

О Т З Ы В

официального оппонента 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
(физико-математические науки)

Разработка физических и технологических основ создания элементов интегральных полупроводниковых приборов нанометрового масштаба играет основополагающую роль в развитии отечественного технологического базиса современной электроники. На текущем этапе развития наноэлектроники основные усилия исследователей и технологов направлены на совершенствование литографических методов переноса рисунка в функциональные слои интегральных микросхем.

В диссертационной работе А.В. Метлицкой в качестве альтернативы проекционной литографии рассматриваются методы формирования рисунка на поверхности в процессе самоорганизации наноструктур под действием ионной бомбардировки поверхности. Одной из наиболее распространенных форм нанорельефа, формирующегося при ионном распылении поверхности, являются волнообразный нанорельеф (ВНР) и риплы. Эти структуры могут играть роль наномаски при последующих технологических процессах изготовления полупроводниковых интегральных приборов или их отдельных элементов. Этим и определяется актуальность темы диссертационной работы А.В. Метлицкой, которая посвящена исследованию математических моделей эрозии поверхности при ионной бомбардировке и выявлению механизмов формирования наноструктур при данных процессах. При этом работа направлена на разработку теоретических основ так называемых пучковых технологий формирования массивов нанопроволок, тренчей и подобных им наноструктур.

Диссертация Метлицкой А.В. состоит из трех глав, содержащих:

1. аналитический обзор литературы;
2. вывод и анализ нелокального уравнения эрозии;
3. исследование модели Бредли-Харпера

и заключения.

Первая глава, которая посвящена обзору математических моделей эрозии, содержит два раздела, первый из которых посвящен истории развития теории распыления, а второй описанию стохастических и релаксационных эффектов. По результатам главы сделан обоснованный вывод о необходимости использования нелинейных уравнений для качественного описания, учитывающего все основные параметры

сформированного рельефа. В частности, автором учитывается один из важнейших параметров – амплитуда получаемого рельефа. В первой главе также упомянуто, что общепризнанной моделью на сегодняшний день является модель Бредли-Харпера (уравнение Курамото-Сивашинского). Однако в обзоре не приведены современные работы, посвященные исследованию данной модели. Первую главу следовало бы дополнить актуальными публикациями по математическому моделированию для уравнения Бредли-Харпера (Курамото-Сивашинского), чтобы более четко обозначить актуальность тематики диссертационной работы.

Во второй главе диссертации Метлицкой А.В. содержится вывод нелокального уравнения эрозии, которое впервые предложенного авторским коллективом, членом которого она является. В разделах второй главы автором исследуются состояния равновесия нелокальной и нелинейной модели в форме так называемых террас и плоскостей. Террасы, являющиеся конечной стадией эволюции всех экспериментально наблюдаемых в процессах распыления диссипативных структур, аппроксимируются линейным функциями. Выполнен анализ устойчивости этих состояний равновесия и определены условия потери устойчивости. Определены области существования террас на плоскости экспериментальных параметров и проведено их сопоставление с экспериментальными данными.

Исследованы периодические решения краевой задачи, линеаризованной на нулевом состоянии равновесия, и определены критические значения коэффициента диффузии, выполняющего роль управляющего параметра. Показано, что при потере устойчивости от нулевого состояния равновесия бифурцируют решения, описывающие высококомодовые бегущие волны. Полученные результаты сравниваются с альтернативными моделями формирования ВНР, например, вследствие развития гидродинамических неустойчивостей. Основным результатом анализа пространственно-нелокальной модели является обоснование принципиальной возможности формирования наиболее интересного с практической точки зрения коротковолнового волнообразного нанорельефа.

В третьей главе исследованы механизмы формирования волнового нанорельефа в рамках модели Бредли-Харпера при эрозии поверхности ионной бомбардировкой. Показано, что такой рельеф может появиться в результате ионной бомбардировки при потере устойчивости плоского профиля, которая возникает при малом значении «коэффициента диффузии» или большой интенсивности потока бомбардирующих ионов. Для нелинейной краевой задачи построена нормальная форма и определены режимы бифуркации волновых решений от нулевого состояния равновесия. Для данной задачи получены условия существования диссипативных структур, которым соответствуют экспериментально наблюдаемые микро- и нановолны. Также в работе сделан вывод о том, что согласно модели Бредли-Харпера одной из причин формирования неоднородного рельефа является

смена устойчивости однородных состояний равновесия, т.е. процесс самоорганизации.

Необходимо отметить, что при знакомстве с работой возникает ощущение некоторой недосказанности. Во-первых, в заключении явно не хватает рекомендаций по практическому применению результатов работы и не даны рекомендации по дальнейшему развитию тематики диссертационного исследования. Хотелось бы добавить в диссертацию главу, либо подраздел, содержащий практическую часть, на основании которой можно было бы сделать вывод о применимости результатов исследования. Однако замечания носят лишь рекомендательный характер и не влияют на, безусловно, положительное впечатление от диссертационного исследования Метлицкой А.В.

Не смотря на то, что задача исследования требует весьма специфических знаний в области взаимодействия ионов с поверхностью, работа Метлицкой А.В. выполнена на высоком профессиональном уровне. Результаты исследования обладают новизной, имеют теоретическую и практическую ценность, а также апробированы на международных научных конференциях. Работа является законченным научным исследованием и соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней». Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

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. достойна присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Доктор физико-математических наук,
профессор, ведущий научный сотрудник
кафедры физической электроники
физического факультета МГУ имени М.В.
Ломоносова

119991, ГСП-1, Москва
Ленинские горы, МГУ имени
М.В.Ломоносова

дом 1, строение 2, Физический факультет
e-mail: chernysh@phys.msu.ru

тел. +7(495)939 19 89

08.12.2014

Декан физического факультета МГУ



В.С. Черныш

Н.Н.Сысоев