

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ И МАГНИТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ.

В. К. Аркадьев.

Электромагнитная волна, проходя через какое-либо тело, обычно имеет в нем иную скорость, чем в пустоте и нередко распространяется в теле, теряя постепенно свою энергию по пути, т.-е. испытывая поглощение. Скорость очень длинных волн в диэлектриках определяется их диэлектрическим коэффициентом ϵ_{∞} , который может быть определен электростатически по увеличению емкости конденсатора, и магнитной проницаемостью μ_{∞} , которая может быть измерена магнетометром. Если электромагнитная волна очень коротка, то ее электрическое и магнитное поля меняются настолько быстро, что электрические и магнитные частицы не успевают смещаться и в веществе не успевают возникать электрическая или магнитная поляризация, которые влияют на скорость волны; тогда нет трения, которое обуславливает сильную абсорпцию волн средней длины. Поэтому абсорпция коротких волн очень мала и их скорость в веществе не отличается от скорости в пустоте; таковы X-лучи, абсорпция которых ничтожна — все тела прозрачны для X-лучей, их скорость в веществе равна скорости в пустоте, показатель преломления X-лучей равен 1. Это происходит оттого, что в высокопеременных электрических полях волн X-лучей электроны и ионы не успевают заметно смещаться. Колебания X-лучей лежат по ту сторону кризиса электрических свойств вещества, в той области, где диэлектрический коэффициент равен 1.

В средней части спектра, где число колебаний электромагнитной волны совпадает или близко к числу колебаний электрических центров, мы имеем область резких изменений показателя преломления и диэлектрического коэффициента ϵ — область электрической дисперсии и область сильного поглощения лучей, область электрической абсорпции. Здесь у диэлектриков обнаруживается так называемая электропроводность поляризации, обозначаемая σ . Появление этого фактора электропроводности изолятора представляет собой весьма своеобразное явление: при определенной частоте колебаний, именно тогда, когда заложенные в веществе центры сильнее всего раскачиваются (резонируют) под действием переменного поля волны,

на диаграмме. Там же указаны лежащие в этой области собственные длины волн λ_0 элементарных магнитов и их трение Θ .

В области этой полосы абсорпции магнитная проницаемость переменна. В одном случае она даже меньше 1 и равна 0,80.

По аналогии с диэлектриками, мы должны заключить, что в этой области периодов магнитные тела должны обнаружить и магнитную проводимость. Этот парадоксальный факт приводит к ряду следствий, которые позволяют о ферромагнитных телах говорить так же, как мы привыкли говорить о проводниках электричества.

Именно, при перемагничивании в переменном поле, даже если не существует гистерезиса, мы должны иметь некоторую потерю энергии и образование тепла, обусловленное вязким трением элементарных магнитов. Это приводит к закону развития в 1 кб. см магнитного тепла W_m , аналогичному закону Джауля, именно

$$W_m = \rho H^2 t,$$

что совпадает с электрическим законом Джауля ¹⁾

$$W_e = \sigma E^2 t.$$

Магнитная проводимость σ в сантиметровых герцевых волнах оказывается порядка $10^{10} - 10^{11}$ единиц. Чтобы оценить это число, представим себе, что уже в постоянном магнитном поле железо обнаруживает такую же магнитную проводимость. Ясно, что в таком случае всякий трансформатор с замкнутой магнитной цепью можно было бы питать постоянным током, и он давал бы постоянный трансформированный электрический ток ²⁾. Сечение его железа, благодаря большой магнитной проводимости магнитопровода ($\rho = 10^{11}$ CGSM) можно было бы сделать весьма ничтожным и всю железную цепь можно было бы осуществить в виде одного витка тонкой железной проволоки. Однако этому кладет предел написанный выше магнитный закон Джауля, из которого следует, что один виток тонкой проволоки не выдержал бы такой нагрузки и быстро перегорел бы вследствие громадного магнитного трения.

Предполагая, что элементарные магниты в ферромагнитном металле вращаются по тем же законам упруго-вязкого движения, которое обычно приписывается смещению электрических центров в диэлектри-

¹⁾ Здесь закон Джауля написан для 1 см³ вещества; действительно, сила тока в 1 см³ есть $i = \frac{r}{r} = \frac{E}{r}$; сопротивление 1 см³ $r = \frac{1}{\sigma}$; тогда $W_e = i^2 r t = \sigma E^2 t$.

Аналогичный вывод относится и к магнитному закону Джауля.

²⁾ Ток был бы обусловлен постоянным электрическим полем, образующим кольца около железной проволоки с постоянным магнитным током.

ке, получают для проницаемости μ и магнитной проводимости ρ следующие величины:

$$(3) \mu = 1 + (\mu_\infty - 1) \frac{1 - \gamma^2}{\eta^2 \gamma^2 + (1 - \gamma^2)^2} \text{ и } \rho = \frac{\mu_\infty - 1}{2T_0} \frac{\eta \gamma^2}{\eta^2 \gamma^2 + (1 - \gamma^2)^2}$$

Величина коэффициента преломления и абсорбции определяется из выражений ¹⁾:

$$(4) \quad \begin{aligned} 2n^2 &= \sigma' (\sqrt{\mu^2 + \rho'^2} - \rho') = \sigma' \mu_n, \\ 2k^2 &= \sigma' (\sqrt{\mu^2 + \rho'^2} + \rho') = \sigma' \mu_k, \end{aligned}$$

где $\rho' = 2\rho T$.

Коэффициент абсорбции k' , который определяет убывание амплитуды волны с расстоянием x формулой $e^{-k'x}$, есть $\frac{2\pi k}{\lambda} = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{c}} \sqrt{\frac{\mu_k}{\lambda}}$.

Представленный на рис. 2 коэффициент есть $S = \sqrt{\frac{\mu_k}{\lambda}}$. Линиями представлен теоретический ход величин μ_k и μ_n . Светлые кружки представляют измерение по поглощению волн в ферромагнитных проволоках величины μ_k . Согласно теоретических величин с опытными вполне удовлетворительно.

Из приведенных формул (2) и (4) мы видим что n и k в случае электрической и магнитной дисперсии выражается при помощи двучленов

$$\begin{aligned} \sigma_n' &= r + \alpha, & \sigma_k' &= r - \alpha, \\ \mu_k &= r + \beta', & \mu_n &= r - \beta', \end{aligned}$$

где α заменяет ε и μ , $\beta' = \sigma' + \rho'$, а $r = \sqrt{\alpha^2 + \beta'^2}$. Исследование хода величин $r \pm \alpha$ составляет предмет теории электрической дисперсии и абсорбции, в частности обычной оптической дисперсии; изучение величин $r \pm \beta'$ — предмет теории магнитной дисперсии и абсорбции.

В последнее время двучлены μ_k и μ_n получили применение и в электротехнике, где при их помощи поддаются теоретическому исследованию те электромагнитные процессы, где поглощение энергии в железе обусловлено не только вязким трением при вращении элементарных магнитов, но также и другими причинами, как гистерезис и ток Фуко (Уллер, Тонкс, Трукса, Ганс).

Изучение хода в зависимости от длины волны, величин $\mu = \sqrt{\mu_n \mu_k}$, $2\rho' = \mu_k - \mu_n$ и самих μ_k и μ_n различных ферромагнитных метал-

¹⁾ Общие выражения для n и k суть:

$$2n^2 = \sqrt{(\varepsilon^2 + \sigma'^2)(\mu^2 + \rho'^2)} + \varepsilon\mu - \sigma'\rho' \text{ и } 2k^2 = \sqrt{(\varepsilon^2 + \sigma'^2)(\mu^2 + \rho'^2)} - \varepsilon\mu + \sigma'\rho'$$

Из них получаются (2) и (4) как частные случаи.

См. В. Аркадьев, Ж. Р. Ф. О. 45, 312, 1913.

лов и их соединений, т.-е. пассивных магнитных спектров, составляет предмет пассивной магнитной спектроскопии. Ее отличие от старой пассивной электрической спектроскопии, ис-

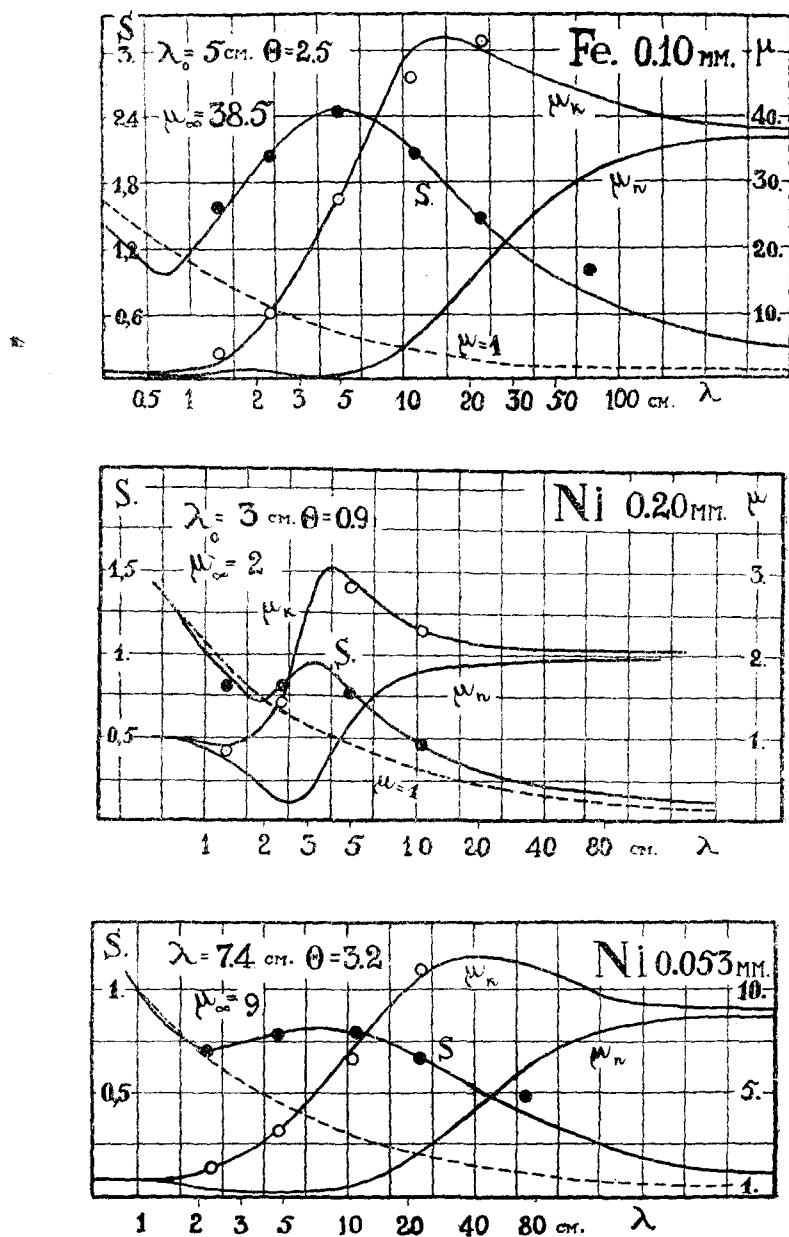


Рис. 2. Полосы магнитной абсорбции $S = \sqrt{\frac{\mu_k}{\lambda}}$ в железных и никелевых проводах и их кажущаяся проницаемость μ_k и μ_n .

следующей ход показателя преломления, абсорпции, коэффициента отражения и т. п., заключается в том, что первая исследует влияние на вещество электрического вектора электромагнитной волны, а вторая — магнитного вектора той же волны. Мы видим, что обе эти ветви общей электромагнитной спектроскопии вполне равноправны.

Если старая спектроскопия нам раскрыла многие свойства тел и выяснила ту широкую спектральную область собственных колебаний частиц вещества, которая простирается от границы ультрафиолетовых лучей и проникает в область лучей Герца, то не менее ценных результатов мы в праве ожидать от магнитной спектроскопии, так как именно магнитные свойства вещества и особенно магнетона в настоящее время представляют много непонятного и загадочного. Зоммерфельд говорит в своей известной книге о строении атома: „Наступит день, когда поучительные результаты исследований по магнетизму нам позволят разгадать магнетон Бора, или, что то же, кванты Планка, и дадут возможность с полной ясностью нарисовать картину квантового строения вещества“.

ЛИТЕРАТУРА

(основные работы).

1. W. Arkadiew. Ueber die Reflexion elektromagnetischer Wellen an Drähten. Ann. der Phys. **45**, 133, 1914. Ж. Р. Ф. О. **45**, 46, 1913.
2. R. Gans. Bemerkung zu meiner Arbeit „Das Verhalten Hertz'scher Gitter“ Ann. d. Phys. **66**, 427, 1921.
3. W. Arkadiew. Ueber die Absorption elektromagnetischer Wellen an zwei parallelen Drähten. Ann. d. Phys. **53**, 105, 1919. Ж. Р. Ф. О. **44**, 1912.

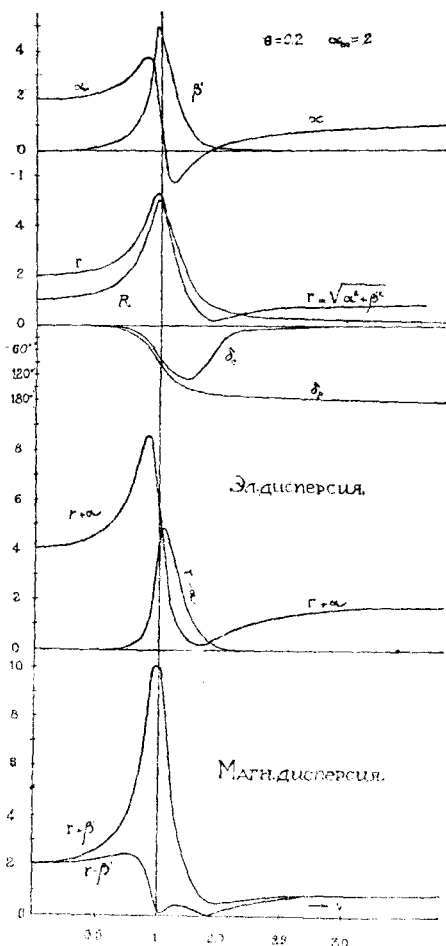


Рис. 3. R — резонанс электрических или магнитных центров; δ_p — отставание их фазы и фазы поляризации от фазы поля; δ_e — отставание фазы индукции; r — величина $\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$; коэффициент преломления n в диэлектриках определяется из ур. $2n^2 = r + \alpha$, коэффициент поглощения в них из ур. $2k^2 = r - \alpha$; кажущаяся проницаемость $\mu_k = r + \beta'$, $\mu_n = r - \beta'$.

4. В. Аркадьев. Ферромагнитные свойства как функция длины волны. *Ж. Р. Ф. О.* **45**, 312, 1913.
5. W. Arkadiew. Das Verschwinden der ferromagnetischen Eigenschaften bei den kürzesten elektrischen Wellen. *Phys. Zs.* **14**, 561, 1913.
6. W. Arkadiew. Eine Theorie der elektromagnetischen Feldes in ferromagnetischen Metallen. *Phys. Zs.* **14**, 928, 1913. *Ж. Р. Ф. О.*
7. В. Аркадьев. Теория намагничивания тела в постоянном и переменном полях и ее приложения к практическим вопросам электротехники. *Телеграфия и телефония без проводов.* 7 вып. 1920 г. стр. 135.
8. В. Аркадьев. Современные задачи изучения намагничивания тела и вещества в постоянном и переменном полях. „Физика“ — Журн. Московск. Физич. Общества имени Лебедева, стр. 320. 1922.
9. Richard Gans und Ramon G. Loyarte. Die Permeabilität des Nickels für schnelle elektrische Schwingungen. *Ann. d. Phys.* **64**, 209, 1921.
10. Richard Gans. Die Permeabilität des Nickels für kurze Hertz'sche Wellen und die Messungen von Arkadiew. *Ann. d. Phys.* **64**, 250, 1921.
11. W. Arkadiew. Die Theorie des elektromagnetischen Feldes in ferromagnetischen Metallen und die Berechnungen von R. Gans. *Ann. d. Phys.* **65**, 643, 1921.
12. R. Gans. Bemerkungen zu der Arbeit „Die Permeabilität des Nickels für schnelle elektrische Schwingungen von Richard Gans und Ramon G. Loyarte und die Priorität Arkadiew“, *Ann. d. Phys.* **66**, 429, 1921.
13. W. Arkadiew. Erklärungen zu der Arbeit von R. Gans „Magnetische Permeabilität des Nickels für schnelle elektrische Schwingungen und die Messungen von Arkadiew“. *Ann. d. Phys.* **66**, 130, 1921.
14. Б. А. Введенский. О скорости размагничивания железа. *Науч. Изв. Гос. Изд.* стр. 320. 1922.
15. B. Wwedensky. Ueber die Wirbelströme bei spontaner Aenderung der Magnetisierung. *Ann. der Phys.* **64**, 609, 1921.
16. B. Wwedensky. Magnetische Viskosität in sehr dünnen Eisendrähten. *Ann. der Phys.* **66**, S. 110. 1921.
17. W. Kartschagin. Ueber die selektive Absorbtion elektrischer Wellen an Eisendrähten und über die magnetische Permeabilität des Eisens. *Ann. d. Phys.* **67**, 325, 1922.
18. Введенский и К. Теодорчик. О начальной проницаемости железа в полях радиочастот. *Телеграфия и телефония без проводов.* № 13. стр. 248, 1922 Z.
19. B. Wwedensky und K. Theodortschik. Ueber die Abhängigkeit der Permeabilität der Eisendrähte von Frequenz im Wellenlängenbereich von 54 bis 705 m. *Ann. d. Phys.* **68**, 463, 1922.
20. W. Arkadiew. Das Spektrum der magnetischen Permeabilität in dem Bereiche der Wellenlängen zwischen 1 cm. und 1 km. *Phys. Zs.* **22**, 511, 1921.
21. В. Аркадьев. О процессе возбуждения искрой быстрых электрических колебаний и об абсолютном измерении их амплитуды. „Физика“.
22. В. Аркадьев. Зависимость проницаемости железа и никеля от силы и периода переменного магнитного поля очень медленных и очень быстрых электрических колебаний. „Физика“.
23. В. Аркадьев. Новые пути в изучении молекулярного мира, „Наука и Техника“ № 2—3, стр. 20, 1922. Отд. изд. „Молекулярный мир и его изучение“. Москва, 1924.
24. L. Page. Magnetisation in Weak Fields as a Function of Frequency. *Phys. Rev.*, **21** 456, 1923.
25. В. Аркадьев. Магнитная спектроскопия. Изд. НТО ВОНХ. Вып. 4. Москва. 1924.