

## СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ОДНОФОТОННОГО ДЕТЕКТОРА

Г. М. Чулкова, А. В. Семенов, А. А. Корнеев, А. И. Кардакова, Н. В. Аверьев, П. П. Ан,  
А. Ю. Казаков, А. В. Грифонов

Московский педагогический государственный университет

Получена 31 октября 2011 г.

**Аннотация.** В статье представлена зависимость квантовой эффективности от энергии фотона в рамках модели горячего пятна. Диффузия квазичастиц происходит в основном перпендикулярно направлению тока в областях с максимальной плотностью тока. Максимальная квантовая эффективность детектора пропорциональна вероятности поглощения фотона. Несмотря на квантовый характер работы сверхпроводникового однофотонного детектора, он не имеет четко выраженной красной границы. Изменяя режим работы в зависимости от длины волны можно в видимом и инфракрасном диапазонах получать высокие значения квантовой эффективности, которые будут определяться лишь качеством изготовления детекторов и степенью их согласования с излучением.

**Ключевые слова:** сверхпроводниковый однофотонный детектор, квантовая эффективность, спектральная чувствительность.

**Abstract.** We consider quantum efficiency dependence on photons' energy from hot spot model. Direction of quasiparticles diffusion drive across superconductive film. The maximal quantum efficiency is proportional to a probability of photon absorption. The spectral sensitivity of superconductive single photon detector does not have clearly expressed red limit. Changing regimes of work depends on a wavelength we can get high values of quantum efficiency in visible and infrared range which will be specified by the quality of fabrication of detectors and their consistency with the radiation.

**Key words:** superconducting single-photon detector, SSPD, quantum efficiency, spectral sensitivity.

В области ближнего ИК диапазона в настоящее время наивысшей чувствительностью обладают однофотонные детекторы на основе наноструктур из ультратонких сверхпроводниковых пленок. Эти детекторы по всем основным характеристикам превосходят фотоэлектронные умножители и лавинные фотодиоды в видимом диапазоне и в еще большей мере в ИК области.

Наиболее яркими примерами практического применения сверхпроводникового однофотонного детектора являются: системы безопасной передачи конфиденциальной информации, использующие квантовую криптографию на расстояние 200 км, снижение доли ошибочных битов информации в протяженных линиях оптической связи, за счет более высокой чувствительности и быстродействия приемного модуля, исследование излучения однофотонных источников на основе квантовых ям и квантовых точек.

Для определения спектральной зависимости квантовой эффективности однофотонного детектора воспользуемся моделью «горячего» пятна [1]. В рамках этой модели поглощенный фотон создает в пленке область размером в плане порядка длины когерентности  $\xi$ . В этой области имеются неравновесные квазичастицы с энергиями, существенно превышающими энергию щели  $\Delta$ . Схематично процесс представлен на Рис. 1. В процессе диффузии квазичастиц «горячая» область перекрывает значительную часть ширины пленки, транспортный ток перераспределяется обтекая «горячую» область, так что плотность тока по краям пленки повышается. Диффузия квазичастиц происходит в основном перпендикулярно направлению тока в областях с максимальной плотностью тока. Таким образом, «горячее пятно» приобретает форму полосы шириной  $\xi$ , ориентированной поперек пленки. Длина  $\ell$  этой полосы пропорциональна энергии фотона  $E$  и может быть рассчитана в адиабатическом приближении:

$$\ell = \frac{8\pi E}{H_c^2 d \xi}, \text{ где } H_c - \text{критическое магнитное поле, } d - \text{толщина пленки.}$$

В месте, где транспортный ток обтекает горячее пятно, плотность

транспортного тока повышается  $j_{эфф} = \frac{j}{1 - \frac{\ell}{w}}$  и приближается к критическому

значению. В этой ситуации имеющиеся флуктуации параметра порядка могут привести к полному перекрытию сечения пленки «горячей» областью и возникновения импульса напряжения. В результате квантовая эффективность  $\eta$  такого детектора равна произведению вероятности поглощения фотона  $K$  и вероятности возникновения флуктуации  $Q$  в области обтекания «горячего» пятна транспортным током:  $\eta = K \cdot Q$ .

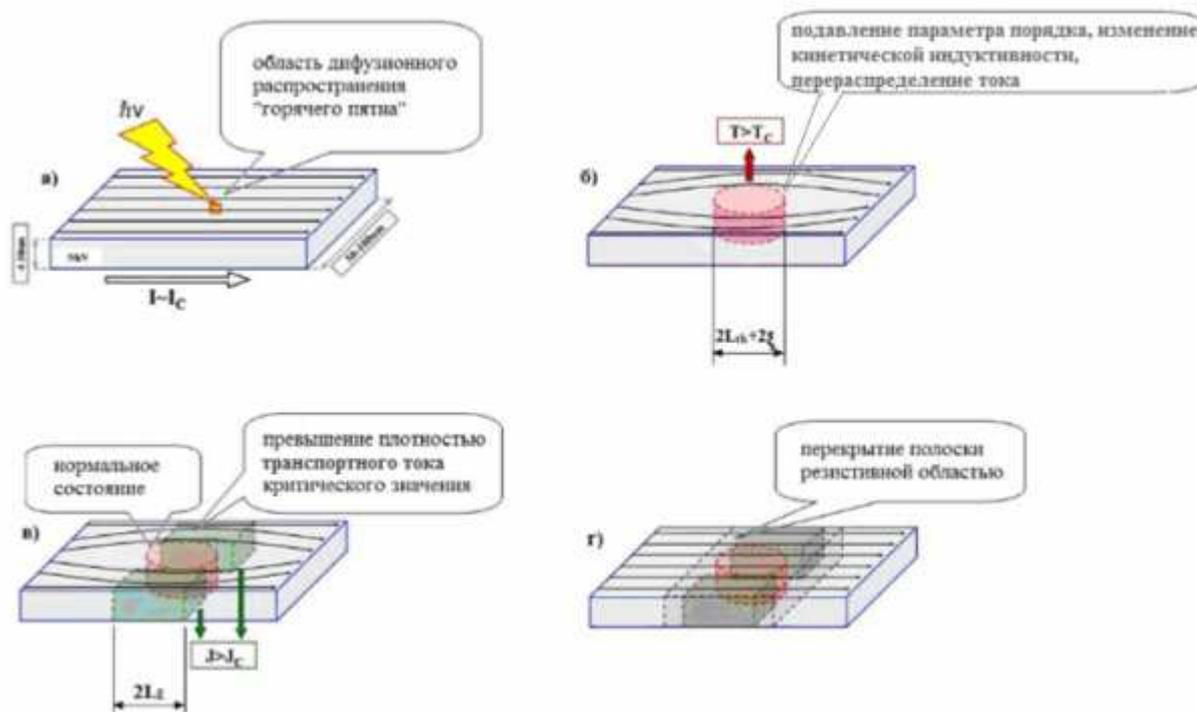


Рис.1.

Коэффициент  $K$  определяется электродинамикой наших пленок и составляет величину от 0,1 до 0,3, которая в рассматриваемом нами диапазоне практически не зависит от длины волны. Вероятность  $Q$  можно определить из скорости срабатывания детектора в темновых условиях. Действительно, в правильно сконструированном детекторе шум определяется тем же физическим механизмом, что и полезный сигнал – в нашем случае таким механизмом является флуктуация параметра порядка. В темновых условиях из-за

флуктуаций возникают области размером  $\xi$  с пониженным параметром порядка, что приводит к разрушению сверхпроводимости и возникновению импульсов напряжения. Если вероятность возникновения такой флуктуации в данном месте в единицу времени равна  $\alpha$ , то на пленки длиной  $L$  будут возникать в единицу времени  $\nu = \alpha L / \xi$  импульсов напряжения. Величину  $\nu$  называют скоростью темновых срабатываний, и она сильно зависит от степени приближения плотности транспортного тока к плотности критического тока  $j_c$ :

$\nu = B \cdot \exp\left(-\beta \cdot \left(1 - \frac{j}{j_c}\right)\right)$ , где  $B$  и  $\beta$  - постоянные, которые хорошо определяются экспериментально.

Величина  $Q$  таким образом может быть легко оценена из скорости темновых срабатываний. Если время жизни горячего пятна равно  $\tau$ , то вероятность его образования за время существования сверхпроводящей флуктуации равно:

$$Q = 1 - \exp(-\alpha \cdot \tau) = 1 - \exp\left(-\tau \cdot \frac{\xi}{L} \nu\right),$$

где  $\nu$  берется при значении плотности тока  $j_{эфф}$ , соответствующего обтеканию «горячего» пятна и которое зависит от энергии поглощенного фотона. Таким образом, спектральная зависимость квантовой эффективности однофотонного детектора определяется спектральной зависимостью  $Q$ , которая в свою очередь зависит от энергии кванта через значение  $j_{эфф}$  (по-видимому, зависимость  $\tau$  от энергии фотона существенно слабее, т. к. определяется в основном диссипативными процессами ухода неравновесных фононов).

Явная зависимость квантовой эффективности  $\eta$  от энергии фотона довольно сложна, поэтому разберем два предельных случая. Пусть вероятность возникновения флуктуации мала, тогда:

$$\eta = K \cdot \frac{\tau B \xi}{L} \exp\left(-\beta \left(1 - \frac{I}{I_c \left(1 - \frac{E}{E_0}\right)}\right)\right),$$

где  $E_0 = \frac{H_C^2}{8\pi} \xi dw$ . Из сравнения с экспериментальными результатами [2,3] для полосок NbN шириной 0,4 мкм при малой квантовой эффективности (что соответствует используемому приближению) получим  $E_0 = 7,5$  эВ в хорошем согласии с параметрами используемых пленок.

В противоположном приближении высокой квантовой эффективности значение можно оценить величину тока  $I_m$ , при котором будет достигаться максимальная квантовая эффективность:

$$I_m = I_C \left( 1 - \frac{E}{E_0} \right) \left( 1 - \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{\tau B \xi}{L} \right) \right).$$

Таким образом, несмотря на квантовый характер работы сверхпроводникового однофотонного детектора, он не имеет четко выраженной красной границы. Изменяя режим работы в зависимости от длины волны можно в видимом и инфракрасном диапазонах получать высокие значения квантовой эффективности, которые будут определяться лишь качеством изготовления детекторов и степенью их согласования с излучением.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы

### Литература

1. A. Semenov, G. Gol'tsman, A. Korneev - Quantum detection by current carrying superconducting film// *Physica C* – 2001 – 351 – pp. 349-356.
2. A.Verevkin, J.Zhang, R.Sobolewski, A.Lipatov, O.Okunev, G.Chulkova, A.Korneev, K.Smirnov, G.Gol'tsman – Detection efficiency of large-active-area NbN single-photon superconducting detectors in ultraviolet to near-infrared range// *Applied Physics Letters* – 2002 – v.80 – №25 – pp.4687-4689.
3. L. Maingault, M. Tarkhov, I. Florya, A. Semenov, R. Espiau de Lamaestre, P. Cavalier, G. Gol'tsman, J.-P. Poizat, and J.-C. Villegier – Spectral dependency of superconducting single photon detectors// *Journal of Applied Physics* – 2010 – v.107 – pp.116103.