

Письма в ЖЭТФ, том 11, стр. 537 – 540

5 июня 1970 г.

**МЕТАСТАБИЛЬНОЕ "ПЕРЕВЕРНУТОЕ" СОСТОЯНИЕ
ФЕРРОМАГНЕТИКА КАК ИСТОЧНИК УСИЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЛИ ЗВУКОВЫХ ВОЛН**

А.М.Косевич

Известно [1], что одноосный ферромагнетик, находящийся в магнитном поле, параллельном оси легкого намагничивания, обладает двумя равновесными

состояниями, если $H < \beta M_0$, где H – напряженность магнитного поля в магнетике, M_0 – величина спонтанного магнитного момента, а β – константа анизотропии ($\beta > 0$). В одном из этих состояний (термодинамически устойчивом) вектор магнитного момента M направлен вдоль поля H , а во втором (термодинамически метастабильном) – против поля H . Если $H > \beta M_0$, то остается одно устойчивое направление M вдоль поля H .

Мы хотим обратить внимание на то, что метастабильное "перевернутое" состояние ферромагнетика (ферродизэлектрика) может быть легко использовано для усиления (в значительной степени – когерентного) электромагнитных волн или звуковых колебаний. Можно указать два способа подобного использования "перевернутого" состояния.

1. Пусть ось z – это ось легкого намагничивания, и магнитный момент кристалла M параллелен этой оси: $M = -M_0 n$ ($M_0 > 0$), где n – орт оси z . Предположим, что внешнее постоянное магнитное поле направлено против M ($H = H_0 n$, $H_0 > 0$) и таково, что $H_0 - \beta M_0 = H_1 < 0$ и $|H_1| \ll H_0 \cong \beta M_0$. В области низких температур устойчивость "перевернутого" состояния относительно термических флуктуаций будет сохраняться даже при очень малых H_1 .

Включим теперь медленно возрастающее со временем слабое магнитное поле h , параллельное оси z . Тогда в тот момент времени, когда выполнится условие $H_1 + h(t) = 0$, "перевернутое" состояние превратится в неустойчивое и за время соответствующей релаксации τ произойдет переход ферромагнетика в устойчивое равновесное состояние с вектором M , направленным вдоль H . Если $g \beta M_0 \tau \gg 1$, где g – гиромагнитное отношение, то в течение такого перехода магнитный момент M будет совершать прецессию вокруг направления n с возрастающей частотой, приближающейся к резонансной частоте $\omega_0 = g(H + \beta M_0) = 2g \beta M_0$. Ясно, что при этом будет происходить электромагнитное излучение и возможно усиление высокочастотной электромагнитной волны с нужной циркулярной поляризацией и частотой $\omega \leq \omega_0$, удовлетворяющей условию $\omega \tau \gg 1$. Спектральные характеристики излучения или усиления могут быть проанализированы аналогично тому, как это описано в работе [2]. Максимальное усиление должно иметь место при $\omega = \omega_0$. Заметим, что резонансная частота ω_0 может варьироваться путем изменения наклона постоянного магнитного поля H к оси легкого намагничивания.

За счет магнито-акустической связи в резонансных условиях возможно также усиление звуковой волны.

Обратим внимание на то, что в предлагаемой нами схеме отсутствует необходимость "мгновенного" и весьма трудно реализуемого отключения магнитного поля большой напряженности, предполагавшегося в работе [2] (такая же трудность возникала при обсуждении реализации схемы "когетрона" [3]).

2. Предположим теперь, что $H_1 > 0$ и по-прежнему $H_1 \ll H_0$. Тогда "перевернутое" состояние в постоянном магнитном поле будет неустойчивым. Однако его можно стабилизировать высокочастотной циркулярно поляризованной электромагнитной волной, бегущей вдоль оси z . Действительно, запишем магнитное поле и магнитный момент в виде

$$H = H_0 n + h, \quad M = -M_0 n + m + \xi,$$

где h – высокочастотное поле волны:

$$h_x = h_1 \cos \omega t, \quad h_y = h_2 \sin \omega t, \quad |h_1| = |h_2| = h_0 \quad (1)$$

m — малая добавка к магнитному моменту, описывающая его прецессию вокруг направления n с частотой порядка gH_1 , а ξ — быстро осциллирующая (с частотой $\omega \gg gH_1$) составляющая магнитного момента.

Записывая уравнения Ландау и Лифшица для движения магнитного момента и используя известный в механике метод анализа колебаний в быстро осциллирующем поле [4, 5] получим следующие уравнения для "медленно" изменяющейся величины m :

$$\dot{m}_x + \Omega m_y = 0, \quad \dot{m}_y - \Omega m_x = 0, \quad \dot{m}_z = 0, \quad (2)$$

$$\Omega = gH_1 - (g^2 / 2\omega) [h_1 h_2 - (g\beta M_0 / \omega) h_0^2]. \quad (3)$$

Полная энергия ферромагнетика при малых отклонениях от "перевернутого" состояния равна

$$W = W_0 - \frac{1}{2} M_0 \Omega (\theta - \pi)^2, \quad W_0 = \text{const},$$

где θ — угол отклонения вектора M от направления n .

Мы видим, что устойчивым колебаниям (2) отвечает $\Omega < 0$. Из (3) следует, что это возможно при условии, что во-первых, волна (5) — правополяризована: $h_1 h_2 = h_0^2$; во-вторых, при $\omega > g\beta M_0 \cong gH_0$. Поскольку напряженности полей в электромагнитной волне обычно малы, то наиболее благоприятным является выбор частоты из условий

$$\omega > g\beta M_0, \quad 1 - (g\beta M_0 / \omega) = 2\gamma \sim 1,$$

при которых получают такие ограничения на ω :

$$g\beta M_0 < \omega < \gamma g h_0 (h_0 / H_1). \quad (4)$$

Из (4) следует, что ограничения на ω и h_0 ослабевают с уменьшением βM_0 . Если принять $\beta M_0 \sim 100$ эс, $H_1 \sim 1$ э, то необходимо иметь в волне $h_0 \sim 10^9$ и $\omega \sim 10^9$ сек⁻¹.

Если амплитуда электромагнитной волны медленно убывает со временем, то в момент времени, при котором $\Omega = 0$, произойдет описанная в п. 1 переориентация вектора M и возможен процесс усиления.

Наиболее интересно было бы осуществить условие $\omega = 2gH_0 + gH_1 = 2g\beta M_0 + gH_1$, при котором частота стабилизирующей "перевернутое" состояние волны является резонансной для обычной ориентации вектора M вдоль поля H . В этом случае при уменьшении амплитуды волны h_0 "на входе" в некоторый момент времени произойдет ее резкое возрастание "на выходе".

Я благодарен В.М.Цукернику за постоянный интерес к работе, а также И.М.Лифшицу и М.И.Каганову за полезные дискуссии.

Литература

- [1] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, Электродинамика сплошных сред, М., Гостехиздат, 1957, § 37.
 - [2] В.Г.Барьяхтар, А.Г.Квирикадзе. ФТТ, 9, 3264, 1967.
 - [3] В.М.Файн. Известия высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 1, 75, 1958.
 - [4] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Механика, М., Гостехиздат, 1958, § 30.
 - [5] А.И.Ахиезер, С.В.Пелетминский. ФТТ, 10, 3301, 1968.
-