

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

Диссертация А.В. Метлицкой посвящена решению актуальной проблемы микро- и наноэлектроники – построению математической модели процессов самоорганизации наноструктур при ионном распылении поверхности твердых тел. Наибольший интерес представляет случай распыления кремния, для которого в диссертации выполнены расчеты критических значений управляющих параметров и длины волны волнообразного нанорельефа. В настоящее время процесс самоорганизации наноструктур на кремнии составляет основу интенсивно развивающейся безмасочной и безрезистной разновидности литографии – технологии формирования рисунка нанометрового масштаба на поверхности кремния. Работа А.В. Метлицкой призвана заложить теоретические основы новой разновидности литографии, получившей название пучковой технологии, и широко используемой не только в интегральной электронике, но и в методах анализа поверхности и полупроводниковых структур.

В диссертационной работе А.В. Метлицкой исследованы две основные математические модели, используемые при описании развития поверхностной топографии при эрозии поверхности полупроводников ионной бомбардировкой – модель Бредли-Харпера и нелокальная модель эрозии. Выбор модели Бредли-Харпера сделан по результатам анализа литературных источников, приведенного в первой главе диссертации. Нелокальная модель эрозии, судя по публикациям, предложена и исследована авторским коллективом, членом которого является А.В. Метлицкая. Хотелось бы отметить, что в ходе анализа литературных источников автором выявлен ряд неточностей, допущенных в некоторых публикациях, наиболее серьезной из которых является знак диффузионного члена в уравнении эрозии. Первая глава диссертации содержит четкие комментарии к выявленным неточностям, что позволило автору избежать ошибок при постановке краевых задач, анализ которых составляет содержание двух следующих глав диссертации.

Вторая глава диссертации А.В. Метлицкой посвящена анализу нелокальной модели эрозии поверхности ионной бомбардировкой. В данном случае под нелокальностью понимается пространственная удаленность точки выхода вторичного иона от точки удара первичного иона. Учет этой особенности процесса распыления, несущественной при описании эрозии макроскопического рельефа, при моделировании эрозии рельефа нанометрового

масштаба приводит к появлению в уравнении эрозии так называемого отклоняющегося аргумента. Выводу нелокального уравнения эрозии посвящен первый раздел второй главы диссертации. Во втором разделе второй главы выполнена регуляризация и обезразмеривание уравнения эрозии и выбраны нормировки, приводящие уравнение к наиболее простому виду.

Собственно анализ нелокального уравнения эрозии, состоящий из исследования его состояний равновесия, их устойчивости и периодических решений, выполнен в третьем разделе второй главы диссертации. Одним из основных результатов анализа является построение решений в виде наклонных плоскостей, являющихся одной из наиболее устойчивых хаотических форм рельефа, развивающегося при ионной бомбардировке. Следует отметить, что при постановке задачи, ввиду очевидной невозможности постановки граничных условий для отыскания постоянных интегрирования, автором использован принцип минимальной скорости распыления, эквивалентного в данном случае минимальному производству энтропии.

Построению периодических решений посвящен четвертый раздел второй главы диссертации. В разделе рассмотрена краевая задача с периодическими граничными условиями. Показано, что выше определенного значения управляющего параметра вещественные части точек спектра устойчивости переходят в отрицательную полуплоскость. Таким образом, состояние равновесия в виде плоскости теряет устойчивость, а от него бифурцируют решения в виде высокомодовых бегущих волн.

Экспериментальные исследования в области эрозии поверхности ионной бомбардировкой базируются на ряде моделей, из которых общепринятой считается модель Бредли-Харпера. Эта модель имеет вид нелинейного дифференциального уравнения четвертого порядка, являющегося одной из модификаций уравнения Курамото-Сивашинского. В третьей главе диссертационной работе исследована периодическая краевая задача для одной из версий уравнения Бредли-Харпера методами качественной теории дифференциальных уравнений с бесконечномерным фазовым пространством (пространством начальных условий). Выведены 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.

Однако работа имеет и ряд недочетов. Действительно, в виду большого числа параметров, определяющих процесс формирования наноструктур при ионном распылении поверхности, их экспериментальный подбор для получения нанорельефа, а тем более нанорельефа требуемого типа является трудоемкой задачей. В то же время, математические модели, адекватно описывающие процессы развития микроскопического рельефа (уравнение Бредли-Харпера) и нанорельефа (нелокальное уравнение эрозии) при распылении, позволяют решить эту задачу без дорогостоящего эксперимента. Используя результаты работы можно локализовать область пространства технологических параметров, в которой существуют требуемые виды нанорельефа. Та-

ким образом, были бы даны четкие рекомендации по дальнейшему использованию результатов диссертации. Однако это замечание носит частный характер и не ставит под сомнение основные результаты работы.

Диссертация Метлицкой Алены Владимировны является законченной научно-исследовательской работой, выполненным автором на высоком профессиональном уровне. Все результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов анализа динамических систем, математически строго обоснованы, содержат утверждения в виде лемм и теорем, имеющих математические доказательства. Полученные результаты апробированы на международных конференциях и опубликованы в профильных научных журналах.

Работа написана хорошим литературным языком и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. Автореферат и публикации отражают основное содержание диссертации.

Диссертационная работа отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Метлицкая Алена Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент
профессор кафедры теоретической
физики МГОУ,
д.ф-м.н., проф.

08.12.2014

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 10А.
e-mail: yushkanov@inbox.ru



А.А. Юшканов

