

Форма линии магнитного резонанса в тонкой пленке на поверхности анизотропного сверхпроводника

© С.А. Ефремова, С.Л. Царевский

Казанский государственный университет,
420008 Казань, Россия

E-mail: Sergey.Tsarevskii@ksu.ru

(Поступила в Редакцию 17 июня 1998 г.)

Рассчитана форма линии ЭПР в тонкой ($= \lambda/2$, λ — лондоновская глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводнике) парамагнитной пленке, наложенной на поверхность анизотропного сверхпроводника, в наклонных магнитных полях с учетом неоднородности локального магнитного поля вихревой решетки Абрикосова. Показано, что с изменением угла наклона внешнего магнитного поля форма линии ЭПР заметно меняется, что может дать дополнительную информацию о параметрах сверхпроводника (о типе симметрии вихревой решетки, о параметре анизотропии сверхпроводника).

В настоящее время метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [1–3] и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [4] магнитной пробы на поверхности высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) широко используется для изучения особенностей проникновения магнитного поля в сверхпроводник и перехода в сверхпроводящее состояние. В качестве магнитной пробы обычно используют нанесенную на поверхность сверхпроводника пленку органического соединения дифинил пикрил гидразила (ДФПГ) — для ЭПР [1,3] либо силиконового масла — для ЯМР [4]. В обоих случаях изучалось изменение в зависимости от температуры неоднородной ширины линии магнитного резонанса при переходе образца либо в сверхпроводящее состояние, либо в вихревое состояние при свиппировании внешнего однородного поля. Такие эксперименты позволяют сделать оценки для глубины проникновения магнитного поля в сверхпроводник λ и локальной макроскопической намагниченности образца. Однако если в качестве ЭПР-, ЯМР-пробы использовать тонкие пленки ($\leq 1000 \text{ \AA}$) контролируемой толщины, то из анализа формы линии магнитного резонанса можно получать значительно более богатую информацию о параметрах сверхпроводника. В данном сообщении приведены результаты расчета формы линии магнитного резонанса в тонкой магнитной пленке калиброванной толщины ($\cong 0.5\lambda$), нанесенной на поверхность анизотропного ВТСП, в наклонном по отношению к поверхности сверхпроводника магнитном поле. Известно, что во внешнем магнитном поле \mathbf{H} ($H_{c1} < H < H_{c2}$, H_{c1} , H_{c2} — критические поля) в сверхпроводнике II рода образуется (по крайней мере локально) двумерная решетка вихрей Абрикосова. В работе [5] на основе решения уравнений Лондонов для анизотропного сверхпроводника с соответствующими граничными условиями получены аналитические выражения для Фурье-компонент локального магнитного поля \mathbf{h} над поверхностью сверхпроводника в наклонных магнитных полях. Карту магнитного поля на различных расстояниях z над поверхностью сверхпроводника можно восстановить, используя обратное

преобразование Фурье. Для анализа формы резонансной линии потребовались достаточно подробные карты магнитного поля в элементарной ячейке вихревой решетки для различных расстояний от поверхности сверхпроводника. Это определяется как числом точек, на которые разбивается элементарная ячейка вихревой решетки и в которых вычисляется $\mathbf{h}(\mathbf{r})$ (использовалось $512 \bullet 512$ точек), так и числом таких карт в зависимости от h (их было 100). На основе полученных карт можно получить плотность функции распределения $\rho(h, z, \theta)$ локального магнитного поля в узком слое ($z, z + dz$) над поверхностью сверхпроводника (θ — угол между нормалью к поверхности сверхпроводника, параллельной оси \mathbf{e} , и однородным магнитным полем \mathbf{H}) [5]. На рис. 1 в качестве примера приведены $\rho(h, z, \theta)$ для различных θ и z . Вычисления проведены для ВТСП Y-Ba-Cu-O с параметрами анизотропии $\Gamma = 25$, в поле $H = 2$ (в единицах Φ_0/λ^2). По оси абсцисс отложены значения поля в единицах $100(h - h_{\min})/(H - h_{\min})$, $h_{\min} = 1.8767$ — минимальное значение локального магнитного поля в глубине сверхпроводника [5]. Как видно из рис. 1, в наклонных магнитных полях форма функции $\rho(h, z, \theta)$ усложняется, появляется дополнительный пик. Это связано с тем, что в распределении локального магнитного поля в ближайшей окрестности над поверхностью сверхпроводника появляется еще одна седловая точка с другим значением поля. Высота пиков и их взаимное расположение для данных угла θ и высоты z определяются, конечно, типом симметрии вихревой решетки и значением параметра анизотропии сверхпроводника Γ . Вычисления показали, что неоднородное поле достаточно быстро, уже на расстоянии $\cong 0.5$ становится однородным (расстояние измеряется в единицах λ). Итак, для определения особенностей неоднородного поля вихрей Абрикосова методом ЭПР-пробы необходимо использовать пленки определенной толщины, не более 0.5. Мощность переменного магнитного поля, поглощаемого резонирующими спинами, расположенными в узком слое над поверхностью сверхпроводника, будет пропорциональна

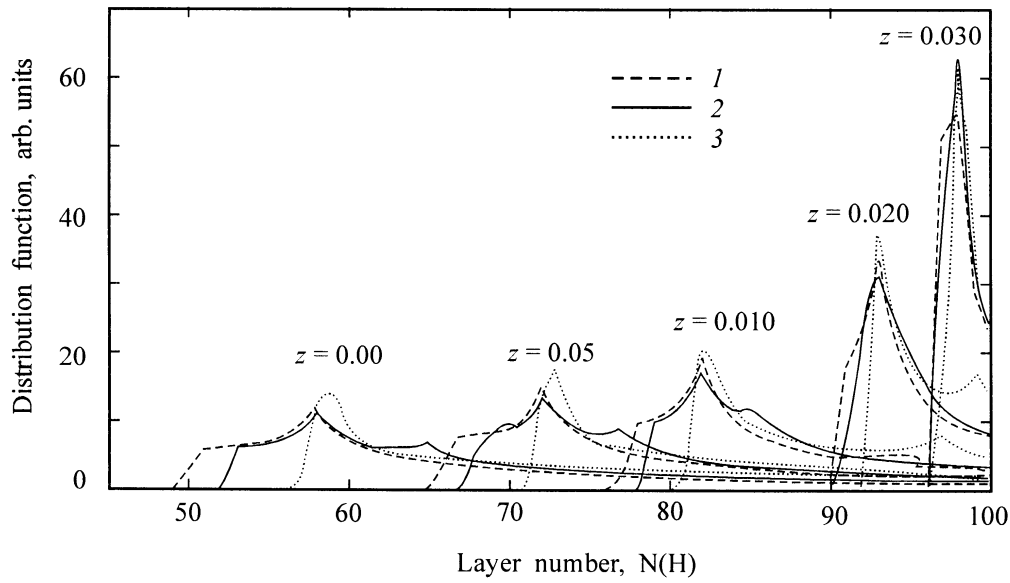


Рис. 1. Функция распределения $\rho(h, z, \theta)$ локального магнитного поля \mathbf{h} в элементарной ячейке вихревой решетки над поверхностью сверхпроводника (в произвольных единицах) для $\theta = 0$ (1), $\pi/6$ (2) и $\pi/3$ (3). По оси абсцисс отложены значения поля в единицах $100(h - h_{\min}) / (H - h_{\min})$. $H = 2$, $h_{\min} = 1.8767$.

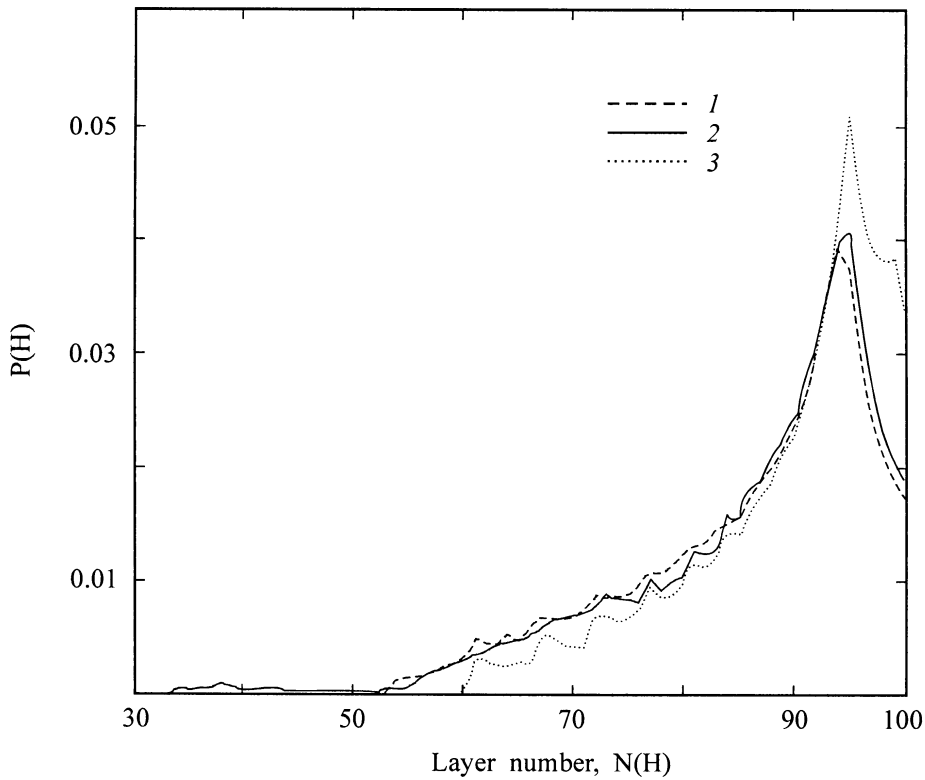


Рис. 2. Зависимость энергии поглощения P от магнитного поля и угла наклона θ . $\theta = 0$ (1), $\pi/6$ (2) и $\pi/3$ (3). Обозначения по оси абсцисс соответствуют рис. 1.

$\int_0^d \rho(h, z, \theta) dz$, d — толщина пленки. Следует учесть также, что каждый резонирующий спин имеет собственную кривую поглощения, обладающую, как правило, лоренцевой формой и определяющую однородную ширину поглощения Δ . Поглощаемая всеми резонирующими спинами пленки мощность переменного магнитного поля как функция внешнего магнитного поля H и угла θ равна

$$P(H, \theta) = C \int_{-\infty}^{\infty} dh \frac{\Delta}{\Delta^2 + (H - h)^2} \int_0^d dz \rho(h, z, \theta). \quad (1)$$

Константа C определяется нормировкой $\int P(H, \theta) dH = 1$.

На рис. 2 приведены рассчитанные по формуле (1) линии ЭПР $P(H, \theta)$ для наложенной на поверхность ВТСП парамагнитной пленки ДФПГ $d = 0.5$, $\Delta = 2$ (в единицах $(H - h_{\min})/100$) для различных углов θ .

Как видно из рис. 2, при изменении угла наклона внешнего магнитного поля форма линии ЭПР-пробы достаточно заметно меняется, что дает возможность извлечь более подробные сведения о локальном магнитном поле сверхпроводника (например, о типе симметрии вихревой решетки, о параметре анизотропии Γ и т. д.).

Список литературы

- [1] B. Rakvin, P. Pozek, A. Dulcic. *Solid State Commun.* **72**, 2, 199 (1989).
- [2] А.А. Романюха, Ю.Н. Швачко, Б.Б. Устинов. *УФН* **161**, 10, 37 (1991).
- [3] R.I. Khasanov, Yu.M. Vashakidze, Yu.I. Talanov. *Physica C* **218**, 1–2, 51 (1993).
- [4] Y. Maniva, T. Mituhashi, K. Muzoguchi, K. Kurne. *Physica C* **175**, 3–4, 401 (1991).
- [5] С.А. Ефремова, С.Л. Царевский. *ФТТ* **39**, 11, 1935 (1997).