

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИАТЭ НИЯУ МИФИ



Н.Г. Айрапетова

8 декабря 2014 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе
Метлицкой Алены Владимировны
«Моделирование процессов самоорганизации наноструктур при ионном
распылении поверхности полупроводников»,
представленной на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ

Актуальность темы исследования

Альтернативой существующим методам создания на поверхности полупроводников рисунка нанометрового масштаба, таким как ультрафиолетовая и электронно-лучевая литография, является самоорганизация наноструктур, позволяющая формировать упорядоченные и хаотические наноструктуры непосредственно на поверхности кремниевой пластины. Преимущество технологии, основанной на явлении самоорганизации, заключается в том, что она позволяет формировать массивы наноструктур (например, тренчей или нанопроволок) одновременно на всей поверхности растра. В связи востребованностью данной технологии, теоретическое исследование явлений самоорганизации наноструктур при ионном распылении поверхности, становится актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время процесс самоорганизации наноструктур при эрозии поверхности полупроводников ионной бомбардировкой недостаточно изучен. Применением явления самоорганизации наноструктур занимается сравнительно узкий круг исследователей, из которых практических значимых

результатов добилась группа В.К. Смирнов. Группой разработаны экспериментальные основы технологии формирования массивов высокоаспектных упорядоченных и хаотических наноструктур с характерными размерами от 100 до 20 нм.

В научной литературе развитие поверхностной топографии при ионном распылении, в частности образование волнообразного нанорельефа, описывается с использованием различных математических моделей, из которых наиболее распространенной является модель М. Бредли и Дж. Харпера. Наряду с этой моделью в работе Метлицкой А.В. рассматривается так называемая пространственно-нелокальная модель эрозии, принадлежащая к классу дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. Ранее это уравнение не исследовалось и его динамика практически не изучена.

Цели и задачи исследования

Целью работы Метлицкой А.В. является исследование математических моделей эрозии поверхности ионной бомбардировкой и выявление на основе полученных результатов механизма формирования волнообразного нанорельефа.

Поставленная цель достигается путем решения следующих задач:

- исследование устойчивости состояний равновесия в рамках нелокальной модели эрозии;
- исследование устойчивости однородных состояний равновесия уравнения Бредли-Харпера;
- сопоставление механизмов формирования волнообразного нанорельефа в рамках нелокального уравнения эрозии и уравнения Бредли-Харпера с экспериментальными данными.

Научная новизна

Новыми являются результаты, раскрывающие механизмы формирования наноструктур в процессах ионного распыления:

- состояния равновесия в виде плоского профиля и пространственно-неоднородные решения в виде террас для нелинейного нелокального уравнения эрозии;
- условия устойчивости плоского профиля и пространственно-неоднородных решений нелинейного нелокального уравнения эрозии;
- волновые решения пространственно-нелокального уравнения эрозии, линеаризованного на нулевом состоянии равновесия;

- результаты анализа периодической краевой задачи для одной из версий уравнения Бредли-Харпера методами качественной теории дифференциальных уравнений с бесконечномерным фазовым пространством (пространством начальных условий);
- механизм возникновения широкого класса пространственно-неоднородных форм рельефа, который формируется в процессе ионной бомбардировки;
- асимптотические формулы для пространственно-неоднородных форм рельефа и условия их устойчивости, т.е. условия их физической реализуемости.

Эти результаты получены с использованием метода инвариантных многообразий, нормальных форм, а также асимптотических методов анализа, и, следовательно, являются строго обоснованными с математической точки зрения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные в диссертационной работе результаты представляют интерес для интегральной электроники как теоретические основы безмасочной и безрезистной литографии и как основы пучковых технологий. Результаты работы объясняют ряд экспериментальных фактов, таких как формирование террас и волнообразного нанорельефа. В ходе анализа моделей эрозии выделен управляющий параметр – коэффициент диффузии, определяющий устойчивость рассматриваемой системы, определены его критические значения и области устойчивости состояний равновесия. Полученные асимптотические формулы и дисперсионные соотношения позволяют рассчитать параметры волнообразного нанорельефа и выбрать режимы распыления, обеспечивающие требуемые геометрические параметры волн.

Результаты работы найдут применение при разработке ряда технологических процессов, основанных на самоорганизации волнообразного нанорельефа на поверхности кремния.

Степень достоверности и апробация результатов

Все полученные результаты строго обоснованы и сформулированы утверждения в виде лемм и теорем, для которых приведены математические доказательства. Методики, примененные в данной работе, аргументированы и основаны на известных результатах качественной теории дифференциальных уравнений.

В работе использованы современные методы анализа динамических систем:

- метод интегральных многообразий;
- аппарат теории нормальных форм Пуанкаре-Дюлака;
- асимптотические методы анализа;
- спектральная теория дифференциальных операторов,

что позволило получить выносимые на защиту результаты. Результаты работы апробированы на научном семинаре «Нелинейной динамики и синергетики» ЯрГУ, представлены на расширенном заседании кафедры микроэлектроники ЯрГУ и на международных научных конференциях.

Краткое содержание работы

В соответствии с целями и задачами исследования, автором выполнен обзор математических моделей эрозии поверхности ионной бомбардировкой, которому посвящена первая глава диссертации. В разделе 1.1 обзора рассмотрены основные этапы развития теории распыления поверхности ионной бомбардировкой. В разделе 1.2. рассмотрены модели, учитывающие стохастические и релаксационные эффекты высшего порядка. По результатам обзора сделан обоснованный вывод о недостатках как самих моделей, так подходов, используемых при их анализе. В частности о необходимости нелинейного анализа уравнения Бредли-Харпера, т.к. все выводы относительно его применимости в литературе по теории распыления основаны только на результатах анализа линеаризованного уравнения.

Вторая глава диссертации Метлицкой А.В. посвящена пространственно-нелокальной модели эрозии. В разделе 2.1 приведен подробный вывод уравнения эрозии, учитывающего нелокальность процесса распыления. А в разделе 2.2 выполнены регуляризация и обезразмеривание нелокального уравнения, которые необходимы для последующего анализа. В следующем разделе показано существование состояний равновесия в виде плоскостей и пространственно-неоднородных решений в виде террас и определены условия их устойчивости. Получен безразмерный комплекс параметров, определяющих устойчивость состояний равновесия, и определены его критические значения. В разделе 2.4 были получены волновые решения пространственно-нелокального уравнения эрозии, линеаризованного на нулевом состоянии равновесия. Примечательно, что при численном анализе динамики вещественной части собственных значений оператора имеет место бифуркация коротковолновых мод, а длина волны не зависит от размеров растра. Для

нелокальной модели было показано, что при потере устойчивости плоского профиля от состояния равновесия бифурцируют решения в виде высокомодовых бегущих волн.

В третьей главе автором рассмотрена модель эрозии поверхности ионной бомбардировкой, которую в теории распыления называют моделью Бредли-Харпера. Уравнение Бредли-Харпера рассматривается применительно к распылению цилиндрической поверхности, т.е. поверхности вида $z=f(x)$, поскольку именно такой рельеф формируется в большинстве случаев и представляет интерес с точки зрения его практического использования. В разделе 3.1. приведена постановка краевой задачи для уравнения Бредли-Харпера. Показано, что состоянием равновесия данной краевой задачи является так называемый плоский профиль, устойчивость которого исследуется в следующем разделе. На основании проделанного анализа автором сформулирована теорема об устойчивости нулевого решения линейной краевой задачи для уравнения Бредли-Харпера.

Далее в разделе 3.3. выполнен анализ нелинейной краевой задачи. В разделе 3.4 построена нормальная форма, анализ которой позволил автору вывести условия, при которых может быть сформирован пространственно-неоднородный (волновой) рельеф. Для соответствующих решений краевой задачи получены асимптотические формулы и выведены условия их устойчивости, т.е. условий их физической реализуемости.

Замечания по диссертации

Недостатком работы является различие в уровнях строгости аргументации, содержащейся во второй и третьей главе диссертации. Например, в разделе 2.3.1. есть некоторое противоречие между утверждением, что в работе используется детерминистический подход, и применением принципа минимального производства энтропии для определения параметров формирующихся хаотических структур в виде террас. Непонятно также, почему соискатель исследует устойчивость состояний равновесия в виде террас в разделе 2.3.2 при одних периодических условиях, а в разделе 2.4. при построении волновых решений, выбран другой период. Хотя и очевидно, что качественного различия между результатами быть не может, в работе этот момент никак не комментируется.

Приведенные выше замечания не являются существенными и не снижают общего положительного впечатления от работы, как законченного научного исследования, содержащего новые научные и практически значимые результаты.

Автореферат и опубликованные по теме диссертации работы в полной мере отражают содержание, основные результаты и перспективность диссертационных исследований.

Материалы диссертации и автореферата оформлены в соответствии с действующими требованиями.

В целом, диссертационная работа Метлицкой Алены Владимировны «Моделирование процессов самоорганизации наноструктур при ионном распылении поверхности полупроводников» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор - Метлицкая А.В. заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден и принят на заседании кафедры «Компьютерные системы, сети и технологии» (Протокол №4/14 от 11 ноября 2014 год)

Заведующий кафедрой
компьютерных систем,
сетей и технологии

*249040, г. Обнинск
Калужской обл.,
Студгородок 1*



С.О. Старков