

**О НЕЛИНЕЙНОМ ПОГЛОЩЕНИИ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭНЕРГИИ ВОЛЬФРАМОМ
ПРИ БОЛЬШИХ АМПЛИТУДАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ**

В.В.Бойко, Л.В.Овчинникова, Г.Н.Ландышева

Обнаружен эффект нелинейного поглощения высокочастотной энергии вольфрамом, достигающий с ростом амплитуды высокочастотного поля величины $\approx 10\%$. Показано, что этот эффект обладает анизотропией и частотной зависимостью, отличной от частотной зависимости известных нелинейных эффектов.

Как показали исследования последних лет (см., например, обзор [1]), при облучении радиоволнами чистых и совершенных монокристаллов, возможно наблюдение различных нелинейных эффектов, проявляющихся в генерации второй гармоники, появлении постоянной радио-эдс, "токовых" состояний и автоколебаний.

В настоящей работе мы сообщаем о наблюдении и исследовании еще одного типа нелинейных эффектов в металлах, который наблюдался в вольфраме с ростом падающей на его поверхность волны в нулевом внешнем магнитном поле ($H_0 = 0$). Впервые на немонотонный ход зависимости поверхностного импеданса галлия, висмута и калия в слабых магнитных полях и сложный характер его изменения с уровнем высокочастотной мощности было указано в работах [2 - 4], однако эти исследования носили качественный характер и были выполнены при амплитудах переменного магнитного поля $H_{\sim} < 2 \text{ Э}$.

Эксперименты, о которых идет речь ниже, проводились на монокристаллических образцах вольфрама на частоте 0,35 - 8,0 МГц в интервале температур 1,5 - 4,2 К при H_{\sim} до 15 Э. Регистрация активных потерь в высокочастотном контуре осуществлялась с помощью амплитудного моста. Магнитное поле Земли компенсировалось с точностью $\pm 2\%$.

Калибровка добротности контура и чувствительности регистрирующей схемы осуществлялась с помощью активного сопротивления, включаемого параллельно контуру, в состав которого входила прямоугольная катушка индуктивности с исследуемыми образцами диаметром ≈ 8 мм и толщиной от 0,5 до 1,6 мм.

Образцы вырезались из монокристаллического слитка вольфрама с $R_{3,00 \text{ К}} / R_{4,2 \text{ К}} \approx 3 \cdot 10^4$ и обрабатывались по методике, описанной в [5].

Пример записи экспериментальных кривых показан на рис. 1 (стрелками отмечено прямое и обратное изменение внешнего поля H_0 , \mathbf{n} - нормаль к поверхности образца). Значения H_{\sim} , приведенные на рисунке, определялись с учетом формы катушки индуктивности по формуле:

$$H_{\sim} = 0,8 \frac{n_K U_K}{\omega L_K}, \text{ где } L_K - \text{индуктивность катушки с образцом, } n_K -$$

число витков на см, U_K - напряжение на контуре, ω - частота.

Как видно из рисунка, величина относительных изменений напряжения на контуре $\Delta U_K / U_K = A_0$ (при $H_0 = 0$) резко увеличивается с ростом амплитуды высокочастотного поля. При $H_{\sim} \approx 2,0 \text{ Э}$ возникает небольшой провал, который в дальнейшем исчезает, а при $H_{\sim} \approx 10 \text{ Э}$ наблюдается гистерезис и скачкообразное уменьшение сопротивления вольфрама.

Как показали исследования, амплитуда линии A_0 практически не зависела от направления H_0 относительно кристаллографических осей кристалла и уменьшалась при $H_0 \perp H_{\sim} \perp \mathbf{n}$. Понижение температуры образца от 4,2 до 1,5 К приводило к 30% росту A_0 . При $H_0 \parallel \mathbf{n}$ эффект зависимости A_0 от внешнего магнитного поля полностью пропадал.

Одними из основных факторов, оказывающих определяющий вклад в амплитуду линии A_0 , являлись качество поверхности образца и ори-

ентация плоскости кристалла относительно падающей электромагнитной волны. Последнее утверждение наглядно иллюстрируется результатами, представленными на рис. 2. Этот результат был проверен на нескольких образцах, приготовленных по одной и той же технологии, и во всех экспериментах отношение $A_0(100)/A_0(110)$ было ≈ 2 .

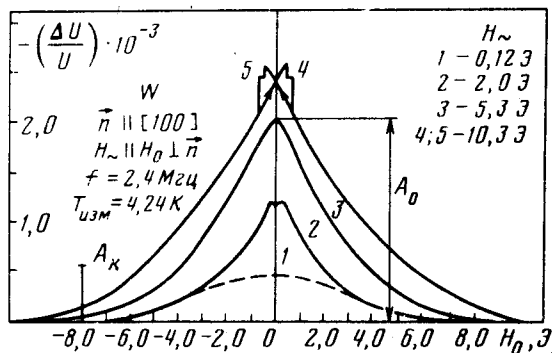


Рис. 1

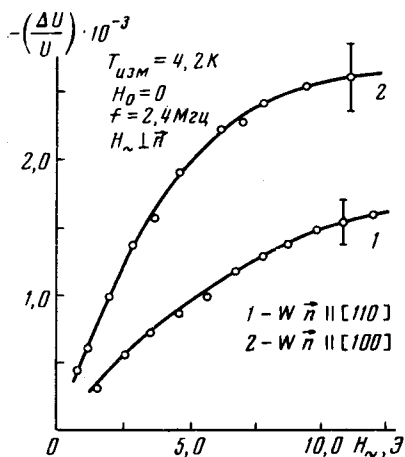


Рис. 2

Частотная зависимость амплитуды линии A_0 представлена на рис. 3. Обычно нелинейные эффекты в металлах описываются при помощи поверхностного импеданса [1]. Критерием применимости такого описания считается малость величины $|\Delta Z| \ll 1$. Базируясь на этом факте и выражениях для поверхностного импеданса в условиях аномального скин-эффекта

$$Z = R - iX = - \frac{4\pi \omega \delta_n i}{c^2}$$

и величины относительных изменений напряжения $\Delta U_K/U_K$ резонансного контура с $Q \gg 1$, обусловленной изменением реальной части импеданса образца [6],

$$\frac{\Delta U_K}{U_K} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_K \xi} = - Q n_K^2 S \frac{\text{Re}(\Delta Z_{\text{обр}})}{\omega L_K}$$

можно оценить величину $\Delta R/R$. Здесь δ_n – глубина проникновения поля в металл в условиях аномального скин-эффекта, c – скорость света, Q – добротность контура, S – площадь образца, облучаемая электромагнитной волной, ξ – коэффициент передачи моста, $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ – изменение напряжения на выходе моста.

Из этих выражений, а также результатов, представленных на рис. 1 и рис. 2 и значений $Q = 17,1$; $L_K = 18,7$ мкГн; $n_K = 170$; $S = 1$ см²; $\xi = 0,3$, которые определялись непосредственно в эксперименте, следует что для $H = 8 \text{ Э}$ $\Delta R(100)/R$ равно $\approx 10\%$.

Совокупность рассмотренных выше экспериментальных данных не позволяет объяснить наблюдаемый нами рост сопротивления вольфра-

ма с уровнем высокочастотного поля ни одним из известных в настоящее время механизмов нелинейности.

Этот эффект не может быть связан ни с разогревом электронной системы, поскольку в этих условиях он пренебрежимо мал, ни с обычным ростом сопротивления образца с увеличением магнитного поля, так как в линейном режиме в интервале магнитных полей H_0 от 0 до ≈ 20 Э проводимость вольфрама не уменьшается, а наоборот увеличивается (см. рис. 1 — линия 1); ни с процессом детектирования металлами электромагнитных волн радиочастотного диапазона, рассмотренным в [1]. Согласно [1], величина нелинейных эффектов, обусловленная этим механизмом должна увеличиваться с ростом частоты электромагнитного поля, поскольку минимальное значение H_{\sim} , при котором такая нелинейность становится заметной, уменьшается с частотой $\sim \omega^{-1/3}$, что не согласуется с результатами, представленными на рис. 3.

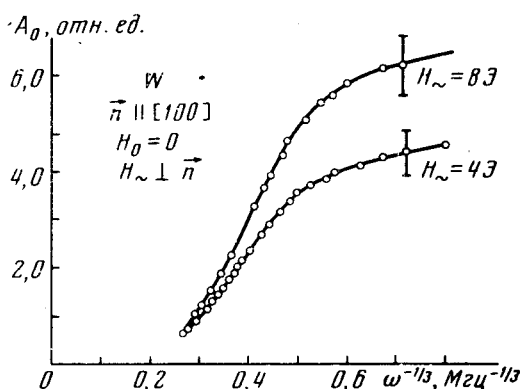


Рис. 3

В рамках существующих теоретических представлений об эффекте выпрямления можно объяснить только гистерезис и скачкообразное уменьшение сопротивления вольфрама, которое наблюдается при $H_{\sim} \gtrsim 10 \text{ Э}$ (см. рис. 1).

Отличие в амплитуде линий A_0 для плоскостей (100) и (110) (см. рис. 2), существенно превышающее рост этой линии с понижением температуры, вероятнее всего обусловлено различной степенью зеркальности этих плоскостей и, следовательно, различным вкладом электронов, сталкивающихся с границей металла.

Учитывая сильную зависимость наблюдаемого эффекта от характера отражения электронов от поверхности металла, нам кажется перспективным использование для изучения механизмов рассеяния электронов проводимости на границе раздела металл — вакуум.

Однако для постановки таких исследований необходимо строгое теоретическое описание нелинейных эффектов с учетом вклада в них поверхностных электронов.

Поступила в редакцию
25 июля 1980 г.

Литература

[1] В.Т. Долгополов. УФН, 130, 241, 1980.

- [2] J. E. Cochran, C. A. Shiffman. *Phys. Rev.*, 140, 5A, 1963, 1978.
- [3] В.Ф.Гантмахер. Письма в ЖЭТФ, 2, 557, 1965.
- [4] В.Ф.Гантмахер, Л.А.Фальковский, В.С.Цой. Письма в ЖЭТФ, 9, 246, 1969.
- [5] В.В.Бойко, В.А.Гаспаров. *ЖЭТФ*, 61, 2362, 1971.
- [6] D. K. Wagner, R. Bowers. *Adv. Phys.*, 27, 651, 1978.
-