

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОЧИСТКИ И ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЗОННОЙ ПЛАВКИ

Сухорученков К. В.¹, студент, ✉ skv1999@yandex.ru
Мараева Е. В.¹, кандидат физико-математических наук, доцент, jenvmar@mail.ru
Александрова О. А.¹, кандидат физико-математических наук, доцент,
oaaleksandrova@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, 5, корп. 3, 197376, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Работа посвящена созданию виртуального прибора в среде LabVIEW, позволяющего моделировать процесс зонной плавки в зависимости от технологических параметров. Рассматриваются методы очистки и выращивания монокристаллов путем медленного перемещения узкой зоны расплава по длине поликристаллического слитка твердого материала, в результате чего благодаря перекристаллизации происходит перераспределение примесей, растворенных в слитке. Окончательное распределение примесей зависит от их первоначального распределения, числа и ширины зон расплава и направления их движения. Виртуальный прибор предназначен для использования студентами и преподавателями в условиях дистанционного обучения и в очном режиме.

Ключевые слова: метод зонной плавки, метод зонной очистки, метод целевой загрузки, распределение примеси, полупроводниковый монокристалл, среда программирования LabVIEW.

Цитирование: Сухорученков К. В., Мараева Е. В., Александрова О. А. Моделирование условий очистки и процесса выращивания полупроводниковых монокристаллов методом зонной плавки // Компьютерные инструменты в образовании. 2022. № 2. С. 19–31. doi: 10.32603/2071-2340-2022-2-19-31

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод зонной плавки используется для очистки материалов, а также для получения однородно легированных слитков. Зонная очистка была разработана в начале 1950-х годов У. Г. Пфанном как метод получения сверхчистых полупроводниковых материалов, широко применявшихся для изготовления приборов на их основе. Она позволяет получать полупроводниковые монокристаллы с содержанием примесей менее 0,0001 %. Зонная плавка была применена также для очистки металлов, органических и неорганических соединений, став ценным методом фундаментальных научных исследований и важной промышленной технологией. В настоящее время проводится значительное количе-

ство исследований по увеличению производительности метода зонной плавки, исследований структуры и микротвёрдости смесей, полученных этим методом, и исследований по увеличению степени чистоты выращенных таким образом монокристаллов [1–3].

Целью работы явилось создание программы, позволяющей производить моделирование процессов очистки и выращивания полупроводникового монокристалла. Алгоритм моделирования состоит из следующих шагов: выбор режима проведения зонной плавки (зонная очистка, зонное легирование, однородное легирование методом целевой загрузки), ввод исходных данных, расчет коэффициентов распределения примеси и приведенных коэффициентов испарения в случае летучей примеси, построение и вывод графиков распределения примеси по длине монокристалла на экран.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ОПИСАННЫЕ В ПРОГРАММЕ

Используя методику, описанную в [4], программа позволяет описать следующие процессы: зонная очистка, проход легирующей примеси через чистый исходный образец и метод целевой загрузки. При описании данных процессов мы приходим к выводу уравнений распределения примеси по длине слитка, который базируется на рассмотрении уравнений материального баланса и уравнения баланса объёмов. Основные закономерности, используемые при выводе уравнения распределения примеси по длине слитка, приведены в [4]. На рисунке 1 изображена схема моделируемой установки.

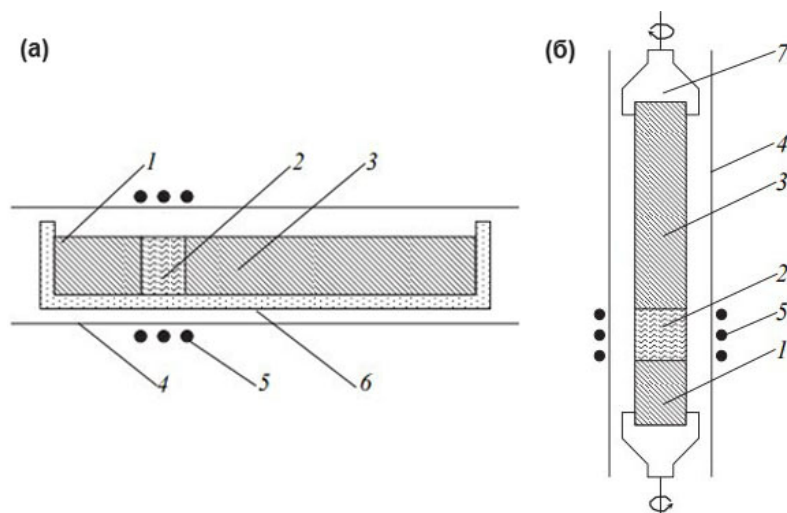


Рис. 1. Схема выращивания и очистки кристаллов методом зонной плавки: а) горизонтальная плавка с использованием тигля; б) вертикальная бестигельная зонная плавка; 1 – кристалл; 2 — расплавленная зона; 3 — исходный материал; 4 — стенки герметичной камеры; 5 — высокочастотный индуктор; 6 — тигель; 7 — держатель кристалла

2.1. Зонная очистка (проход зоны через однородный в среднем образец)

Способ зонной плавки с прохождением расплавленной зоны через однородный в среднем образец обычно реализуется при очистке материала. Однородное распределение примеси создается при помещении измельченного исходного материала в тигель или лодочку. В этом случае концентрация примеси в подпитывающем слое равна начальной концентрации примеси в исходном материале ($C_n = C_0$), и распределение примеси по длине монокристалла (C_m) может быть найдено по формуле:

$$C_m = \frac{k}{k_{об}} C_0 \left(1 + (k_{об} - 1) \exp\left(-k_{об} \frac{x}{L_0}\right) \right),$$

где k , $k_{об}$ — приведенный и обобщенный коэффициенты распределения примеси соответственно; C_0 — значение начальной концентрации примеси, см^{-3} ; x — расстояние от начальной точки кристаллизации, см ; L_0 — длина расплавленной зоны, см .

В работе используется линейный коэффициент испарения, или коэффициент межфазного взаимодействия α , имеющий физический смысл скорости, с которой частица пересекает границу раздела фаз, и определяющий, является ли рассматриваемая примесь летучей. Его размерность выражается в $\text{см}/\text{с}$.

В случае нелетучей примеси (линейный коэффициент испарения $\alpha = 0$) обобщенный коэффициент распределения $k_{об}$ равен приведенному k . Связь между равновесным коэффициентом распределения k_0 , характеризующим отношение концентраций примеси в твердой и жидкой фазах в условиях термодинамического равновесия, и эффективным коэффициентом распределения k , характеризующим связь между концентрациями примеси в твердой и жидкой фазах в неравновесных условиях, определяется по уравнению Бартон-Прима-Слихтера [4]:

$$k_{об} = k = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp\left(-\frac{f\delta}{D}\right)},$$

где k_0 — равновесный коэффициент распределения; f — скорость кристаллизации, $\text{см}/\text{с}$; δ — толщина слоя расплава, который возникает у фронта кристаллизации в реальных условиях выращивания кристалла, обогащенного примесью, если $k_0 < 1$, и обедненного примесью, если $k_0 > 1$. Рассчитывается по уравнению Слихтера [4], см ; D — коэффициент диффузии примеси, определяющий плотность потока диффундирующих атомов (атомов, проходящих в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной направлению диффузии).

В случае летучей примеси ($\alpha \neq 0$) обобщенный коэффициент распределения $k_{об}$ складывается из приведенного коэффициента распределения k и приведенного коэффициента испарения k_u . Значение приведенного коэффициента испарения k_u может быть найдено из выражения:

$$k_u = \frac{\alpha F}{f S},$$

где α — линейный коэффициент испарения; F — площадь поверхности испарения, см^2 ; S — площадь поперечного сечения кристалла, см^2 .

В этом случае $k_{об}$ может быть найден следующим образом:

$$k_{об} = k + k_u = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp\left(-\frac{f\delta}{D}\right)} + \frac{\alpha F}{f S}.$$

При легировании полупроводника летучей примесью изменение ее концентрации в расплавленной зоне будет зависеть от скорости испарения. Если скорость испарения очень мала, то примесь в жидкой фазе будет накапливаться в основном за счет оттеснения ее в расплав в соответствии с эффективным коэффициентом распределения. При увеличении скорости испарения в атмосферу начнет уходить все больше и больше примеси.

Наконец, когда количества испаряющейся и оттесняемой в расплав движущимся фронтом кристаллизации примесей сравниваются (это будет соответствовать условию $k_{об} = 1$), концентрация примеси в расплавленной зоне приобретет постоянное значение, что позволит получить постоянную концентрацию примеси по длине кристалла:

$$C_m = \frac{k}{k_{об}} C_0.$$

Для нелетучей примеси эффективность процесса очистки будет зависеть от значения коэффициента распределения k , скорости движения расплавленной зоны f (влияет на k), а также от длины расплавленной зоны L_0 .

2.2. Проход легирующей примеси через чистый исходный образец

Доля однородной части кристалла, полученного проходом легирующей зоны через нелегированный исходный образец, в общем случае незначительна, и выход годного материала в этом случае невелик. Тем не менее, в определенных условиях однократный проход расплавленной зоны может быть использован для выращивания кристаллов с приблизительно однородным распределением примеси по длине.

В расплав первой зоны, создаваемой в начальной части нелегированного кристалла ($C_n = 0$), помещают рассчитанное количество примеси ($C_0 \neq 0$).

Затем зону перемещают по кристаллу, в результате чего примесь распределяется по длине кристалла. Если процесс проводится в вакууме, то есть равновесная концентрация, устанавливающаяся в расплаве в условиях термодинамического равновесия с давлением пара летучей примеси над расплавом, $C_p = 0$, то закон распределения примеси при прохождении легирующей зоны через чистый исходный образец задается формулой:

$$C_m = k C_0 \exp\left(-k_{об} \frac{x}{L_0}\right).$$

Концентрация примеси к концу кристалла изменяется тем меньше, чем меньшее значение имеет эффективный коэффициент распределения k . Поэтому данный метод применяется только для тех легирующих примесей, которые имеют $k \ll 1$.

2.3. Метод целевой загрузки

Суть метода целевой загрузки состоит в создании требуемого соотношения между концентрациями C_0, C_p, C_n (или C_0 и C_n , если процесс проводится в вакууме) для получения постоянной концентрации примеси в твердой фазе. В этом случае распределение примеси по длине кристалла может быть найдено следующим образом:

$$C_m = \frac{k}{k_{об}} \left(C_n + k_u C_p + (k_{об} C_0 - C_n - k_u C_p) \exp\left(-k_{об} \frac{x}{L_0}\right) \right).$$

Для достижения стационарной концентрации летучей примеси необходимо выполнить следующее условие:

$$k + \frac{\alpha F}{f S} \left(1 - \frac{C_p}{C_0}\right) = \frac{C_n}{C_0},$$

тогда

$$C_m = \frac{k}{k_{об}}(C_n + k_u C_p) = k \frac{f S C_n + \alpha F C_p}{f S k + \alpha F} = k C_0.$$

В случае проведения процесса в вакууме ($C_0 = 0$)

$$C_m = \frac{k}{k_{об}} C_n + \frac{k}{k_{об}} (k_{об} C_0 - C_n) \exp\left(-k_{об} \frac{x}{L_0}\right).$$

Если примесь нелетучая ($\alpha = 0$), то в случае проведения процесса в вакууме

$$C_m = C_n + (k C_0 - C_n) \exp\left(-k_{об} \frac{x}{L_0}\right).$$

Условия однородного легирования: если концентрация примеси в начальной зоне $C_0 = \frac{C_n}{k}$, то $C_m = C_n$.

3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРОГРАММЫ

3.1. Выбор программной среды и ввод исходных данных

Согласно [5], виртуальные приборы, создаваемые в среде LabView, позволяют проводить моделирование технологических процессов с помощью интуитивно понятного потокового программирования, что значительно упрощает вычислительный процесс, а также дает возможность провести моделирование при варьировании различных параметров, задаваемых студентом самостоятельно. Используемая в данной работе среда LabVIEW является традиционной и наиболее оптимальной для проведения моделирований подобного рода [6–8]. Ее широкое применение в образовательном процессе обусловлено относительной простотой графического языка программирования, наличием отлаженных инструментов для установки связи с реальными приборами, возможностью удаленного управления ходом эксперимента.

В качестве исходных данных используется информация о маркировке кристаллов. Для работы программы также требуются данные о скорости движения расплавленной зоны, длины расплавленной зоны, длины слитка, диаметра кристалла, начальной концентрации примеси, концентрации примеси в подпитывающем слое, а также справочные данные, такие как равновесный коэффициент распределения, коэффициент диффузии примеси и линейный коэффициент испарения.

При выборе основного материала, примесей и типа расчета на экран выводятся справочные и рассчитанные параметры технологического процесса для выбранных примесей в виде списка значений. На рисунках 2 и 3 приведены примеры фрагментов лицевой панели программы с выбором исходных данных и со справочными и рассчитанными параметрами технологического процесса. Для примера в эксперименте исследуется кристалл Ge, для которого применяется горизонтальная зонная плавка, в качестве примесей были выбраны Bi, In, Ag. Расчет проводился при условии, что образец в среднем однородный, то есть $C_n = C_0$.

Созданный в работе виртуальный прибор не предназначен для рассмотрения взаимодействия примесей. Случай легирования кристалла одновременно несколькими примесями с учётом уравнения электронейтральности был рассмотрен авторами в предыдущей работе [5], посвященной процессу моделирования выращивания монокристаллов методом Чохральского.

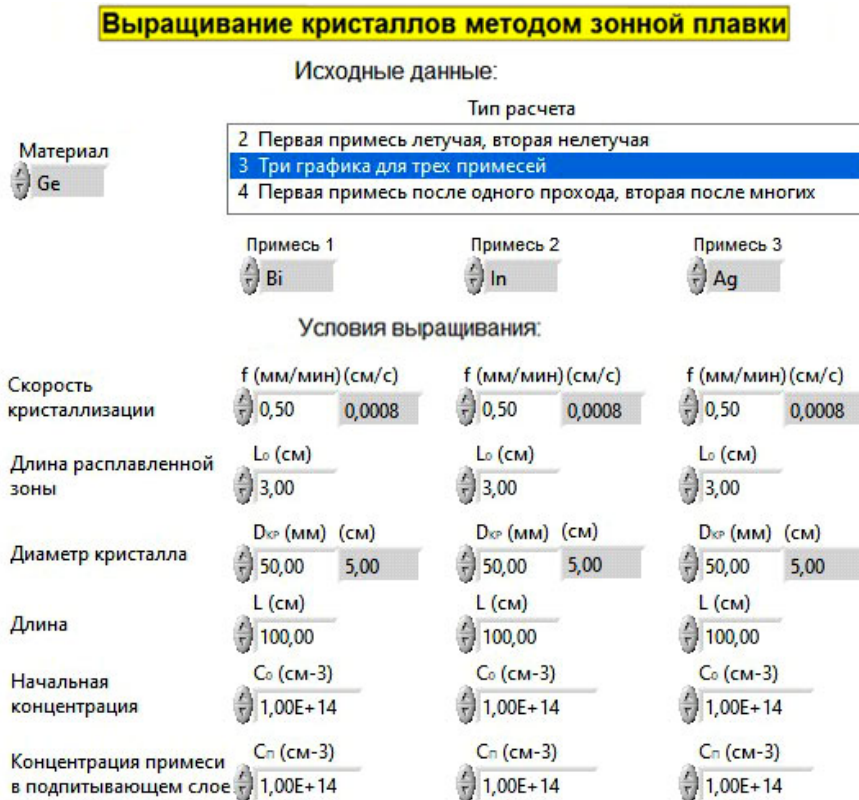


Рис. 2. Фрагмент лицевой панели с выбором исходных данных технологического процесса

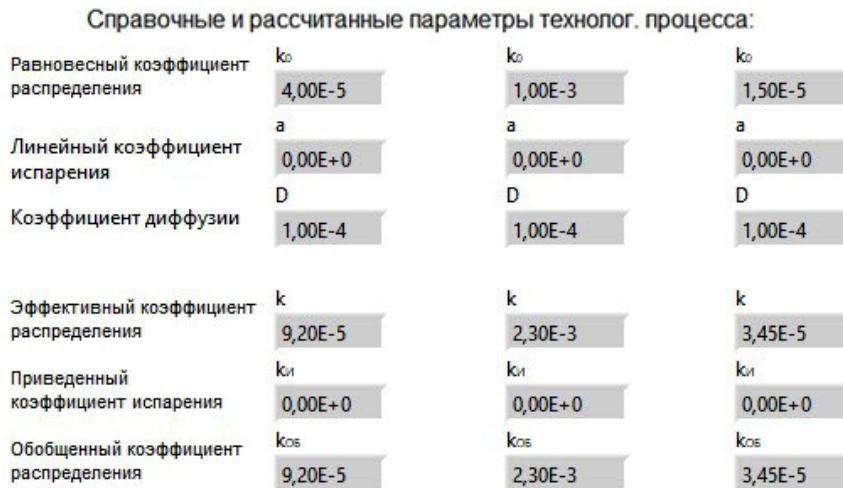


Рис. 3. Фрагмент лицевой панели со справочными и рассчитанными параметрами технологического процесса

В программе использовались данные, приведенные в [4]. При выборе материала из всего набора исходных данных, необходимых для работы, с помощью алгоритма, заданного в блоках «Case Structure» и «Formula node», выбираются значения равновесных коэффициентов распределения, соответствующие материалу. На рисунке 4 показаны части блоков «Case Structure» и «Formula node», выполняющих вышеописанную функцию.

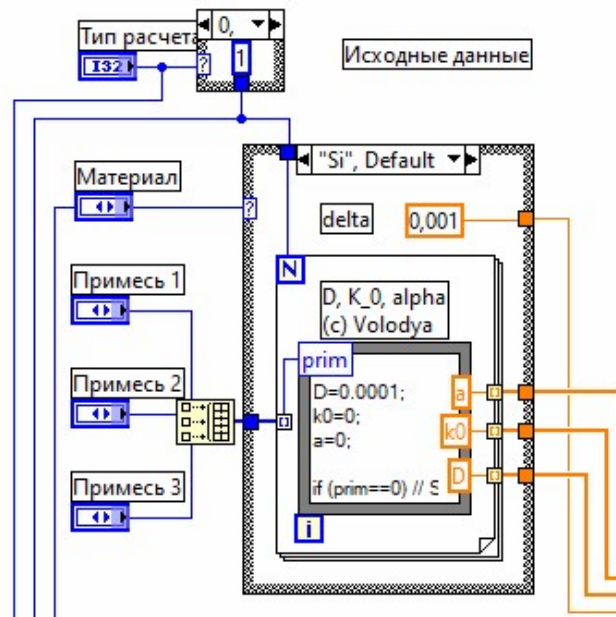


Рис. 4. Блоки «Case Structure» и «Formula node», отвечающие за выбор справочных данных

При помощи аналогичных блоков производится расчет обобщенных, приведенных и эффективных коэффициентов распределения, а также толщины диффузионного слоя, площади поверхности испарения и площади поперечного сечения кристалла. На рисунке 5 изображен пример действия таких блоков.

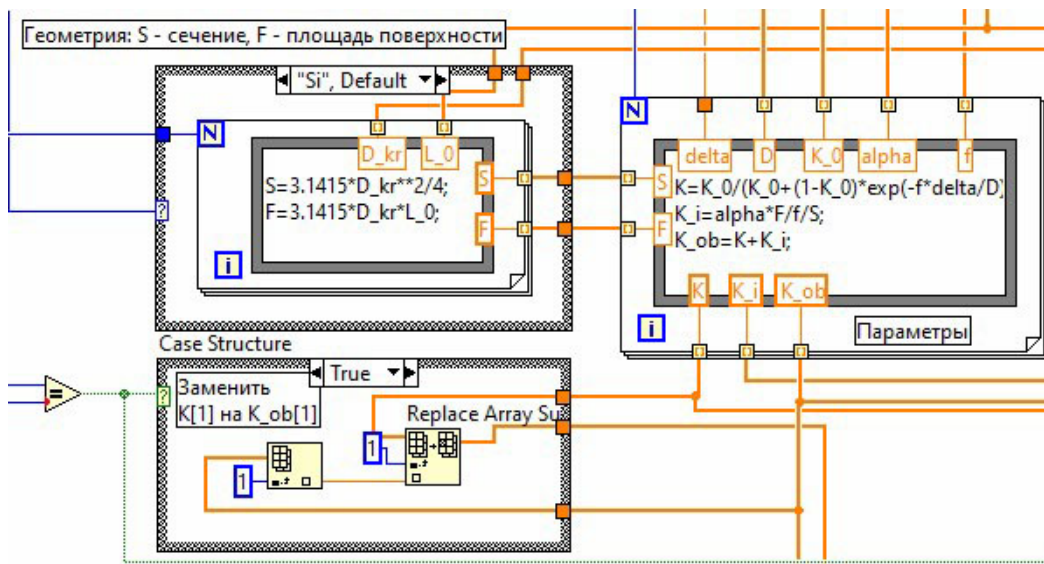


Рис. 5. Блоки «Case Structure» и «Formula node», отвечающие за расчет площади поперечного сечения S , площади испарения F , коэффициентов распределения примеси k , $k_{об}$, а также коэффициента испарения k_u

3.2. Вывод графиков на экран

График распределения примеси по длине монокристалла $C_m(x)$ при известном значении начальной концентрации примеси C_0 строится с помощью блоков «For loop», «Formula node» и «Case Structure», далее он выводится на экран вместе с таблицей, содержащей результаты расчета концентраций. Это показано на рисунках 6 и 7.

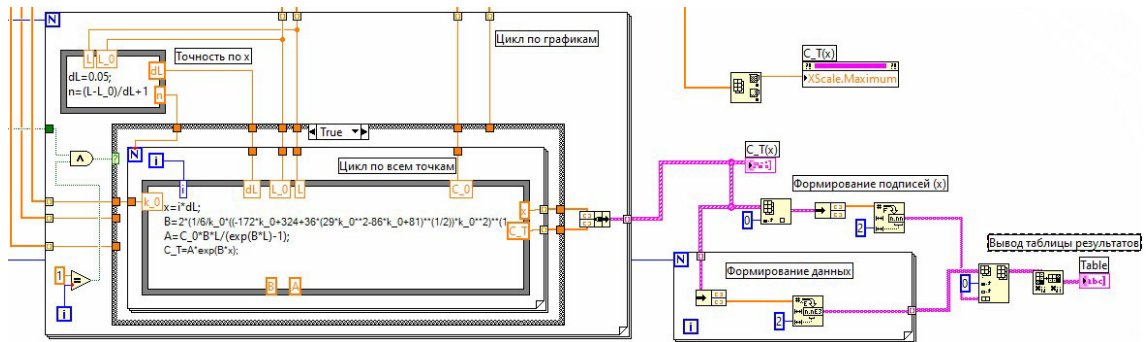


Рис. 6. Фрагмент блок-диаграммы с блоками, выводящими на экран график распределения примеси вдоль кристалла

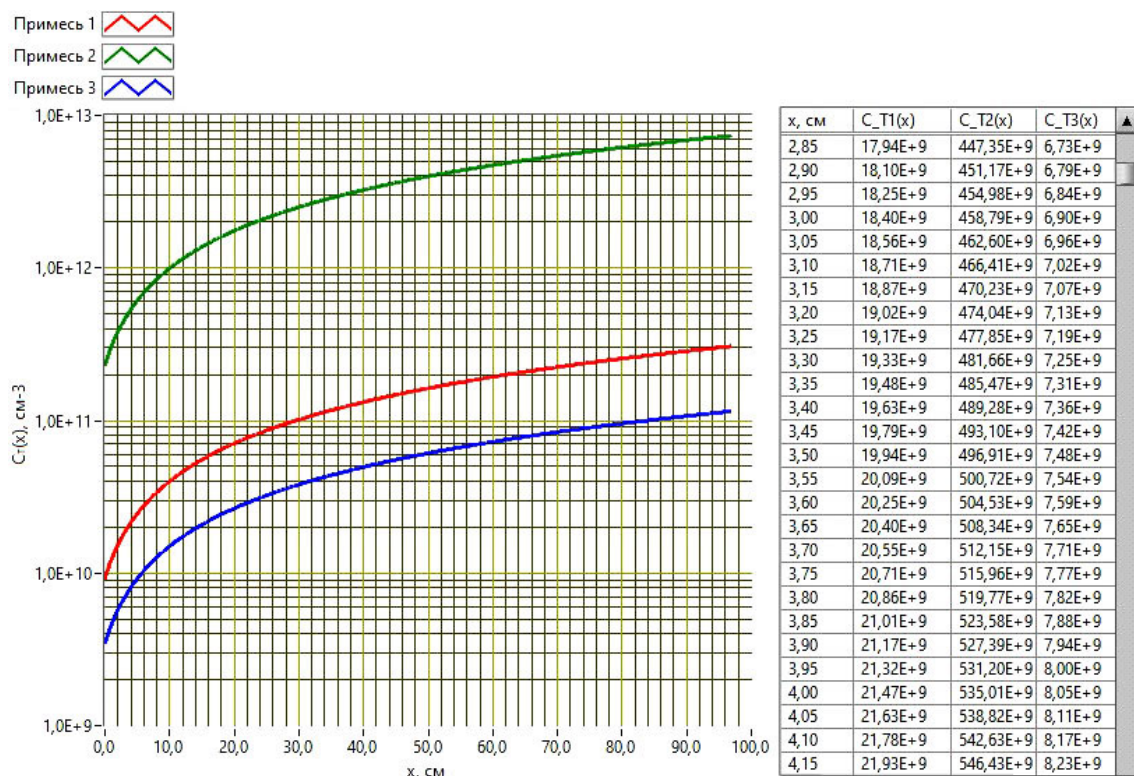


Рис. 7. Фрагмент лицевой панели с графиком распределения примеси вдоль кристалла, позволяющим проанализировать влияние эффективного коэффициента распределения на процесс очистки методом зонной перекристаллизации, и с таблицей рассчитанных значений

Программа также позволяет проанализировать распределение примеси C_m для одного типа примеси при варьировании таких параметров, как скорость движения расплав-

ленной зоны, длина расплавленной зоны, летучесть примеси, начальная концентрация, концентрация в подпитывающем слое и диаметр кристалла. На рисунках 8–11 представлены графики распределения примесей по длине кристалла при варьировании некоторых вышеперечисленных параметров. Для демонстрации графиков были использованы различные комбинации основных материалов и примесей.

На графике, представленном на рисунке 8, исследуется влияние длины расплавленной зоны на процесс очистки методом зонной перекристаллизации.

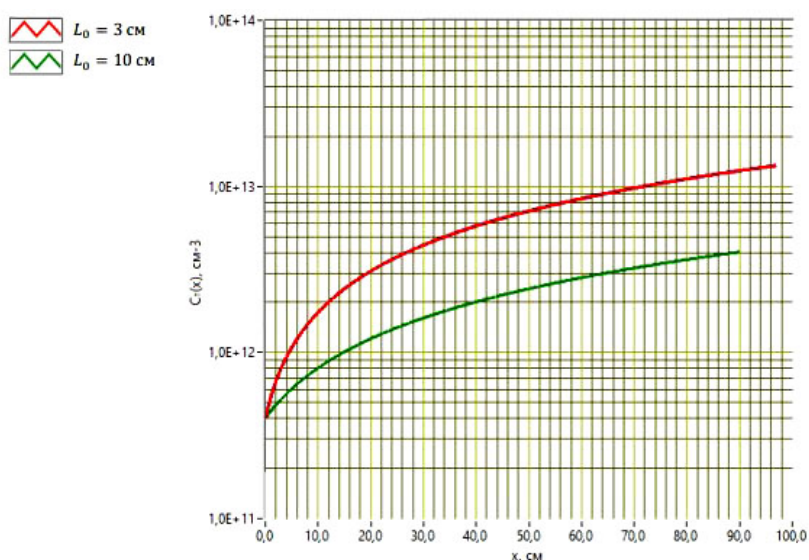


Рис. 8. Фрагмент лицевой панели с графиком распределения примеси вдоль кристалла для Si, легированного Cu, при различных значениях длины расплавленной зоны

На графике, представленном на рисунке 9, исследуется влияние скорости движения расплавленной зоны на процесс очистки методом зонной перекристаллизации.

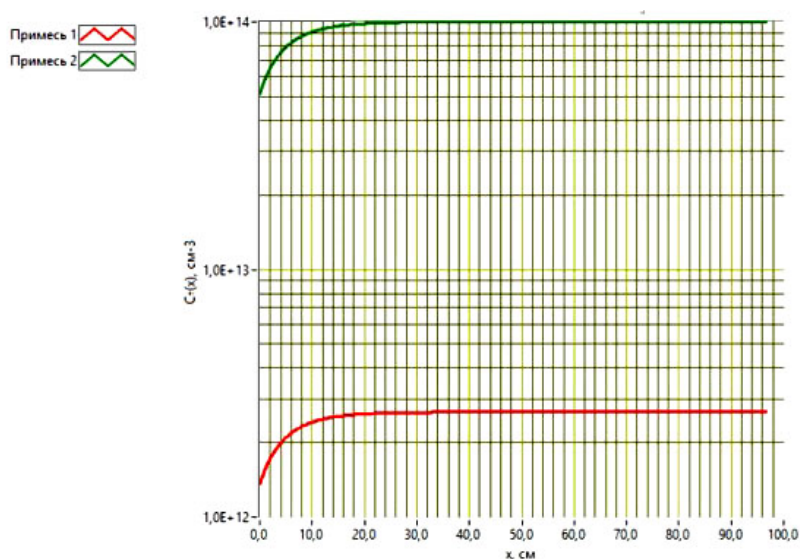


Рис. 9. Фрагмент лицевой панели с графиком распределения примеси вдоль кристалла для Ge, легированного Bi, при различных значениях скорости движения расплавленной зоны

График, представленный на рисунке 10, построен при работе программы в режиме «Первая примесь летучая, вторая — нелетучая».

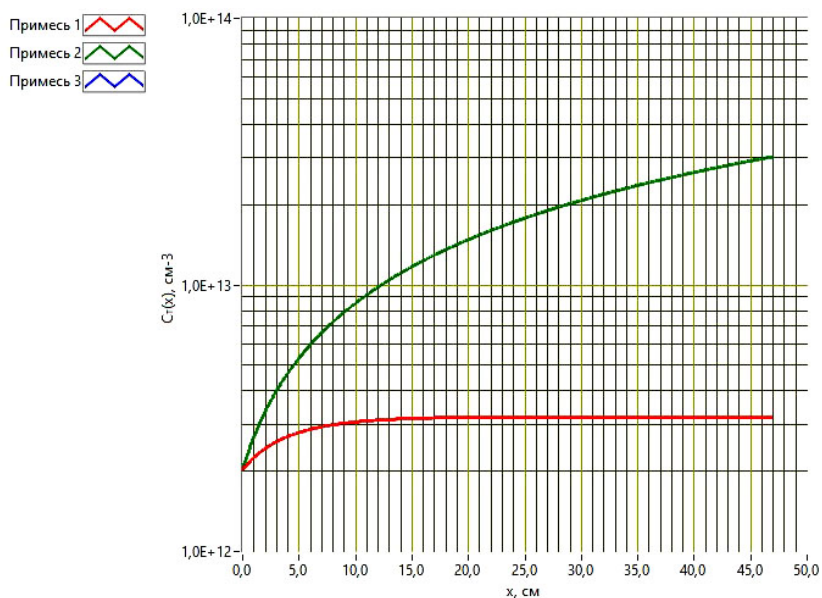


Рис. 10. Фрагмент лицевой панели с графиком распределения примеси вдоль кристалла для Ge, легированного Sb, в зависимости от летучести примеси

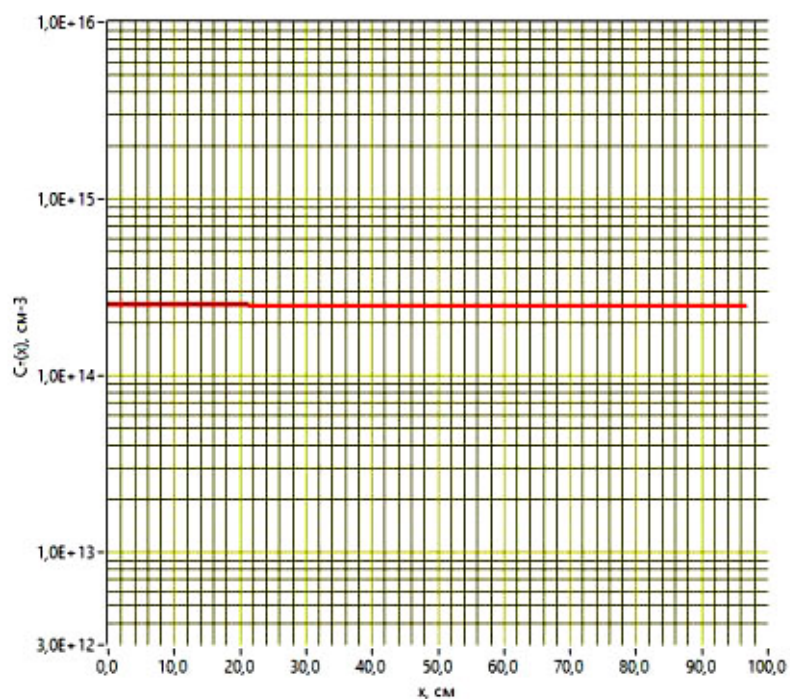


Рис. 11. Фрагмент лицевой панели с графиком распределения примеси вдоль кристалла ГЭС — 7,2 в случае выращивания методом целевой загрузки

График, представленный на рисунке 11, демонстрирует распределение примеси вдоль кристалла при выращивании методом целевой загрузки. После подбора

определенных параметров технологического процесса и расчета точных значений концентрации в начальной зоне и концентрации подпитки график распределения примеси принимает форму прямой, что говорит о равномерном распределении примеси по длине кристалла.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, создана наглядная программа, позволяющая проводить моделирование технологических процессов в условиях дистанционного обучения. Для написания программы выбрана среда LabVIEW, применяемая для автоматизации научных установок и лабораторных практикумов, быстрого создания комплексных систем для научных исследований. Разработанный виртуальный прибор позволяет смоделировать процесс выращивания монокристаллов путем медленного перемещения узкой зоны расплава по длине поликристаллического слитка твердого материала, в результате чего благодаря перекристаллизации происходит перераспределение примесей, растворенных в слитке. В качестве исходных данных используются информация о марке кристалла и основных технологических параметрах процесса, таких как скорость движения расплавленной зоны, длина расплавленной зоны, длина слитка, диаметр кристалла, начальная концентрация примеси, концентрация примеси в подпитывающем слое. Программа может быть использована в научной лаборатории и в учебном процессе студентами бакалавриата, обучающимися по направлению 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» (профиль «Проектирование и технология микро- и наносистем»).

Список литературы

1. Tsirlin A. M., Sukin I. A., Grigorevskii I. N., Starodumov I. O. Thermodynamic Analysis of Zone Melting // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2022. Vol. 95, № 1. P. 1–8. doi: 10.1007/s10891-022-02450-w
2. Kozhevnikov O.E., Pylypenko M. M., Shcherban A. P., Datsenko O. A., Pelykh V. M., Virych V. D. The refining of titanium by crucibleless zone melting method // Problems of Atomic Science and Technology. 2021. № 5(135). P. 70-76. doi: 10.46813/2021-135-070
3. Wan H., Kong Li., Yang Bi., Xu B., Duan M., Dai Y. Zone Melting under Vacuum Purification Method for High-Purity Aluminum // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 17. P. 802–808. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.01.010
4. Авров Д. Д., Александрова О. А., Лебедев А. О. и др. Технология материалов микроэлектроники: от минерального сырья к монокристаллу: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 146 с.
5. Сухорученков К. В., Мараева Е. В., Александрова О. А. Моделирование процесса выращивания полупроводниковых монокристаллов методом Чохральского. // Компьютерные инструменты в образовании. 2021 . № 4. С. 99–108. doi: 10.32603/2071-2340-2021-4-99-108
6. Тревис Дж. LabVIEW для всех. – Prentice Hall, М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. 544 с.
7. Лашкова Н. А., Пермяков Н. В., Максимов А. И., Спивак Ю. М., Мошников В. А. Анализ локальных областей полупроводниковых нанобъектов методом туннельной атомно-силовой микроскопии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2015. № 1 (213). С. 31–42. doi: 10.5862/JPM.213.3
8. Матюшкин Л. Б. Программное обеспечение для исследования спектров поглощения и люминесценции квантово-размерных наноструктур // Технические науки — от теории к практике. 2013. № 24. С. 154–158.

Поступила в редакцию 09.06.2022, окончательный вариант — 16.06.2022.

Сухорученков Кирилл Владиславович, студент 1 курса магистратуры, кафедра Микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ✉ skv1999@yandex.ru

Мараева Евгения Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), jenvmar@mail.ru

Александрова Ольга Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), oaaleksandrova@gmail.com

Computer tools in education, 2022

№ 2: 19–31

<http://cte.eltech.ru>

doi:10.32603/2071-2340-2022-2-19-31

Simulation of Purification Conditions and the Process of Growing Semiconductor Single Crystals by the Zone Melting Method

Suchoruchenkov K. V.¹, Student, ✉ skv1999@yandex.ru
Maraeva E. V.¹, PhD, Associate Professor, jenvmar@mail.ru
Alexandrova O. A.¹, PhD, Associate Professor, oaaleksandrova@gmail.com

¹Saint Petersburg Electrotechnical University,
5, building 3, st. Professora Popova, 197376, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The work is devoted to the creation of a virtual device in the LabVIEW environment, which allows simulating the process of zone melting depending on technological parameters. Methods for cleaning and growing single crystals by slowly moving a narrow melt zone along the length of a polycrystalline ingot of a solid material are considered, as a result of which, due to recrystallization, the impurities dissolved in the ingot are redistributed. The final distribution of impurities depends on their initial distribution, the number and width of the melt zones, and the direction of their movement. The virtual device is intended for use by students and teachers in distance learning and face-to-face mode.

Keywords: *zone melting method, zone cleaning method, target loading method, impurity distribution, semiconductor single crystal, LabVIEW programming environment.*

Citation: K. V. Sukhoruchenkov, E. V. Maraeva, and O. A. Alexandrova, "Simulation of Purification Conditions and the Process of Growing Semiconductor Single Crystals by the Zone Melting Method," *Computer tools in education*, no. 2, pp. 19–31, 2022 (in Russian); doi:10.32603/2071-2340-2022-2-19-31

References

1. A. M. Tsirlin, I. A. Sukin, I. N. Grigorevskii, and I. O. Starodumov, "Thermodynamic Analysis of Zone Melting," *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 95, no. 1, pp. 1–8, 2022; doi:10.1007/s10891-022-02450-w

2. O. E. Kozhevnikov, M. M. Pylypenko, A. P. Shcherban, O. A. Datsenko, V. M. Pelykh, and V. D. Virych, “The refining of titanium by crucibleless zone melting method,” *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 5(135), pp. 70–76, 2021; doi: 10.46813/2021-135-070
3. H. Wan, L. Kong, B. Yang, B. Xu, M. Duan, and Y. Dai, “Zone melting under vacuum purification method for high-purity aluminum,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 17, pp. 802–808, 2022; doi: 10.1016/j.jmrt.2022.01.010
4. D. D. Avrov, O. A. Aleksandrova, A. O. Lebedev, et al., *Tekhnologiya materialov mikroelektroniki: ot mineral'nogo syr'ya k monokristallu: ucheb. posobie*, St. Petersburg, Russia: Izd-vo SPbGETU “LETI”, 2017 (in Russian).
5. K. V. Sukhoruchenkov, E. V. Maraeva, and O. A. Alexandrova, “Simulation of the Process of Growing Semiconductor Single Crystals by the Czochralski Method,” *Computer tools in education*, no. 4, pp. 99–108, 2021 (in Russian); doi: 10.32603/2071-2340-2021-4-99-108
6. J. Travis, *LabVIEW for edition – Prentice Hall*, Moscow: DMK Press; PriborKomplekt, 2005 (in Russian).
7. N. A. Lashkova, N. V. Permiakov, A. I. Maximov, Yu. M. Spivak, and V. A. Moshnikov, “Local Analysis Of Semiconductor Nanoobjects By Scanning Tunneling atomic Force Microscopy,” *St. Petersburg Polytechnic University Journal - Physics and Mathematics*, no. 213, pp. 31–42, 2015 (in Russian); doi: 10.5862/JPM.213.3
8. L. Matyushkin, “Software For Absorption And Luminescence Spectra reseach Of Quantum-sized Nanostructures,” *Tekhnicheskie nauki — ot teorii k praktike*, no. 24, pp. 154–158, 2013 (in Russian).

Received 09-06-2022, the final version — 16-06-2022.

Kirill Suchoruchenkov, Student of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University, ✉ skv1999@yandex.ru

Evgenia Maraeva, PhD, Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University, jenvmar@mail.ru

Olga Alexandrova, PhD, Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University, oaaleksandrova@gmail.com