

## НАБЛЮДЕНИЯ ВЕТВЛЕНИЯ ДОМЕНОВ ШУБНИКОВСКОЙ ФАЗЫ В МОНОКРИСТАЛЛЕ НИОБИЯ

А.О.Голубок, Л.Я.Винников

В монокристаллах ниобия с высоким разрешением проведено прямое наблюдение структуры промежуточно-смешанного состояния. Обнаружено многократное ветвление доменов шубниковской фазы.

В работе <sup>1</sup> Ландау рассмотрел модель промежуточного состояния (ПС) с многократным ветвлением доменов нормальной фазы у поверхности образца. Авторами <sup>2</sup> в рамках модели многократного ветвления было учтено расширение нормальных доменов у поверхности образца и показано, что минимально возможная ширина доменов у поверхности должна иметь величину  $\sim 200 \Delta$  ( $\Delta$  – константа поверхностного натяжения на границе  $n$ - и  $s$ -фаз, определяемая посредством  $a = \frac{H_c^2}{8\pi} \Delta$ , где  $a$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $H_c$  – критическое магнитное поле). Отметим, что эффекты многократного ветвления, как указывалось в <sup>2</sup>, не должны иметь места в чистых сверхпроводниках первого рода разумной толщины из-за недостаточно малой поверхностной энергии  $n$ – $s$  границы.

В работе <sup>3</sup> экспериментально показано, что в сверхпроводниках второго рода с параметром Гинзбурга – Ландау  $\kappa \sim 1$  и отличным от нуля размагничивающим фактором могут сосуществовать домены мейснеровской и шубниковской фазы. Такое состояние называют промежуточно-смешанным (ПСС). Существование ПСС связано с возникающим в сверхпроводниках второго рода ( $\kappa \sim 1$ ) притяжением между вихрями, в результате которого в доменах шубниковской фазы устанавливается равновесная индукция  $B_0$  ( $B_0 = n \Phi_0$ , где  $n$  – равновесная плотность вихрей,  $\Phi_0$  – квант магнитного потока, равный  $2,07 \cdot 10^{-7}$  Гс  $\cdot$  см<sup>2</sup>). Авторы <sup>3</sup> структуру ПСС описывали в рамках теории ПС без ветвления <sup>4</sup>, заменяя  $H_c$  на  $B_0$ . Ясно, что при таком подходе в доменах шубниковской фазы должно быть достаточно большое число вихрей, а расстояние между вихрями не должно быть большим по сравнению с их размерами. Заметим, что так как энергия, сосредоточенная на границе между мейснеровскими и шубниковскими доменами может быть достаточно малой <sup>3</sup>, то в случае ПСС эффекты ветвления доменов шубниковской фазы могут быть выражены более сильно по сравнению с аналогичными эффектами в сверхпроводниках первого рода.

В настоящей работе с помощью высокоразрешающей техники декорирования <sup>5</sup> проведено наблюдение магнитной структуры на поверхности монокристалла ниобия при  $T = 4,2$  К ( $B_0 \cong \cong 800$  Гс <sup>6</sup>). Образцы вырезались из монокристалла ниобия электронно-лучевой плавки, механически шлифовались и химически полировались в смеси HF (40%) + HNO<sub>3</sub> (60%). Затем

образцы отжигались в вакууме  $\sim 5 \cdot 10^{-9}$  мм. рт. ст. при  $T = 2200^\circ \text{C}$  в течение  $\sim 5$  часов. Декорирование проводилось частицами железа с размером  $\sim 50 \text{ \AA}$ . Получающиеся биттеровские картины изучались в сканирующем электронном микроскопе в режиме вторичных электронов. Светлые участки на фотографиях — домены шубниковской фазы.

На рис.1 показана структура ПСС, образующаяся на поверхности пластинки с толщиной  $\approx 100 \text{ мкм}$  в перпендикулярном магнитном поле  $\approx 400 \text{ Э}$ . Видно, что характерный период структуры  $a$  оказался равным  $\sim 10 \text{ мкм}$ . Определив характерный период, можно оценить параметр  $\Delta$ . Из <sup>4</sup> имеем:

$$\Delta = a^2 \varphi(\eta) L^{-1},$$

где  $L$  — толщина образца,  $\eta = H/H_c$ , ( $H$  — внешнее поле),  $\varphi(\eta)$  — табулированная функция <sup>2</sup>. Заменяя  $H_c$  на  $B_0$  и подставляя  $L \approx 10^{-2} \text{ см}$ ;  $\eta = 0,5$ ;  $\varphi(\eta) = 2 \cdot 10^{-2}$ ;  $a = 10 \text{ мкм}$ , получим  $\Delta \approx 200 \text{ \AA}$ . Отметим, что внутри доменов шубниковской фазы разрешалась вихревая решетка с индукцией  $B_0' \approx 500 \text{ Гс}$ , что согласуется с моделью, в которой нормальные домены расширяются у поверхности образца <sup>4</sup>. На рис.2 показана структура ПСС, образующаяся на поверхности цилиндра высотой  $\approx 1,2 \text{ см}$  и  $\varphi \approx 0,6 \text{ см}$  в поле  $\approx 250 \text{ Э}$ , перпендикулярном торцевой поверхности. Видно, что характерный период структуры оказался порядка  $1 \text{ мкм}$ . Индукция в доменах шубниковской фазы оценивалась по фотографиям на которых отчетливо разрешались отдельные вихри. Она оказалась равной  $\approx 800 \text{ Гс}$ , что согласуется с литературными данными для равновесной индукции в объеме чистых монокристаллов ниобия. В отличие от тонкого образца, в толстом образце в доменах шубниковской фазы наблюдалась вихревая жидкость. Зная  $\Delta$ , можно оценить характерный период структуры ПСС на поверхности и в объеме образца. Из <sup>2</sup> имеем

$$a_V = 0,882 \eta^{-1/3} (1-\eta)^{-2/3} L^{2/3} \Delta^{1/3} \text{ и } a_S = 1,46 \eta (1-\eta)^2 \Delta \varphi^{-2}(\eta),$$

где  $a_V$  и  $a_S$  периоды соответственно в объеме и на поверхности. Подставив  $\eta \approx 0,3$ ;  $\Delta \approx 200 \text{ \AA}$ ;  $\varphi \approx 2 \cdot 10^2$ , получим  $a_V \approx 250 \text{ мкм}$  и  $a_S \approx 10 \text{ мкм}$ .



Рис. 1

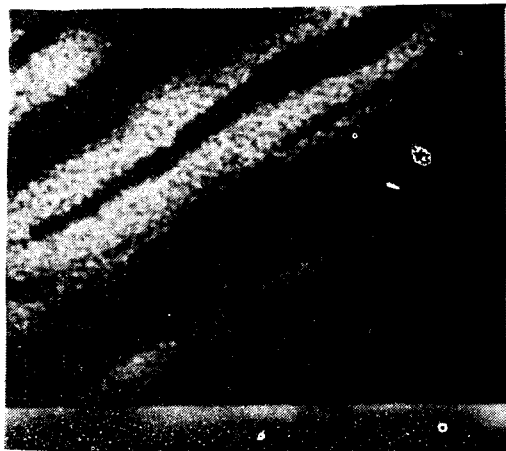


Рис. 2

Таким образом, наблюдаемая на рис.2 структура ПСС, вообще говоря, соответствует поверхностной структуре, образующейся в результате многократного ветвления доменов шубниковской фазы, однако характерный масштаб поверхностной структуры оказывается несколько меньше масштаба, предсказываемого в работе <sup>2</sup>. В связи с этим отметим, что в результате многократного ветвления к поверхности образца подходят домены шубниковской фазы, содержащие небольшое число вихрей; при этом ширина доменов сравнима с расстоянием между вихрями. По-видимому, при вычислении масштаба поверхностной структуры ПСС необходимо более точно учитывать тот факт, что домены шубниковской фазы состоят из отдельных вихрей, несущих кванты магнитного потока, в отличие от однородного распределения поля в доменах нормальной фазы в случае ПС сверхпроводников первого рода.

Авторы благодарят Г.И.Сальникова за отжиги монокристаллов, Ю.В.Шарвина, В.В.Шмидта и А.Л.Шеланкова за полезные обсуждения и ценные критические замечания.

### Литература

1. Ландау Л.Д. ЖЭТФ, 1943, 13, 377.
2. Лифшиц Е.М., Шарвин Ю.В. ДАН СССР, 1951, 79, 783.
3. Krägeloh U. Phys. Stat. Sol., 1970, 42, 559.
4. Ландау Л.Д. ЖЭТФ, 1937, 7, 371.
5. Essmann U., Träuble H. Phys. Stat. Sol., 1966, 18, 813.
6. Kerchner H.R., Christen D.K., Sekula S.T. Phys. Rev. B., 1980, 21, 86.

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
12 мая 1982 г.