

## У Т В Е Р Ж Д А Ю

Заместитель директора ФГБУН  
«Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова  
Российской Академии наук»,

К.Ф.-М.Н.

И.Н. Барабанов

12 января 2015 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертации Серegiной Елены Владимировны «Использование проекционного метода для математического моделирования стохастического распределения неосновных носителей заряда в полупроводниковых материалах», представленной к защите в диссертационном совете Д 002.024.03 при Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**Актуальность диссертационной работы** Серegiной Е.В. обосновывается тем, что коэффициенты в дифференциальных уравнениях, описывающих достаточно большое число явлений и процессов, могут иметь случайный разброс в своих значениях, что, естественно, может влиять на решения таких уравнений. Серegiной Е.В. в качестве объекта исследования, на примере которого показана возможность учета такого явления, выбраны дифференциальные уравнения, описывающие процесс диффузии неосновных носителей заряда (ННЗ) в однородных полупроводниковых материалах. Рассмотрено воздействие широких электронных и световых пучков на полупроводники, в результате чего в последних возникают неравновесные ННЗ; вследствие наличия градиента концентрации носителей заряда возникает диффузионный процесс, описываемый обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка. Отметим, что широкие электронные и световые пучки на практике используются для решения различных физических, технологических и

других задач, например, в полупроводниковых фотоприемных устройствах различного назначения, для диагностики электрофизических параметров полупроводников и т.п. В таких объектах исследования для получения количественной информации о полупроводниковом материале как правило необходимо знать распределение неравновесных ННЗ, генерированных внешним энергетическим воздействием, после их диффузии в мишени. На практике локальные значения электрофизических параметров полупроводниковых материалов в силу ряда причин могут иметь случайный разброс относительно своих усредненных по объему значений, и не исключено, что наличие такого разброса в значениях локальных параметров может оказать существенное влияние на процесс диффузии и на распределение неравновесных ННЗ в объеме полупроводника, а в последующем и на характеристики полупроводникового прибора. Для решения рассматриваемого в диссертационной работе класса задач весьма полезным может оказаться использование проекционного метода, который ранее для математического моделирования стохастического распределения ННЗ в полупроводниковых материалах не использовался. В силу вышеизложенного диссертационная работа имеет несомненную научную новизну и практическую значимость.

**Целью диссертационной работы** Серегиной Е.В. являлось решение задачи статистического анализа диффузии неосновных носителей заряда (ННЗ) проекционным методом с учетом случайной составляющей в электрофизических параметрах полупроводника (времени жизни, коэффициента диффузии и скорости поверхностной рекомбинации ННЗ) и проведение вычислительного эксперимента по выявлению закономерностей в результатах развития стохастического процесса диффузии ННЗ по глубине полупроводникового материала.

Для достижения поставленной в работе цели сформулированы конкретные задачи исследования, выполнение которых позволило получить новые результаты, и сформулировать положения, выносимые на защиту: 1) метод построения стохастической математической модели одномерной диффузии неравновесных ННЗ в полупроводниковых материалах; 2) схема проекционной аппроксимации, основанная на применении метода наименьших квадратов, для математической модели диффузии ННЗ по глубине в полупроводниках; 3) метод решения задачи анализа диффузии ННЗ со случайными электрофизическими параметрами, основанный на использовании проекционной модели; 4) результаты статистического анализа диффузии ННЗ в

полупроводнике, полученные путем проведения вычислительного эксперимента.

**Структура диссертационной работы** имеет классический характер: первая глава диссертации носит обзорный характер – в ней описано современное состояние проблемы исследования моделей стохастических явлений и систем. На основе анализа литературных данных сформулированы задачи исследования; во второй, третьей и четвертой главах изложен материал, полученных диссертантом самостоятельно, при этом в четвертой главе работы проведено сравнение результатов, полученных в диссертационной работе, с имеющимися опубликованными данными по рассматриваемой тематике. В конце каждой главы делаются выводы, суммирующие полученные результаты; после четвертой главы сделано заключение, суммирующее все результаты, полученные в диссертационной работе. Затем дан список сокращений, после которого – список литературы. После списка литературы приведены тексты программы, реализующей проекционный метод статистического анализа диффузии неосновных носителей заряда в классических полупроводниковых материалах.

**Следует особо отметить**, что предложенный Серegiной Е.В. подход к решению рассматриваемой задачи можно считать универсальным, поскольку его применение не ограничивается гипотезой о нормальности закона распределения коэффициентов дифференциального уравнения; этот метод можно распространить на любую корректную краевую задачу для любого линейного дифференциального уравнения в частных производных.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна.** Научные положения и также выводы, сформулированные в диссертации, их достоверность и научная новизна хорошо аргументированы и обоснованы.

**Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки.** Тема и содержание диссертации соответствует научной специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Полученные Серegiной Е.В. результаты имеют большое значение для развития математического моделирования явлений тепломассопереноса и развития проекционных методов численного решения таких задач, а разработанные программы могут служить основой для создания программного обеспече-

ния, пригодного для практического использования разработчиками полупроводниковых устройств и приборов.

**Замечания.** Работа не лишена недостатков. Ниже указаны некоторые из них:

- 1) на странице 33 диссертации в правой части формулы (1.20), которая определяет матрицу дифференцирования в базисе модифицированных функций Лагерра, вместо  $\gamma D$  должно быть  $\gamma \tilde{D}^T$ ;
- 2) в работе упоминается о том, что разработано программное обеспечение для эффективного компьютерного моделирования стохастического явления диффузии ННЗ в полупроводниках с учетом возможности параллельных вычислений, однако, в программе, которая приведена в приложении, отсутствует поддержка распараллеливания на уровне исходного кода;
- 3) в приложении на странице 142 в описании функции Diflg\_upt, которая вычисляет матрицу дифференцирования в базисе модифицированных функций Лагерра, приведены операторы, которые реализуют общий алгоритм формирования матрицы дифференцирования, основанный на дифференцировании базисных функций. Очевидно, что было бы экономичнее реализовать алгоритм формирования этой матрицы, используя формулу (1.21), т.е. не прибегая к операции дифференцирования;
- 4) в доказательстве леммы 4, которое приведено на странице 47, было бы желательно пояснить, как именно получается тождество  $D\Delta\tilde{p}_h \equiv (D\Delta\tilde{p})_h$  или привести этот вывод полностью;
- 5) в разделе 4.3 4-й главы диссертации следовало бы глубже рассмотреть задачу идентификации электрофизических параметров, которые обеспечивают приемлемую точность совпадения экспериментальных данных с расчетными. Судя по всему, эти параметры автор установил обычным подбором.

Вместе с тем качество и количество материала, приведенного в диссертационной работе, позволяет говорить, что имеющиеся недостатки не снижают в целом высокой ценности выполненных исследований и не могут повлиять на положительную оценку работы.

**Соответствие диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.** Диссертация Серегиной Е.В. является законченной научно-квалификационной работой, в ко-

торой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний (математического моделирования).

Диссертация написана единолично, содержит совокупность новых научных результатов и положений, выдвигаемых автором для публичной защиты, имеет внутреннее единство и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Предложенные автором решения аргументированы и критически оценены по сравнению с другими известными решениями. В диссертации имеются рекомендации о возможностях практического использования разработанных методов. Оформление диссертации соответствует требованиям, установленным Министерством образования и науки РФ.

Результаты выполненного исследования представлены в 19 научных трудах, 8 из которых опубликованы в журналах и изданиях из перечня ВАК Минобрнауки РФ. Апробация работы проведена на ряде международных и российских научных конференций по тематике исследований, а также на научных семинарах Института математического моделирования РАН и Калужского государственного университета им. К.Э. Циолковского.

В тексте диссертации даются ссылки на авторов и источники, откуда диссертант заимствует материалы или отдельные результаты; в списке литературы указаны ссылки на 144 источника; анализ списка литературы говорит о том, что Серегина Е.В. хорошо ориентируется в научных публикациях по тематике своей работы. В диссертации отмечены соавторы, идеи и разработки которых использованы при выполнении работы.

В автореферате сформулирована актуальность проблемы, цель работы и задачи исследования, проведена оценка достоверности полученных результатов, изложены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту, показан личный вклад автора в проведенное исследование, имеется информация о публикациях и апробациях результатов работы, описаны структура и объем диссертации и краткое содержание работы по главам, а также основные результаты и выводы диссертации. Автореферат и опубликованные научные работы достаточно полно отражают содержание диссертации. Таким образом диссертация Серegiной Е.В. отвечает основным критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

**Вышеизложенное позволяет утверждать, что диссертационная работа Серegiной Елены Владимировны «Использование проекционного метода для математического моделирования стохастического распределения неос-**

новных носителей заряда в полупроводниковых материалах», удовлетворяет всем требованиям Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Серегина Е.В. заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании межлабораторного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской Академии наук (Протокол № 1 от 12 января 2014 г.).

Заведующий лабораторией  
"Методов и технических средств  
структурного анализа, контроля и  
прогнозирования состояния  
процессов и объектов",  
доктор технических наук,  
профессор



И.Б. Ядыкин

Ведущий научный сотрудник  
лаборатории динамических  
информационно-управляющих  
систем,  
доктор технических наук



М.М. Чайковский

117997 Москва, Профсоюзная ул., д. 65  
ИПУ РАН, <http://www.ipu.ru>, 8-495-334-80-10