

# Влияние облучения аномально малой дозой быстрых нейтронов на поверхностный импеданс свинцового монокристалла вблизи $H_{c3}$

Л. И. Джорджишвили

*Институт физики АН Грузии, Грузия, 380077, г. Тбилиси, ул. Тамарашвили, 6*  
E-mail: jorj@physics.iberiapac.ge

Статья поступила в редакцию 24 ноября 1998 г.

Экспериментально показано, что облучение свинцового монокристалла аномально малой дозой быстрых нейтронов (порядка  $4 \cdot 10^6$  нейтрон/см<sup>2</sup>) приводит к гашению циклотронного резонанса и поверхностной сверхпроводимости. Этот эффект объясняется геометрическими причинами.

Експериментально показано, що опромінення свинцевого монокристалла аномально малою дозою швидких нейтронів (порядка  $4 \cdot 10^6$  нейтрон/см<sup>2</sup>) приводить до гасіння циклотронного резонансу та поверхневої надпровідності. Цей ефект пояснюється геометричними причинами.

PACS: 61.80.Ng, 74.25.Nf, **76.40.+b**

Настоящая работа является продолжением работ [1–6], в которых представлены результаты изучения влияния малых доз быстрых нейтронов на циклотронный резонанс (ЦР) [1], сверхвысокочастотный (СВЧ) импеданс [2] монокристаллического свинца, а также влияния облучения на ЦР в предварительно деформированном монокристалле [5].

Измерения проводились на спектрометрах с частотной модуляцией [7,8] в автодинном режиме и с частотно-модулированным клистроном. Полосковые резонаторы работали на частоте  $f = 9,6$  ГГц. Температура измерений  $T = 1,4–1,25$  К достигалась откачкой паров гелия. Монокристаллы диаметром 17,8 мм и толщиной от 0,8 до 1,8 мм (для разных образцов) изготавливались способом, описанным в [9]. Качество выращенных монокристаллов оценивалось по величине параметра  $\omega t$ , значения которого для различных образцов варьировались в интервале от 15 до 95 при  $T = 1,4$  К. Образец служил дном полоскового резонатора. Сторона, обращенная внутрь резонатора, названа лицевой; противоположная — тыльной.

Образцы облучались при  $T = 300$  К на плутоний-бериллиевом источнике [10] с интегральной интенсивностью  $4,7 \cdot 10^6$  нейтрон/см<sup>2</sup>·с в телесном угле  $4\pi$ . Поток

нейтронов измерялся дозиметром КРАН-1, укомплектованным датчиками быстрых, промежуточных и тепловых нейтронов. Для получения аномально малых доз нейтронов применялся фильтр из бора и парафина. В месте расположения облучаемого образца зафиксированы следующие значения потоков нейтронов: быстрых — 380 нейтрон/см<sup>2</sup>·с, промежуточных — 125 нейтрон/см<sup>2</sup>·с, тепловых — 65 нейтрон/см<sup>2</sup>·с (погрешность измерений 30%).

На рис. 1 представлена зависимость СВЧ поверхностного импеданса монокристалла Рb-13 ( $\omega t = 95$ ) от внешнего магнитного поля для необлученного образца (а) и после его облучения в течение 2 ч (б). Как видно на рисунке, облучение приводит к гашению не только ЦР, но и поверхностной сверхпроводимости. При электронно-микроскопических съемках электронный пучок настолько разогрел поверхность образца, что это привело (в случае, например, монокристалла Рb-15) к взрыву пузырька газа, находившегося в приповерхностном слое. В связи с этим образец Рb-13 как самый лучший больше никаким воздействиям не подвергался, кроме облучения нейтронами (ни облучению электронным пучком в электронном микроскопе, ни деформации, ни отжигу в вакууме).

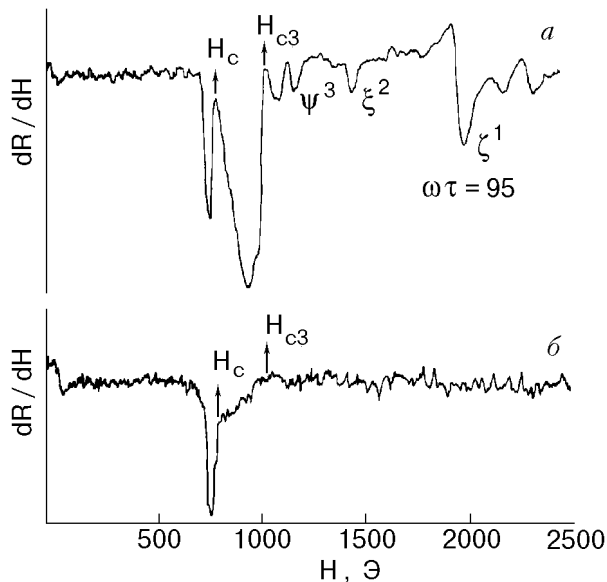


Рис. 1. Гашение ЦР при  $T = 1,4$  К и  $\nu = 9,375 \cdot 10^9$  с<sup>-1</sup>: необлученный образец Рb-13 (а); после облучения дозой быстрых нейтронов  $4,1 \cdot 10^6$  нейтрон/см<sup>2</sup>·с (2 ч при потоке 570 нейтрон/см<sup>2</sup>·с) (б).

Дальнейшее облучение кристалла привело к неожиданным результатам. Оно не вызвало большую порчу образца, а даже улучшило его: наблюдалось сужение полосы пропускания СВЧ резонатора и появление ЦР [2]. Это происходило, по-видимому, из-за гомогенизации поверхности монокристалла нейтронным потоком, когда возможно не только разрушение порядка, но и беспорядка. Облучение стимулировало также поверхностную диффузию [11], и со временем поверхность не только восстанавливается, но и становится более гладкой: через три года после облучения параметр  $\omega\tau$  образца Рb-13 стал равным 130.

Известно, что ЦР и поверхностная сверхпроводимость — это явления, происходящие в скин-слое: для ЦР  $\delta_{an} = 2,8 \cdot 10^{-5}$  см на частоте  $f = 9,6$  ГГц [12] и на длине когерентности  $\xi_{Pb} = 8,3 \cdot 10^{-6}$  см [13] — для поверхностной сверхпроводимости. Поэтому можно связать гашение ЦР и разрушение поверхностной сверхпроводимости с нарушением рельефа поверхности монокристалла в результате облучения его нейтронами.

Рассмотрим подробнее, какие процессы могут протекать в монокристалле свинца при его облучении нейтронами. Облучение образцов производилось с тыльной стороны. Нейтроны выбивали атомы Рb с поверхности образца и могли также выбрасывать на лицевую поверхность каскады атомов. Эти процессы приводили либо к рассеиванию атомов Рb в

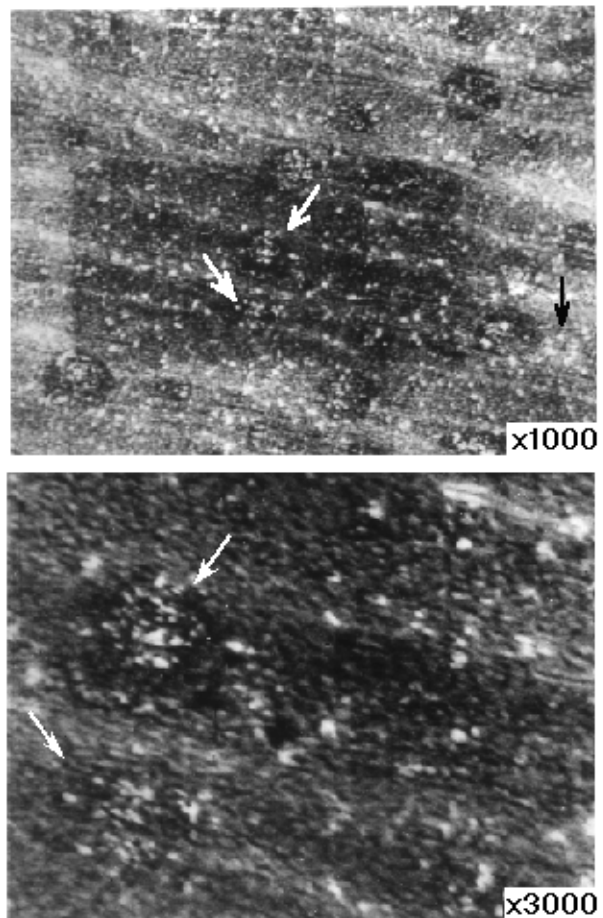


Рис. 2. Электронномикроскопическая фотография лицевой поверхности облученного с тыльной стороны образца Рb-15. Микроскоп JSM-50. Напряжение пучка 35 кВ. Образец Рb-15 облучен в течение 2 ч потоком 570 нейтрон/см<sup>2</sup>·с (доза  $4,1 \cdot 10^6$  нейтрон/см<sup>2</sup>). Характерные кратерообразные «муравейники» показаны стрелками. Увеличение  $\times 1000$  и  $\times 3000$ , фотоувеличение  $\times 2,94$ .

пространстве и возникновению углублений на поверхности образца, либо (в случае выхода каскадов на поверхность) — к появлению холмиков из выброшенных атомов в виде «муравейников». Это хорошо видно на электронномикроскопической фотографии поверхности облученного образца Рb-15 (рис. 2). Оценка по фотографии размеров дефектов поверхности образца показала, что они имеют в плоскости величину порядка глубины скин-слоя ( $\geq 10^{-5}$  см); при этом рассеяние СВЧ тока на частоте  $f = 9,6$  ГГц наиболее эффективно.

Согласно Де Жену [13], зародыши поверхностной сверхпроводимости образуются тогда, когда магнитное поле параллельно поверхности образца, по которой текут СВЧ токи. Но коль скоро в результате облучения образца на его поверхности образуются ямки и холмики

(«муравейники»), размеры которых сравнимы со скин-глубиной (или длиной когерентности), то условие параллельности магнитного поля поверхности кристалла нарушается. Для проверки этого предположения был проведен контрольный эксперимент [6], в котором показано, что уже при угле наклона магнитного поля к поверхности образца  $2,5^\circ$  наблюдается уменьшение резкости и величины сверхпроводящего перехода вблизи  $H_{c3}$ . По фотографии лицевой поверхности образца Pb-15, приведенной на рис. 2, мы смогли оценить средний размер холмиков в плоскости. Он оказался порядка 5–30 мкм (увеличение  $\times 1000$ , фотоувеличение  $\times 2,94$ ). Высоту холмиков оценить не удалось, так как в электронном микроскопе невозможно разрешение по вертикали. Однако, основываясь на результатах специальных проверочных экспериментов [6] и данной работы, можно получить оценку высоты холмика. Ясно, что боковая образующая конуса холмика составляет с магнитным полем угол, превышающий  $2,5^\circ$  (поскольку ЦР и переход при  $H_{c3}$  не наблюдаются). Если средняя величина диаметра основания конуса  $\sim 10^{-4}$  см, то угол наклона образующей конуса к основанию, равный  $2,5^\circ$ , соответствует средней высоте конуса  $\approx 2,2 \cdot 10^{-6}$  см. При полном гашении пика поверхностной сверхпроводимости высота должна быть больше.

На фотографии поверхности облученного образца Pb-15 средняя плотность крупных холмиков  $\approx 1,4 \cdot 10^6$  см $^{-2}$ . Кроме крупных холмиков, имеется множество мелких (белые пятнышки), средняя плотность которых составляет  $8,6 \cdot 10^6$  см $^{-2}$ . Они также могут вносить вклад в процесс нарушения условий возникновения зародышей поверхностной сверхпроводимости в магнитном поле. Для мелкого холмика отношение высоты конуса к диаметру основания должно быть больше, т.е. угол между боковой образующей и направлением магнитного поля больше, чем в случае «муравейника». (Точные значения этих параметров можно было бы получить с помощью атомно-силового микроскопа.)

Оценим величину площади поверхности монокристалла свинца, выбывшую из игры из-за образования ямок и холмиков в процессе облучения образца. Количество этих дефектов поверхности  $n \sim 10^6$  см $^{-2}$ , средний размер дефекта  $2r \sim 10^{-3}$  см. Следовательно, искомая

площадь  $S = n\pi r^2 \approx 1$  см $^2$ . Площадь лицевой поверхности образца  $S_0 = \pi d^2/4 \approx 2,54$  см $^2$ , т.е. порядка 0,4 поверхности образца выбыло из игры. В действительности величина выбывшей доли поверхности может быть несколько меньше, так как СВЧ линейные токи практически текут в некоторой области под резонансной полоской размерами  $13 \times 0,6 \times 0,1$  см.

Согласно проведенным исследованиям, можно сделать вывод, что облучение с тыльной стороны свинцового монокристалла сверхмалым потоком быстрых нейтронов ( $570$  нейтрон/см $^2$ .с) в течение 2 ч приводит к такой порче лицевой стороны образца, что гасится не только ЦР, но и поверхностная сверхпроводимость. Это происходит по чисто геометрическим причинам: нарушаются условия наблюдения ЦР [12] и условия возникновения зародышей поверхностной сверхпроводимости, так как поверхность образца становится гофрированной, т.е. большая ее часть не параллельна внешнему магнитному полю.

1. Л. И. Джорджишвили, *ФНТ* 4, 454 (1977).
2. Л. И. Джорджишвили, *ФТТ* 22, 2018 (1980).
3. Л. И. Джорджишвили, *Сообщения АН ГССР* 98, 77 (1980).
4. Л. И. Джорджишвили, *ФТТ* 24, 333 (1982).
5. Л. И. Джорджишвили, *Сообщения АН ГССР* 106, 285 (1982).
6. Л. И. Джорджишвили, *ФНТ* 12, 533 (1986).
7. М. С. Хайкин, *ПТЭ* № 3, 104 (1961).
8. Л. И. Джорджишвили, Т. Л. Калабегшвили, *ПТЭ* № 1, 135 (1972).
9. М. С. Хайкин, С. М. Черемисин, В. С. Эдельман, *ПТЭ* № 4, 225 (1970).
10. L. Stewart, *Phys. Rev.* 98, 740 (1955).
11. U. Daunert, *Doktorische naturwissenschaftliche Dissertation*, 92s. München (1964).
12. А. А. Абрикосов, *Основы теории металлов*, Наука, Москва (1987), гл. 18.
13. П. Де Жен, *Сверхпроводимость металлов и сплавов*, Мир, Москва (1968).

### The influence of exposure to fast neutrons of anomalous small dose on surface impedance of lead monocrystals near $H_{c3}$

L. I. Jorjishvili

It is experimentally shown that the exposure of lead monocrystals to anomalous small doses of fast neutrons ( $\sim 4 \cdot 10^6$  neutron/cm $^2$ ) results in quenching of cyclotron resonance and surface superconductivity. This phenomenon is explained by geometrical reasons.