

ОПТИМИЗАЦИЯ ФЕРРОЗОНДОВ С МНОГОСЛОЙНЫМИ ПЛЁНОЧНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

В.Н. Самофалов, Л.З.Лубяный, А.Н.Стеценко, А.Г.Равлик, И.А.Чичибаба

Национальный Технический Университет «Харьковский политехнический институт»

Целью данной работы является разработка феррозондов с повышенной чувствительностью к полю на основе многослойных плёночных сердечников с одноосной анизотропией, которые перемагничиваются путём вращения векторов намагниченности. Для решения этой задачи важно найти аналитическую связь между магнитными параметрами сердечников и чувствительностью феррозонда. Существующая теория работы феррозонда [1] не позволяет установить такую связь и потому требует уточнения. В данное время в качестве сердечников феррозондов обычно используются магнитно-мягкие материалы с рекордно высокими значениями магнитной проницаемости $\mu = 10^5$ и выше. Использование таких ферромагнитных материалов позволяет регистрировать слабые магнитные поля до 10^{-5} Э. Измерить более низкое поле не удаётся из-за высокого уровня флуктуационных шумов, которые возникают при перемагничивании сердечников возбуждающими полями.

Показано, что величина эдс сигнала $e(t)$, возникающего в измерительных катушках, включённых встречно, равняется

$$e(t) = \frac{dB}{dt} \approx 4\pi \cdot A \cdot \left[\frac{d^2 M(H)}{(d(H))^2} \right] \cdot \frac{dH_v}{dt} \cdot 2H_x \quad (1)$$

где H_x – измеряемое поле, H_v – поле возбуждения, $M(H)$ – зависимость намагниченности от поля, A – некоторая постоянная, учитывающая размеры сердечника.

Как видно из (1), чувствительность феррозонда связана с магнитными параметрами величиной d^2M/dH^2 , которую находят из экспериментальной или рассчитанной зависимости.

Если воспользоваться известной зависимостью для кривизны линии $K = 1/R$, заданной функцией $M(H)$, то (1) примет вид

$$e(t) \approx 4\pi \cdot A \cdot \left(\left[\frac{1}{\sin \varphi} \right] \right)^3 \frac{1}{R} \cdot \frac{dH}{dt} \cdot 2H_x,$$

где φ – угол между вектором R , проведенным в точку касания кривой $M(H)$, и H . В случае линейной зависимости $M(H)$ $R \rightarrow \infty$ и, следовательно, эдс сигнала $e(t) = 0$.

Для экспериментальных исследований изготовлены сердечники феррозондов путём конденсации в вакууме 4-слойных плёнок сплавов $Ni - Fe$, в которых ферромагнитные слои разделены прослойками SiO , Al_2O_3 или аморфного углерода. Для создания одноосной анизотропии конденсация проводилась в магнитном поле. Поле наведенной одноосной анизотропии варьировалось изменением температуры подложки в пределах $H_K = 1 \div 5 \text{ Э}$. В прямоугольных образцах размером $2 \times 20 \text{ мм}$ и толщиной слоёв $t = 0.1 \div 0.5 \text{ мкм}$ ОЛН была ориентирована перпендикулярно к длинной стороне образца. Петля гистерезиса в лёгком направлении была прямоугольной с $H_C = 0.1 \div 0.3 \text{ А/см}$, а в трудном направлении зависимость $M(H)$ показана на рис. 1. Появление искривлённого участка на петле гистерезиса может быть обусловлено, наличием в плёнке как амплитудной, так и угловой дисперсии анизотропии.

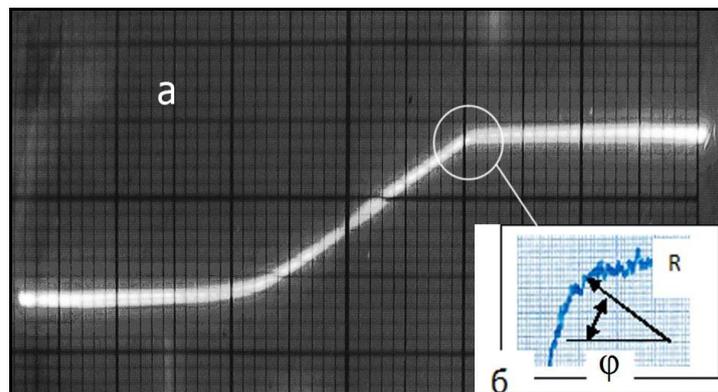


Рис.1

Проведен расчёт кривой намагничивания в поле перпендикулярном ОЛН с учётом амплитудной дисперсии анизотропии. Предполагалось, что угловая дисперсия магнитной анизотропии отсутствует. Считали, что плотность вероятности областей с значениями $H_K > H_{Kmin}$ равномерная, т.е. $f = 1/(H_{Kmax} - H_{Kmin})$, где H_{Kmin} и H_{Kmax} – минимальное и максимальное значение поля одноосной анизотропии. С учётом дисперсии рассчитанная зависимость $M(H)$ имеет вид

$$M(H) = \left(\frac{M_S H_{k \min}}{H_{k \max} - H_{k \min}} \right) \ln \left(\frac{H_{k \max}}{H_{k \min}} \right) + \Delta M_m(H) \frac{\Delta M_m(H_x - H_{k \min})}{(H_{k \max} - H_{k \min})} \left\{ 1 + \ln \left(\frac{H_{k \max} - H_{k \min}}{H_x - H_{k \min}} \right) \right\}$$

где $\Delta M_m = M_S - M(H_{Kmin})$. Особенностью этой зависимости является то, что вторая производная $d^2M/dH^2 \rightarrow \infty$ при $H \rightarrow H_{Kmin}$.

С целью повышения точности результатов, полученных в процессе проведения экспериментов, использовался виртуальный прибор, работающий в программной среде LabVIEW.

График зависимости амплитуды второй гармоники в пробном поле $H_{п}=10^{-5}$ А/см от тока возбуждения для образца с прослойками Al_2O_3 приведен на рис. 2. На рис. 3 для этого же образца приведены данные амплитуд флуктуаций вблизи второй гармоники частоты возбуждения $f_{в}$.

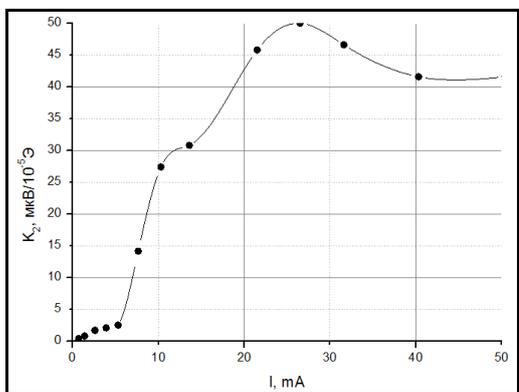


Рис. 2

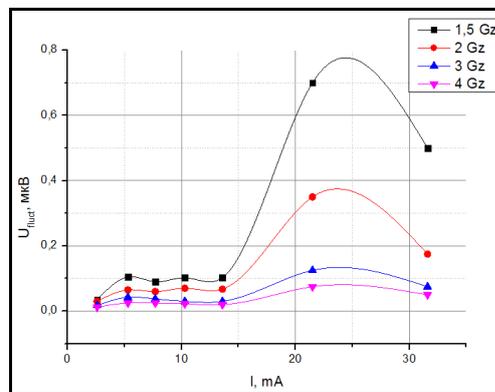


Рис. 3

На рис.4 приведен график отношения амплитуды второй гармоники к амплитуде флуктуаций для частот анализа 1,5–4 Гц. По существу это наиболее важный параметр, характеризующий чувствительность четногармонических преобразователей – отношение сигнал/шум (S/N). Из рис.4 видно, что оптимальный ток возбуждения для исследуемого образца составляет 13,6мА.

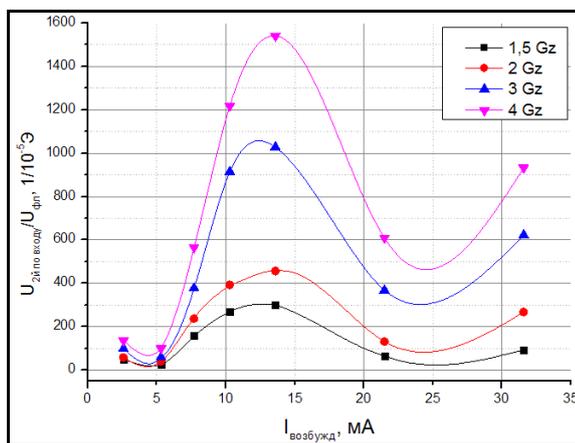


Рис. 4

При этом отношение S/N достигает значений 300-1500 для пробного поля $H_{п}=10^{-5}$ А/см. При более высоких частотах $f_{в}$ это соотношение становится еще большим. Таким образом, порог чувствительности исследуемого феррозонда при допустимом отношении S/N порядка 5-10 достигает значения 10^{-6} – 10^{-7} А/см.