

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор — начальник Управления научной
политики и организации научных исследований
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени
М. В. Ломоносова»

доктор физико-математических наук, профессор



А.А. Федянин

2017 г.

ОТЗЫВ

ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу **Селиверстова** Сергея Валерьевича
«**Энергетическое разрешение интегрированного с антенной терагерцового
NbN микроболометра на горячих электронах**», представленной на соискание
учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.03 – радиофизика.

Исследования и разработки, проводимые в настоящее время в области создания эффективных источников и приемников терагерцового диапазона частот электромагнитного излучения, открывают новые возможности в медицине, безопасности и охране окружающей среды. Это стимулирует растущий в мире интерес к теме освоения терагерцового диапазона частот. Практически все взрывчатые вещества имеют ярко выраженные резонансы поглощения в терагерцовом диапазоне частот, в то время как многие материалы, используемые для хранения и упаковки опасных веществ, прозрачны для волн этого диапазона. Применение мощных коротких импульсов терагерцового излучения чрезвычайно перспективно для изучения динамики химических, биологических и физических процессов. С использованием терагерцового излучения открывается возможность создания систем сканирования в отраженном свете от поверхности биологических материалов с целью определения малейших изменений концентрации содержащейся в них воды, что чрезвычайно важно для ранней диагностики различных патологий в медицине.

Диссертация С.В.Селиверстова посвящена исследованию параметров и условий применения перспективного класса детекторов излучения терагерцового диапазона частот – болометров, действие которых основано на эффекте разогрева электронной подсистемы сверхпроводника. Данный тип детекторов демонстрирует высокую чувствительность и при этом обладает на несколько порядков меньшей постоянной времени по сравнению с другими терагерцовыми приборами, прямо преобразующими терагерцовое излучение в электрический сигнал, такими как ячейка Голея, пирозлектрический детектор, детектор на границе перехода сверхпроводник-нормальный

металл и другие. Актуальность диссертационной работы С.В. Селиверстова не вызывает сомнений.

В диссертационной работе С.В. Селиверстова представлены результаты теоретического и экспериментального исследования вольт-ваттной чувствительности, оптической эквивалентной мощности шума и энергетического разрешения детекторной системы на основе сверхпроводникового электронно-разогревного болометра. Автор анализирует работу болометра с точки зрения двух моделей: сосредоточенного и распределённого детектирующего элемента. Приведены теоретические и экспериментальные подтверждения влияния неоднородности разогрева чувствительного элемента болометра на его выходные характеристики. Показано, что учёт этой неоднородности позволяет получить расчетные значения вольт-ваттной чувствительности, которые в значительно большей степени соответствуют экспериментально измеренным параметрам. Представляют большой интерес результаты экспериментального измерения энергетического разрешения болометра, полученные в рамках диссертационной работы при измерении коротких импульсов излучения. До этого были доступны лишь косвенные данные об энергетическом разрешении данных приемников, полученные на основании двух отдельных экспериментов: один – по измерению эквивалентной мощности шума, другой – по измерению полосы преобразования болометра при критической температуре. Отдельная глава посвящена описанию экспериментов по практическому применению исследуемых болометров для регистрации коротких импульсов терагерцового излучения, полученных в нелинейной оптической среде. Демонстрируются уникальные возможности детектора при регистрации слабых импульсов терагерцового излучения наносекундной длительности, возможности терагерцовой медицинской диагностики.

Таким образом, можно констатировать, что автором диссертации была проделана большая работа, направленная на решение важнейших научных задач, связанных с получением новых данных о физике работы интегрированного с антенной терагерцового микроболометра на эффекте электронного разогрева. Наиболее интересными и существенными из полученных результатов являются следующие:

1. Исследована оптическая эквивалентная мощность шума детекторной системы на основе интегрированного с антенной терагерцового NbN болометра на эффекте электронного разогрева, изготовленного по оптимизированной технологии. Установлено, что для детектора с оптимизированными размерами чувствительного элемента наилучшее полученное значение эквивалентной мощности шума достигает $2,0 \times 10^{-13} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-0,5}$ на частоте излучения 2,5 ТГц.

2. Проведено измерение энергетического разрешения детекторной системы на основе интегрированного с антенной NbN болометра на эффекте электронного разогрева, изготовленного по оптимизированной технологии. Наилучшее достигнутое значение энергетического разрешения болометра составило 1.5 аДж. Данные измерений подтвердили расчёты энергетического разрешения, основанные на экспериментальных данных об эквивалентной мощности шума и постоянной времени детектора.

3. Развита модель работы болометра, позволяющая учесть неоднородность разогрева его чувствительного элемента, находящегося в резистивном состоянии, под действием тепловой мощности тока смещения и мощности падающего излучения.

4. Экспериментально продемонстрирована возможность регистрации с помощью детекторной системы на основе NbN болометра на эффекте электронного разогрева импульсов терагерцового излучения наносекундной длительности, сгенерированных в нелинейной оптической среде методом оптического выпрямления и методом генерации на разностной частоте, с рекордным временным разрешением.

5. Разработаны методы определения степени гидратации наружных оболочек глаза (роговицы и склеры) с использованием терагерцового излучения, исследована зависимость коэффициента отражения наружных оболочек глаза от процентного содержания в них воды по массе.

Исследованные болометры могут с успехом применяться в схемах регистрации непрерывного и квази-непрерывного терагерцового излучения, в том числе при регистрации коротких импульсов наносекундной и суб-наносекундной длительности. Благодаря высокой чувствительности и низкой эквивалентной мощности шума болометров данные схемы могут быть использованы в Физическом институте имени П.Н. Лебедева РАН, Институте физики микроструктур РАН, Нижегородском государственном университете имени Н.И. Лобачевского и других организациях, в которых проводятся исследования, связанные с детектированием терагерцовых сигналов низкой мощности, что существенно снижает требования к уровню сложности создания и эксплуатации соответствующих терагерцовых источников, расширяет динамический диапазон работы спектроскопических и диагностических терагерцовых схем.

Диссертационная работа была заслушана, обсуждалась и была одобрена на научном семинаре кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова 19 декабря 2016 года.

К работе имеются следующие замечания:

1. Экспериментальное значение энергетического разрешения болометра получено при детектировании излучения на длине волны 1.55 мкм, тогда как детектор в диссертационной работе позиционируется как терагерцовый. В диссертации недостаточно подробно обосновывается тот факт, что полученное энергетическое разрешение болометра в ближнем ИК диапазоне однозначно характеризует энергетическое разрешение в терагерцовой области частот.
2. Из рисунка, иллюстрирующего сравнение двух моделей (сосредоточенного и распределённого элементов), не видно преимущество модели распределённого элемента. Графики не дают явного представления о том, что использование данной модели позволило получить значение вольт-ваттной чувствительности болометра, соответствующее экспериментальным данным. С этой целью было бы правильнее представить на графике расчетные значения вольт-ваттной чувствительности, учитывающие потери в оптических компонентах системы.
3. Большой интерес представляют результаты исследования зависимости эквивалентной мощности шума и энергетического разрешения детектора от размеров его

чувствительного элемента. Однако в тексте диссертации нет подробного описания этих результатов, не приведены и рассчитанные профили температуры сверхпроводящей полоски детектора.

4. Текст диссертации содержит грамматически и стилистически неправильные обороты, как например:

«рост заинтересованности исследователей к терагерцовому диапазону» (с.10);

«чип детектора специальным образом бондировался на установке» (с.70);

«излучение лазера ... было отправлено на нелинейный оптический кристалл» (с.77);

«излучение амплитудно-модулировалось источником питания» (с.80).

Имеются досадные опечатки, например, при записи уравнений (3.2), служащих основой для моделирования вольт-ваттной чувствительности детектора.

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку проделанной работы, результаты которой представляют несомненную научную и практическую ценность. Диссертационная работа С.В. Селиверстова выполнена на высоком научном уровне, содержит решение ряда научных задач в области физики работы болометров на эффекте электронного разогрева.

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 15 печатных работах, из них 7 статей в рецензируемых журналах, перечисленных в соответствующем разделе диссертации, 3 статьи в сборниках трудов конференций, 4 тезиса докладов и 1 патент на изобретение. Результаты неоднократно докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, а также научных семинарах.

Полученные автором результаты являются новыми. Автореферат правильно отражает содержание текста диссертации. Таким образом, диссертация Селиверстова С.В. удовлетворяет требованиям Положения о присуждении учёных степеней, предъявленным к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.03 – радиофизика, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составила

доктор физико-математических наук (специальность 01.04.05), доцент кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова



Мурзина Татьяна Владимировна

Адрес: 119991 Москва Ленинские горы, д.1, стр.2, МГУ, физический факультет

Тел.:8(495)939-36-69, murzina@mail.ru

«_24_» марта 2017 г.

Заведующий кафедрой квантовой электроники физического факультета
МГУ имени М.В.Ломоносова, доктор физико-математических наук, профессор

В.И. Панов

Тел.:8(495)939-25-02, panov@spmlab.phys.msu.ru

«_24_» марта 2017 г.

