

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ОКРЕСТНОСТИ ДОППЛЕР-СДВИНУТОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА ДЫРОК В КАДМИИ

И.Ф.Волошин, Л.М.Фишер

Исследовано поверхностное сопротивление R и его производная по магнитному полю dR/dH пластин кадмия в круговых поляризациях плюс и минус в магнитном поле, параллельном гексагональной оси [0001]. Измерения проводились при различных амплитудах H_1 возбуждающего электромагнитного поля. Обнаружено нелинейное поведение поверхностного сопротивления в поляризации плюс в окрестности порога дырочного доплерона. Обсуждается возможная физическая природа обнаруженного явления.

Хорошо известно, что поверхностное сопротивление R полубесконечного металла с равным числом электронов и дырок при зеркальном отражении носителей от границы имеет максимум на пороге доплеронной волны [1, 2]. В работе [3] было показано, что в компенсированных металлах при диффузном характере отражения поверхностное сопротивление R как функция магнитного поля H на пороге доплерона имеет излом. Излом выражен тем сильнее, чем больше длина свободного пробега носителей тока. Эта особенность $R(H)$ на пороге дырочного доплерона в кадмии экспериментально наблюдалась в работах [3, 4] при $H \parallel [0001]$. В этих работах возбуждение металлической пластины осуществлялось радиочастотным полем, имеющим круговую поляризацию. Измерения проводились с помощью автодинного детектора при малой амплитуде H_1 возбуждающего поля. В настоящей работе эти измерения были продолжены в радиочастотных полях большей напряженности.

Исследования поверхностного сопротивления проводились амплитудным мостом при температурах 1,6 — 4,2К в интервале частот 0,001 — 2,0 Мгц. Пластины кадмия имели толщину 0,43 и 0,6 мм. Нормаль к поверхности пластины совпадала с направлением гексагональной оси [0001]. Образец помещался в систему двух скрещенных катушек, создающих круговую поляризацию поля [3]. Напряжение на катушках можно было плавно менять в интервале 0,05 — 30 в. Это напряжение усиливалось широкополосным усилителем и подавалось на детектор. Продетектированный сигнал, пропорциональный $R(H)$, регистрировался на автоматическом X - Y потенциометре, на X -координату которого подавался сигнал с датчика магнитного поля. Кроме $R(H)$ имелась возможность измерять производную $dR/dH = f(H)$. Магнитное поле создавалось электромагнитом. Записи производились при ориентации $H \parallel [0001]$.

При исследованиях зависимости $R(H)$ коэффициент передачи усилителя на выходе моста подбирался так, чтобы напряжение на входе детектора было одинаковым при различных амплитудах возбуждающего поля H_1 . В результате записи $R(H)$ и $dR/dH = f(H)$, произведенные при различных амплитудах H_1 , совпадают, если поверхностное сопротивление не зависит от величины поля H_1 .

Примеры записи зависимости $R(H)$ при различных амплитудах H_1 возбуждающего поля в круговой поляризации плюс приведены на рис. 1. Максимальная амплитуда поля H_1 для этих записей составляет примерно ~ 10 э. Как показывают оценки это соответствует мощности потока энергии порядка 10^{-2} *вт/см²*.

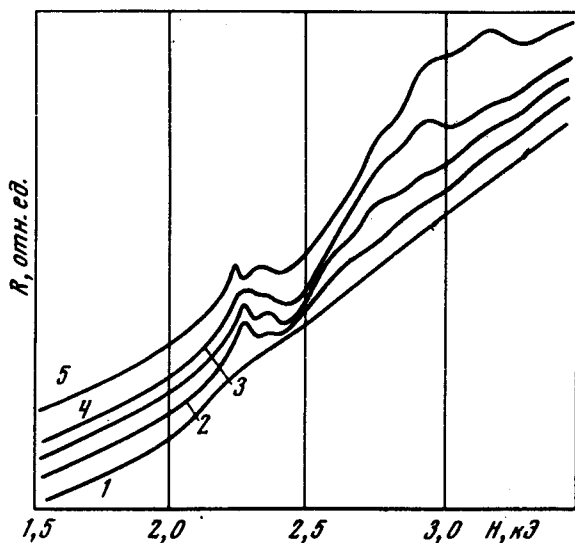


Рис. 1. Зависимость $R(H)$ при различных амплитудах поля H_1 . $T = 1,6$ К, толщина образца $d = 0,6$ мм, $H \parallel [0001]$, частота поля $f = 116$ кГц: кривая 1 — $H_1 = 0,15$ э, кривая 2 — $2,2$ э, кривая 3 — $3,3$ э, кривая 4 — $4,4$ э, кривая 5 — 6 э

При малых радиочастотных напряжениях зависимость $R(H)$ (кривая 1) подобна наблюдавшейся ранее в [4]. Вблизи порога дырочного доплерона кривая $R(H)$ имеет сглаженный излом, а в более сильных полях сопротивление почти линейно увеличивается при возрастании магнитного поля. Поведение поверхностного сопротивления существенно меняется при увеличении амплитуды переменного поля. Прежде всего, излом поверхностного сопротивления на пороге доплерона сменяется максимумом, амплитуда которого увеличивается с ростом поля H_1 (кривая 2). Затем этот максимум раздваивается, а в более сильных полях возникает дополнительная особенность (кривая 3). При этом на кривой $R(H)$ в полях выше порога доплерона наблюдаются осцилляции, обусловленные возбуждением в пластине дырочного доплерона. При дальнейшем увеличении переменного поля H_1 изменения $R(H)$ на пороге волны несколько сглаживаются вследствие расщепления порогового максимума на несколько более слабых экстремумов (кривая 4). Одновременно особенность в области более высоких полей увеличивается и возникает большой плавный максимум. При большей амплитуде поля H_1 пороговый максимум становится более острым и смещается в сторону меньших полей. В свою очередь максимум в сильных полях возрастает по амплитуде и смещается в большие поля (кривая 5).

Пороговая амплитуда поля H_1 , при которой начинает проявляться нелинейность, сильно зависит от температуры и угла между направлением постоянного магнитного поля \mathbf{H} и осью $[0001]$. Она имеет минимальное значение при самой низкой температуре и $H \parallel [0001]$.

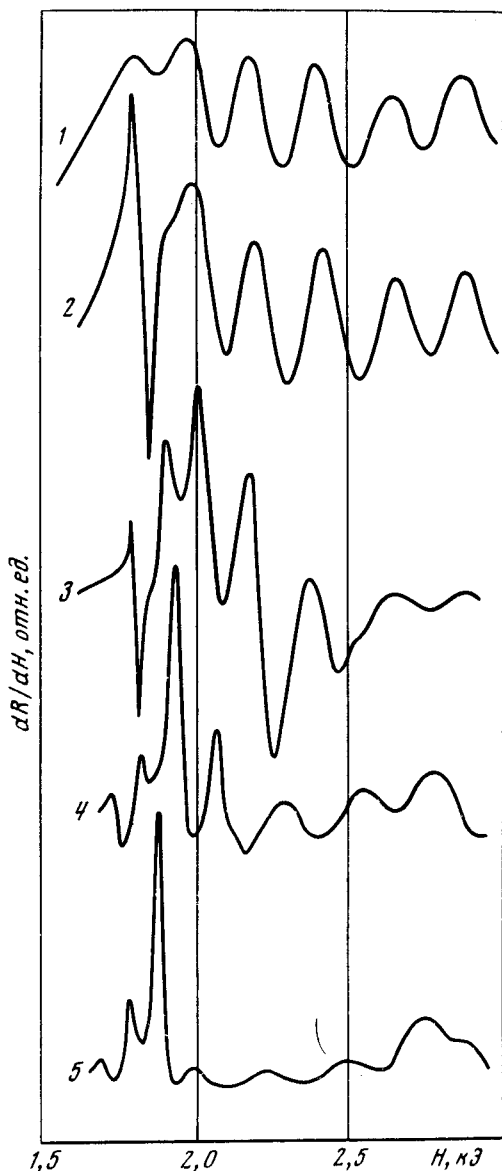


Рис. 2. Производная $dR/dH = f(H)$ при различных значениях поля H_1 . $T = 1,6\text{K}$, $d = 0,6\text{ мм}$, $f = 55\text{ кГц}$, $\mathbf{H} \parallel [0001]$: кривая 1 — $H_1 = 0,3\text{ э}$, кривая 2 — $0,8\text{ э}$, кривая 3 — 4 э , кривая 4 — $7,5\text{ э}$, кривая 5 — 11 э . Кривые 1 и 2 записаны при одинаковых коэффициентах усиления $k = k_0$. Для кривой 3 $k = 1/8k_0$, для кривых 4 и 5 $k = 1/13k_0$.

Нелинейное поведение импеданса кадмия в поляризации плюс проявляется более ярко на записях производной $dR/dH = f(H)$. Примеры зависимости $dR/dH = f(H)$ при различных значениях H_1 приведены на рис. 2. Коэффициенты усиления при записи каждой кривой указаны в подписи к рисунку. Из приведенного рисунка видно, как трансформируются кривые dR/dH от H по мере увеличения поля H_1 . При малых амплитудах поля $H_1 < 0,5\text{ э}$ в широком интервале его значений осцилляционная картина остается постоянной (кривая 1). Первый слева максимум на этой кривой соответствует особенности на пороге дырочного доплерона. Его положение по магнитному полю совпадает с данными работы [3]. Осцилляции на

кривой связаны с возбуждением в пластине дырочного доплерона. При $H_1 > 0,5 \text{ э}$ в окрестности порога появляются два резких экстремума — максимум и минимум (кривая 2), амплитуда которых быстро растет при увеличении H_1 . В более сильном переменном поле, кроме этих экстремумов, появляются дополнительные острые экстремумы большой амплитуды (кривые 3 и 4). Постепенно вся осцилляционная картина сильно деформируется. Вблизи порога волны наблюдается серия острых экстремумов с малым периодом. В области нелинейности заметно увеличивается амплитуда осцилляций (кривые 3 и 4). При больших значениях H_1 ($H_1 > 8 \text{ э}$) амплитуда осцилляций дырочного доплерона по мере роста напряженности переменного поля уменьшается (кривая 5).

Следует отметить, что положение экстремумов доплеронных осцилляций по магнитному полю зависит от напряженности поля H_1 . При увеличении H_1 экстремумы смещаются в сторону более низких полей. Это означает, что в достаточно сильных переменных полях меняется закон дисперсии дырочного доплерона.

Обнаруженное нелинейное поведение поверхностного сопротивления кадмия в поляризации плюс имеет место в широком интервале частот при температурах $T = 3,9\text{К}$, когда видны осцилляции, обусловленные дырочным доплероном. При более высоких температурах осцилляции импеданса и нелинейное его поведение не наблюдались. Это позволяет высказать предположение, что нелинейные эффекты в кадмии связаны с доплеронной волной.

Исследование поверхностного сопротивления кадмия в поляризации минус показало отсутствие нелинейных эффектов при амплитудах H_1 до нескольких десятков эрстед.

Из рассмотрения кривых на рис. 1 можно сделать предположение, что обнаруженные нелинейные эффекты могут быть связаны с возникновением зеркального отражения дырок от границы металла в электромагнитном поле относительно большой амплитуды. Оценки однако показывают, что появление потенциального барьера в кадмии в электромагнитном поле, подобно тому, как это имеет место в висмуте в поле звуковой волны [5], по-видимому, мало вероятно.

Другой возможной причиной нелинейности может быть механизм, рассмотренный Копасовым и Демиховским [6]. В этой работе было показано, что в переменных полях большой амплитуды в окрестности доплер-сдвинутого циклотронного резонанса сильно уменьшается бесстолкновительное затухание волны. Вследствие уменьшения затухания поверхностное сопротивление кадмия на пороге доплерона должно увеличиться. Это приведет к значительному возрастанию амплитуды доплеронных осцилляций в этой области магнитного поля. Однако таким образом нельзя, по-видимому, объяснить изменение спектра дырочного доплерона в широком интервале магнитного поля. Для выяснения физической природы нелинейного эффекта в кадмии требуются дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

Авторы благодарны В.Г.Фастовскому за внимание к работе и В.Г.Скобову и А.С.Чернову за обсуждение результатов.

Всесоюзный
электротехнический институт
им. В.И.Ленина

Поступила в редакцию
13 августа 1976 г.

Литература

- [1] E. A. Kaner, V. G. Skobov. *Phys. Lett.*, 25A, 105, 1967.
 - [2] М.Я.Азбель, С.Я.Рахманов. *ЖЭТФ*, 57, 295, 1969.
 - [3] В.В.Лаврова, С.В.Медведев, В.Г.Скобов, Л.М.Фишер, В.А.Юдин. *ЖЭТФ*, 64, 1839, 1973.
 - [4] В.В.Лаврова, С.В.Медведев, В.Г.Скобов, Л.М.Фишер, В.А.Юдин. *ЖЭТФ*, 65, 705, 1973.
 - [5] W. Salaneck, Y. Sawada, E. Burstein. *J. Phys. Chem. Sol.*, 32, 2285, 1971.
 - [6] А.П.Копасов, В.Я.Демиховский. *ФТТ*, 15, 3589, 1973.
-