

**Отзыв
официального оппонента**

о диссертационной работе Толкачева Ивана Андреевича "Численное моделирование многопереходных фотопреобразователей оптического излучения", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Актуальность темы исследования. Наряду с солнечной фотоэнергетикой, в которой ставится задача получения электрической энергии при освещении естественным широкополосным излучением, интенсивно развивается область беспроводной передачи энергии на расстояние за счет преобразования монохроматического излучения в электрическую энергию с помощью полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей. Одним из путей совершенствования таких устройств является использование монокристаллических многопереходных структур, позволяющее увеличить выходное напряжение без последовательного соединения дискретных однопереходных фотопреобразователей. Теоретическое описание и прогнозирование работы многопереходных фотопреобразователей усложняется использованием в структуре туннельных диодов, что, в силу их бистабильности, может сопровождаться возникновением нескольких устойчивых состояний фотопреобразователя. Ранее теоретическое описание многопереходных фотопреобразователей проводилось без учета этого явления. Диссертация И.А. Толкачева посвящена численному моделированию многопереходных фотопреобразователей с учетом N -образной вольтамперной характеристики используемых туннельных диодов. Особую ценность работе придаёт рассмотрение преобразования мощных субнаносекундных лазерных импульсов. Этот вопрос всё ещё остаётся недостаточно описанным в научной литературе, несмотря на его важность для радиофотонных приложений. Настоящая работа восполняет ряд пробелов в области физики многопереходных фотопреобразователей, в связи с этим тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной, а сама работа представляется необходимой и своевременной.

Новизна и достоверность результатов. В работе получен ряд новых научных результатов. Укажем некоторые из них, по нашему мнению, наиболее важные и интересные.

Первая глава содержит подробный обзор литературы. Оригинальные результаты работы изложены в последующих четырех главах.

Вторая глава посвящена моделированию однопереходного фотопреобразователя для радиоизотопного источника. Разработана модель однопереходного преобразователя излучения радиолюминесцентного оптического источника субнановаттной интенсивности на основе структуры $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$. Показано, что в силу малой интенсивности излучения люминесцентного источника режим насыщения напряжения холостого хода не

достигается, что позволяет повышать КПД фотопреобразователя за счет повышения интенсивности излучения. Корректность разработанной численной модели и достоверность проведенных теоретических расчётов подтверждаются хорошим совпадением результатов моделирования и эксперимента. Важность полученных результатов определяется тем, что они служат основой для дальнейшего проектирования и моделирования многопереходных структур, исследованных в последующих главах.

В третьей главе проведено моделирование для двух- и трехпереходных фотопреобразователей, работающих в стационарном режиме. Получены принципиально важные результаты работы: впервые теоретически продемонстрировано существование двух устойчивых состояний двухпереходного преобразователя, соответствующих разным ветвям ВАХ соединительного туннельного диода. Для трехпереходного преобразователя была решена проблема значительного усложнения моделирования из-за увеличения числа состояний преобразователя. Хорошее согласие с экспериментом в этом случае было получено путем замены одного из туннельных диодов омическим сопротивлением.

Четвертая глава посвящена импульсному субнаносекундному режиму работы многопереходных фотопреобразователей. Важнейшим полученным результатом является относительно большая величина токов смещения для случая интенсивного возбуждения, что позволяет существенно упростить моделирование за счет исключения из рассмотрения туннельных эффектов и упростить конструкцию преобразователя. Показано, что эффективность монолитных многопереходных (шесть и более) фотопреобразователей субнаносекундных лазерных импульсов может быть увеличена за счёт модификации фронтальных субэлементов и увеличения уровня легирования туннельных диодов.

В пятой главе проводится численное моделирование СВЧ-модулей на основе многопереходных фотопреобразователей для формирования биполярных электрических импульсов. Рассмотрены случаи использования одно- и многопереходных преобразователей. Показано, что существует возможность формировать биполярные импульсы при малой длительности возбуждающих лазерных импульсов.

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений. Использована строгая теоретическая база и современные вычислительные методы. Результаты расчетов, полученные в работе, хорошо согласуются с результатами экспериментов в тех случаях, когда такие экспериментальные результаты имеются. Результаты опубликованы в рецензируемых изданиях и докладывались на международных конференциях.

Научная и практическая значимость работы высока и несомненна. К достоинству работы следует отнести комплексный характер исследования: сочетание разработки физических моделей, численного моделирования и сопоставления с экспериментальными данными. Научная новизна проявляется в ряде ключевых моментов: впервые учтено влияние N -образной ВАХ туннельных диодов при моделировании работы многопереходных фотопреобразователей, впервые продемонстрировано, что в импульсном режиме туннельные эффекты могут стать менее существенными из-за преобладания токов смещения. На этой основе впервые выполнено моделирование шести- и двенадцатипереходных преобразователей и предложены конкретные методы достижения эффективности при увеличении числа субэлементов. Практическая ценность подкреплена конкретными рекомендациями по структуре фотопреобразователей за счет

варьирования толщины и состава фронтальных субэлементов. Продемонстрирована эффективность многопереходных фотопреобразователей в СВЧ-устройствах. Оценено влияние неоднородности освещения на характеристики приборов, предложены упрощённые модели и методы оптимизации. Возможность повышения КПД фотопреобразователя для радиоизотопного источника открывает возможности для создания сверхдолговечных источников питания слаботочных систем.

Замечания

1. Было бы полезно обсудить, каким образом можно управлять переходом между режимами работы фотопреобразователя, соответствующими туннельному и диффузионному протеканию тока.
2. В расчётных моделях СВЧ-модулей на базе многопереходных фотопреобразователей практически не отражён учёт паразитных параметров соединений и монтажа на микрополосковую линию, которые могут существенно влиять на форму и амплитуду генерируемых импульсов в СВЧ-диапазоне. Желательно хотя бы в оценочном виде показать, как эти факторы могут скорректировать полученные результаты.
3. В численных расчётах используются идеализированные параметры структур (резкие границы гетеропереходов, однородное легирование и т. п.), которые на практике трудно реализовать. Стоит сопоставить выбранные в модели параметры с реальными технологическими допусками современных методов эпитаксиального роста и литографии. Это позволило бы оценить, насколько предсказанные эффекты (например, мультистабильность или рост амплитуды генерируемых электрических импульсов) достижимы в реальных образцах.
4. Концентрационные и полевые зависимости подвижностей носителей заряда описываются формулами (15-18), при этом дается ссылка на работы [116, 117], посвященные кремнию. Насколько это уместно, учитывая, что основным материалом настоящей работы является арсенид галлия?

Высказанные замечания носят уточняющий характер и не ставят под сомнение полученные научные результаты и общую высокую оценку выполненного диссертационного исследования.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий научно-методический уровень выполнения работы, большой объем проведенных исследований, новизну полученных результатов. Работа является цельным и законченным исследованием. В диссертации убедительно раскрыта актуальность направления, представлены оригинальные научные результаты, показана прикладная ценность проведенных изысканий, а также обеспечена надёжность и обоснованность выводов. Объем проведенных исследований и степень личного участия автора в получении ключевых результатов соответствуют всем предъявляемым к кандидатской диссертации критериям.

Считаю, что диссертационная работа Толкачева Ивана Андреевича "Численное моделирование многопереходных фотопреобразователей оптического излучения" отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 "Физика полупроводников" согласно Положению о присуждении учёных степеней в Федеральном

государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а её автор Толкачев Иван Андреевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук.

Профессор
Высшей инженерно-физической школы
Института электроники и телекоммуникаций
С.-Петербургского политехнического университета Петра Великого,
профессор, доктор физ.-мат. наук,
специальность 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков



Дмитрий Анатольевич Фирсов

E-mail: firsov.da@spbstu.ru

Тел.: +7-921-798-8231

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 29

02.09.2026

