

параметр Гинзбурга — Ландау  $\kappa = \lambda/\xi$ ; у С. п. р.  $\kappa < 1/\sqrt{2}$ . Переходы между нормальным и сверхпроводящим состоянием в магн. поле у С. п. р. являются фазовыми переходами 1-го рода. При охлаждении образца С. п. р., помещённого в магн. поле, происходит выталкивание магн. потока за счёт движения доменных границ. Если такое движение затруднено неоднородностями образца, то происходит «замораживание» магн. потока; в таком неравновесном состоянии может наблюдаться неполный эффект Мейснера. Практически все чистые металлы за исключением Nb относятся к С. п. р.

**СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЁМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ** — приёмные устройства, основанные на изменении состояния сверхпроводника (или системы сверхпроводников) под действием излучения. Использование сверхпроводников, обладающих малым уровнем шума и сильно нелинейными свойствами, позволяет достигнуть высокой чувствительности С. п. и., приближающейся к теоретич. (квантовому) пределу. Наиб. распространение получили след. виды С. п. н.: сверхпроводниковые болометры, приёмники на основе Джозефсона эффекта (тунелирование спаренных электронов) и приёмники на основе одночастичного тунелирования.

Чувствительным элементом (ЧЭ) сверхпроводникового болометра (СБ) является сверхпроводящая плёнка (СП), находящаяся при темп-ре, фиксированной на крутом участке кривой перехода плёнки из нормального в сверхпроводящее состояние (рис. 1). Незначит. нагрев плёнки (на  $\sim 10^{-4}$  К) потоком эл.-магн. излучения

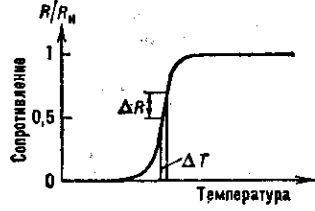
рамке (5) — «термостату» с большой постоянной времени ( $\tau \sim 10$  с). Висмутовая плёнка имеет значит. сопротивление и высокий коэф. поглощения, величина к-рого практически не зависит от длины волны излучения. Находящаяся в хорошем тепловом контакте с ней плёнка Al обладает узким сверхпроводящим переходом ( $\Delta T \sim 10^{-3}$  К) и обеспечивает высокий коэф. преобразования. Включение СП в измерительную схему осуществляется при помощи тонких плёнок из индия, нанесённых на нейлоновые нити (4).

СБ работает в режиме прямого детектирования излучения, к-рое обычно модулируется с НЧ ( $\sim 10$  Гц). Пороговая чувствительность  $P_{\text{п}}$  СБ, т. е. мощность, вызывающая изменение напряжения на плёнке, равное среднеквадратичному шумовому напряжению на ней (см. Шумы в радиоэлектронике), определяется шумом ЧЭ. На практике в высокочувствит. СБ осн. шум обусловлен термодинамич. флуктуациями темп-ры при переносе теплоты от ЧЭ к термостату. Этот шум обычно превосходит джозефсоновский шум (белый шум) активного сопротивления плёнки, а также шум, вызываемый флуктуациями фонового излучения. В этом случае  $P_{\text{п}} \approx (4kT^2G)^{1/2}$ , где  $G$  — коэф. тепловой связи ЧЭ с термостатом. Постоянная времени СБ определяется соотношением  $\tau = C/G$ , где  $C$  — теплоёмкость ЧЭ. С учётом этого  $P_{\text{п}} \sim \tau^{-1}$  и ухудшается при уменьшении  $\tau$ , а при фиксированном  $\tau$  она улучшается с уменьшением  $C$ .

Высокочувствительными считаются СБ с  $P_{\text{п}} = 10^{-12} - 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>, обладающие довольно значит. инерционностью ( $\tau = 10^{-1} - 10^{-4}$  с. Чувствительность описанного выше составного болометра достигает  $P_{\text{п}} = 3 \cdot 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при частоте модуляции 2 Гц. Для увеличения быстродействия СБ (ведущего к соответствующей потере чувствительности) СП наносится на массивную подложку через теплоизолирующую прослойку, либо СП находится в тепловом контакте с жидким гелием, что обеспечивает быстрый отвод от неё теплоты. Постоянная времени таких СБ уменьшается до  $10^{-5} - 10^{-10}$  с, а  $P_{\text{п}} = 10^{-2} - 10^{-12}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>.

Действие приёмников излучения с джозефсоновскими переходами (ДП) основывается на видоизменении нелинейных вольт-амперных характеристик (ВАХ) этих переходов под действием эл.-магн. излучения. На рис. 3 схематически представлена ВАХ ДП с непосредств. проводимостью (мостик, точечный контакт) как в отсутствие, так и при наличии внеш. излучения.

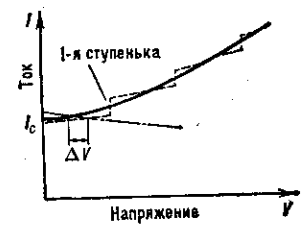
Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления плёнки R при переходе её из нормального в сверхпроводящее состояние. R<sub>н</sub> — сопротивление плёнки в нормальном состоянии. Под действием излучения температура плёнки увеличивается на  $\Delta T$ , её сопротивление на  $\Delta R$ .



вызывает заметное изменение её сопротивления и напряжения на ней (при фиксиров. токе), к-рое и регистрируется малошумящим усилителем. Чувствительность СБ пропорциональна крутизне кривой перехода и поэтому использование материалов с узкими сверхпроводящими переходами является предпочтительным. СП должна удовлетворять и другим, часто противоречивым требованиям: высокое уд. сопротивление в нормальном состоянии, малая толщина, слабая зависимость чувствительности от частоты излучения, малая теплоёмкость и др.

Для достижения высокой чувствительности наиб. выгодным оказалось разделение ф-ций поглощения излучения и реагирования на вызываемый им нагрев. Этот принцип реализован в т. н. составном болометре, простейшая схема к-рого представлена на рис. 2. В этом болометре ЧЭ (1) — СП из Al. Она нанесена на одну из сторон тонкой сапфировой подложки (2), с др. стороны подложки нанесена плёнка Bi (3), поглощающая излучение. Подложка подвешена на тонких нейлоновых нитях (4), к-рые крепятся к массивной медной

Рис. 3. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) джозефсоновского перехода с непосредственной проводимостью. Сплошная кривая — ВАХ без действия излучения, штриховая кривая — ВАХ при действии излучения, штрихпунктир — нагрузочная кривая. I<sub>с</sub> — критический ток, ΔV — изменение напряжения под действием излучения.



Воздействие излучения (с частотой f) сводится в осн. к понижению критич. тока I<sub>с</sub> и появлению вертикальных ступеней при напряжениях  $V_n = nhf/2e$  (n — целое число, соответствующее номеру ступени). Ступени на ВАХ обусловлены нелинейным взаимодействием в переходе колебаний тока — собственных (джозефсоновских) и наведённых внеш. излучением. В режиме квадратичного детектирования ДП включается в цепь с заданным током и при понижении I<sub>с</sub> происходит изменение напряжения на ДП ΔV, к-рое и регистрируется как отклик приёмника. Для малых амплитуд наведённого тока  $I \ll I_c$  величина отклика  $\Delta V \approx I^2$ . В случае низких частот ΔV определяется кривизной ВАХ и не зависит от частоты. Этот случай тождествен случаю обычного классич. детектирования излучения нелинейным элементом. В области высоких частот ве-

Рис. 2. Схема основного узла составного сверхпроводящего болометра: 1 — сверхпроводящая плёнка из Al; 2 — сапфировая подложка; 3 — плёнка из Bi; 4 — нейлоновые нити; 5 — медная рамка; 6 — висмутовый нагреватель подложки; 7 — контакты из In.

