



МОСКОВСКИЙ
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

**СПОНТАННЫЕ
И ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ
РЕЗИСТИВНЫЕ СОСТОЯНИЯ
В УЗКИХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ
NbN ПОЛОСКАХ**

Москва 2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский педагогический государственный университет»



Спонтанные и фотоиндуцированные
резистивные состояния
в узких сверхпроводящих NbN полосках

Монография

МПГУ
Москва • 2015

УДК 535+543.42
ББК 22.34
С731

Рецензенты:

А. В. Родин, кандидат физико-математических наук,
зам. декана ФПФЭ, Московский физико-технический институт
(государственный университет)

В. А. Ильин, доктор физико-математических наук, профессор
кафедры общей и экспериментальной физики факультета физики
и информационных технологий МПГУ

Авторский коллектив:

А. А. Корнеев, О. В. Окунев, Г. М. Чулкова, К. В. Смирнов,
И. И. Милостная, О. В. Минаева, Ю. П. Корнеева, Н. С. Каурова,
Б. М. Воронов, Г. Н. Гольцман

Спонтанные и фотоиндуцированные резистивные состояния
С731 **в узких сверхпроводящих NbN полосках** : Монография / А. А. Кор-
неев, О. В. Окунев, Г. М. Чулкова и др. – Москва : МПГУ, 2015. –
108 с. : ил.

ISBN 978-5-4263-0269-3

Монография посвящена актуальной проблеме современной фотоники: разработке высокочувствительных и быстродействующих сверхпроводниковых однофотонных детекторов на основе тонкой пленки NbN. В работе исследуются неравновесные процессы, протекающие в тонкой сверхпроводящей пленке после поглощения инфракрасного фотона и приводящие к возникновению резистивного состояния. На этих процессах основан механизм фотоотклика исследуемого в работе однофотонного детектора. В частности, исследуются зависимости квантовой эффективности и скорости темнового счета от геометрических параметров детектора: толщины пленки, ширины полоски, а также от величины транспортного тока детектора.

Монография предназначена для студентов старших курсов, аспирантов и начинающих исследователей, работающих в области сверхпроводниковой наноэлектроники и радиофизики.

УДК 535+543.42
ББК 22.34

ISBN 978-5-4263-0269-3

© МПГУ, 2015

Оглавление

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	9
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	19
1.1. Современные однофотонные детекторы	19
1.2. Однофотонный сверхпроводниковый детектор на основе тонкой пленки NbN	24
1.3. Выбор объекта исследования и постановка задачи	26
ГЛАВА 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА	28
2.1. Технология изготовления и методы отбора образцов	28
2.2. Описание экспериментальной установки и методики измерений	37
2.3. Калибровка мощности для определения квантовой эффективности	41
2.4. Особенности методики измерения скорости темнового счета	43
2.5. Выводы	45
ГЛАВА 3. МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОДНОФОТОННОГО ОТКЛИКА В ТОНКИХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНКАХ	47
3.1. Формирование и развитие горячего пятна в тонкой сверхпроводящей пленке при поглощении фотона	48
3.2. Однофотонный и многофотонный процессы детектирования тонкой сверхпроводящей пленкой	58
3.3. Выводы	60
ГЛАВА 4. КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ОДНОФОТОННОГО ДЕТЕКТОРА	62
4.1. Эффект однофотонного детектирования	63
4.2. Зависимость числа фотоотсчетов от транспортного тока	67

4.3. Зависимость квантовой эффективности от толщины пленки	73
4.4. Выводы	81
ГЛАВА 5. СКОРОСТЬ ТЕМНОВОГО СЧЕТА И ЭКВИВАЛЕНТНАЯ МОЩНОСТЬ ШУМА	83
5.1. Зависимость скорости темнового счета от транспортного тока.	83
5.2. Эквивалентная мощность шума	90
5.3. Применение.	94
5.4. Выводы	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	100
ЛИТЕРАТУРА	103

Глава 1. Обзор литературы и постановка задачи

В главе дается обзор литературы по существующим однофотонным детекторам. Показывается перспективность сверхпроводниковых однофотонных детекторов и обосновывается выбор объекта исследования.

В § 1.1 дается обзор современных типов однофотонных детекторов, сравниваются их технические характеристики.

В § 1.2 обосновывается возможность создания и перспективность практического использования сверхпроводникового однофотонного детектора на основе тонкой пленки NbN.

В § 1.3 ставятся задачи настоящего исследования.

1.1 Современные однофотонные детекторы

Традиционно в качестве однофотонных детекторов в видимом и ближнем ИК диапазонах используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и лавинные фотодиоды (ЛФД). Механизм регистрации фотона в этих устройствах основан на формировании лавины после ударной ионизации в результате внешнего либо внутреннего фотоэффекта.

Несмотря на то, что квантовая эффективность ФЭУ в видимом диапазоне приближается к 100%, в ИК области она существенно падает и на телекоммуникационных длинах волн 1.3 мкм — 1.55 мкм составляет $\sim 1\%$. Кроме того, максимальная скорость счета ФЭУ не превышает 10^7 с^{-1} при высоком темновом счете $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$. При этом точность определения момента поглощения фотона (временная нестабильность переднего фронта фотоотклика, или джиттер) составляет сотни пикосекунд [8, 9].

Спектральная чувствительность популярных кремниевых ЛФД ограничена величиной запрещенной зоны, и длинноволновая граница их чувствительности находится в районе 1 мкм. При максимальной скорости счета фотонов ~ 10 МГц ЛФД обладают скоростью темнового счета $\sim 10^4$ с $^{-1}$. При работе с импульсными источниками излучения темновой счет удастся снизить использованием ЛФД в гейгеровском (time-gated) режиме, т.е. подают смещение на ЛФД только в короткий период времени, в течение которого ожидается появление фотона. Однако это сильно снижает максимальную скорость счета. Кроме того, в ЛФД наблюдается паразитное «послесвечение» (afterglowing), связанное со спонтанным излучением фотонов в процессе развития лавины. Это явление осложняет изготовление матричных приемников на основе ЛФД, так как испущенные фотоны поглощаются соседними детекторами матрицы и вызывают их срабатывание.

Для работы в диапазоне более длинных волн создаются ЛФД на основе Ge [10, 11, 12] и узкозонного тройного соединения InGaAs [13, 14, 15]. Вместе с повышением квантовой эффективности в этих детекторах возрастает уровень спонтанных срабатываний прибора в отсутствие излучения, что является серьезным препятствием в получении высокой чувствительности. Время восстановления варьируется от нескольких единиц до сотен наносекунд.

В последние годы появились разработки полупроводниковых однофотонных детекторов в дальней инфракрасной области спектра на основе квантовых точек, образующихся в двумерном слое GaAs/AlGaAs [16, 17, 18]. Детекторы охлаждаются до сверхнизких температур (ниже 0.1 К). Лавинное размножение числа свободных носителей заряда возникает после поглощения фотона с энергией, соответствующей переходу между уровнями размерного квантования. Эти физические эффекты интересны тем, что позволяют регистрировать одиночные фотоны в диапазоне длин волн выше 100 мкм,

недоступном другим детекторам. Но сложные технические условия работы и крайне продолжительное время восстановления, около 1 мс, сильно ограничивают возможную область их применения. При столь малой скорости счета такие детекторы требуют тщательной экранировки комнатного фона, который легко может вызывать их насыщение.

В качестве однофотонных детекторов ИК излучения перспективными представляются детекторы на основе сверхпроводящих материалов. В сверхпроводниках величина энергетической щели, как правило, не превышает нескольких мэВ. Например, величина щели в тонкой пленке NbN ~ 1.5 мэВ, что почти на 3 порядка меньше энергии фотонов ближнего ИК диапазона (например, энергия фотона на длине волны 1.3 мкм составляет ~ 1 эВ). Поэтому поглощенный фотон, отдавая свою энергию электронной подсистеме детектора, способен создать лавину из 100—1000 квазичастиц. Для сравнения: ширина запрещенной зоны большинства полупроводников превышает 100 мэВ (а у многих — выше 1 эВ). Поэтому в полупроводниковых однофотонных детекторах используется иной механизм развития лавины: один поглощенный фотон создает одну электронно-дырочную пару, после чего ускоряемые электрическим полем носители приводят к появлению лавины квазичастиц. Для обеспечения высокого быстродействия ЛФД приходится применять различные схемы принудительного гашения лавины (чего не требуется сверхпроводниковым детекторам). Кроме того, криогенные температуры, необходимые для работы сверхпроводниковых детекторов, обеспечивают меньший уровень тепловых шумов.

На сегодняшний день наиболее развитой является технология детекторов, работающих на сверхпроводящем переходе (Transition Edge Sensors — TES). Эти приборы являются дальнейшим развитием сверхпроводниковых болометров. Подбором сверхпроводника с малой величиной щели Δ (и малой

критической температурой T_c) удается достичь однофотонной чувствительности [19]. TES требуют охлаждения то температуры ~ 0.1 K, а также сложной схемы температурной стабилизации. Квантовая эффективность определяется коэффициентом поглощения и может быть доведена до величины, близкой к 100% [20]. Более того, по величине отклика можно судить об энергии поглощенного фотона либо о количестве фотонов. Однако низкая скорость теплоотвода, необходимая для обеспечения однофотонной чувствительности, сильно ограничивает скорость работы прибора. Максимальная скорость счета фотонов составляет десятки кГц, но при этом в TES-детекторах достигим очень низкий уровень темнового счета (менее 10^{-3} с $^{-1}$).

Еще один тип сверхпроводникового детектора — детектор на основе сверхпроводящего туннельного контакта (STJ) [21, 22, 23, 24, 25]. Поглощение кванта ИК излучения регистрируется в нем по изменению электрического тока туннельного контакта. Эти детекторы требуют глубокого охлаждения до температуры около 1 K. При квантовой эффективности в несколько десятков процентов на длине волны 1.3 мкм скорость счета не превышает 10 кГц.

В табл. 1.1 приведены технические характеристики (максимальная скорость счета, квантовая эффективность на длине волны 1.3 мкм, джиттер (τ_{tts}), минимальный темновой счет (R_{dk}), эквивалентная мощность шума (NEP) на длине волны 1.3 мкм) лучших из перечисленных выше детекторов. Первые четыре строчки — коммерчески доступные ЛФД и ФЭУ, последние три строчки — сверхпроводниковые детекторы. В последней строчке приведены характеристики детектора, исследованного в рамках настоящей работы. Приведённые в табл. 1.1 значения параметров показывают, что характеристики существующих однофотонных детекторов не полностью отвечают современным практическим потребностям. Поэтому поиск новых физических принципов однофотонного детектирования и разработка на их основе

Таблица 1.1. Сравнение технических характеристик однофотонных детекторов (значения квантовой эффективности и NEP приведены для длины волны 1.3 мкм)

Вид детектора	Максимальная скорость счета, c^{-1}	Квантовая эффективность, %	τ_{tts} , пс	R_{dk} , c^{-1}	NEP , Вт/ $\Gamma_{\Gamma}^{1/2}$
InGaAs PFD5WIKSF APS (Fujitsu) [13, 15]	1×10^6	~ 20	более 100	$\sim 6 \times 10^3$	$\sim 10^{-17}$
R5509-43 PMT (Hamamatsu) [9]	9×10^6	1	150	1.6×10^4	$\sim 10^{-16}$
Si APD SPCM-AQR-16 (EG&G)	5×10^6	0.01	350	25	$\sim 10^{-16}$
Mepsicron-II (Quantar)	1×10^6	0.001	100	0.1	-
STJ [23]	5×10^3	60	-	-	-
TES [19]	2×10^4	90	-	менее 10^{-3}	менее 10^{-19}
SSPD настоящая работа	$10^{9(a)}$	30	35	менее 10^{-3}	6×10^{-18}

^a — значение было получено для мостиков длиной 1–10 мкм, а также меандров размером 4 мкм $\times$ 4 мкм, изготовленных из пленки толщиной 10 нм. По последним данным [26] для детекторов из пленки толщиной 3.5 нм в форме меандра, покрывающего большую площадь (10 мкм $\times$ 10 мкм с заполнением 0.5–0.7), значительный вклад в длительность импульса фотоотклика вносит кинетическая индуктивность тонкой пленки NbN.

новых типов однофотонных детекторов ИК диапазона является **актуальной и практически значимой задачей**.

В сложившейся ситуации актуальным является экспериментальное исследование возможностей однофотонного детектирования в однородных сверхпроводящих пленках. В настоящей работе исследуется новый эффект однофотонного детектирования в тонких сверхпроводящих пленках, возникающий в однородных, узких пленках-мостиках в условиях протекания электрического тока, близкого к критическому току распаривания. На основе этого эффекта предложен новый тип однофотонного детектора оптического и ИК диапазонов [4]. Детектор потенциально обладает высоким быстродей-

Научное издание

Корнеев Александр Александрович
Окунев Олег Валерьевич
Чулкова Галина Меркурьевна
Смирнов Константин Владимирович
Милостная Ирина Ивановна
Минаева Ольга Вячеславовна
Корнеева Юлия Петровна
Каурова Наталья Сергеевна
Воронов Борис Моисеевич
Гольцман Григорий Наумович

Спонтанные и фотоиндуцированные резистивные состояния
в узких сверхпроводящих NbN полосках

Монография

Редактор *Дубовец В. В.*
Оформление обложки *Удовенко В. Г.*
Компьютерная верстка *Дорожкина О. Н., Ковтун М. А.*

Управление издательской деятельности
и инновационного проектирования МПГУ
119571, Москва, Вернадского пр-т, д. 88, оф. 446.
Тел.: (499) 730-38-61
E-mail: izdat@mpgu.edu

Подписано в печать 11.12.2015. Формат 60х90/16.
Бум. офсетная. Печать цифровая. Объем 6,75 п. л.
Тираж 500 экз. Заказ № 438.

ISBN 978-5-4263-0269-3



9 785426 302693