

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛА

ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

В.М. Трояновский, Чжо Наинг Сое (Москва)

Задачу разработки имитационной модели выращивания монокристаллов для учебного процесса можно рассматривать как часть общей задачи анализа и синтеза сложного объекта. Особенности комплексного моделирования сложного объекта подробно изложены в докладе Б.В. Соколова [1], что позволяет нам применять результаты этой работы как базу всего рассмотрения. Заметим также, что при таком подходе успешно реализуется концепция производства, основанного на знаниях [2].

Комплексное моделирование сложных процессов успешно используется в учебном процессе [3]. При этом концепция разработки виртуальной лаборатории для внутривузовского и дистанционного обучения разрабатывается уже около 20 лет [4,5].

В области микроэлектроники, которая охватывает исследование, конструирование, производство и применение микроэлектронных изделий [6], обучение включает такие крупные направления, как изучение материалов (материаловедение), технологических процессов, оборудования, а также подготовку высококвалифицированных специалистов. Одним из процессов микроэлектронного производства является процесс выращивания монокристаллов по методу Чохральского [7]. В настоящее время существует значительное количество модификаций этого метода, основа которого состоит в том, что небольшую монокристаллическую затравку вводят неглубоко в расплав и затем ее медленно вытягивают из расплава. В процессе выращивания монокристалла растущий кристалл и тигель с расплавом вращаются, причем, как правило, в противоположных направлениях [8].

Чтобы продемонстрировать особенности технологического процесса выращивания монокристалла с целью применения результатов в учебном процессе можно использовать виртуальную лабораторию и метод имитационного моделирования.

Путь решения задачи

Основные процессы выращивания кристаллов из расплава достаточно подробно рассмотрены в книге Г. Мюллера [7]. Учебные лаборатории для изучения подобных процессов должны быть оснащены дорогостоящим энергоемким оборудованием, специальными расходными материалами, современными контрольно-измерительными приборами и средствами обеспечения безопасности работы. Использование виртуальной лаборатории позволяет не только справиться с этими проблемами, но и придает новые качественные особенности процессу обучения.

Однако задача в целом приобретает черты сложного объекта. Следуя [1], при декомпозиции задачи целесообразно использовать аналитическую модель внутри имитационной модели, и на первое место выступает задача визуализации процесса и реализующего его оборудования.

Созданная нами программа позволяет сначала ознакомиться с видом установки и визуализировать процесс выращивания монокристалла с элементами динамики (рис.1), включая вращение тигля и кристалла и вытягивание кристалла из расплава.

Вращение. Процесс протекает во времени, и при выращивании можно наблюдать появление неровностей, которые перемещаются вместе с кристаллом. Такую динамику мы организуем программным путем, при этом создается иллюзия вращения кристалла и тигля.

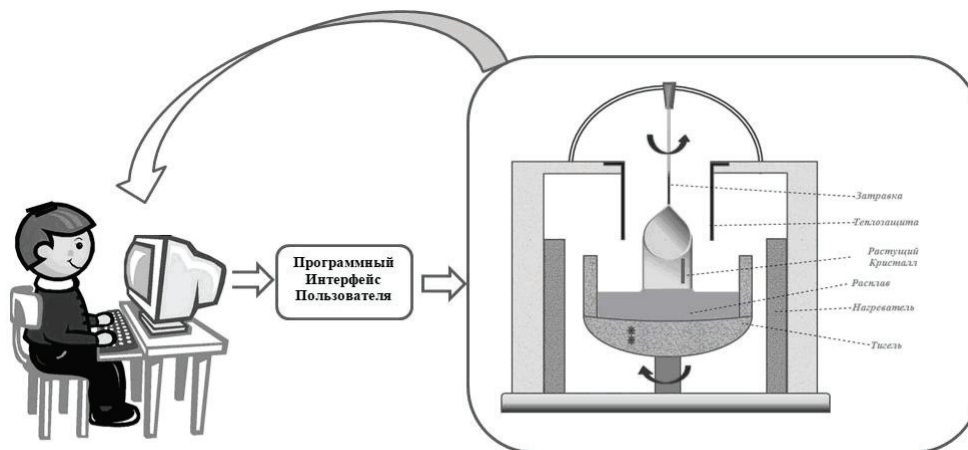


Рис.1. Этап 1. Визуализация процесса

Вытягивание. Для рисованных объектов мы имеем геометрические параметры (такие как высота, положение верхнего края растущего монокристалла и т.д.). При изменении положения верхнего края должно быть видно, как кристалл перемещается по вертикали. При этом его нижняя часть должна оставаться в расплаве. На сколько мы изменим ординату сверху, на столько же кристалл должен вырасти снизу. Поскольку все это происходит в тех же временных рамках, что и вращение кристалла и тигля, необходимо изменять соответствующие параметры рисованного объекта в общем цикле, где организована визуализация вращения.

Более сложным представляется создание аналитической модели и моделирование управления процессом.

В технологическом процессе выращивания кристаллов много факторов. В частности, в статьях С.П. Саханского [8-10] рассмотрены основные процессы выращивания кристаллов из расплава и построения моделей управления формой, температурой и скоростью вытягивания кристаллов из расплава. В книге Г. Мюллера приведена схема [7], отражающая представление процессов, наблюдающихся при росте кристаллов, во взаимосвязи с их физическим и математическим описаниями и неоднородностями. Обобщающая схема в этой книге содержит 12 соответствующих категорий. Описание модели управления температурой при выращивании кристаллов в статье С.П. Саханского [9] содержит 14 параметров; формула для описания зависимости диаметра кристалла d от скорости вытягивания V_c и температуры расплава T содержит 6 параметров, причем 2 из них являются инвариантами, содержащими от 3 до 5 параметров.

Поэтому, вновь следуя [1], мы будем стремиться снижать размерность учитываемых переменных для возможной постановки серии прямых машинных экспериментов на исходной имитационной модели. Более того, при построении модели управления процессом нам придется дополнительно развивать результаты работы [8] в части введения в рассмотрение динамических каналов управления и оценки влияния случайных воздействий. (Заметим, к примеру, что скорость вытягивания кристалла нельзя изменить мгновенно – для этого потребовалось бы бесконечно большое ускорение и соответствующая сила). Перспективным здесь представляется создание динамических моделей и привлечение методов идентификация [11, 12].

Средства автоматизации и визуализации

Для разработки программы визуализация использована среда разработки Excel+VBA [13] и подключение функций API операционной системы Windows. Чтобы показать вращение кристалла и тигля, а также процесс роста кристалла программа содержит специальный блок моделирования и анимации [14].

Выводы

1. Рассмотрена задача разработки имитационной модели выращивания монокристалла для применения в учебном процессе как пример моделирования сложных объектов.

2. Представлен путь решения задачи с использованием базовых процессов микроэлектроники и концепции создания виртуальной лаборатории.

3. Представлены результаты, полученные на этапе визуализации процесса и предложения по созданию аналитической модели как части имитационной модели сложного динамического объекта.

Литература

1. **Соколов Б.В. и др.** Комплексное моделирование сложных объектов: основные особенности и примеры практической реализации // Тр.Седьмой Всерос. науч.-практ. конф. „Имитационное моделирование. Теория и практика“ (ИММОД-2015). М.: Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова, 2015. С. 58—81.
2. **Przemyslaw Różewski, Dmitry Novikov, Natalia Bakhtadze, Oleg Zaikin (eds.)**, New Frontiers in Information and Production Systems Modelling and Analysis. - Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 268 p. / DOI 10.1007/978-3-319-23338-3.
3. **Потрясаев С.А.** Комплексное моделирование сложных процессов на основе нотации BPMN. // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 11. С. 913–920.
4. **Трояновский В.М.** Концепция разработки виртуальной лаборатории для внутривузовского и дистанционного обучения. // Известия вузов. Сер. Электроника, 1999. №1-2. С. 127–132.
5. **Трухин А.В.** Об использовании виртуальных лабораторий в образовании // Открытое и дистанционное образование. 2002. № 4 (8).
6. **Троян П.Е.** Микроэлектроника: учебное пособие // Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. 346 с.
7. **Мюллер Г.** Выращивание кристаллов из расплава. Конвекция и неоднородности. М.: Мир, 1991. 143 с.
8. **Саханский С.П.** Модель управления формой при выращивании монокристаллов германия. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 6. С. 2–5.
9. **Саханский С.П., Баркин С.М.** Модель управления температурой при выращивании кремния. // Вестник СибГАУ. 2010. № 3(29). С. 149–153.
10. **Саханский С.П., Якобсон М.Е.** Модель управления скоростью вытягивания монокристаллов кремния. // Вестник СибГАУ. 2010. № 5(31). С. 254–258.
11. **Бахтадзе Н.Н., Сакрутина Е.А.** The Intelligent Identification Technique with Associative Search // International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 2015. Vol. 9. P. 418–431.
12. **Трояновский В.М.** Информационно-управляющие системы и прикладная теория случайных процессов: Учебное пособие. М.: Гелиос АРВ, 2004. 304 с.
13. **Румянцева Е.Л., Трояновский В.М.** Инструментальная среда MS Excel как средство организации данных, диалога и презентаций в информационных системах. // Мир ПК/ №5 май 2004/ С. 72–74.
14. **Чжо Наинг Сое.** Элементы информационных технологий для моделирования процессов выращивания монокристаллов кремния // Труды 9-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы информатизации в науке, образовании и экономике – 2016»/ М.: МИЭТ/ С.67.