

## ПОГЛОЩЕНИЕ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В УЛЬТРАТОНКИХ НИТЯХ ПРОВОДНИКОВ

© В.Н.Богомолов, В.Ю.Бутко, Т.М.Павлова, А.В.Фокин

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Поступила в Редакцию 9 июня 1995 г.)

Получены системы ультратонких нитей металлов и полупроводников, эффективно поглощающих СВЧ-излучение. Проведено исследование высокочастотных свойств этих систем в частотном диапазоне  $\nu = 12-53$  GHz при температурах  $\vartheta = 1.8-300$  K. Для ультратонких ртутных нитей установлена немонотонность температурной зависимости поглощения СВЧ-излучения. Обнаружено, что температурная зависимость ослабления СВЧ-излучения в этих нитях в области сверхпроводящего перехода и перехода типа плавления качественно отличается от зависимости, наблюдаемой для более толстых нитей. Экспериментальные результаты интерпретируются на основе модели слабого экранирования высокочастотных полей в ультратонких нитях проводников.

Одной из проблем СВЧ-электроники является создание систем, в которых происходит эффективное поглощение энергии высокочастотных излучений наряду с наведением в них больших дипольных моментов. Для ее решения традиционно исследовались системы проводящих частиц с характерными размерами  $D \geq \delta \approx 1 \mu\text{m}$  (здесь  $\delta$  — величина скин-слоя [1]). В то же время, как показано в [2], для эффективного поглощения полей СВЧ- и дальнего ИК-диапазонов целесообразно использовать ультратонкие нити проводников диаметром  $d \leq 10$  nm, поскольку в них может быть реализована ситуация слабого экранирования.

### 1. Объект и методика исследования

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование СВЧ-свойств систем ультратонких нитей проводников и полупроводников диаметром порядка 10 nm, полученных в микроканалах диэлектрических асбестовых матриц под давлением из расплава. Используемая технология [3] позволяет создавать непланарные ансамбли полностью изолированных нитей. Количество нитей в поперечном сечении образующихся пучков может достигать  $3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ .

Измерения проводились в прямоугольных волноводах в частотном диапазоне  $\nu = 12-53$  GHz при температурах  $\vartheta = 1.8-300$  K и в цилиндрических резонаторах для частот 25 и 36 GHz при  $\vartheta = 80-300$  K.

При проведении резонаторных измерений нами использовалась установка, созданная под руководством И.Б.Вендик в Санкт-Петербургском электротехническом университете. Измерялись уход резонансной частоты и уширение полосы пропускания резонатора при внесении образца. Из этих измерений определялись значения вещественной ( $\varepsilon_1$ ) и мнимой ( $\varepsilon_2$ ) частей комплексной диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ ) исследуемых композитов. Образцы представляли собой цилиндры длиной  $L = 0.5-2$  мм с диаметром  $d = 2-200$   $\mu\text{m}$ . Описанная методика впервые была применена в [4] при исследовании органических образцов игольчатой формы.

Из волноводных измерений находились значения коэффициентов отражения  $R$  и пропускания  $T$ , определяемых следующими выражениями:

$$R = \left| \frac{E_R}{E_0} \right|, \quad (1)$$

$$T = \left| \frac{E_T}{E_0} \right|. \quad (2)$$

Здесь  $E_R$ ,  $E_T$  и  $E_0$  — напряженности электрической компоненты поля отраженной, прошедшей и падающей волны соответственно. В качестве образцов использовались пластинки исследуемого композита толщиной 70–500  $\mu\text{m}$ , полностью перекрывающие сечение волновода. Поглощение СВЧ-излучения определялось с использованием методики [5] при помощи измерений пропускания  $T$  для образцов различной толщины.

## 2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Установлено, что исследуемые системы эффективно поглощают СВЧ-излучение. Так, например, слой асбеста с объемным заполнением ртути  $f \approx 0.1\%$  толщиной 140  $\mu\text{m}$  поглощает порядка 60% падающей СВЧ-мощности. В зависимости от заполнителя и степени заполнения микроканальных асбестовых матриц их диэлектрическую проницаемость можно варьировать в широких пределах ( $|\varepsilon| = 3-250$ ), тангенс угла потерь  $\text{tg} \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) = 0.5-5$ . Наблюдаемая частотная зависимость СВЧ-параметров оказалась достаточно слабой во всем исследованном

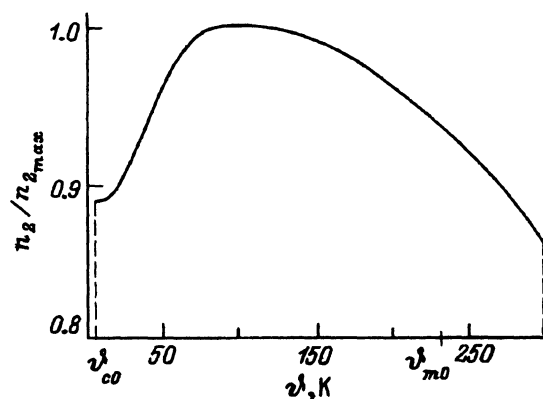
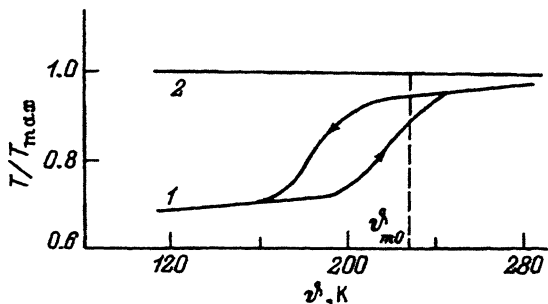


Рис. 1. Температурная зависимость нормированного коэффициента поглощения СВЧ-излучения для композита, содержащего ультратонкие ртутные нити ( $|n_2| = |\text{Im}(\sqrt{\varepsilon})|$ ).

$T_{m0} = 234$  K — температура плавления массивной ртути,  $T_{c0} = 4.12$  K — температура сверхпроводящего перехода массивной ртути.

Рис. 2. Температурная зависимость нормированного коэффициента пропускания СВЧ-излучения для интервала от комнатной до азотной температур через слой композита, содержащего ультратонкие ртутные нити (1), и через слой композита, содержащего ртутные нити 20-микронного диаметра в стеклянных капиллярах (2).  
 $\vartheta_{m0} = 234$  К — температура плавления массивной ртути.



диапазоне. Эти данные позволяют считать рассматриваемые материалы перспективными для создания широкополосных радиопоглощающих материалов.

На рис. 1 представлена температурная зависимость поглощения СВЧ-излучения в слое образца с ртутным заполнением. Из этого рисунка видно, что если при понижении температуры от комнатной до температур порядка 80 К поглощение возрастает, то при дальнейшем понижении оно начинает уменьшаться.

Полученные данные о немонотонной температурной зависимости поглощения, абсолютной величине поглощения и диэлектрической проницаемости свидетельствуют о реализации в исследуемых системах нетрадиционного для проводников режима неполного экранирования [2].

Измеренная температурная зависимость пропускания СВЧ-излучения через слой композита, содержащего ультратонкие ртутные нити

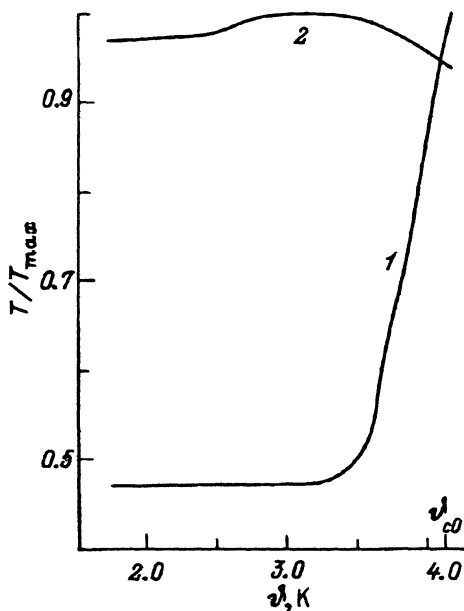


Рис. 3. Температурная зависимость нормированного коэффициента пропускания СВЧ-излучения через слой композита, содержащего ультратонкие ртутные нити для области гелиевых температур.

$\vartheta_{c0} = 4.12$  К — температура сверхпроводящего перехода массивной ртути.

ти, представлена на рис. 2,3. В интервале от комнатной до азотной температур она может интерпретироваться как фазовый переход типа плавления с проявлением размерных эффектов (рис. 2). Эти эффекты заключаются в сдвиге фазового перехода относительно температуры плавления массивной ртути в сторону низких температур на несколько десятков градусов (конкретная величина сдвига определяется диаметром исследуемых нитей), его размытии и наблюдаемом гистерезисе. Такие явления на подобных образцах были обнаружены в [6] при исследовании температурной зависимости проводимости по постоянному току ( $\sigma_0(\vartheta)$ ).

В области гелиевых температур (рис. 3) температурная зависимость пропускания ( $T$ ) для ультратонких нитей может интерпретироваться как проявление сверхпроводящего фазового перехода. Было обнаружено смещение перехода в более низкотемпературную область относительно критической температуры массивной ртути. Это смещение, вероятно, связано с подавлением сверхпроводимости СВЧ-излучением.

Для сравнения на рис. 2,3 представлена также измеренная температурная зависимость пропускания СВЧ-излучения через образец, содержащий ртутные нити диаметром порядка  $20 \mu\text{m}$  в стеклянных капиллярах (металлические нити и проволочки подобной толщины традиционно используются в СВЧ-электронике). Для таких систем не наблюдалось эффектов, обнаруженных для ультратонких нитей. Температурная зависимость пропускания оказалась практически во всем исследованном температурном интервале обратной по знаку и значительно более слабой, чем для ультратонких нитей.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность И.Б.Вендик, Ю.А.Кумзеру и С.Г.Романову за помощь в работе и полезные обсуждения.

#### Список литературы

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Теоретическая физика. М. (1992). Т. 8. 661 с.
- [2] Бутко В.Ю. ФТТ **38**, 4, (1996).
- [3] Богомолов В.Н. УФН **124**, 1, 171 (1978).
- [4] Буравов Л.И. ЖТФ **50**, 2, 252 (1980).
- [5] Ковнеристий Ю.К., Лазарев И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучение. М., (1982). 123 с.
- [6] Богомолов В.Н., Колла Е.В., Кумзеров Ю.А. Письма в ЖЭТФ **41**, 1, 28 (1985).