

## ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН В АМОРФНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПРОВОЛОКАХ

Л.Краус<sup>1)</sup>, А.Н.Анисимов, А.Г.Гуревич, А.В.Атласман

Наблюдалось параметрическое возбуждение спиновых волн при поперечной накачке в тонких аморфных ферромагнитных проволоках, которое оказалось возможным благодаря применению метода индукционного "усиления" магнитного поля при расположении образца в пучности электрического поля СВЧ резонатора.

Параметрическое возбуждение спиновых волн (ПВСВ) как при поперечной<sup>1</sup>, так и при продольной<sup>2</sup> накачке детально исследовалось экспериментально в неметаллических ферри-магнетиках и антиферромагнетиках. ПВСВ в металлах<sup>3-5</sup> было уделено значительно меньше внимания. В последние годы большой интерес проявляется к аморфным металлам (см., например,<sup>6</sup>). Исследование ПВСВ в аморфных материалах может дать важную информацию об этих веществах. Однако нам не известны работы по ПВСВ в аморфных магнитоупорядоченных веществах. Задачей данной работы явилось наблюдение ПВСВ в аморфных неметаллических проволоках — тех же, которые были использованы в<sup>6</sup>.

Наблюдение ПВСВ в тонких металлических проволоках при помещении их в пучность магнитного поля резонатора (как при исследованиях неметаллических образцов) затруднительно вследствие сравнительно большой ширины резонансной кривой, малого диаметра проволоки  $d$  и (если толщина скин-слоя  $\delta < d$ ) малой величины  $\delta$ . Эти трудности удается

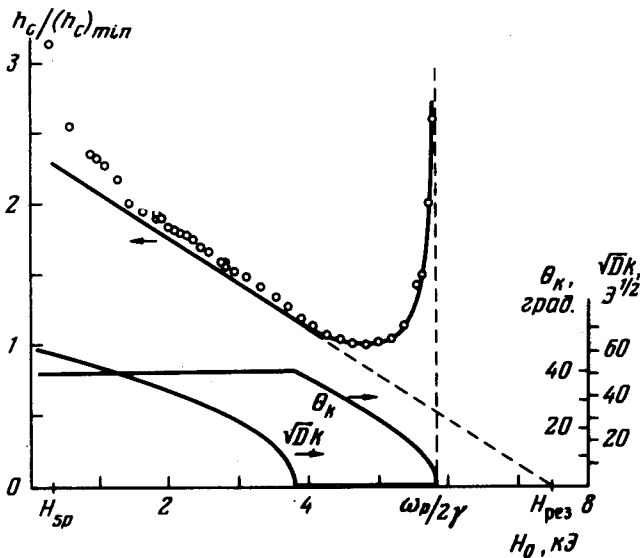
<sup>1)</sup> Физический институт Чехословацкой Академии наук, Прага.

преодолеть при использовании индукционного эффекта — возбуждения сильного магнитного поля у поверхности металлической проволоки, помещенной в пучность электрического поля резонатора <sup>7</sup>. Этот эффект был применен ранее <sup>6</sup> для исследования ферромагнитного резонанса в аморфных проволоках.

Наблюдение ПВСВ при продольной накачке в проволоках с использованием упомянутого индукционного эффекта вряд ли возможно. Нами наблюдался процесс ПВСВ первого порядка при поперечной накачке <sup>1</sup>.

Исследования образцы представляли собой аморфные проволоки состава  $(\text{Fe}_{1-x}\text{M}_x)_{80}\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ , где  $\text{M} = \text{Ni}, \text{Co}, \text{Cr}$  с диаметрами  $2 \div 10$  мкм в тонкой ( $\sim 1$  мкм) стеклянной оболочке, изготовленные методом Тэйлора <sup>8</sup>. Отрезки проволок длиной  $\sim 1$  мм помещались в пучность электрического поля отражательного прямоугольного резонатора  $\text{TE}_{103}$ ; электрическое поле и постоянное магнитное поле  $\text{H}_0$  были параллельны оси проволоки. Магнетронный генератор 8 мм диапазона работал в импульсном режиме со скважностью  $\sim 1000$  и длительностью импульсов  $\sim 10$  мкс. Собственная добротность резонатора  $Q_0$  с образцом составляла  $\sim 1000$ ; в процессе измерений она контролировалась, и ее изменения учитывались при определении порогового поля. При измерениях добротность связи устанавливалась несколько, но меньшей  $Q_0$ , и порог параметрического возбуждения индифицировался по замедлению роста амплитуды отраженных импульсов при плавном увеличении падающей мощности при помощи прецизионного аттенюатора.

Импульсная падающая мощность не превышала  $\sim 30$  Вт; при большей мощности наступал пробой, проволоки перегревались и необратимо переходили в поликристаллическое состояние, для которого порог ПВСВ не мог быть достигнут из-за возрастания ширины резонансной кривой.



Зависимости порогового поля, а также параметров возбуждаемых спиновых волн для процесса ПВСВ первого порядка при поперечной накачке в аморфной проволоке  $\text{Fe}_{76}\text{Ni}_{24}\text{P}_{10}\text{B}_{10}$  от внешнего постоянного магнитного поля. Сплошные линии — расчет, точки — экспериментальные результаты.  $4\pi M_0 = 11750$  Гс, частота накачки 36,24 ГГц, температура комнатная. Длина образца 1,32 мм, диаметр проволоки  $\sim 3$  мкм

Экспериментальная зависимость пороговой величины СВЧ магнитного поля  $h_c$  (в относительных единицах) от постоянного магнитного поля  $\text{H}_0$  для одного из образцов, а также результат расчета этой зависимости приведены на рисунке. При расчете мы не учитывали анизотропии и приняли киттелевскую <sup>10</sup> модель тонкой (с толщиной скин-слоя) пленки, обычно используемую при рассмотрении ферромагнитного резонанса в металлах. Для использованной проволоки толщина скин-слоя была сравнима с диаметром (расчетная величина  $\delta$  при  $\mu = 1$  составила  $\sim 1,5$  мкм), и возможность использования этой модели аргументов отнюдь не была очевидной. В нашем случае для принятой модели, согласно <sup>9</sup>,

$$h_c = \frac{\omega_p}{\omega_M} \frac{|\omega_p^2 - \gamma H_0(\gamma H_0 + \omega_M)|}{F(\omega_p, \omega_M, H_0, \theta_k)} 2\Delta H_k, \quad (1)$$

где  $\omega_p$  — частота накачки,  $\gamma$  — магнитомеханическое отношение,  $\omega_M = \gamma 4\pi M_0$ ,  $M_0$  — постоянная намагниченность,  $2\Delta H_k$  — параметр релаксации возбуждаемых спиновых волн с волновым вектором  $k$ ,  $\theta_k$  — угол между  $k$  и  $M_0$ , а выражение для функции  $F$  следует из формулы (35) в <sup>9</sup>. Теоретическая кривая  $\frac{h_c}{(h_c)_{min}}(H_0)$ , приведенная на рисунке, получена путем

минимизации выражения (1) по  $\theta_k$  в предположении  $\Delta H_k = \text{const}$ . Полученные при этом значения  $\theta_k$ , а также величины  $\sqrt{D}k$  приведены на этом же рисунке ( $D$  — константа неоднородного обмена, значение которой для данного вещества неизвестно).

Расчетные значения  $h_c$  в области  $\theta_k \cong \text{const}$  (см. рисунок) приближаются к прямой, пересекающей ось абсцисс в точке, соответствующей полю однородного ферромагнитного резонанса, которое без учета анизотропии составляет

$$H_{\text{рез}} = \sqrt{(\omega_p/\gamma)^2 + (2\pi M_0)^2} - 2\pi M_0. \quad (2)$$

При приближении к полю  $H_0 = \omega_p/2\gamma$ , соответствующему нижней границе спектра спиновых волн, величина  $h_c$  резко растет.

Экспериментальное значение резонансного поля оказалось на 350 Э меньше расчетной величины. Эта разница лежит в пределах значений эффективного поля магнитоупругой анизотропии таких проволок (в стеклянной оболочке) <sup>6</sup>. Это дало нам основание сдвинуть расчетную кривую вдоль оси  $H_0$  до совпадения расчетного и экспериментального значений  $H_{\text{рез}}$ .

Из рисунка видно, что после такого сдвига в области сильного изменения  $\theta_k$  и  $k \cong 0$  имеет место совпадение экспериментальных данных с расчетом. Это, по-видимому, свидетельствует о независимости в данном случае  $\Delta H_k$  от  $\theta_k$ . Некоторое расхождение между экспериментом и расчетом, увеличивающееся по мере роста  $k$ , в области  $\theta_k \cong \text{const}$  можно объяснить вкладом в  $\Delta H_k$  собственных процессов релаксации спиновых волн, который возрастает с ростом  $k$ . Резкий рост  $h_c$  происходит при поле  $H_0$ , близком к расчетному полю  $H_{\text{сп}}$  включения процесса трехмагнитного расщепления, значение которого можно найти <sup>11</sup>, исходя из закона сохранения энергии.

Для других образцов разного состава, в том числе с  $M = \text{Co}$ ,  $\text{Cr}$  и различными размерами, были получены аналогичные результаты. В согласии с <sup>7</sup>, величины пороговой мощности уменьшались с уменьшением диаметра проволоки и увеличением их длины.

Абсолютные величины  $h_c$  и, следовательно, значения  $2\Delta H_k$  не могли быть определены нами, так как пока отсутствует точный расчет величины магнитного поля у поверхности проволоки, помещенной в электрическое поле резонатора, т. е. "усиления" поля при использовании индукционного метода Родбелла. Предполагая, что величина  $2\Delta H_k$  не только не зависит от  $k$  и  $\theta_k$ , но и совпадает с шириной линии однородного резонанса  $2\Delta H_0$ , мы можем рассчитать по формуле (1) величину  $h_c$  и оценить "усиление" поля. Приняв величину  $2\Delta H_0 = 85$  Э, полученную интерполяцией данных работы <sup>6</sup> на частоту возбуждаемых спиновых волн (равную половине частоты накачки), мы получили, что усиление (по мощности) превышает  $10^3$  (оно составляет 32 дБ, если сравнение полей проводить при неизменной добротности резонатора, и 30 дБ, если учитывать увеличение  $Q_0$  при перемещении образца из пучности электрического в пучность магнитного поля резонатора).

Таким образом, в данной работе, насколько нам известно, впервые наблюдалось параметрическое возбуждение спиновых волн (а именно, процесс первого порядка при поперечной накачке) в аморфных ферромагнитных металлах. При этом выяснилось, что экспериментальная зависимость порогового поля от внешнего постоянного магнитного поля хорошо согласуется с результатами расчета с использованием тонкопленочной модели.

Авторы благодарят доктора Шнейдера (Центральный институт физики твердого тела и материаловедения, Дрезден) за образцы аморфных проволок.

#### Литература

2. *Schlomann E., Green J.J., Milano U.* J. Appl. Phys., 1960, **31**, 386S.
3. *Cimley J.B., Penney T., Jones R.V.* J. Appl. Phys., 1963, **34**, 1145.
4. *Comley J.B., Jones R.V.* J. Appl. Phys., 1965, **36**, 1201.
5. *Berteaud A.J., Pascard H.* J. Appl. Phys., 1965, **36**, 970; 1966, **37**, 2035.
6. *Kraus L., Frait Z., Schneider J.* Phys. Stat. Sol. (a), 1981, **63**, 669.
7. *Rodbell D.S.* J. Appl. Phys. 1959, **30**, 1845.
8. *Wiesner H., Schneider J.* Phys. Stat. Sol. (a), 1974, **26**, 71.
9. *Patton C.E.* J. Appl. Phys., 1969, **40**, 2837.
10. *Kittel C.* Phys. Rev., 1947, **71**, 270.
11. *Sparks M., Loudon H., Kittel C.* Phys. Rev., 1961, **122**, 791.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
10 декабря 1982 г.