

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ПУТЕМ КОНСТРУИРОВАНИЯ МАСОК НА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА

Антон ЧЕРНЯВСКИЙ, Людмила ГРАМОВИЧ\*

DMIB, gr. IBM-192, FCIM, Национальный Центр по Изучению и Тестированию Материалов,  
Технический Университет Молдовы, Кишинёв, Республика Молдова

\*Autorul corespondent: Грамович Людмила, [gramovici.ludmila@mib.utm.md](mailto:gramovici.ludmila@mib.utm.md)

**Аннотация.** В данной статье рассматривается способ создания имитационной модели электрического травления путем конструирования специально разработанных масок с помощью движка Unity. В зависимости от нанесенной маски можно предугадать рост пор, согласно данным полученным в результате исследований и проведения практических экспериментов. В конечном итоге разработка моделирования роста пор при использовании фотолитографических масок разных форм позволит сократить число экспериментальных экспериментов.

**Ключевые слова:** электрохимия, поры, нанотехнология, маска, фоторезист, движок Unity.

### Введение

Развитие нанотехнологий позволило разработать различные шаблоны, с помощью которых получают сборки нанопроводов и нанотрубок из различных материалов с определенным диаметром и длиной. Все это стало возможно благодаря электрохимии, которая представляет собой экономически эффективный инструмент для введения пористости в полупроводники, и предполагает доступный и экономичный метод для образования отверстий в полупроводниковых материалах [1].

Суть данного метода в том, используя природу поведения материала при прохождении электрохимического травления, можно получить специфическую архитектуру распространения пор на поверхности полупроводниковых подложек. При этом основное внимание уделяется выращиванию пор и изменения поведения движения этих пор за счет нанесенной маски, которая может быть изготовлена с помощью литографического процесса. Также следует сказать, что поведения при росте пор такого: поры образуются поперек поверхности материала, а в области столкновения с границами фоторезистора образуются параллельно поверхности под фоторезистором. Учитывается, что между двумя соседними порами расстояние остается неизменным и всегда одинаково точным -  $2W$ . Нанесенная маска может быть разных форм и размеров и в зависимости от этого, поры растут согласно условиям, описанным выше.

Стоит отметить, что на данный момент наибольший интерес представляет именно исследование механизмов распространения и взаимодействия пор, находящихся непосредственно под маской и создающих определенные, изучаемые алгоритмы, полезные для дальнейшего расширения области применения данной технологии.

Узнать больше об этом процессе можно из статьи Electrochemical Deposition by Design of Metal Nanostructures [2].

### Постановка проблемы

Электрохимическое травление наноматериалов представляет собой довольно трудоемкий с точки зрения прогнозирования результатов процесс по ряду причин, среди которых: крайне маленький размер как материалов, так и, следовательно, возникающих в процессе травления пор и воронок, из-за чего иногда точно считать результаты опыта может быть сложно; отсутствие достаточной технической базы для более детального исследования

процесса травления, в том числе в связи с отсутствием приложений для высокоточного воспроизведения данного процесса; математическая и алгоритмическая сложность не автоматизированного расчета траектории движения и взаимодействия различных дорожек травления.

В данном контексте также важно уточнить, что в качестве проблемы данной работы ставится именно изучение и попытка воспроизведения алгоритмов распространения архитектуры пор при электрохимическом травлении с участием фоторезистивной маски при помощи вычислительных мощностей современных компьютерных технологий.

### **Потенциальное решение и симплификации условия**

Для решения задачи такого масштаба необходимо разбить полный процесс решения на подзадачи и ввести некоторые симплификации к постановке условия задачи для концентрации работы конечного приложения на исследовании интересующей нас части процесса травления наноматериалов. Начнем с упрощений, вводимых для решения поставленной задачи: 1) Так как нас интересует механизм условно горизонтального взаимодействия, рассмотрен будет только верхний горизонтальный слой наноматериала; 2) Изучение построения дорожек в зонах нахождения фоторезистивных масок позволяет не воссоздавать полный механизм построения пор в зонах травления, так как известно, что в таких зонах оно хаотично и в данный момент меньше нуждается в доп. исследованиях; 3) Так как механизм столкновения и изменения траектории распространения пор изучен не до конца, для реализации столкновения будет использована реалистичная имитация, основанная на существующих экспериментах.

Данную задачу можно условно разделить на 3 составные части:

1) Разработка механизма создания шаблонного экземпляра наноматериала с нанесенной маской, с возможностью настраивания размеров экземпляра, фоторезистора и настройкой размеров и форм зон травления (то есть с отсутствием маски); 2) Обработка генерации распространяемых пор на основе существующих понятий о минимальном расстоянии между дорожками, а также в зависимости от формы фоторезистирующей маски (механизм обработки входных данных); 3) Воспроизведение механизмов распространения и взаимодействия пор под фоторезистирующей зоной, вывод полученного результата.

Для решения такой задачи необходимо создать приложение или симуляционную программу, соответствующую описанным выше условиям и упрощениям, с учетом удобства использования для пользователей для существенного ускорения процесса построения и проведения симуляций работы изучаемого процесса.

### **Выбор среды разработки приложения**

Для реализации приложения, соответствующего поставленным условиям, стоит отталкиваться от уже существующих сред симуляций с уже существующими механизмами физического взаимодействия и с достаточной гибкостью для имплементации необходимых деталей для стабильной работы симуляций, а также с достаточным уровнем оптимизации для облегчения проведения симуляций, реализации их для больших размеров наноматериалов, а также возможного распространения полученного приложения в качестве учебного пособия и расширения масштабов изучения явления травления наноматериалов.

Исходя из этого, стоит рассмотреть несколько возможных подходящих сред разработки:

- 1) **Unreal Engine** - среда разработки видеоигр с мощной системой как физических, так и стандартных пространственных взаимодействий и, как следствие, широкими возможностями по симуляции реалистичной модели изучаемого явления с высокими графическими составляющими. К сожалению, сложность и частичное отсутствие гибкости реализации и чрезмерная реалистичность делают эту среду не оптимальной для решения такой задачи.

- 2) **PyGame** - расширение (фреймворк) для разработки на языке программирования Python, позволяющий крайне гибко подходить к процессу разработки в связи с большой гибкостью самого языка, а также из-за детального процесса создания и взаимодействия объектов и систем. К сожалению, необходимость большой дополнительной реализации базовых систем можно отнести и к минусам данной среды разработки, а в дополнение к сравнительной медлительности работы оригинального Python получаем, что данный вариант также будет сложно использовать для решения поставленной задачи.
- 3) **Unity** - глобальная среда разработки, созданная для реализации самых разнообразных проектов и особенно удобная для создания “инди” проектов (то есть проектов с маленьким количеством членов команды разработки), преимущественно за счет своей относительной простоты базового освоения, широкой популярности и доступности, а также большим множеством готовых решений со стороны самой среды и пользовательских расширений. По этим и ряду других причин для решения поставленной задачи нами была выбрана **именно эта** среда разработки.

### Создание приложения

Процесс создания приложения, как упоминалось ранее, будет состоять из трех этапов, о них и поговорим:

- 1) Механизм создания и изменения шаблона наноматериала для последующего травления реализуется на понятии о двумерных массивах, а также изменения и отображения данных, перезаписывания данных в режиме эдитинга в среде разработки Unity. Механизм заключается в создании шаблонной платы по заданным параметрам (рис. 3), после чего создается визуальный экземпляр, где каждую клетку можно настраивать в режиме реального времени для достижения комфортной формы для последующей имитации процесса травления (рис. 4).

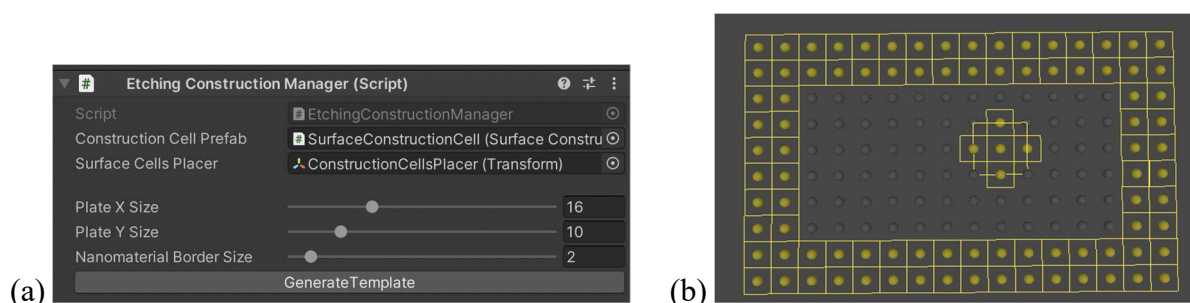


Рисунок 3. Изображения со среды Unity.

(a) Пример конструктора шаблона. (b) Пример визуализированной платы

- 2) Механизм обработки и генерации входных данных осуществляется на основе проверки физических коллизий двух соседних элементов, расстояние между которыми составляет минимальную дистанцию между двумя дорожками ( $2W$ ) и создается на стыках переходов от пространства травления к пространству маски. В данном контексте каждая клетка самостоятельно создает рейкасты - специальные физические лучи, проверяющие, возможно ли поместить в данном месте начало дорожки или нет на основе физ. взаимодействия клеток. Как итог, строятся начальные элементы и направления их движений.
- 3) Механизмы распространения дорожек травления основаны на физическом распространении и взаимодействии имитационных частиц с теми симплификациями, что были введены нами для упрощения проведения симуляций. В данном контексте каждая частица и её след движения воссоздают алгоритм физического взаимодействия с соседними клетками для изменения курса при столкновении (считается, что область взаимодействия немного больше размера дорожки для сохранения расстояния между дорожками), так все элементы будут хаотично сталкиваться до их полной остановки, когда программа регистрирует финальный рисунок - результат текущей симуляции.

### **Выводы**

Разработка приложения для генерации процесса травления позволяет решить задачи, поставленные в данной работе, а именно: расширение масштабов исследования процессов травления наноматериалов с применением фоторезистора, облегчения проведения опытов для поисков новых структур, расширение представлений о способах и методах травления.

Дальнейшее применений данной технологии:

Следует заметить, что полученную архитектуру в результате экспериментов, можно воспринимать как каркас нанометрических размеров для моделирования нанообъектов.

Области применения безграничны включая микрофлюидике, наноэлектронику, нанофотонику и прочие.

**Благодарность.** Отдельное спасибо dr., conf. Eduard Monaico за поддержку и предоставленную возможность проявить себя, за необходимую помощь в ходе написания работы. А также за неотъемлемый вклад в науку и за экспериментальную работу над электрическим осаждением наноматериалов, при отсутствии которой не состоялось бы наше дальнейшее исследование.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования, культуры и исследований Республики Молдова № 20.80009.5007.20.

### **Литература**

1. MONAICO, E., TIGINYANU, I., URSAKI, V. (2020), Porous semiconductor compounds. *Semiconductor Science and Technology*. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab9477>
2. ED.MONAICO, E.I.MONAICO, V.V.URSAKI, I.M.TIGINYANU, and K.NIELSCH. *Electrochemical deposition by design of metal nanostructures*. Vol. 55, No. 4, pp. 367 – 372 (2019)
3. Unity User Manual 2020.3 (LTS) - <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html>
4. Unity User Manual 2020.3 (LTS).Collider - [Unity - Manual: Colliders](#)