



О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Ю.П. Корнессовой
“Квантовая эффективность сверхпроводникового однофотонного
детектора на основе тонкой пленки NbN”,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.

Новые перспективы в области криогенной электроники и сверхпроводниковых детекторов, возникшие в последние 10-15 лет, связаны с развитием фундаментальной физики сверхпроводимости, разработкой компактной криогенной техники, а также с созданием новых технологий тонкопленочных структур с субмикронными размерами. Одно из важных прикладных направлений, связанных с темой диссертации, посвящено исследованию сверхпроводящих приемников излучений с рекордной чувствительностью и очень низким уровнем тепловых шумов. Разработка таких детекторов требует изучения новых аспектов фундаментальной физики неравновесной сверхпроводимости, особенностей взаимодействия электромагнитного излучения со сверхпроводниками. Таким образом, тема диссертации несомненно актуальна, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Диссертация состоит из Введения, шести глав и Заключения, она основана на 13 научных работах, опубликованных в российских и международных изданиях, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК. Во Введении дан общий анализ актуальности создания и исследования сверхпроводниковых однофотонных детекторов, их преимуществ перед другими типами детекторов, определены цели, методы и объекты выполненных в диссертации исследований, а также их достоверность и практическая ценность; перечислены положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы по современным однофотонным детекторам, сравнению технических характеристик различных детекторов, основанных на полупроводниковых и сверхпроводниковых структурах. Подробно рассмотрены различные (предложенные ранее) модели возникновения резистивного отклика при поглощении фотонов в тонких узких сверхпроводящих пленках (SSPD детекторах), а также их сравнение с имеющимися в литературе результатами. Обсуждаются особенности SSPD детектора с параллельным включением сверхпроводящих полос, а также возможности увеличения квантовой эффективности детекторов за счет включения их в оптический резонатор. На основании проведенного анализа литературы показано, что разработка сверхпроводниковых устройств на основе

используемых в диссертации физических принципов однофотонного детектирования - актуальная и практически значимая проблема. Отмечена необходимость продвижения SSPD детекторов в более длинноволновой диапазон 3-10 мкм, а также необходимость детального исследования механизмов возникновения резистивности в таких устройствах при поглощении фотона. Обоснованы выбор объектов исследований и конкретная постановка задач диссертационной работы, связанных с увеличением квантовой эффективности однофотонного детектора на основе тонких пленок нитрида ниобия в дальнем инфракрасном диапазоне.

Технология приготовления структур подробно описана во второй главе. Исследуемые тонкопленочные образцы NbN, являющиеся чувствительными элементами SSPD детекторов, изготавливались на сапфировых подложках в виде узких (40-150 нм) полосок толщиной 3.5-4.5 нм с помощью электронной литографии и плазмохимического травления. В диссертации представлено несколько использованных в работе технологических маршрутов изготовления SSPD детекторов, в том числе интегрированных в четвертьволновые оптические резонаторы. Структуры демонстрировали высокие критические температуры и критические токи, узкие (0.4-0.8 К) сверхпроводящие переходы. Был предложен новый подход к изготовлению резонатора непосредственно на подложке перед осаждением и формированием сверхпроводящей тонкопленочной структуры SSPD детектора, в связи с чем была отработана технология осаждения пленок NbN на слой монооксида кремния.

Третья глава диссертации посвящена методикам экспериментальных исследований характеристик изучаемых структур. Для измерения квантовой эффективности SSPD детекторов и скорости темного счета использовалась криогенная установка, низкотемпературная вставка которой размещалась в транспортном гелиевом дьюаре при температуре 1.7 - 4.2 К, при этом излучение в дьюаре подводилось с помощью одномодового оптоволоконного кабеля с диаметром светонесущей части 9 мкм. Установка также включала усилители фотоотклика образца (т.е. электрических импульсов, возникающих в образце при поглощении фотона), счетчик импульсов, высокочастотный осциллограф, источник тока смещения образца. Использовались источники непрерывного инфракрасного излучения: полупроводниковый светодиод (длина волны 1260 нм), лазерный диод (1550 нм), а также оптоволоконный импульсный лазер, позволяющий посылать на детектор импульсы света (1064 нм) длительностью 100 пс и частотой повторений 200 МГц. Число фотонов, направляемых на детектор, определялось по мощности источников излучения. Для исследования спектральной чувствительности применялись монохроматоры, использующие разложение излучения нагретого тела в спектр с помощью дифракционной решетки и выделение узкого участка спектра. Для анализа статистики интервалов между фотооткликами (фотоотсчетами) использовался цифровой осциллограф, позволявший оцифровывать сигналы с наносекундным разрешением.

В четвертой главе представлены исследования квантовой эффективности и механизмов появления фотооткликов в тонкопленочных сверхпроводящих структурах SSPD детекторов в виде меандров. Фундаментальной задачей, которая ставилась в этой части работы, было получение экспериментальных данных, которые позволили бы сделать выбор между существующими моделями возникновения резистивного отклика при поглощении фотона сверхпроводящей пленкой. В основе механизма отклика во всех моделях лежит подавление сверхпроводимости в локальной области пленки, поглотившей фотон. Поглощенная энергия ответственна за разрушение куперовских пар и зарождение первичной нормальной области с радиусом, близким к длине электронной термализации (~20 нм), которая может разрастаться, перекрывая всю пленку по ширине, за счет диффузии неравновесных электронов и концентрации

сверхпроводящего тока в областях пленки вне "горячего пятна". В последние годы возникли также модели, связывающие возникновение резистивности с зарождением и движением абрикосовских вихрей вне "горячего пятна". Поскольку внешнее магнитное поле должно понижать барьер для вхождения вихрей в пленку, было важно исследовать зависимость скорости счета от магнитного поля. Полоски NbN шириной 104 нм и 148 нм, изготовленные в виде меандра, исследовались при 4.2 К во внешнем поле до 250 мТл, перпендикулярном поверхности пленки. Для низких токов смещения ($\sim 0.5 I_c$) и низких энергий фотонов (длин волн больших 450 нм) продемонстрирована сильная зависимость числа отсчетов от магнитного поля, которая в целом согласуется с моделью вхождения краевых вихрей Булаевского и др.

Дополнительную информацию о границах применимости модели горячего пятна и вихревой модели дают результаты, представленные во втором разделе Главы 4, посвященной изучению спектральной зависимости квантовой эффективности и ее зависимости от ширины полоски детектора и тока смещения. Показано, что кроссовер от модели горячего пятна к вихревой модели происходит при длине волны отсечки, величина которой и ее зависимость от ширины полоски хорошо согласуется с моделью горячего пятна.

В пятой главе диссертации обсуждаются результаты по детектированию фотонов структурой в виде ряда параллельных полосок NbN, которая была первоначально предложена с целью уменьшения кинетической индуктивности устройства и обеспечения более быстрого срабатывания. Была измерена и описана статистически зависимость числа фотооткликов от числа падающих фотонов, исследована зависимость квантовой эффективности от тока смещения, температуры и длины волны, проведено сравнение с результатами численного моделирования. Был продемонстрирован однофотонный отклик вплоть до длин волн 10 мкм. Было показано, что квантовая эффективность резко возрастает при увеличении тока смещения, но также существенно возрастает и скорость темного счета, при этом при понижении температуры квантовая эффективность растет быстрее. Квантовая эффективность экспоненциально уменьшается с увеличением длины волны излучения, однако в интервале 1.3 - 3.5 мкм для исследованного детектора в виде параллельных полосок она падает лишь в 30 раз, тогда как для детектора в виде меандра это падение составляет 3 порядка. Проведенные эксперименты и численное моделирование фотооткликов показали, что предложенная ранее для таких детекторов модель каскадного переключения в резистивное состояние неприменима. Реально фотоотсчет возникает после последовательного поглощения нескольких фотонов.

В последней главе диссертации представлены результаты расчета и реализации однофотонного детектора, интегрированного в оптический четвертьволновой резонатор. Резонатор позволяет повысить коэффициент поглощения излучения в детекторе и увеличить квантовую эффективность. Предложенный микрорезонатор нового типа состоял из золотого тонкопленочного зеркала, осажденного на сапфировую подложку и слоя SiO (или другого изолятора), поверх которого изготавливался SSPD детектор. Такой дизайн позволял посылать излучение непосредственно на детектор, а не через подложку, как в реализациях старого типа, в которых резонатор изготавливался поверх детектора. Толщина диэлектрического слоя была равна четверти длины волны детектируемого излучения, чтобы проходящая и отраженная волны создавали пучность вблизи слоя детектора. Были проведены расчеты зависимости диэлектрической проницаемости и поглощения в пленке NbN от длины волны излучения. Для пленок с толщиной 4 нм при длинах волн более 2 мкм поглощение составляет только 20%, что и определяет низкую максимальную квантовую эффективность без резонатора. В работе были измерены спектральные зависимости квантовой эффективности SSPD детекторов,

интегрированных в резонаторы с диэлектрическими слоями Si_3N_4 , SiO_2 и SiO . Было продемонстрировано, что на длинах волн вблизи 1.5 мкм детекторы с резонаторами на основе SiO показывают втрое большую квантовую эффективность по сравнению с детекторами без резонаторов.

В Заключение сформулированы основные научные и прикладные результаты диссертации. Успешное выполнение задач диссертационной работы было бы невозможно без использования современных достижений нанотехнологии тонкопленочных структур, а также без проведения подробных модельных и экспериментальных исследований характеристик сверхпроводниковых однофотонных детекторов.

В качестве замечаний можно отметить следующие моменты.

1. Четвертая глава, в которой, фактически, изучен кроссовер по длине волны излучения и току смещения от модели горячего пятна к вихревым моделям является центральной в диссертации. После подробного прочтения диссертации складывается впечатление, что полученного экспериментального материала достаточно для обобщения ранее предложенных моделей и формулирования пусть полуколичественной, но комбинированной модели с элементами модели горячего пятна и вихревых моделей. Выводы и положения, вынесенные на защиту, к сожалению, гораздо беднее, носят, как бы, частный характер, связаны с конкретными параметрами изученных структур. Нет обобщенных выводов о том, в каких областях параметров (хорошо бы в приведенных единицах) работает одна модель, в каких другая, а где надо учитывать обе.
2. Из результатов, обсуждаемых в конце четвертой главы (стр.120-123), довольно очевидно, что уменьшение критического тока в исследуемых меандрах до 0.7 от тока распаривания Гинзбурга-Ландау (даже при 0.5 T/T_c) обусловлено не только поворотами меандра, а происходит за счет включения вихревого механизма. Этим можно также объяснить большой разброс плотностей тока депиннинга, который можно получить из данных Табл. 4.1. В связи с этим было бы полезным детальное исследование динамики вихрей, в том числе в присутствии внешнего магнитного поля, на отдельных узких пленках NbN без облучения. Единственный результат исследования I_c(H) без излучения (для меандра), представленный на Рис. 4.1, также подробно не обсуждается. Кажется, диссертантом пропущены явно проявляющиеся особенности на кривой, связанные, по-видимому, с проникновением вихрей в возникающую линию проскальзывания фазы. Наверное, дифференцирование этой кривой позволило бы непосредственно из эксперимента извлечь величину поля проникновения вихря B_v, которое рассчитывается в работе. Были бы также полезными исследования в магнитном поле характеристик детекторов в виде параллельных полосок, лишь некоторые из которых подвергаются непосредственному воздействию фотонов.
3. Для изучения вклада механизма проникновения вихрей было бы полезно исследовать пленки с низким внутренним пиннингом, а также пленки с искусственными шероховатостями на краях, уменьшающими поверхностный пиннинг.
4. В диссертации встречаются неточности и смысловые ошибки. Так в подписи под Рис. 4.2а сплошные линии названы прямыми линиями. На странице 119 написано: "Т.е. при уменьшении ширины полоски... длина волны отсечки... уменьшается" вместо "...увеличивается". Обычно употребляемое "сопротивление на квадрат" называется "поверхностным сопротивлением". Несколько жаргонно звучит: "критический ток, рассчитанный из Булаевского" (стр 110). В Табл. 4.1 (стр 117) указано, что образец №1

имеет ширину 150 нм и толщину 4.5 нм, а в том же разделе на стр. 120 написано, что образец №1 имеет ширину 122 нм и толщину 3.6 нм. Этот список можно продолжить.

Сделанные замечания, в основном, имеют характер пожеланий или относятся к форме представления материала и не снижают общей высокой оценки работы.

В целом диссертация выполнена и изложена на высоком уровне, она является цельным и законченным исследованием. Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений. Диссертация вносит существенный вклад в реализацию и исследования сверхпроводниковых однофотонных детекторов. Практическая значимость работы связана с исследованием характеристик уже активно применяемых и перспективных сверхпроводниковых однофотонных детекторов. Результаты могут быть использованы и развиты в ИФТТ РАН г.Черноголовка, ИПТМ РАН г.Черноголовка, МГУ г. Москва, ИРО РАН, г.Москва, ФИАН г.Москва, ФТИ РАН г. Санкт-Петербург. Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации, ее результаты и выводы. Представленные результаты докладывались на престижных международных семинарах и конференциях.

Диссертационная работа "Квантовая эффективность сверхпроводникового однофотонного детектора на основе тонкой пленки NbN" удовлетворяет всем требованиям п.8 Положения ВАК РФ "О присуждении ученых степеней", предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор - Корнеева Юлия Петровна - заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 - оптика.

Отзыв составил
Зав. лаб. сверхпроводимости
ИФТТ РАН, д. ф.-м. н., проф.

В.В.Рязанов

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на семинаре ИФТТ РАН "Сверхпроводимость" 12.11.2014 и на заседании Ученого совета ИФТТ РАН (протокол № 23 от 17 ноября 2014 года).

Подпись Рязанова удостоверяю
Ученый секретарь ИФТТ РАН



Г.Е.Абросимова