

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук В.П. Кошельца на диссертационную работу Селиверстова Сергея Валерьевича «Энергетическое разрешение интегрированного с антенной терагерцового NbN микроболометра на горячих электронах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Повышенный интерес, проявляемый в последние годы к наноструктурам на основе тонких сверхпроводниковых пленок, обусловлен как интересной физикой происходящих в них процессов, так и возможностью создания на их основе сверхчувствительных болометров на горячих электронах с уникальными параметрами. Поэтому диссертационная работа С. В. Селиверстова, посвященная разработке терагерцовых микроболометров на основе сверхпроводниковых наноструктурах из ультратонкой пленки нитрида ниобия и исследованию энергетического разрешения таких устройств, является чрезвычайно актуальной как с научной, так и с прикладной точек зрения.

Диссертация Селиверстова состоит из вводного раздела, четырех глав и заключения. В достаточно обширном введении представлен обзор приемных устройств на эффекте электронного разогрева в тонких сверхпроводниковых пленках. Обоснована актуальность исследуемой проблемы, поставлены цели и задачи диссертационной работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены выносимые на защиту положения, а также описана структура диссертации.

В первой главе приведен обзор теоретических и экспериментальных работ по тематике исследования. В начале главы кратко изложены теоретические основы принципа работы детектора на основе сверхпроводникового болометра на эффекте электронного разогрева. Представлен обзор основных публикаций, посвященных исследованиям приемных устройств на эффекте электронного разогрева, работающих как в смесительном режиме, так и в режиме прямого детектирования, а также работ по исследованию физики работы и техническим характеристикам таких устройств. На основе проведенного анализа литературных данных автором был выбран объект исследования и сформулированы задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы было измерение энергетического разрешения прямых сверхпроводниковых детекторов на эффекте электронного разогрева, изготовленных по усовершенствованному технологическому маршруту, а также экспериментальное исследование их чувствительности и быстродействия.

Вторая глава посвящена описанию технологии изготовления исследуемых в работе болометров, обсуждаются вопросы контроля качества экспериментальных

образцов. Представлен обзор основных технологических процессов, использованных при изготовлении болометров на эффекте электронного разогрева; детально описан технологический маршрут изготовления образцов, оптимизированный для задач данного диссертационного исследования. В работе использовался весь арсенал современных технологических методов и процессов: реактивное магнетронное распыление, термическое испарение, электронно-лучевое испарение, электронная и фото литографии, ионное и жидкостное травление. Особо следует отметить, что в работе удалось контролируемым и воспроизводимым образом изготавливать сверхпроводниковые тонкопленочные структуры толщиной 4 нм и длиной до 200 нм.

В Главе 3 представлены результаты теоретического и экспериментального исследования вольт-ваттной чувствительности, оптической эквивалентной мощности шума и энергетического разрешения сверхпроводникового детектора на эффекте электронного разогрева. В работе были измерены чувствительность и быстродействие прямого детектора терагерцового излучения на основе интегрированного с антенной сверхпроводникового болометра на эффекте электронного разогрева в ультратонких пленках нитрида ниобия, работающего при температуре 9 К. Представлено описание экспериментов по измерению вольт-ваттной чувствительности детектора, а также сравнение полученных экспериментальных данных с результатами моделирования. Разработана модель, основанная на численном решении уравнений теплового баланса, позволяющая учесть влияние неоднородности разогрева чувствительного элемента болометра вдоль его длины. Значение вольт-ваттной чувствительности детектора, полученное в рамках данной модели, ближе к экспериментальным данным, чем в приближении однородного разогрева; однако полученные теоретические оценки все еще значительно превышают результаты эксперимента.

Заключительная четвертая глава посвящена описанию экспериментов по регистрации импульсного терагерцового излучения наносекундной длительности с помощью сверхпроводникового болометра на эффекте электронного разогрева. Продемонстрирована возможность детектирования импульсного терагерцового излучения, которое генерировалось в нелинейной оптической среде методом оптического выпрямления, а также методом генерации на разностной частоте. Эти результаты имеют важное практическое значение, поскольку открывают возможность использования импульсных методов в медицине и системах безопасности, где в настоящее время наблюдается острая нехватка сравнительно простых и удобных источников и приёмников импульсного терагерцового излучения. В этой же главе приведены первые результаты по измерению степени гидратации роговицы и склеры глаза с помощью неинвазивных терагерцовых технологий, что очень важно для ранней диагностики различных офтальмологических нарушений и заболеваний. Использование терагерцового излучения для этих целей представляется весьма перспективным, поскольку вода эффективно поглощает терагерцовое излучение и обладает высокой диэлектрической проницаемостью.

Характеризуя диссертационную работу в целом, хотелось бы отметить, что проведенные С.В. Селиверстовым исследования позволили исследовать работу терагерцовых приемных устройств на эффекте электронного разогрева, работающих в режиме прямого детектирования, в том числе для регистрации импульсных сигналов. На частоте излучения 2,5 ТГц было измерено значение эквивалентной мощности шума детекторной системы около $2 \cdot 10^{-13}$ Вт/√Гц. Этот результат был подтвержден в дополнительном прямом измерении с использованием импульсного лазера с длиной волны излучения 1.55 мкм и длительностью импульса менее 50 пс. Измеренное в этом эксперименте значение энергетического разрешения детекторной системы составило 1,6 адж. Новизна и достоверность полученных автором результатов не вызывают сомнений. Сергеем Валерьевичем Селиверстовым проведен комплекс сложных и разносторонних исследований и расчетов, получен ряд новых результатов.

В то же время в работе имеются некоторые недостатки:

1. В таблице 1 представлены значения эквивалентной мощности шума, постоянной времени и рабочей температуры детекторов терагерцового диапазона. Однако в этой таблице не приведены значения энергетического разрешения детекторов, которые вычисляются из приведенных данных. Дополнительная колонка была бы очень полезна для сравнения различных типов ТГц детекторов; из такой таблицы было бы видно, что изучаемые детекторы на эффекте электронного разогрева не обладают наилучшим энергетического разрешения, но могут обеспечить наилучшую комбинацию разрешения и постоянной времени. Кроме того, в таблице приведены значения для «электрической» эквивалентной мощности шума для ряда детекторов, в то время как уже опубликованы результаты для оптических измерений, часть из них упоминается в диссертации.

2. На рис. 3.3 экспериментальные значения вольт-ваттной чувствительности детектора при различных напряжениях смещения не скорректированы на оптические потери и сильно различаются от результатов расчета, полученных в приближении однородного разогрева и модели распределенного элемента. Это затрудняет сравнение характера экспериментальной и теоретической зависимостей чувствительности от напряжения смещения. Учитывая данные рис. 3.1 (где зависимости от напряжения для эксперимента и теории совпадают по форме), складывается впечатление, что предложенная модель распределенного элемента, хоть и дает более близкие значения вольт-ваттной чувствительности детектора, предсказывает несколько иной ход зависимости чувствительности от напряжения. Следует также отметить, что при оценке оптических потерь не учитывалось поглощение в ТГц излучения при прохождении от холодной нагрузки до окна криостата; на частоте 2,5 ТГц при средней влажности поглощение на расстоянии 1 м будет порядка 50%. Это означает, что эффективная температура холодной нагрузки будет намного больше, чем предполагаемые автором 77 К, и может объяснить заметное расхождение эксперимента и расчета (с учетом потерь в окне и линзе).

3. В диссертации многие важные эксперименты описаны недостаточно подробно, вместо изложения методики зачастую просто приводятся ссылки на опубликованные работы. Например, не описано подробно как проводились измерения эквивалентной мощности шума детекторной системы при использовании импульсного лазера с длиной волны излучения 1.55 мкм.

4. Важный для выводов диссертации результат измерения отклика детектора на импульсы излучения 1,55-микронного лазера длительностью менее 50 пс приведен в качестве вставки к рис. 3.13, на котором показана зависимость сигнала детектора от поглощенной мощности. Зависимость отклика детектора от времени не обсуждается, в работе лишь указано, что длительность переднего фронта (130 пс) определяется высокочастотными свойствами тракта, но не приведено никаких пояснений. Причины увеличения длительности заднего фронта также не осуждаются, как и предельно возможное разрешение, определяемое физикой работы детектора.

Сделанные замечания не влияют существенно на общую оценку работы; диссертация С.В. Селиверстова представляет собой цельную и законченную научно-исследовательскую работу. Полученные результаты могут использоваться в научных организациях, занятых исследованием терагерцовых детекторов и разработкой сверхпроводниковых терагерцовых устройств для практических приложений. Основные результаты работы докладывались на представительных международных конференциях и достаточно подробно опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах; они хорошо известны специалистам. Автореферат правильно отражает основное содержание диссертационной работы.

В целом, содержание диссертационной работы соответствует всем требованиям Положения ВАК РФ и критериям, установленным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г № 842 "О порядке присуждения ученых степеней" к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор – Селиверстов Сергей Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

В.П. Кошелец
« 04 » апреля 2017 г.

профессор Кошелец Валерий Павлович
И.о. гл.н.с. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
доктор физико-математических наук,
адрес: 125009, Москва, ул. Моховая 11, стр. 7
Телефон +7-495-6293418;
E-mail: valery@hitech.cplire.ru

