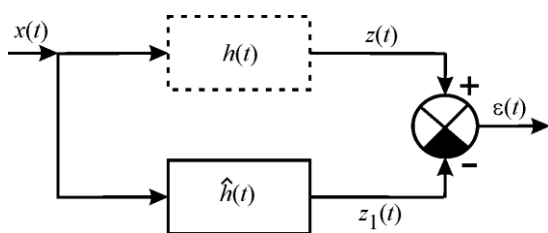


Рис.3. Схема анализа погрешности из-за неточности учета динамики канала
 Fig.3. Scheme of error analysis due to inaccuracy of channel dynamics

При использовании методики [11] можно одинаково обрабатывать как детерминированные, так и случайные сигналы, получая количественную оценку тех или иных решений. Используя схему, представленную на рис. 3, можно оценить ошибки, возникающие вследствие игнорирования динамики. На схеме $h(t)$ соответствует истинной весовой функции канала, а $\hat{h}(t)$ – используемой весовой функции.

Очевидно, при нормированных весовых функциях сигнал ошибки и его характеристики для стационарного процесса $x(t)$ определяются как

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \int_{\theta} h(\theta)x(t-\theta)d\theta - \int_{\lambda} \hat{h}(\lambda)x(t-\lambda)d\lambda, \\ M\{\varepsilon(t)\} &= \int_{\theta} h(\theta)M\{x(t-\theta)\}d\theta - \int_{\lambda} \hat{h}(\lambda)M\{x(t-\lambda)\}d\lambda = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

так как $M\{x(t-\theta)\} = m_x$, $M\{x(t-\lambda)\} = m_x$.

Таким образом, математическое ожидание ошибки равно 0. Определим дисперсию:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varepsilon}^2 &= M\{\varepsilon^2(t)\} = \int_{\theta} \int_{\theta_1} h(\theta)h(\theta_1)M\{x(t-\theta)x(t-\theta_1)\}d\theta d\theta_1 - \\ &- 2 \int_{\theta} \int_{\lambda} \hat{h}(\theta)\hat{h}(\lambda)M\{x(t-\theta)x(t-\lambda)\}d\theta d\lambda + \int_{\lambda} \int_{\lambda_1} \hat{h}(\lambda)\hat{h}(\lambda_1)M\{x(t-\lambda)x(t-\lambda_1)\}d\lambda d\lambda_1, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} M\{x(t-\theta)x(t-\theta_1)\} &= K_{xx}(\theta-\theta_1), \\ M\{x(t-\theta)x(t-\lambda)\} &= K_{xx}(\theta-\lambda), \\ M\{x(t-\lambda)x(t-\lambda_1)\} &= K_{xx}(\lambda-\lambda_1). \end{aligned}$$

Соотношение (2) показывает, что дисперсия ошибки является функционалом, зависящим от различия свойств используемых весовых функций и статистических свойств входного сигнала (ковариационной функции $K_{xx}(\tau)$):

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = F[h(t), \hat{h}(t), K_{xx}(\tau)]. \quad (3)$$

В частных случаях из (3) следует:

- точная модель имеет нулевую погрешность:

$$\sigma_{\varepsilon}^2 \Big|_{\hat{h}(t)=h(t)} = 0; \quad (4)$$

- игнорирование динамики приводит к дополнительной динамической погрешности, и, если модель безынерционна, дисперсия ошибки может быть определена из соотношения

$$\sigma_{\varepsilon}^2 \Big|_{\hat{h}(t)=\delta(t)} = \sigma_y^2 - 2 \int_{\theta} h(\theta)K_{xx}(\theta)d\theta + \sigma_x^2. \quad (5)$$

В случае апериодического звена первого порядка с постоянной времени T и входного сигнала с экспоненциальной автоковариационной функцией с показателем α относительная величина погрешности составит

$$\frac{\sigma_{\varepsilon}^2}{\sigma_{\chi}^2} = \frac{\alpha T}{1 + \alpha T}, \quad (6)$$

так что при $\alpha T \approx 10$ дисперсия ошибки превышает 90 % дисперсии входных флуктуаций!

Учет динамических свойств реальных каналов. Фактически в каждом канале (воздействия скорости вытягивания, температуры нагревателя, скорости вращения заправки и кристалла) есть два динамических звена: первое – от датчика до технологического параметра, второе – от точки изменения этого технологического параметра до реального изменения диаметра кристалла.

Соответствующая схема принимает вид, представленный на рис.4.

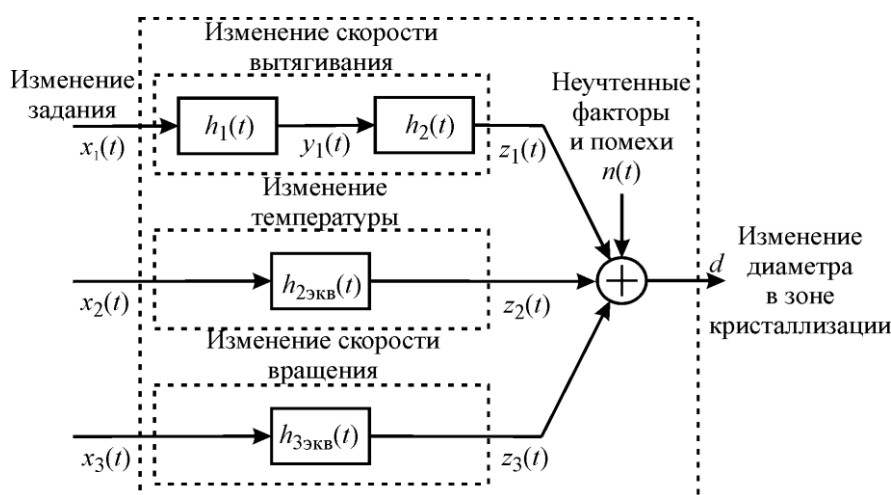


Рис.4. Динамические каналы, формирующие изменение диаметра растущего кристалла
Fig.4. Dynamic channels forming the change in the diameter of the growing crystal

При этом динамика эквивалентного звена, состоящего из $h_1(t)$ и $h_2(t)$, определяется как [11]

$$h_{\text{экв}}(t) = \int_{\tau} h_1(\tau) h_2(t - \tau) d\tau, \quad (7)$$

а изменение диаметра кристалла определяется в виде

$$d(t) = d_0 + \sum_{i=1}^3 \int_{\tau} x_i(\tau) h_{i \text{ экв}}(t - \tau) d\tau + n(t). \quad (8)$$

Следует отметить, что соотношения (7), (8) позволяют отслеживать во времени и оценивать количественно все плавные изменения диаметра растущего кристалла, а также влияние помех. Эта конфигурация еще изменится («выросшая часть монокристалла, проходя через область высокой температуры в расплаве, частично оплавляется» [4]), и это еще один динамический процесс.

Важно знать динамические характеристики каналов (функции $h_i(t)$). Из общих соображений следует, что увеличение числа звеньев в динамическом канале ведет к колоколообразной форме функции $h_i(t)$ (в пределе приближаясь к гауссовой кривой). Для виртуальной лаборатории достаточно использовать эмпирические функции. Однако, измеряя доступные параметры в процессе нормального функционирования установки, можно провести идентификацию динамических каналов и получить их количественные оценки.

Средства автоматизации и особенности визуализации. Для разработки программы виртуальной лаборатории использованы среда Excel+VBA и подключение функций API операционной системы Windows. Чтобы показать вращение кристалла и тигля, а также процесс роста кристалла, программа использует специальную структуру данных и содержит блок моделирования и анимации.

Для повышения эффективности демонстрации всей цепочки процедур в процессе выращивания монокристалла в программу введены элементы мультимедиа и цветовой динамики. В частности, они используются для имитации звуковых эффектов включения тумблеров, шума двигателей, имитации процесса отсасывания воздуха, изменения цвета нагревателей и градиента цвета вытягиваемого кристалла. Вид одного из экранов виртуальной лаборатории приведен на рис. 5.

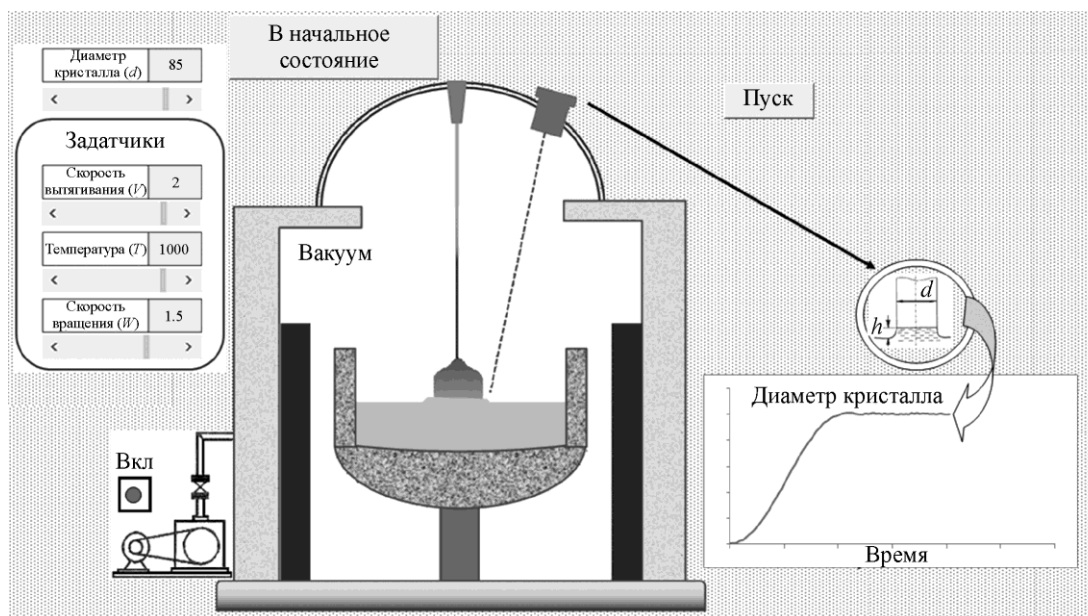


Рис.5. Вид экрана виртуальной лаборатории в режиме демонстрации роста монокристалла
 Fig.5. Virtual laboratory screen view in demonstration mode of mono-crystal growth

Поскольку наиболее сложные и тонкие процессы проходят в зоне кристаллизации, но частично отражаются на форме и размере мениска, на экранную форму дополнительно вынесена увеличенная зона наблюдения за мениском. Для наблюдения изменения диаметра растущего кристалла не только «на глаз» данные моделирования отображаются на графике и доступны в табличном виде.

Применение результатов виртуальной лаборатории. Настоящая работа выполнена, в первую очередь, для повышения эффективности учебного процесса студентов очной формы обучения. Перед реальной лабораторной работой студенты с помощью созданного электронного компонента (виртуальной лаборатории) должны:

- ознакомиться с предстоящей работой;
- выполнить индивидуальное домашнее задание (при трех или четырех управляемых параметрах и в нескольких точках в своем диапазоне можно сгенерировать случайным образом много вариантов заданий);
- проявить фантазию и промоделировать дома, что можно «интересного» сделать во время реальной лабораторной работы (продолжающейся, увы, ограниченное время!);
- в начале реальной лабораторной работы представить отчет: таблицы, графики, копии экранов, полученные при подготовке с помощью виртуальной лаборатории.

Преподаватель использует представленные студентами результаты при допуске к работе и для обсуждения возможных модификаций хода лабораторной работы.

Виртуальную лабораторию предполагается использовать в проекте «Музей «Ангстрем» – МИЭТ – Зеленоград». Рядом со стендом, где представлены слитки полупроводниковых монокристаллов, будет развернута виртуальная лаборатория, демонстрирующая в интерактивном режиме весь процесс их изготовления.

Заключение. Применение электронного компонента позволяет повысить уровень изучения студентами сложных технологических процессов в микроэлектронике. Созданная виртуальная лаборатория демонстрирует в интерактивном режиме процесс выращивания монокристалла по методу Чохральского. Важная особенность программы – учет динамики процессов и моделирование влияния помех. Результаты могут быть использованы при подготовке к работе в реальной лаборатории. Кроме того, перспективным является применение результатов в системе дистанционного обучения.

Литература

1. **Троян П.Е.** Микроэлектроника: учеб. пособие. – Томск: ТГУСУР, 2007. – 346 с.
2. Анализ инновационной деятельности высших учебных заведений России / **И.И. Гребенюк, Н.В. Голубцов, В.А. Кожин и др.** – М.: Академия Естествознания, 2012. – 258 с.
3. **Мединцева И.П.** Компетентностный подход в образовании // Педагогическое мастерство: материалы II междунар. науч. конф. (г. Москва, декабрь 2012 г.). – М.: Буки-Веди, 2012. – С. 215–217.
4. **Прокофьева В.К., Раскин А.А., Рыгалин Б.Н.** Лабораторный практикум по курсу «Технология материалов электронной техники» / Под ред. Б.Н. Рыгалина. – М.: МИЭТ, 2008. – 84 с.
5. **Мюллер Г.** Выращивание кристаллов из расплава. Конвекция и неоднородности. – М.: Мир, 1991. – 143 с.
6. **Kakimoto K.** Development of crystal growth technique of silicon by the czochralski method // J. Czochralski. – 2013. – Vol. 124. – No. 2. – P. 227–230.
7. **Саханский С.П.** Модель управления формой при выращивании монокристаллов германия // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 6. – С. 2–5.
8. **Саханский С.П., Баркин С.М.** Модель управления температурой при выращивании кремния // Вестник СибГАУ. – 2010. – № 3(29). – С. 149–153.
9. **Саханский С.П., Якобсон М.Е.** Модель управления скоростью вытягивания монокристаллов кремния // Вестник СибГАУ. – 2010. – № 5(31). – С. 254–258.
10. **Róźewski P., Novikov D., Bakhtadze N., Zaikin O.** New frontiers in information and production systems modelling and analysis. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – 268 p.
11. **Трояновский В.М.** Информационно-управляющие системы и прикладная теория случайных процессов: учеб. пособие. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 304 с.

Поступила 09.02.2018 г.; принята к публикации 24.04.2018 г.

Прокофьева Виолетта Константиновна – кандидат химических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), prokofeva_v@mail.ru

Трояновский Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры информатики и программного обеспечения Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), troy40@mail.ru

Чжо Наинг Сое – аспирант кафедры информатики и программного обеспечения Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), kn.bagan@gmail.com

References

1. Troyan P.E. *Microelectronics: Textbook*. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2007. 346 p. (In Russian).
2. Grebenyuk I.I., Golubtsov N.V., Kozhin V.A. et al. *Analysis of innovation activity of higher educational institutions of Russia*. Moscow, Academy of Natural History, 2012. 258 p. (In Russian).
3. Medintseva I.P. Competence approach in education. *Pedagogical skill: Materials II International. Sci. Conf.* Moscow, Buki-Vedi, 2012, pp. 215–217. (In Russian).
4. Prokofieva V.K., Raskin A.A., Rygalin B.N. *Laboratory workshop on the course «Technology of electronic materials»*. Ed. B.N. Rygalina. Moscow, MIET, 2008. 84 p. (In Russian).
5. Muller G. *Growing crystals from the melt. Convection and inhomogeneity*. Moscow, Mir Publ., 1991. 143 p. (In Russian).
6. Kakimoto K. Development of crystal growth technique of silicon by the Czochralski method. *J. Czochralski*, 2013, vol. 124(2013), no. 2, pp. 227–230.
7. Sakhansky S.P. Model of shape control in growing germanium single crystals. *Nano- and Microsystems Technique*, 2012, no. 6, pp. 2–5. (In Russian).
8. Sakhanskiy S.P., Barkin S. Model of temperature control for growing silicon. *Bulletin of Siberian State University of Management*, 2010, no. 3 (29), pp. 149–153. (In Russian)
9. Sakhansky S.P., Yakobson M.E. Model for controlling the drawing speed of silicon monocrystals. *Bulletin of Siberian State University of Management*, 2010, no. 5 (31), pp. 254–258. (In Russian).
10. Przemysław Różewski, Dmitry Novikov, Natalia Bakhtadze, Oleg Zaikin (eds.). *New frontiers in information and production systems 428 modeling and analysis*. Switzerland, Springer International Publishing, 2016. 268 p. DOI 10.1007/978-3-319-23338-3
11. Troyanovskiy V. *Information control system and applied theory of random process. 1st ed.* Moscow, Gelios-ASV Publ., 2004, p. 304. (In Russian).

Submitted 09.02.2018; Accepted 24.04.2018.

Information about the authors:

Violetta K. Prokofieva – Cand. Sci. (Chem.), Assoc. Prof. of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), prokofieva_v@mail.ru

Vladimir M. Troyanovsky – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Computer Science and Software Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), troy40@mail.ru

Kyaw Naing Soe – PhD student of the Computer Science and Software Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), kn.bagan@gmail.com