

Сверхпроводящий однофотонный детектор на основе ультратонкой пленки NbN

А.Корнеев, О.Минаева, И.Рубцова, И.Милостная, Г.Чулкова, Б.Воронов, К.Смирнов, В.Селезнев, Г.Гольцман, А.Перлман, В.Слыш, А.Кросс, П.Альварес, А.Веревкин, Р.Соболевски

Представлены результаты исследований сверхпроводящих однофотонных детекторов, изготовленных из ультратонкой пленки NbN. Развитие технологического процесса изготовления детекторов, а также снижение рабочей температуры до 2 К позволили существенно увеличить квантовую эффективность: для видимого света ($\lambda = 0.56$ мкм) она составила 30 %–40 %, т. е. достигла предела, определяемого коэффициентом поглощения пленки. С ростом длины волны квантовая эффективность экспоненциально падает, составляя ~ 20 % на $\lambda = 1.55$ мкм и ~ 0.02 % на $\lambda = 5$ мкм. При скорости темного счета $\sim 10^{-4}$ с $^{-1}$ экспериментально измеренная эквивалентная мощность шума составила 1.5×10^{-20} Вт/Гц $^{-1/2}$; в дальнейшем она может быть уменьшена до рекордно низкого значения 5×10^{-21} Вт/Гц $^{-1/2}$. Временное разрешение детектора равно 30 пс.

Ключевые слова: однофотонный детектор, тонкие сверхпроводящие пленки.

В настоящее время развитие однофотонной техники ближнего ИК диапазона сдерживается отсутствием высокочувствительных и быстрых детекторов. Так, чувствительность широко распространенных лавинных фотодиодов (ЛФД) на основе Si ограничена величиной запрещенной зоны кремния. Квантовая эффективность η_q широко применяемых в диапазоне 1.2–1.6 мкм InGaAs-ЛФД достигает в однофотонном режиме 20 %, однако эти фотодиоды отличает большая нестабильность временной задержки переднего фронта импульса Δt и высокая скорость темного счета $R = 10^4$ с $^{-1}$. Для уменьшения последней ЛФД обычно используются в стробирующем режиме, что позволяет реализовать скорость счета фотонов до 10^7 с $^{-1}$. Например, лавинные фотодиоды FPD5W1KS (Fujitsu) хотя и имеют квантовую эффективность ~ 16 %, но их скорость счета составляет 5×10^6 с $^{-1}$ ($\Delta t \sim 200$ пс) при $R = 500$ с $^{-1}$ (в стробирующем режиме). Примерно так же обстоит дело и с фотоумножителями. Так, на длине волны 1.3 мкм один из лучших электровакуумных фотоумножителей R5509-42 STOP PMT (Hamamatsu) при максимальной скорости счета 9×10^6 с $^{-1}$ ($\Delta t \sim 150$ пс) имеет квантовую эффективность $\eta_q \sim 1$ % и $R = 1.6 \times 10^4$ с $^{-1}$.

Чрезвычайная привлекательность использования сверхпроводящих устройств в качестве одноквантовых детекторов обусловлена тем, что энергетическая щель в сверхпроводниках на несколько порядков меньше типичной ширины запрещенной зоны в полупроводниках. Например, ширина энергетической щели в NbN составляет

примерно 2 мэВ. Таким образом, каждый поглощенный фотон создает большое количество квазичастиц (в случае NbN и фотона с $\lambda = 1$ мкм – около 300). В данной работе представлены результаты исследований сверхпроводящего однофотонного детектора (СПОД) на основе ультратонкой пленки NbN.

Процесс изготовления детекторов, подробно описанный в работе [1], вкратце состоит в том, что на сапфировую подложку с двусторонней полировкой методом реактивного магнетронного распыления при постоянном токе наносится сверхпроводящая пленка NbN толщиной 4 нм. Активный элемент детектора представляет собой узкую полосу в виде меандра, покрывающую площадку размером 10×10 мкм. Типичная ширина полоски составляет 100–120 нм, а фактор заполнения (отношение площади, занятой сверхпроводником, ко всей площади устройства) достигает 0.6–0.7 (рис. 1).

Принцип действия детектора основан на использовании резистивной области в узкой сверхпроводящей плен-

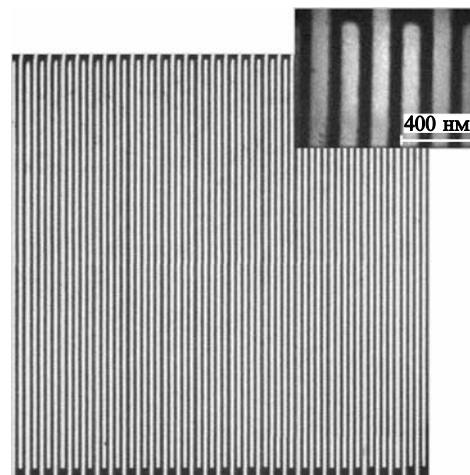


Рис. 1. Изображение детектора, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа.

А.Корнеев, О.Минаева, И.Рубцова, И.Милостная, Г.Чулкова, Б.Воронов, К.Смирнов, В.Селезнев, Г.Гольцман. Московский педагогический государственный университет, Россия, 119992 Москва, ул. Пи-роговская, 1; e-mail: kr78@mail.ru, minaeva_olya@mail.ru, rubtsova_inna@mail.ru, mil@mstu-phys.ru, chulcova@rambler.ru, bmvoronov@mail.ru, skv@mail333.com, goltzman00@mail.ru
A. Pearlman, W. Slys, A. Cross, P. Alvarez, A. Verevkin, R. Sobolewski. University of Rochester, Rochester, NY 14627-0231, USA

Поступила в редакцию 26 мая 2005 г., после доработки – 20 июня 2005 г.

ке, возникающей в результате совместного воздействия поглощенного фотона и транспортного тока. В отличие от сверхпроводящих болометров, работающих при температурах, очень близких к температуре сверхпроводящего перехода T_c , СПОД работает при температуре T , которая существенно ниже T_c . Так, например, для NbN $T_c = 10 - 11$ К, тогда как рабочая температура детектора $T = 2 - 4.2$ К.

Поглощение фотона приводит к формированию лавины квазичастиц и к локальному подавлению сверхпроводимости. В окрестностях образовавшейся нормальной области электрический ток перераспределяется, обтекая ее. В результате плотность тока начинает превышать критическую и всё сечение полосы переходит в нормальное состояние, что сопровождается появлением в ней электрического напряжения. Вследствие диффузии концентрация квазичастиц в нормальной области релаксирует к равновесному значению и сверхпроводимость восстанавливается. Более детальное описание механизма отклика детектора, содержащее расчет числа квазичастиц в лавине, а также информацию о размере образовавшейся нормальной области, дано в работе [2]. Характерные времена термализации и релаксации энергии, лежащие для пленки NbN в пикосекундном диапазоне, определяют высокое быстродействие детектора.

В наших ранних работах [3] для доказательства способности детектора регистрировать одиночные кванты мы исследовали вероятность возникновения отклика детектора в зависимости от энергии импульсов лазерного излучения. Было показано, что эта вероятность прямо пропорциональна энергии импульса излучения и отклик возникает даже при среднем числе фотонов в импульсе, значительно меньшем единицы.

Фотоотклик детектора исследовался на длинах волн 0.56, 0.67, 0.94, 1.26 и 1.55 мкм (непрерывные полупроводниковые лазеры), 0.85 мкм (импульсный GaAs-лазер, длительность импульса $\tau = 20$ пс, частота следования $f \leq 100$ кГц), 0.637, 0.845 и 1.554 мкм (импульсные лазеры Hamamatsu, $\tau = 40 - 60$ пс, $f = 1 - 103$ кГц), а также в диапазоне 1 - 5.5 мкм (ИК спектрометр ИКС-31). Форма импульса напряжения фотоотклика детектора после усиления, составившего 40 дБ, представлена на рис.2. Полная длительность импульса на половине высоты составляет 150 пс. Следует отметить, что в отличие от лавинных диодов и фотоумножителей амплитуда фотоотклика

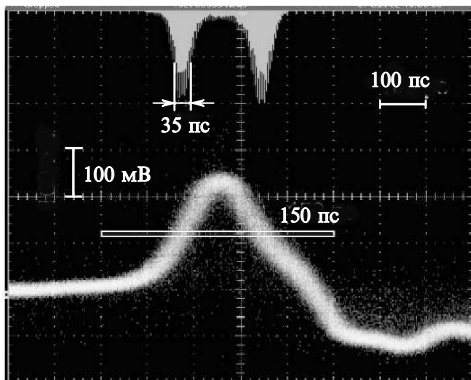


Рис.2. Фотоотклик детектора. Длительность импульса, измеренная на половине высоты, составляет ~ 150 пс; гистограмма в верхней части рисунка – нестабильность фронтов импульса Δt .

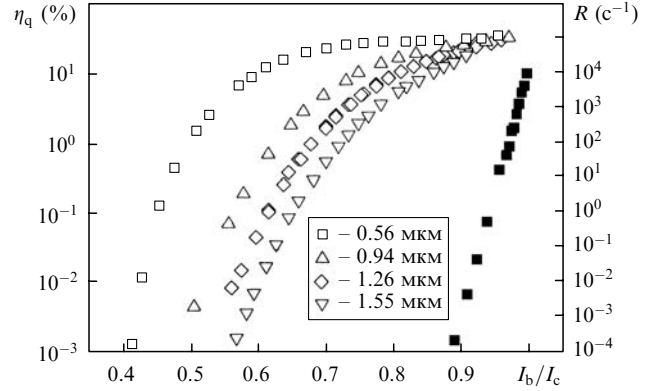


Рис.3. Зависимости квантовой эффективности η_q (светлые точки) и скорости темного счета R (темные точки) от тока детектора при температуре 2 К.

СПОД практически не изменяется от импульса к импульсу и определяется, в основном, током детектора. Нестабильность фронтов импульса составляет 35 пс и в значительной мере определяется собственной нестабильностью измерительной аппаратуры.

Квантовая эффективность η_q измерялась на $\lambda = 0.56, 0.67, 0.94, 1.26$ и 1.55 мкм с помощью непрерывных лазеров. Мощность излучения, подводимого к исследуемому образцу по многомодовому оптоволокну, определялась с помощью измерителей мощности на основе кремниевого ($\lambda = 400 - 1060$ нм) и InGaAs- ($\lambda = 800 - 1600$ нм) фотодиодов. На рис.3 представлены зависимости η_q и скорости темного счета детектора R при температуре 2 К от отношения рабочего тока детектора I_b к его критическому току I_c . Наибольший практический интерес представляет область, где η_q имеет максимальные значения ($0.8 < I_b/I_c < 0.9$). Мы считаем, что «плато», наблюдаемое для видимого света ($\lambda = 0.56$ мкм) в этой области, можно объяснить тем, что каждый поглощенный фотон вызывает срабатывание детектора. С точки зрения применений наиболее интересны телекоммуникационные длины волн 1.3 и 1.55 мкм. На этих длинах волн $\eta_q = 30\%$ (1.3 мкм) и 17% (1.55 мкм). На длине волны 1.3 мкм квантовая эффективность также очень близка к предельному значению, определяемому коэффициентом поглощения пленки. Отметим, что пленка NbN толщиной 4 нм, из которой изготовлен детектор, имеет поверхностное сопротивление около 400 Ом/см^2 . Поскольку это значение близко к волновому сопротивлению вакуума, пленка обладает очень низким коэффициентом отражения и высоким поглощением, достигающим $30\% - 40\%$.

Представленная на рис.3 зависимость скорости темного счета R от нормированного тока детектора I_b/I_c носит экспоненциальный характер в диапазоне исследованных токов $0.87 < I_b/I_c < 0.99$. Экспоненциальный характер $R(I_b)$ простирается на семь порядков. Минимальное измеренное значение R составляло $2 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ при $I_b/I_c = 0.89$ и ограничивалось временем эксперимента: накопление нескольких отсчетов потребовало восьми часов. Отметим, что сочетание столь низкого значения R и величины η_q , превышающей 10% на телекоммуникационных длинах волн при температуре 2 К, позволяет достичь эквивалентной мощности шума $1.5 \times 10^{-20} \text{ Вт} \times \text{Гц}^{-1/2}$. При этом даже небольшое уменьшение I_b/I_c , например до 0.874, позволяет снизить эквивалентную мощность до $5 \times 10^{-21} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$. Экспериментальное

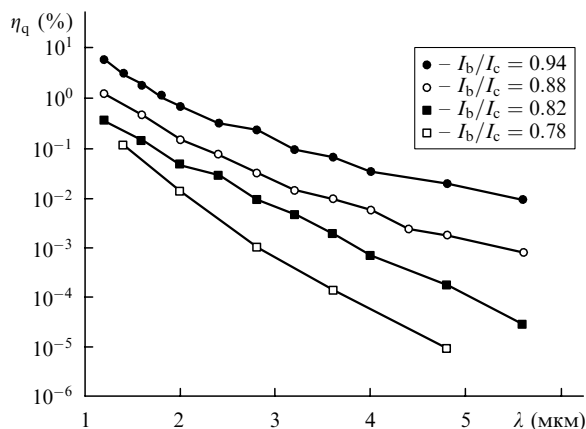


Рис.4. Спектральная чувствительность детектора, измеренная при различных токах и температуре 3 К.

подтверждение этого хотя и требует значительного времени для измерения скорости темнового счета, но является технически вполне выполнимым.

Спектральная чувствительность СПОД была исследована в диапазоне 1.2–5.6 мкм при температуре 3 К. При токе $\sim 0.9I_c$ СПОД обладает спектральной чувствительностью в широком ИК диапазоне. Режим однофотонного детектирования наблюдался во всем диапазоне как минимум до длины волны 5.6 мкм, что делает наш

детектор практически единственным квантовым детектором, работающим в среднем ИК диапазоне (рис.4).

В заключение отметим, что СПОД уже нашел практическое применение в бесконтактном методе тестирования СБИС [4], а также представляется перспективным для использования в целом ряде других областей, таких как исследование флуоресценции одиночных молекул, исследование излучателей на квантовых точках, в квантовых компьютерах. Особый интерес представляет применение сверхпроводящего одноквантового детектора в системах связи (как оптоволоконных, так и работающих в свободном пространстве) для передачи квантово-криптографического ключа.

Работа поддержана РФФИ (грант № 03-02-17697), CRDF (грант RE2-2529-MO-03), INTAS (грант 03-51-4145) и US AFOSR (грант FA9550-04-1-0123).

1. Gol'tsman G., Smirnov K., Kouminov P., Voronov B., Kaurova N., Drakinsky V., Zhang J., Verevkin A., Sobolewski R. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13** (2), 192 (2003).
2. Semenov A., Gol'tsman G., Korneeв A. *Physica C*, **352**, 349 (2001).
3. Gol'tsman G., Okunev O., Chulkova G., Lipatov A., Semenov A., Smirnov K., Voronov B., Dzardanov A., Williams C., Sobolewski R. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (6), 705 (2001).
4. Zhang J., Boiadjieva N., Chulkova G., Deslandes H., Gol'tsman G., Korneeв A., Kouminov P., Leibowitz M., Lo W., Malinsky R., Okunev O., Pearlman A., Slysz W., Verevkin A., Wilsher K., Tsao C., Sobolewski R. *Electron. Lett.*, **39**, 1086 (2003).