

*В.Е. Дём<sup>1,2</sup>, А.Ф. Шевчук<sup>2</sup>, М.Р. Трунин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup> Институт физики твёрдого тела РАН

## Моды «шепчущей галереи» для измерений поверхностного импеданса сверхпроводящих кристаллов

Обсуждается возможность и пример использования мод «шепчущей галереи» цилиндрического сапфирового резонатора для измерения компонент поверхностного импеданса сверхпроводящих монокристаллов, имеющих типичные размеры  $1 \times 1 \times 0,1$  мм<sup>3</sup>.

**Ключевые слова:** резонансные методы, поверхностный импеданс, магнитное поле, диэлектрический резонатор, «шепчущая галерея».

### I. Введение

Основным способом изучения высокочастотных свойств сверхпроводников является измерение компонент их поверхностного импеданса  $Z = R + iX$  в абсолютных единицах (Ом). Действительная часть импеданса, поверхностное сопротивление  $R$ , связана с потерями энергии электромагнитной волны при отражении от сверхпроводника и механизмом рассеяния нормальных носителей. Мнимая часть, реактанс  $X$ , характеризует отклик сверхпроводящих носителей. Измерив величины  $R$  и  $X$ , можно вычислить комплексную проводимость сверхпроводника.

Наиболее точными методами измерения импеданса являются резонансные методы. С их помощью производятся, например, измерения температурных зависимостей  $Z(T)$ . Наилучшие результаты достигаются при помещении образцов в сверхпроводящие объёмные резонаторы [1], однако при использовании таких резонаторов невозможно исследовать магнитополевые свойства образца. Вместе с тем измерения зависимостей поверхностного импеданса от магнитного поля позволяют изучать структуру квазичастиц в ядрах вихрей, динамику вихревой решётки, а также температурную зависимость критических полей [2]. Обычно для этих целей используются медные объёмные резонаторы. Для повышения точности измерений импеданса во внешнем магнитном поле применяются диэлектрические резонаторы на низких модах [3]. В данной работе мы рассмотрели возможность использования высоких азимутальных мод цилиндрического сапфирового резонатора, так называемых мод «шепчущей галереи».

### II. Резонансные методы температурных измерений поверхностного импеданса

Суть резонансных методов заключается в следующем [1]. При фиксированной температуре измеряются частота и добротность одной из мод электромагнитного резонатора. После этого в резонатор помещается сверхпроводящий кристалл небольшого размера (типичный размер  $1 \times 1 \times 0,1$  мм<sup>3</sup>), что приводит к сдвигу частоты и изменению добротности резонатора. Если глубина скин-слоя меньше всех характерных размеров образца, то теория возмущений даёт следующую связь измеряемых величин с компонентами поверхностного импеданса образца:

$$R(T) = \Gamma \left( \frac{1}{Q(T)} - \frac{1}{Q_0(T)} \right),$$
$$X(T) = \frac{2\Gamma}{f_0} (f_0(T) - f(T)) + X_0.$$

Здесь  $f_0$ ,  $Q_0$  — частота и добротность резонатора без образца;  $f$ ,  $Q$  — частота и добротность резонатора с образцом,  $X_0$  — аддитивная константа,  $T$  — температура образца. Значение гамма-фактора  $\Gamma$  определяется геометрией образца и конфигурацией электромагнитного поля (модой) резонатора. Гамма-фактор характеризует чувствительность резонансной системы: чем меньше  $\Gamma$ , тем выше чувствительность.

Когда температура образца ниже температуры сверхпроводящего перехода  $T_c$ , вклад самого образца в общие потери резонансной системы очень мал. Погрешность  $\delta R$  измерения действительной части импеданса в этом случае равна

$$\delta R = \alpha \frac{\Gamma}{Q_0},$$

где  $\alpha$  — относительная погрешность измерения добротности. Отсюда следует, что существуют три пути повышения точности измерения  $R$ : увеличение добротности используемого резонатора, совершенствование метода прецизионных измерений добротности и уменьшение величины гамма-фактора образца. Следуя первому пути, мы применили в измерениях импеданса высокие моды сапфирового резонатора — моды «шепчущей галереи». При гелиевых температурах в миллиметровом диапазоне длин волн их добротность  $Q_0$  может достигать  $10^8$ , что значительно превышает значения добротностей объемных резонаторов из меди ( $Q_0 \sim 10^4$ ) и ниобия ( $Q_0 \sim 10^6$ ).

### III. Сапфировый резонатор и электромагнитные поля «шепчущей галереи»

Использованный нами диэлектрический резонатор представляет собой цилиндр из монокристалла сапфира высотой 2,97 мм и диаметром 15,04 мм. Задача о распределении электромагнитного поля мод «шепчущей галереи» может быть приближённо решена с помощью метода частичных областей. Все компоненты электромагнитного поля резонатора отличны от нуля и периодически зависят от угла. Для измерения поверхностного импеданса предпочтительными являются  $HE_{n,1,1}$  моды, вдоль оси симметрии  $Oz$  которых преобладает электрическое поле. Оптимальное расположение образца и силовые линии электромагнитного поля  $HE_{n,1,1}$  мод показаны на рис. 1.

Во время эксперимента — измерений  $f(T)$  и  $Q(T)$  — температура сапфирового диска поддерживается постоянной и равной 4.2 К. Образец закрепляется на тонком сапфировом стержне на расстоянии 1 мм от боковой поверхности резонатора. Изменения температуры стержня, достигаемые с помощью удаленного нагревателя, точно соответствуют изменениям температуры образца. Внутренний объём резонаторного блока откачивается с помощью криогенного насоса для предотвращения нагрева сапфирового диска.

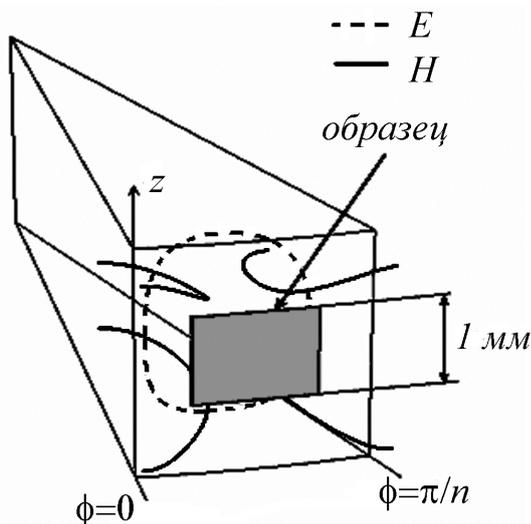


Рис. 1. Линии электромагнитного поля  $HE_{n,1,1}$  мод «шепчущей галереи» и оптимальное расположение образца

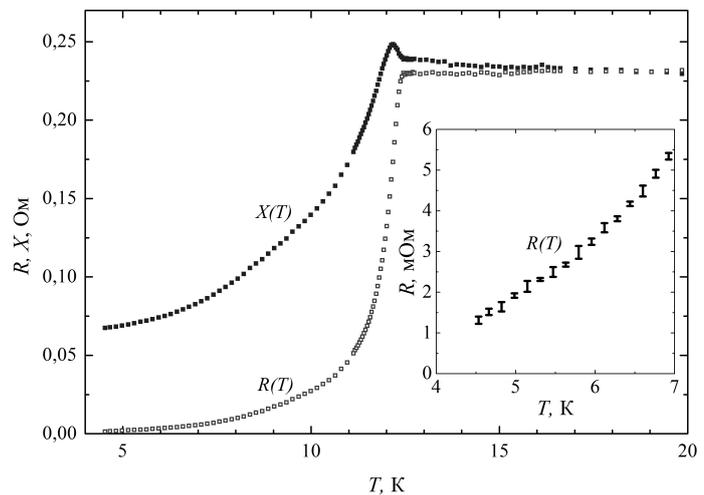


Рис. 2. Температурные зависимости компонент поверхностного импеданса кристалла  $V_{3+x}Si_{1-x}$ , измеренные на частоте 37,32 ГГц с помощью предлагаемой методики. На вставке показана низкотемпературная часть кривой  $R(T)$

**Измерения импеданса кристаллов  $V_{3+x}Si_{1-x}$ .** С целью проверки изложенного экспериментального метода были выполнены измерения температурных зависимостей поверхностного импеданса монокристаллов  $V_{3+x}Si_{1-x}$  с содержанием кремния 24%. Измерения проводились на модах  $HE_{n,1,1}$  с номерами  $n = 11-14$ . Для примера приведены результаты, полученные на моде  $HE_{14,1,1}$ , имеющей частоту 37,32 ГГц. Частота  $f_0$  и добротность  $Q_0 = 6 \cdot 10^6$  резонансной системы на выбранной моде в отсутствие образца, но с сапфировым стержнем внутри не зависели

от температуры стержня в пределах точности измерений, что связано со слабой температурной зависимостью диэлектрической проницаемости сапфира в области низких температур. Как видно из рис. 2, в нормальном состоянии образца при  $T > T_c \approx 12.5$  К действительная и мнимая части импеданса равны:  $R(T) = X(T)$ , что удовлетворяет критерию нормального скин-эффекта. При  $T < T_c$  на кривой  $X(T)$  наблюдается небольшой «горб» («bump») — характерная особенность, присущая двухзонным сверхпроводникам. В области низких температур погрешность  $\delta R$  равна 200 мкОм. В целом, результаты, представленные на рис. 2, хорошо согласуются с измерениями импеданса монокристаллов  $V_{3+x}Si_{1-x}$  на частоте 9,4 ГГц, выполненными с применением сверхпроводящего ниобиевого резонатора [4].

В заключение необходимо отметить недостатки рассматриваемой методики. Поскольку электромагнитное поле используемых мод весьма неоднородно, оказывается невозможным измерение поверхностного импеданса образцов в форме параллелепипеда, имеющих анизотропную проводимость. Поэтому рассматриваемый метод позволяет исследовать только изотропные вещества.

### Литература

1. *Трунин М.Р.* Поверхностный импеданс монокристаллов ВТСП в микроволновом диапазоне // Успехи физических наук. — 1998. — Т. 168, № 9. — С. 933–952.
2. *Golosovsky M., Tsindlekht M. and Davidov D.* High-frequency vortex dynamics in  $YBa_2Cu_3O_7$  // Superconductor Science and Technology. — 1996. — V. 9, N 1. — P. 1–16.
3. *Huttema W.A., Morgan B.* [et al.]. Apparatus for high resolution microwave spectroscopy in strong magnetic fields // Rev. Sci. Instrum. — 2006. — V. 77, I. 2. — P. 023901.
4. *Nefyodov Yu. A., Shuvaev A.M. and Trunin M.R.* Microwave response of  $V_3Si$  single crystals: Evidence for two-gap superconductivity // Europhys. Lett. — 2005. — V. 72, N 4. — P. 638–644.

*Поступила в редакцию 19.08.2011.*