

оппонента на диссертацию Толкачева Ивана Андреевича на соискание степени кандидата физ.-мат. наук по направлению 1.3.11 — физика полупроводников «Численное моделирование многопереходных фотопреобразователей оптического излучения»

В диссертации Толкачева И.А. рассматриваются физические процессы, протекающие в фотоэлектрических преобразователях, изготовленных из многослойных структур на основе твердых растворов AlGaAs. Формально, оригинальное содержание можно разделить на две основные части. Первая посвящена исследованию процессов, протекающих в преобразователях, которые могут быть использованы для солнечных элементов. В связи с этим представляло интерес поведение структур в стационарном режиме. Во второй части исследуются структуры, которые могут быть использованы в радиофотонных устройствах — формирователях электрических импульсов, управляемых оптическим сигналом. В данном случае исследовалась временная динамика отклика фотоэлектрических преобразователей на оптический импульс. В диссертации рассматриваются различные типы структур преобразователей, отличающиеся количеством электронно-дырочных переходов. Автор последовательно проводит анализ, двигаясь от простого (структуры с двумя переходами) к сложному (трехпереходные). Работа является теоретической, экспериментальные данные приводятся лишь для сравнения с оригинальными результатами расчетов, полученными с использованием системы автоматизированного проектирования TCAD.

В работе впервые проводится детальный анализ физических процессов, отвечающих за бистабильность фотопреобразователей оптического излучения. Ранее подобные исследования проводили, в основном, с упрощениями: учитывали только омические потери на туннельных переходах или проводили качественный анализ гистерезиса вольт-амперных характеристик. В немногочисленных, представленных в литературе, статьях, посвященных моделированию бистабильности фотопреобразователей, условия проведения численных экспериментов описаны недостаточно полно для последующей верификации. Автор настоящей диссертации подробно описал условия проведения расчетов, исследовал влияние множества параметров на характеристики приборов в туннельном и диффузионном режимах работы туннельного перехода, рассмотрел влияние оптической толщины слоев, степени неоднородности засветки, длительности и мощности воздействующего оптического импульса, наличия или отсутствия ловушек и туннельных переходов в структурах. Такое многообразие, безусловно, является достоинством настоящей работы.

По мнению оппонента диссертация стоит немного в стороне от основных направлений развития в области солнечной энергетики и радиофотоники. С одной стороны,

диффузионный режим работы многопереходных фотоэлектрических преобразователей является нежелательным, так как он приводит к падению коэффициента полезного действия. С другой стороны, управляемые по оптическому каналу источники электрических импульсов, используемые в фазированных антенных решетках, требуют крайне высокой мощности в гигагерцовом диапазоне, практически недостижимой с использованием линейного фотопреобразователя. Но это лишь подчеркивает актуальность работы:

1) Выбранные режимы в действительности не были достаточно изучены ранее, несмотря на длинную историю исследований, разработок и производства солнечных элементов на основе нескольких электронно-дырочных переходов, соединенных туннельными переходами.

2) Полученные результаты могут в дальнейшем найти практическое применение в других областях. Например, результаты исследования поведения туннельных диодов при наличии высоких токов смещения могут быть использованы для разработки радиотонных модулей более высокочастотных систем субтерагерцового диапазона.

Оформление диссертации не является безупречным. В первой главе оппонент не обнаружил ошибок. Но в последующих главах ошибки есть и в основном они связаны с опечатками или форматированием при подготовке электронного документа (например: некорректное представление рис.1 на стр. 22; предложение на стр. 40 составлено некорректно: «были рассчитаны профили распределения интенсивности излучения для двух значений σ , которые на показаны рисунке 8»). При этом есть и сомнительные утверждения, которых, явно, следовало бы избегать. Например:

- стр. 14: «Получение монохроматического излучения стало возможным с создания монохроматора.»

- стр. 29: «Вольт-амперные характеристики для структуры из таблицы 1 были измерены с помощью источника-измерителя Кейтли...»

- стр. 94: «...униполярные импульсы затухают в атмосфере слишком быстро.»

Кроме этого, оппонент обнаружил терминологическую путаницу в диссертации. Например, любой оптический импульс автор называет лазерным (и даже при рассмотрении не монохроматического источника - радиоизотопа с люминофором; стр. 27, 36 и т. д.), хотя когерентность в расчетах не учитывалась.

Тем не менее, следует отметить, что качество изложения материала относительно специальности является высоким. Оппонент не обнаружил явных ошибок в описании классических для физики полупроводников процессов диффузии и дрейфа носителей заряда, поглощения фотонов, рекомбинации и генерации пар носителей заряда и т. д. Представленные формулы сопровождаются пояснениями, описание расчетов является

полным и достаточным для репликации коллегами при необходимости проверки. Полученные результаты непротиворечивы и выглядят корректными с точки зрения общих физических представлений. В диссертации автор показал, что:

1) Двухпереходные преобразователи в стационарном режиме имеют два устойчивых состояния, если сила тока не превышает максимальный ток туннельного перехода. В первом состоянии имеет место туннельный ток, а во втором — диффузионный в области туннельного перехода.

2) В импульсном фотовольтаическом режиме над туннельными токами доминируют токи смещения при нано и субнаносекундном оптическом воздействии. По этой причине в многопереходных $p-i-n$ фотопреобразователях допустимо исключение встречно-включённых туннельных диодов.

3) При одновременном увеличении толщины $p-i-n$ переходов, близких к фронтальной поверхности фотопреобразователя, и уменьшении коэффициента поглощения в этих переходах эффективность монолитных многопереходных фотопреобразователей субнаносекундных лазерных импульсов увеличивается.

Данные результаты легли в основу научных положений диссертации. Однако, у оппонента вызывает сомнение формулировка первого научного положения: «Двухпереходные монолитные фотопреобразователи в стационарном фотовольтаическом режиме имеют два устойчивых рабочих состояния, если ток через фотопреобразователь не превышает пиковый ток туннельного диода. В первом состоянии эффективное фотовозбуждение имеет место в обоих переходах, а туннельный диод работает в туннельном режиме с малым падением напряжения. Во втором состоянии эффективное фотовозбуждение имеет место только в одном из переходов, второй находится в режиме холостого хода, а туннельный диод работает в диффузионном режиме с большим падением напряжения. В многопереходных фотопреобразователях аналогичный механизм приводит к множественности устойчивых внутренних состояний фотопреобразователя».

Из текста неясно, какой из переходов является первым, а какой вторым (ближе к поверхности фотопреобразователя или дальше от нее). В связи с этим возникают два вопроса к автору диссертации:

1) Чем определяется во втором состоянии двухпереходного фотопреобразователя, какой фотопереход оказывается в режиме генерации, а какой в режиме холостого хода?

2) Возможно ли для многопереходных фотопреобразователей (с числом фотоактивных переходов больше двух) возникновение различных последовательностей туннельных диодов, находящихся в туннельном и

диффузионном режимах работы, или туннельные режимы всегда возникают у диодов, лежащих ближе к освещаемой поверхности?

Кроме этого, у оппонента есть два технических вопроса относительно используемых методов расчета:

3) На рисунке 5 (стр. 31 диссертации) представлены экспериментальная и расчетная вольт-амперные характеристики. На обеих зависимостях имеет место эквидистантный шаг по напряжению. Известно, что алгоритм численного расчета TCAD исходно предполагает автоматическое изменение шага по напряжению при смещении из равновесного состояния. При хорошей сходимости шаг увеличивается, а при плохой — уменьшается. Каким образом удалось добиться равного шага в данном расчете для кривой из рис. 5?

4) При описании методов исследования на стр. 10 указывается, что переизлучение фотонов не учитывалось, хотя излучательная рекомбинация была учтена. С чем связано данное упрощение и на основании каких рассуждений оно сделано? Как изменятся результаты расчета если учесть переизлучение фотонов? Достаточно будет указать тенденцию изменений.

Несмотря на оставшиеся вопросы, можно отметить, что исследование проведено на высоком профессиональном уровне. Недостатки, в основном, касаются неточностей в изложении материала из других областей знаний (не касающейся физики полупроводников).

Считаю, что диссертационная работа Толкачева Ивана Андреевича "Численное моделирование многопереходных фотопреобразователей оптического излучения" отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 "Физика полупроводников" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Толкачев Иван Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук».

Прудаев Илья Анатольевич

кандидат физико-математических наук

ведущий инженер-конструктор

АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»

124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1,

+79138868937

iprudaev@niime.ru

25.08.2026



Подпись
Ильи Прудаева

Ильи Прудаева



Иван Андреевич Толкачев

Иван Андреевич Толкачев