

К. А. ВОЛКОВА

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ВОЛНАХ МАССОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

(Представлено академиком А. Н. Терениным 5 II 1953)

Введение. Резонансное поглощение сантиметровых волн в ферромагнетиках впервые наблюдал В. К. Аркадьев в 1912 г. ((¹), (²), стр. 154 и 276). При исследовании поглощения электромагнитных волн длиной от 1,2 см до 73 см в двух параллельных проволоках В. К. Аркадьев обнаружил избирательное поглощение электромагнитных волн в железных и никелевых проволоках при некоторых частотах. В. К. Аркадьев объяснил это наступающим в максимуме поглощения резонансом «элементарных магнитов» ((³), (²), стр. 279, 228). На основании этих результатов им была дана общая теория магнитных спектров в слабых полях, чем было положено начало новой главе физики—магнитной спектроскопии.

В настоящее время число экспериментальных работ, посвященных ферромагнитному резонансу, велико и оно непрерывно возрастает; обычно они выполняются на волнах в 10—3 см длины, итти далее 1,25 см клистроны и магнетроны пока не позволяют. Они также не дают возможности легко переходить от одной длины волны к другой.

В настоящей работе показывается возможность наблюдения ферромагнитного резонанса в миллиметровых и сантиметровых волнах массового излучателя* А. А. Глаголевой-Аркадьевой ((⁴), стр. 55).

Метод. Для исследования свойств ферромагнитных металлов в этом диапазоне В. К. Аркадьевым был предложен ферромагнитный бирезонатор. Так мы называем ферромагнитное тело (рис. 1), электрически и магнитно резонирующее на переменное электрическое поле E . Поле возбуждает в теле сверхвысокочастотный электрический ток i , который создает круговое магнитное поле H_{ϕ} . Наложенное на постоянное магнитное поле, это высокочастотное поле частоты ν вызывает ферромагнитный резонанс, т. е. усиленную прецессию осей спинов, ориентированных внутренним магнитным полем $H = H_a - NI$, если напряженность внешнего поля H_a такова, что частота прецессии близка к частоте ν поля H_{ϕ} (здесь I — намагниченность и N — размагничивающий фактор).

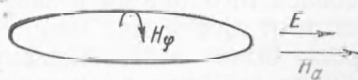


Рис. 1. Ферромагнитный бирезонатор

вызывает ферромагнитный резонанс, т. е. усиленную прецессию осей спинов, ориентированных внутренним магнитным полем $H = H_a - NI$, если напряженность внешнего поля H_a такова, что частота прецессии близка к частоте ν поля H_{ϕ} (здесь I — намагниченность и N — размагничивающий фактор).

В случае магнитного резонанса кажущаяся магнитная проницаемость по сопротивлению R бирезонатора μ_R достигает максимума, а μ_L про-

* Доложено 19 IV 1951 г. на научной конференции МГУ «Ломоносовские чтения».

ходит через минимум. Поэтому в условиях резонанса, когда i достигает максимума, выделяющееся тепло $i^2 R$ особенно велико, ибо R пропорционально $V_{\mu R}^2$. Индуктивность бирезонатора L , состоящая из внешней части, L_a , и относительно малой внутренней, L_i , пропорциональной $V_{\mu L}^2$, должна проходить через неглубокий минимум.

Для изучения магнитного резонанса в миллиметровых волнах пользуются смешанным излучением массового излучателя. Он дает непрерывный спектр колебаний на интервале, значительно более широком, чем полоса поглощения бирезонатора, которая равна около $0,1-0,2 \nu$ (В. К. Аркадьев). В таком случае происходит намагничивание не одной частотой ν , а рядом частот близких к ν , больших и меньших ее, однако амплитуда с частотой ν наибольшая. Наш метод состоит в определении поля H , при котором получается наибольшее выделение тепла $i^2 R$ при данной длине бирезонатора.

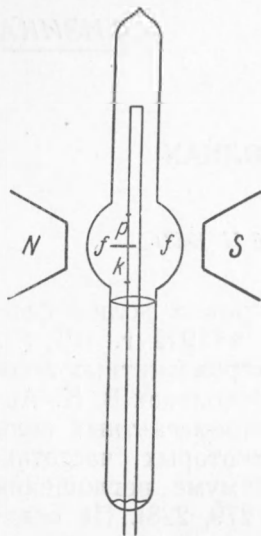


Рис. 2. Бирезонатор ff в вакууме

Было бы легче дать теорию ферромагнитного бирезонатора, если бы он имел форму эллипсоида (см. рис. 1). В наших опытах он имел форму цилиндра ff (см. рис. 2) длиной от 1 до 6 мм при диаметре 15—20 μ . В средней своей части такая проволочка была припаяна к спаяу термоэлемента, составленного из платиновой p и константановой k проволочек такого же диаметра. Был изготовлен набор из таких бирезонаторов разной длины. В этой форме они походят на резонирующие термоэлементы А. А. Глаголевой-Аркадьевой ((⁴), стр. 170, фиг. 1), которые от ферромагнитного бирезонатора отличаются тем, что тело последнего в них заменено отогнутыми вправо и влево проволочками p и k . Они тогда образовали антенну от 0,1 до 30 мм длиной и резонировали на волны от 0,35 до 64,8 мм длиной. Наши бирезонаторы помещались между полюсами электромагнита, позволявшего получать поля H_a от 100 до 13500 эрст. Так как NI очень мало, то можно считать, что $H = H_a$. Внешний диаметр колбочек, заключавших бирезонаторы, колебался от 5 до 9 мм в зависимости от длины их. Для контроля были изготовлены такие же приборы с манганиновым резонатором.

Измерения и результаты. Установка состояла из двух металлических вогнутых зеркал с диаметром отверстия 60 см и фокусным расстоянием $f_1 = 24$ см, $f_2 = 25,6$ см (рис. 3). В фокусе F_1 зеркала P_1 помещалась излучающая часть «автоматического» массового излучателя (⁵). В фокусе F_2 зеркала P_2 помещался резонансный термоэлемент с тонкой антенной. Термоэлемент был связан с гальванометром φ ленинградского типа с чувствительностью $5,1 \cdot 10^{-9} \frac{a}{\text{мм/м}}$ и периодом 6 сек.

Высокое напряжение подавалось от индуктора, питавшегося от аккумуляторной батареи через прерыватель «Ротакс».

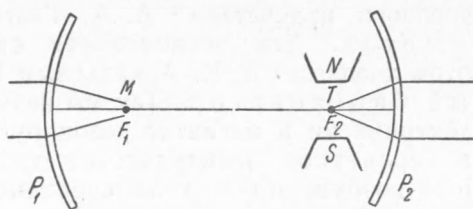


Рис. 3. Бирезонатор F_2 в фокусе волн массового излучателя F_1

При измерениях на каждую заданную напряженность постоянного поля производилось 6—8 отсчетов отклонений гальванометра. Для контроля на место термоэлемента с ферромагнитным бирезонатором устанавливался термоэлемент с резонатором такой же длины из манганина и он также подвергался одновременному действию переменного и постоянного полей.

Измерения производились на следующих частотах ν и волнах λ :

$$\begin{array}{cccccccc} \nu = & 21\,400, & 25\,000, & 32\,300, & 41\,100, & 56\,600, & 125\,000 & \text{Мгц} \\ \lambda = & 14 & 12 & 9,3 & 7,3 & 5,3 & 2,4 & \text{мм} \end{array}$$

Путем измерений обнаружено, что отношение длины собственной волны ферромагнитного бирезонатора к его длине близко к тому же отношению для немагнитной антенны, полученному А. А. Глаголевой-Аркадьевой и Н. А. Соколовым (6).

Результаты измерений, полученные на описанной установке для железа и никеля, приведены на рис. 4.

Все полученные кривые имеют вид, характерный для резонанса. Ширина резонансных кривых весьма значительна и увеличивается с уменьшением длины волны. Возможными причинами, обуславливающими большую ширину резонансной полосы, может быть неоднородный или недостаточный отжиг проволоки бирезонатора, наличие на нем припоя, а также причины молекулярного порядка. К этому, в условиях эксперимента, когда источником ультракоротких волн является массовый излучатель, добавляется, то, что термоэлемент с бирезонатором, как и резонансные термоэлементы, дают возможность выделять из смешанного излучения не спектральную линию, а лишь полосу ширины 0,1—0,2 ν .

Сравнивая кривые, полученные для разных длин волн, можно видеть, что наиболее резко резонанс выступает в волнах 1,4 и 1,2 см; в миллиметровых волнах резонанс выражен тем слабее, чем меньше длина волны. Это находится в согласии с наблюдениями А. Г. Котова (7), который находит, что искусственный магнитный резонанс, т. е. резонанс при изменении наложенного магнитного поля, в железе и никеле выявляется резко всего в волнах от 2 до 6 см, в которых В. К. Аркадьевым (1), (2), стр. 154 и 276), впервые наблюдался естественный магнитный резонанс.

Как для железа, так и для никеля максимум на резонансных кривых смещается в сторону более сильных полей с уменьшением длины волны. Контрольные измерения на термоэлементах с манганиновым резонатором длиной от 1 до 6 мм показали постоянство угла отклонения гальванометра при различной напряженности наложенного поля.

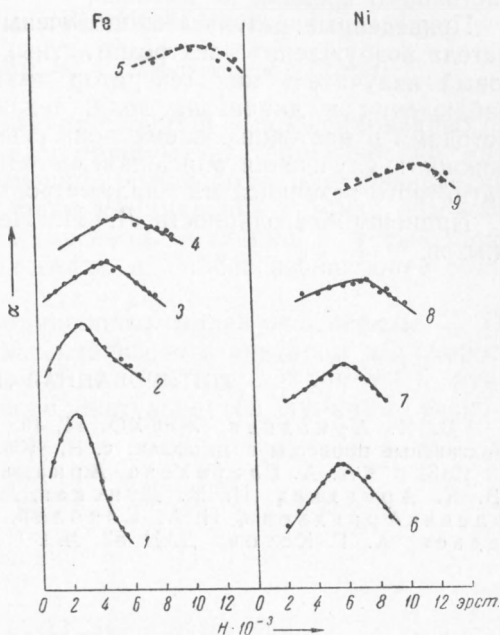


Рис. 4. Резонансные кривые для железа при волнах: 1— $\lambda = 14$ мм, $g = 2,05$; 2— $\lambda = 12$ мм, $g = 2,16$; 3— $\lambda = 9,3$ мм, $g = 2,2$; 4— $\lambda = 7,3$ мм, $g = 2,36$; 5— $\lambda = 2,4$ мм; для никеля 6— $\lambda = 14$ мм, $g = 1,93$; 7— $\lambda = 12$ мм, $g = 2,11$; 8— $\lambda = 9,3$ мм, $g = 2,3$; 9— $\lambda = 5,3$ мм

Фактор расщепления, вычисляемый по формуле

$$g = \frac{2,15 \cdot 10^4}{\lambda \sqrt{BH}},$$

для железа и никеля имеет значения, близкие к 2 для волн в 1,2 и в 1,4 см, что находится в соответствии с данными других исследователей. Для миллиметровых волн фактор расщепления больше 2 и увеличивается с уменьшением длины волны: при $\lambda = 0,73$ см $g = 2,36$ (для железа), при $\lambda = 0,93$ см $g = 2,3$ (никель). При более коротких волнах g еще больше. Причина большой величины g -фактора (по сравнению с $g = 2,00$ для свободного электронного спина) и увеличение его с уменьшением длины волны пока не выяснены.

Данных, относящихся к миллиметровым волнам, в литературе до настоящего времени не имелось.

Приведенные результаты получены путем применения искрового метода возбуждения электромагнитных волн. Они показывают, что массовый излучатель как генератор кратчайших волн позволяет вести наблюдения в диапазоне волн, техника получения которых другими методами в настоящее время пока еще не освоена. Они допускают возможность улучшения описанной методики для более тонкого изучения магнитного резонанса на миллиметровых волнах.

Приношу благодарность Л. И. Петрову за помощь в подготовке опытов.

Поступило
26 I 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. К. Аркадьев, ЖРФХО, 44, 165 (1912). ² В. К. Аркадьев, Электромагнитные процессы в металлах, ч. II, 1936. ³ В. К. Аркадьев, ЖРФХО, 45, 312 (1913). ⁴ А. А. Глаголева-Аркадьева, Собр. тр., изд. АН СССР, 1948. ⁵ В. К. Аркадьев, И. М. Дунская, ДАН, 76, № 4 (1951). ⁶ А. А. Глаголева-Аркадьева, Н. А. Соколов, ДАН, 32, № 8 (1941). ⁷ В. К. Аркадьев, А. Г. Котов, ДАН, 83, № 6 (1952).