

Высокочастотное излучение внутренних джозефсоновских переходов в сверхпроводящем соединении $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)_y$

Мы наблюдали микроволновое излучение из слоистого сверхпроводника $\text{Fe}(\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7})_{0.9}$ в его резистивном состоянии, которое, по-видимому, обусловлено излучением из последовательно включенных внутренних джозефсоновских переходов сверхпроводник – ферромагнитный слой – сверхпроводник.

Ключевые слова: слоистый сверхпроводник, внутренний джозефсоновский переход, микроволновое излучение.

Электромагнитные (ЭМ) волны в терагерцовом (ТГц) частотном диапазоне между инфракрасными и микроволновыми частотами, привлекают огромный интерес в связи с их возможным использованием в широком спектре науки и техники: от астрономии и неразрушающего контроля качества сельскохозяйственной продукции до сверхвысокой скорости передачи информации, контроля безопасности и медицине [1].

Из классической теории сверхпроводимости хорошо известно, что джозефсоновский переход может работать в качестве генератора высокочастотных электромагнитных волн. Однако частота его излучения ограничена величиной сверхпроводящей энергетической щели (1 mV соответствует 483 ГГц), которая для обычных сверхпроводников составляет менее 700 ГГц. При этом одиночный джозефсоновский переход имеет низкую выходную мощность высокочастотного излучения (в диапазоне нановатт). Обе эти проблемы могут быть успешно решены при использовании высокотемпературных сверхпроводников, обладающих внутренними, последовательно включенными джозефсоновскими переходами. В [2] было экспериментально показано, что в слоистом высокотемпературном сверхпроводнике $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ наблюдается непрерывное когерентное излучение мощностью $\sim 0,5$ мВт на частотах $\sim 0,85$ ТГц при температурах до $T \sim 50$ К. Это соединение состоит из внутренних джозефсоновских переходов СИС типа, где в качестве сверхпроводника (С) выступает CuO_2 , а в качестве изолятора (И) Bi_2O_2 . Эта пионерская работа стимулировала исследования по созданию сверхпроводящих компактных источников терагерцового излучения [3].

В настоящей работе мы наблюдали высокочастотное излучение из сверхпроводящего слоистого кристалла $\text{Fe}(\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7})_{0.9}$ в его резистивном состоянии. Характерные особенности исследованных твердых растворов состоят в следующем [4]: i) материал состоит из отдельных кристаллических слоев, скрепленных силами Ван-дер-Ваальса; ii) кристаллические слои одновременно обладают короткодействующим магнитным упорядочением и сверхпроводимостью; iii) чем больше атомов Те в соединении, тем больше концентрация междоузельного Fe; iv) критическая температура (T_c) для сверхпроводящего перехода зависит от величины x . Так, например, при $x = 0,5$ материал переходит в сверхпроводящее состояние при критической температуре $T_c \sim 14$ К. Однако при полной замене селена атомами теллура происходит исчезновение сверхпроводимости и в сплаве FeTe наблюдается только дальнедействующий антиферромагнитный порядок.

На рисунке 1 показано схематическое изображение тетрагональной структуры $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$. Атомы железа расположены в одной плоскости листа (Fe), избыточные атомы железа (обозначены Fe(M)) распределены на междоузлиях слоев Te / Se [5].

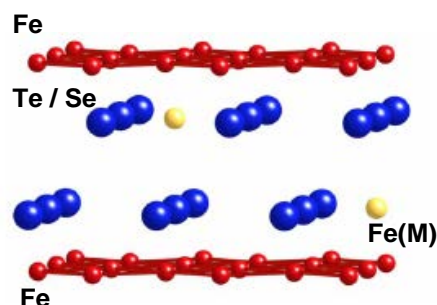


Рис. 1 – Схематическое изображение тетрагональной структуры $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$. Fe - атомы железа в одной плоскости. Fe(M) - железо в междоузлиях слоев Te / Se.

Таким образом, в направлении перпендикулярном к слоям в кристалле $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$ при $T < T_c$ между сверхпроводящими слоями Te / Se находятся слои железа с короткодействующим ферромагнитным порядком. В этом случае слоистый кристалл можно рассматривать как сверхпроводник, состоящий из большого количества последовательно включенных джозефсоновских переходов С-Ф-С типа (здесь Ф - ферромагнитный слой).

Как известно эффект Джозефсона описывает перенос куперовских пар между двумя сверхпроводниками (С) через слабое звено. Само слабое звено может быть очень тонким слоем изолятора (И), позволяющее квантовое туннелирование куперовских пар (джозефсоновский переход СИС – типа), либо состоять из обычного слоя металла (М) в котором возникает эффект наведенной сверхпроводимости (джозефсоновский переход СМС – типа). Во всех этих случаях сверхпроводящий ток I_s описывается стационарным уравнением Джозефсона:

$$I_s = I_c \sin \varphi \quad (1)$$

Здесь I_c критический, т.е. максимальный сверхпроводящий ток, а φ разность фаз между двумя когерентными ансамблями куперовских пар, принадлежащих двум сверхпроводникам разделенных слабой связью. При этом для переходов СИС и СМС типов в основном состоянии разность фаз $\varphi = 0$. В том случае, когда джозефсоновский переход С-Ф-С типа, т.е. направление сверхпроводящего тока перпендикулярно к слоям $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$, транспорт куперовских пар между двумя сверхпроводниками происходит через тонкий слой Fe. В этом случае между сверхпроводниками будет разность фаз $\varphi = \pi$ (так называемое π -состояние) [6]. В эксперименте это должно проявляться в осциллирующем характере I_c от температуры, включая его полное исчезновение [7]. Действительно, такое осциллирующее поведение I_c от температуры было нами обнаружено в $\text{Fe}(\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7})_{0.82}$ [8], что дает нам основание утверждать, что слоистый кристалл $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$ в направлении перпендикулярном слоям состоит из внутренних джозефсоновских переходов С-Ф-С типа. Из теории также следует, что при $I > I_c$, когда на переходе появляется напряжение (U_s), наряду с нормальным током будет существовать и сверхпроводящий ток (так называемое промежуточное состояние), но с разностью фаз φ , изменяющейся во времени (нестационарный эффект Джозефсона). В этом случае в пределах перехода будет существовать также переменный сверхпроводящий ток с частотой $f = (2e/h)U_s$ (2). Другими

словами, джозефсоовский переход будет работать как перестраиваемый по частоте генератор высокочастотного излучения.

Обнаружение микроволнового излучения будет еще одним доказательством существования внутренних джозефсоновских переходов внутри слоистого соединения $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$ при $T < T_c$.

В наших экспериментах мы использовали образцы площадью около 25мм^2 и толщиной в диапазоне $150 - 400\text{мкм}$. Ток был в направлении, перпендикулярном слоям FeSeTe (с - направление кристалла). Для регистрации микроволнового излучения мы использовали джозефсоновский переход сверхпроводник-полимер-сверхпроводник (СПС) [9]. В экспериментах оба объекта были смонтированы в стеклянном криостате, охлаждаемым жидким гелием. Расстояние между сверхпроводником $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$ и детектором СПС было 10мм . Температура гелиевой ванны поддерживалась с точностью $\sim 0.01\text{К}$. На рисунке 2 показана вольт - амперная характеристика (ВАХ) СПС-детектора под воздействием высокочастотного излучения. Для этой цели мы использовали клистрон с частотой $9,3\text{ ГГц}$ и выходной мощностью $0,1\text{Вт}$. Стабильность частоты составляла $\sim 10^{-8}$. Когда частота сверхпроводящего переменного тока в СПС детекторе совпадает с частотой внешнего электромагнитного излучения, на ВАХ возникали резкие скачки тока (ступеньки Шапиро). Необходимо отметить, что появление ступеней Шапиро возможно только при высокой стабильности частоты внешнего источника излучения, в противном случае, можно наблюдать только подавление сверхпроводящего тока в джозефсоновском переходе.

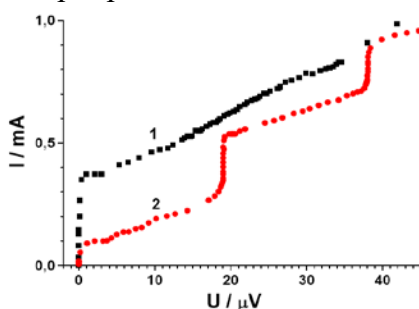


Рис. 2 – ВАХ детектора СПС (здесь П = полиамедин), облученного микроволновым излучением при $T = 3.64\text{ К}$: 1) $F = 0$; 2) $F = 9,3\text{ ГГц}$ (красные символы).

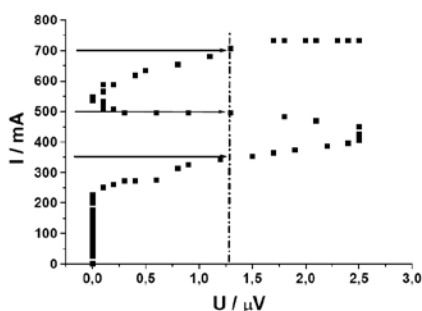


Рис. 3. ВАХ слоистого сверхпроводника $\text{Fe}(\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7})_{0.9}$ при $T = 3,64\text{ К}$. Стрелки указывают величины токов.

На рисунке 3 показана ВАХ слоистого сверхпроводника $\text{Fe}(\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7})_{0.9}$. Стрелки указывают токи через сверхпроводник, при которых детектировалось высокочастотное излучение в соответствии с (2).

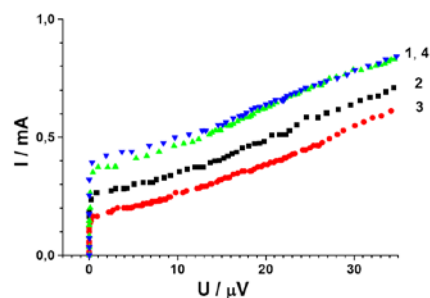


Рис.4. ВАХ детектора СПС при $T = 3.64$ К. Числа указывают токи через слоистый сверхпроводник в резистивном состоянии;

- 1) $I = 0$ зеленые символы; 2) $I = 350$ мА черные символы; 3) $I = 500$ мА красные символы; 4) $I = 700$ мА темно-синие символы.

Как это видно из рисунка 4 при токах пропускания $I < 700$ мА через слоистый сверхпроводник $\text{Fe}(\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7})_{0.9}$ на ВАХ СПС – детектора наблюдаются подавления I_c . Выходная мощность высокочастотного излучения из слоистого сверхпроводника зависит от величины тока. Чем больше ток, тем больше выходная мощность высокочастотного излучения. Тем не менее, как видно из рисунка, когда $I = 700$ мА (кривая 4), ВАХ СПС – детектора был такой же, как при $I = 0$. Такое поведение критического тока детектора SPS не может быть из-за термического нагрева гелиевой ванны. Мы полагаем, что отсутствие подавления I_c у СПС – детектора связано с исчезновением сверхпроводящего тока при $I \geq 700$ мА у $\text{Fe}(\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7})_{0.9}$, и, следовательно, с отсутствием высокочастотного излучения. Здесь необходимо провести более детальное исследование спектральной характеристики высокочастотного излучения.

В заключение отметим, что наблюдаемое высокочастотное излучение из слоистого сверхпроводника $\text{Fe}(\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7})_{0.9}$ в его резистивном состоянии обусловлено излучением из внутренних джозефсоновских переходов СФС типа.

Библиографический список

1. В.М. Исаев, И.Н. Кабанов, В.В. Комаров, В.П. Мещанов Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона Доклады ТУСУРа, № 4 (34), декабрь 2014 С. 5 -21.
2. L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, et al Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors SCIENCE VOL 318 23 NOVEMBER 2007 P. 1291 – 1293.
3. Iwao Kawayama, Caihong Zhang, Huabing Wang and Masayoshi Tonouchi. Study on terahertz emission and optical/terahertz pulse responses with superconductors. Super. Sci. Technol. 26 (2013) 093002 (17pp)
4. Волков М.П., Мелех Б.А.-Т., Бахарев В.И., Картенко Н.Ф. Получение поли- и монокристаллов сверхпроводящих монохалькогенидов железа при непродолжительных временах синтеза Письма в Журнал Технической Физики, 2010, 36, С.8-14.
5. В. С. Sales, А. S. Sefat, М. А. McGuire et.al. Bulk superconductivity at 14 K in single crystals of $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_x\text{Se}_{1-x}$. Phys. Rev. B 79, 2009. P. 094521.
6. А.И.Буздин, Л.Н.Булаевский, С.В.Панюков, Осцилляции критического тока в зависимости от обменного поля и толщины ферромагнитного металла (F) в джозефсоновском контакте S-F-S. Письма в ЖЭТФ, 35, 1982. С. 147-148.
7. V.V. Ryazanov in: Series on NanoScience and Technology. Vol. "Fundamentals of Superconducting Nanoelectronics", Chapter 8. Springer. 2011. P. 219-248.
8. А.Н.Ионов, Б.А.-Т.Мелех, Немонотонная температурная зависимость критического тока в сверхпроводящем $\text{Fe}(\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7})_{0.82}$ Письма в Журнал Технической Физики, 39, 1913, С. 71-78.
9. А.Н.Ионов, Резонансное туннелирование купервских пар в джозефсоновском переходе сверхпроводник-полимер-сверхпроводник, ЖЭТФ, 2013, 143, С.960-967.