

## РЕЗОНАНСНЫЕ СИГНАЛЫ СВОБОДНОЙ ИНДУКЦИИ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ВЫСОКОМ ВАКУУМЕ

*Б.П.Смоляков, Е.П.Хаймович*

Сообщается об обнаружении в различных металлах сигнала излучения, возникающего после действия мощного СВЧ импульса. Сигнал имеет резонансный характер по магнитному полю с длительностью спада  $\sim 10^{-4}$  с. Указанный эффект, по-видимому, связан с возникновением электронных поверхностных состояний на металлических образцах, находящихся при высоком вакууме.

Среди различных физических методов исследований металлов большую роль играют радиоспектроскопические эффекты такие как циклотронный резонанс<sup>1</sup>, парамагнитный резонанс на электронах проводимости и на локализованных магнитных моментах. Нами был использован новый метод исследования металлов по резонансному излучению в виде сигнала индукции а магнитном поле, перпендикулярном поверхности образца.

Измерения проводились на плоских металлических образцах толщиной от нескольких мк до 5 мм. Стекланные ампулы, в которых находились исследуемые металлы, откачивались форвакуумным насосом до  $10^{-2}$  мм. рт. ст. и запаивались. Поскольку эксперименты проводились при температурах 2 и 4,2К, вакуум в предварительно откачанных ампулах достигал  $10^{-7}$  мм. рт. ст. Ампулы с образцами помещались в цилиндрический резонатор и подвергались воздействию СВЧ импульсов длительностью  $4 \cdot 10^{-8}$  с с частотой 9,4 ГГц. После СВЧ импульса возникал сигнал индукции длительностью  $10^{-4}$  с, приведенный на рис. 1. Мощность отклика для разных образцов находилась в пределах  $10^{-8} - 10^{-9}$  Вт. Чувствительность приемного устройства была  $10^{-12}$  Вт. Интересно отметить, что излучение после воздействия СВЧ импульса появляется только при строго определенном значении магнитного поля и носит явно резонансный характер. Сигнал наблюдался только в откачанных ампулах и при разгерметизации полностью пропадал. К исчезновению индукции также приводила заливка парафином образца, находящегося в вакууме, либо заполнение ампул газообразным гелием. При помещении образца непосредственно в жидкий гелий сигнал также не наблюдался. Создание неровностей с размерами до 0,1 мм на полированных поверхностях металла не влияло заметным образом на сигнал индукции. Отжиг медного образца в вакууме ( $10^{-5}$  мм. рт. ст) в кварцевой ампуле в течение суток при температуре  $950^\circ\text{C}$  привел к ослаблению сигнала на порядок. Последующая химическая полировка поверхности отожженного образца привела к восстановлению первоначальной интенсивности сигнала. Чтобы исключить возможность попадания паров вакуумного масла на образцы вместо форвакуумного насоса использовалась криогенная откачка с одновременным отжигом образца. При этом были получены те же результаты.

Для детального исследования зависимости интенсивности излучения от магнитного поля сигнал индукции стробировался, подавался на интегратор и далее на вход "Y" двухкоординатного самописца. На вход "X" подавалось напряжение, пропорциональное линейно-изменяющемуся магнитному полю. На рис. 2 приведена форма линии излучения для образца Cu, полученного прокаткой монокристалла. Максимумы линий соответствуют  $g$ -факторам 2,004 и 1,981. Подобные сигналы были обнаружены для целого ряда металлов (Be, Mg, Al, Fe, Co, Ni, Ag, Au, Cd, In, Sn, Pb, Cu, Hg, Ce, Sm, Eu, Tb, Dy, La, Ho, Er). Каждый металл характеризуется своим положением линий по полю, шириной и интенсивностью. Наибольшая интенсивность обнаружена у бериллия. Ширина линий всех исследованных образцов не превышает 10 – 15 Э. Наибольшее отклонение от  $g = 2$  наблюдалось у железа и тербия. Образцы Fe дают две линии с  $g = 1,909$  и  $1,872$ . Для Tb также наблюдались две линии с  $g = 2,161$  и  $1,899$ . В ходе экспериментов удалось установить, что эффект наблюдается только тогда, когда постоянное магнитное поле перпендикулярно поверхности образца. Отклонение поля  $H$  на несколько градусов от перпендикулярности к поверхности приводило к исчезновению сигнала. Разницы между положением линий по полю, их интенсивностью и формой для образца, вырезанного из медной фольги и специально выращенного монокристалла меди не обнаружено. Характер наблюдаемого спада во многом напоминает известное возбуждение звука в металлах мощным СВЧ импульсом<sup>2,3</sup>. Однако, резонансное по магнитному полю возникновение индукции, длительное время затухания спада, а также независимость от толщины образца делает это предположение маловероятным. Эксперименты на образцах меди с парамагнитными примесями Mn и Er, совпадающие с результатами для чистой меди говорят в пользу поверхностного характера обнаруженного явления. Заметим, что те же образцы Cu с примесью ионов Er дают сигнал ЭПР с  $g$ -фактором  $\sim 6,6$  как в высоком вакууме, так и в разгерметизированных ампулах.

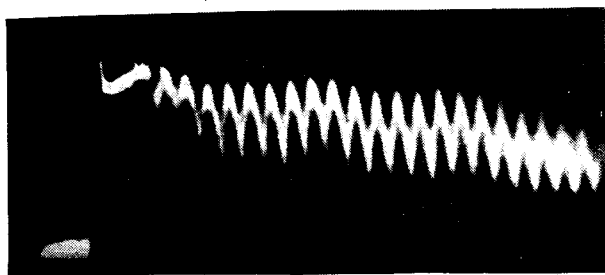


Рис. 1

Рис. 1. Оциллограмма сигнала свободной индукции для образца Al. Спад индукции промодулирован по амплитуде с частотой  $4 \cdot 10^5$  Гц

Рис. 2. Форма линии излучения для образца Cu. Максимумы линий соответствуют полям 3344 Э и 3382 Э. Ширина линий по полю 7 и 8 Э соответственно. Частота заполнения СВЧ импульсов 9381; 4 МГц

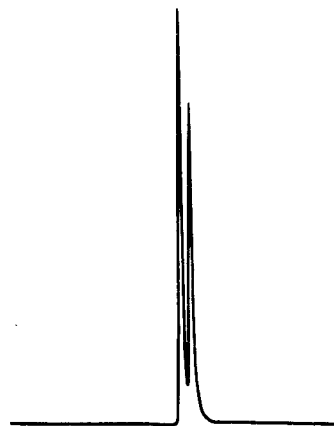


Рис. 2

Перечисленные результаты, а также исчезновение сигнала при контакте металлических образцов с парафином, воздухом или гелием позволяют сделать допущение, что наблюдаемый эффект обязан циклотронному резонансу на поверхностных электронах. Согласно Тамму<sup>4</sup> на границе кристалл – вакуум энергетический спектр электронов в направлении, перпендикулярном поверхности, является дискретным, т. е. квантованным. Такие электроны на поверхности можно рассматривать как двумерные. В магнитном поле перпендикулярном поверхности, двумерное движение свободных электронов превращается в набор квантованных уровней Ландау с расщеплениями  $eHv/mc$ , где  $m$  – эффективная масса. Естественно, что реальные состояния являются хемосорбционными вследствие взаимодействия поверхности металла с чужеродными атомами газов. Но качественная картина поведения электронов, находящихся в поверхностных состояниях остается такой же<sup>5</sup>. Такие поверхности

при понижении температуры испытывают "перестройку", связанную с изменением симметрии поверхностной элементарной ячейки <sup>6</sup>. Это, возможно, приводит к различным циклотронным массам и появлению нескольких линий как на рис. 2.

Благодарим С.А.Альтшулера за полезное обсуждение работы и Е.Ф.Куковицкого за предоставление выращенных им монокристаллов Ве и Си.

#### Литература

1. Азбель М.Я., Канер Э.А. ЖЭТФ, 1956, 32, 896.
2. Гантмахер В.Ф., Долгополов В.Т. Письма в ЖЭТФ, 1967, 5, 17.
3. Dobbs E.R. In Physical Acoustics v. 10. Ed. Acad. Press, New-York and London, 1973.
4. Тамм И.Е. Сбор. научных трудов, М.: Наука, 1975, т.2, гл. 2, стр. 216.
5. Davison C., Levine D. Surface States, N.-Y. and London, 1970; Дависон С., Левин Д. Поверхностные (гамма-волновые) состояния, М.: 1973.
6. Белецкий А.Я. УФН, 1981, 134, 125.

Поступила в редакцию  
22 июня 1982 г.  
После переработки  
9 декабря 1982 г.