

НЕСЕЛЕКТИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВЕРХПРОВОДЯЩУЮ ПЛЕНКУ В РЕЗИСТИВНОМ СОСТОЯНИИ

*Е.М.Гершензон, М.Е.Гершензон, Г.Н.Гольцман,
А.Д.Семенов, А.В.Сергеев*

Обнаружено, что эффект воздействия электромагнитного излучения на сверхпроводящую пленку ниобия в резистивном состоянии, обязанный разогреву квазичастиц, неселективен в широком диапазоне частот от 10^{10} до 10^{15} Гц. Обсуждается роль электрон-электронных столкновений в формировании неравновесной функции распределения квазичастиц.

Среди известных механизмов воздействия излучения на сверхпроводник в резистивном состоянии не зависящим от частоты является лишь болометрический эффект. В¹ нами сообщено о новом эффекте влияния излучения на сверхпроводящую пленку Nb малого поперечного сечения (шириной $W = 1 - 10$ мкм и толщиной $d = 100$ Å), переведенную в резистивное состояние внешним магнитным полем H и транспортным током I . Изучение эффекта проявляющегося в увеличении сопротивления под действием излучения, показало его независимость от частоты в окрестности равновесной энергетической щели и малую инерционность (постоянная времени $\tau = 1$ нс). Отмечалось, что он связан с разогревом квазичастиц излучением.

В настоящей работе проведено исследование этого эффекта в значительно более широком диапазоне частот; показано, что он неселективен и обладает одинаковой инерционностью от радиоволн до ультрафиолета обнаружен ряд особенностей, доказывающих его неболометрическую природу. Полученные результаты свидетельствуют о значительной роли электрон-электронных столкновений в формировании функции распределения квазичастиц в условиях эксперимента.

Измерения в широкой области спектра потребовали сочетания оптических и радио-методов: применялись клистроны сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн, миллиметровые и субмиллиметровые лампы обратной волны (ЛОВ), инфракрасные, оптические и ультрафиолетовые монохроматоры и лазеры, а также абсолютно черное тело (АЧТ) с набором фильтров. Мощность излучения измерялась радиометрами, независимая калибровка осуществлялась с помощью АЧТ. Инерционность эффекта определялась как на СВЧ, так и в оптическом диапазоне. В первом случае использовалась модуляция питания ЛОВ или биения интенсивности излучения двух ЛОВ, сдвинутых по частоте на величину $f = 10^5 - 10^9$ Гц², во втором — импульсный наносекундный азотный лазер ($\lambda = 0,337$ мкм).

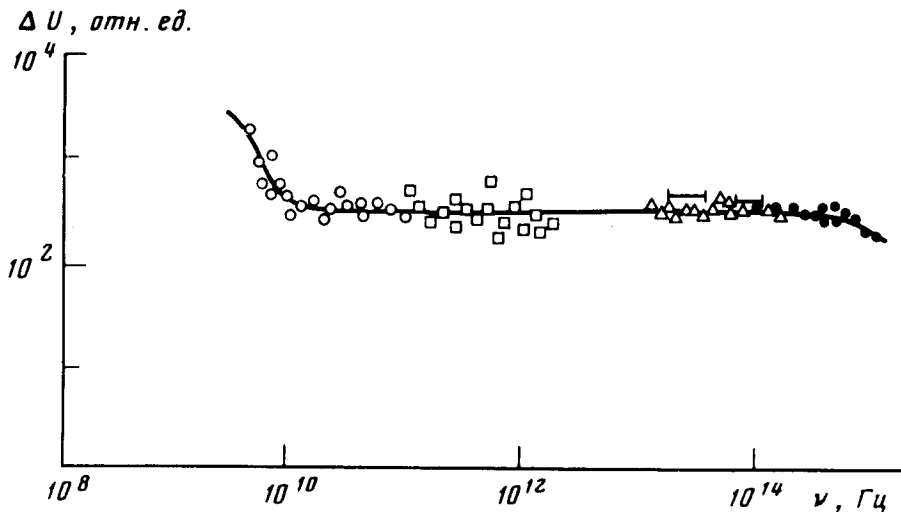


Рис. 1. Зависимость $\Delta U(\nu)$, $P = \text{const}$: \circ — клистроновые генераторы, \square — ЛОВ, \triangle — АЧТ с фильтрами, — — АЧТ в интеграле, \bullet — монохроматоры с глобаром и ртутной лампой

На рис. 1 представлены данные для изменения напряжения на образце ΔU под действием излучения частоты ν в режиме генератора тока для пленки ниобия на сапфировой подложке при $T = 2$ К, $H = 20$ кЭ, $I = 30$ мкА (критическая температура для этого образца $T_k = 6,2$ К, $d = 120$ Å, $W = 2,5$ мкм). При этом мощность P излучения, падающего на пленку, поддерживалась неизменной. Обращает на себя внимание постоянство ΔU в очень широком интервале частот $\nu = 10^{10} - 10^{15}$ Гц. На рис. 2 (кривая 1) показана зависимость ΔU от частоты модуляции f излучения с длиной волны $\lambda = 1$ мм при $T = 5$ К. Видно, что ΔU не меняется вплоть до $f = 2 \cdot 10^5$ Гц, спаду на более высоких частотах соответствует $\tau = 8 \cdot 10^{10}$ с. Это значение сохраняется при любых фиксированных I , H , T , и λ . Близкие результаты получены и по спаду ΔU при импульсном возбуждении азотным лазером.

Для выяснения того, что эффект — не болометрический, наряду с наблюдаемым резким отличием температурных зависимостей ΔU и $\partial U / \partial T$ выполнен ряд независимых измерений. Их основные результаты следующие. Это прежде всего, превышение, достигающее трех порядков, значения ΔU , определенного экспериментально, над величиной болометрического эффекта, рассчитанного из измерений $\partial U / \partial T$, коэффициента поглощения излучения и теплопроводности границы пленки с подложкой и сверхтекучим гелием. Затем — совпадение величины эффекта ΔU (для $f \geq 10^5$ Гц) и постоянной времени τ для одинаковых пленок, напыленных на разные подложки (сапфир и стекло), отличающиеся по значениям теплопроводностей более, чем на порядок (рис. 2). Отметим, что болометрический эффект превышает изучаемый лишь при низких частотах модуляции $f < 10^5$ Гц в условиях плохого теплоотвода от пленок (кривая 2).

Наблюдаемый эффект обусловлен пространственно неоднородным резистивным состоянием. Рост сопротивления под действием излучения может быть вызван расширением нормальных областей, увеличением глубины проникновения электрического поля в сверхпроводящие области l_E , а также влиянием излучения на движение вихрей. Он проявляется как вблизи T_K , где резистивное состояние связано с центром проскальзывания фазы, так и при низких температурах в сильном магнитном поле, когда в создании резистивного состояния может быть существенно вязкое движение вихрей. Эксперимент показывает, что в последнем случае все характеристики эффекта остаются прежними при изменении ориентации магнитного поля относительно поверхности пленки с перпендикулярной на параллельную, если сохраняется приведенное к критическому значению H . При этом магнитный поток, пронизывающий пленку меняется более, чем на два порядка. Таким образом, эффект не связан со способом создания резистивного состояния и его причиной не может быть изменение движения вихрей под действием излучения. Оставшиеся две возможности — изменение размеров нормальных областей и величины l_E — не являются альтернативными.

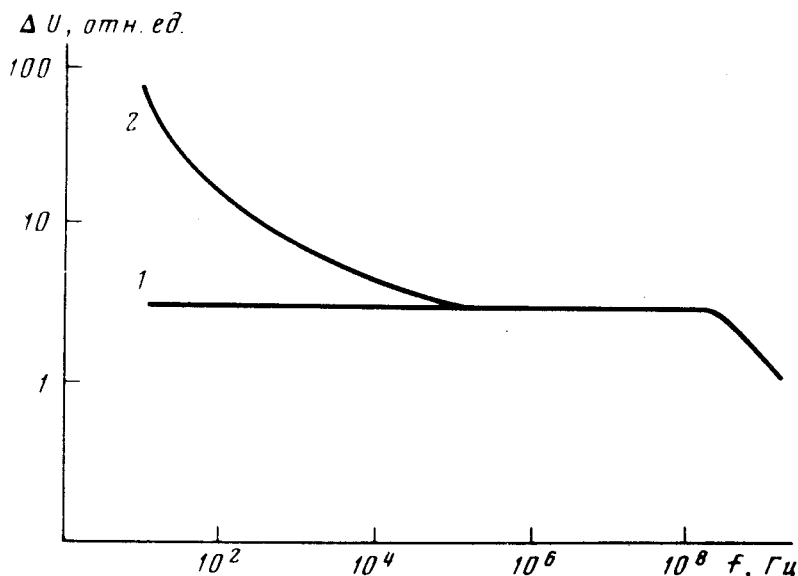


Рис.2. Зависимость $\Delta U(f)$ для пленок Nb толщиной 120 Å нанесенных на различные подложки: 1 — сапфир, 2 — стекло

Качественное объяснение неселективности наблюдаемого эффекта сводится к следующему. Коэффициент поглощения излучения α_s сверхпроводящей пленки в условиях эксперимента, когда сверхпроводимость сильно подавлена, слабо отличается от коэффициента поглощения α_n пленки нормального металла. Расчет для исследуемых пленок в модели свободных электронов показывает, что зависимости $\alpha_n(\nu)$ и $\Delta U(\nu)$ (рис. 1) практически совпадают в области частот $\nu > 10^{10}$ Гц. Поглощенное электромагнитное излучение разогревает электронный газ, как взаимодействуя с уже имеющимися квазичастицами, так и разрушая куперовские пары. Горячие квазичастицы релаксируют за счет электрон-электронных и электрон-фононных столкновений. Диапазон частот, в котором эффект неселективен, включает энергии фотонов $\hbar\omega$ как много больше kT_D (T_D — температура Дебая), так и меньшие kT . Высокоэнергичные фононы, испускаемые квазичастицами при $\hbar\omega > kT_D$ сильно поглощаются и не выходят из пленки, в то время как для тепловых фононов пленка прозрачна. Однако, когда существенная часть энергии квазичастиц ϵ излучается в виде тепловых фононов, функция распределения оказывается сформированной за счет электрон-электронных столкновений. Это связано с тем, что для пленок с малым значением длины свободного пробега l ,

согласно ³, рассеяние электронов на статических дефектах существенно влияет на релаксацию квазичастиц, связанную с межэлектронным взаимодействием. Оценка для времени релаксации энергии за счет межэлектронных столкновений по формуле ⁴

$$\tau_{\epsilon}^{ee} = \frac{2}{3\pi} \frac{\hbar}{kT} \frac{(K_F l)(K_F d)}{\ln(K_F l)(K_F d)}, \text{ где } K_F \text{ — фермиевский волновой вектор,}$$

показывает, что для исследованных пленок ($l \cong 10 - 20 \text{ \AA}$) время неупругого электрон-фононного взаимодействия τ_{ϵ}^{ph} оказывается больше τ_{ϵ}^{ee} при $T \leq 10 \text{ K}$. Таким образом, в широком диапазоне частот излучения энергия кванта эффективно распределяется по электронной подсистеме и величина эффекта определяется только поглощенной мощностью.

Авторы выражают признательность А.Г.Аронову и Б.З.Спиваку за полезные обсуждения.

Литература

1. Гершензон Е.М., Гершензон М.Е., Гольцман Г.Н., Семенов А.Д., Сергеев А.В. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 281.
2. Гершензон Е.М., Гольцман Г.М., Семенов А.Д. Труды III Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам, Горький, 1980, 1, 233.
3. Альтшулер Б.Л., Аронов А.Г. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, 514
4. Altshuler B.L., Aronov B. L., Khmel'nitzky D.E. J. Phys. C (in press).

Московский
педагогический институт им. В.И.Ленина

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16 июля 1982 г.
После переработки
23 августа 1982 г.