

Член-корреспондент АН СССР Л. В. КИРЕНСКИЙ, Н. С. ЧИСТЯКОВ

## О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Значительный интерес, который проявляется к ферромагнитным пленкам, вызывается большими возможностями их применения в качестве элементов памяти и логики электронных вычислительных машин. Другой областью радиоэлектроники, где ферромагнитные пленки (в частности, их магнитно-гиротропные свойства) могли бы найти интересные приложения, является техника сверхвысоких частот (с.в.ч.). Действительно, использование некоторых ферритовых устройств сверхвысокочастотного диапазона в ряде случаев становится неудобным из-за больших габаритов, высокой управляющей мощности и, главное, малого быстродействия. В качестве новых материалов, которые позволили бы создать устройства, лишенные указанных недостатков, несомненный интерес представляют ферромагнитные пленки.

Нами были исследованы некоторые сверхвысокочастотные ( $f = 9000$  Мгц) свойства тонких ферромагнитных пленок в слабых магнитных полях, далеких от ферромагнитного резонанса. Использовались пермаллоевые пленки ( $17\text{Fe } 80\text{Ni } 3\text{Mo}$ ) с одноосной магнитной анизотропией, полученные методом термического распыления в вакууме  $\sim 10^{-5}$  мм рт. ст. на стеклянные подложки, нагретые до  $200^\circ$ . Пленка помещалась в резонатор, включенный на отражение, и подвергалась одновременному воздействию сверхвысокочастотного магнитного поля и слабого внешнего управляющего поля в режиме квазистатического перемагничивания. Изучалась зависимость изменения с.в.ч.-восприимчивости ферромагнитных пленок от характера процесса перемагничивания.

Исследованием установлено, что изменение с.в.ч.-восприимчивости ферромагнитных пленок в результате их перемагничивания происходит лишь в том случае, когда при перемагничивании имеют место процессы вращения вектора намагниченности. Если перемагничивание пленки осуществляется смещением междоменных границ (которое происходит при наложении перемагничивающего поля в направлении оси легкого намагничивания или близком к нему), то изменение с.в.ч.-восприимчивости отсутствует. Отсюда следует, что для получения наиболее выраженного эффекта управления необходимо, чтобы перемагничивание пленки осуществлялось вращением вектора намагниченности. Последнее, как правило, происходит при перемагничивании в направлении оси трудного намагничивания или в произвольном направлении, но при наложении слабого постоянного поля, перпендикулярного перемагничивающему.

Наиболее интересное влияние слабого перпендикулярного поля на характер процесса перемагничивания и, следовательно, на изменение с.в.ч.-восприимчивости, наблюдается при перемагничивании пленки под некоторым углом к оси легкого намагничивания (рис. 1). Как следует из рисунка, в отсутствие перпендикулярного поля ( $H_{\perp} = 0$ ) осциллограммы сигналов изменения с.в.ч.-восприимчивости, соответствующие восходящей и нисходящей ветвям петли гистерезиса, имеют одинаковый вид. Наложение

ние перпендикулярного поля приводит к асимметрии продольных и поперечных петель гистерезиса (1, 2) и различному характеру изменения с.в.ч.-восприимчивости в прямом и обратном<sup>2</sup> направлениях. Можно так подобрать направление перемагничивающего поля и величину постоянного поля  $H_{\perp}$ , что в одном направлении пленка будет перемагничиваться смещением междоменных границ, при котором отсутствует изменение с.в.ч.-восприимчивости, в другом — вращением вектора намагниченности, когда

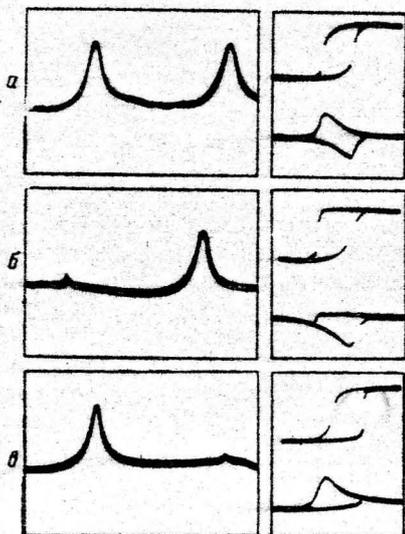


Рис. 1. Влияние слабого перпендикулярного поля  $H_{\perp}$  на изменение с.в.ч.-восприимчивости при перемагничивании пленки под углом  $\varphi = 40^{\circ}$  к оси легкого намагничивания, а —  $H_{\perp} = 0$ , б —  $H_{\perp} = 2$  эрст, в —  $H_{\perp} = -2$  эрст

происходит изменение с.в.ч.-восприимчивости. Последнее обстоятельство является одной из особенностей сверхвысокочастотных свойств ферромагнитных пленок с одноосной анизотропией и может быть использовано для управления работой тонкопленочного элемента.

Среди других особенностей ферромагнитных пленок следует отметить, что основное изменение с.в.ч.-восприимчивости происходит в достаточно слабых магнитных полях, т. е. для управления работой тонкопленочного элемента потребуются ничтожные мощности. И, наконец, ферромагнитные пленки дают принципиальную возможность для осуществления высокого быстродействия. Из экспериментов по импульсному перемагничиванию следует, что время переключения ферромагнитных пленок на два — три порядка меньше времени переключения ферритовых элементов и в некоторых случаях (3) составляет  $\sim 10^{-9}$  сек. Поэтому в импульсном режиме, по-видимому, можно достигнуть скорости управления  $10 \div 100$  Мгц.

Несмотря на ряд интересных особенностей сверхвысокочастотных свойств ферромагнитных пленок по сравнению с поликристаллическими ферродиелектриками практическое использование их в некоторых случаях, по-видимому, будет мало эффективным. Связано это с тем, что пленка обладает незначительным объемом ферромагнитного вещества и по этой причине оказывает на сверхвысокочастотное магнитное поле слабое действие. Последнее означает, что такие эффекты, как магнитное управление частотой резонатора, поворот плоскости поляризации при распространении через пленку электромагнитной волны сверхвысокочастотного диапазона, фазовый сдвиг и т. д. будут слабо выражены. Увеличение толщины пленки ограничено глубиной скин-слоя, которая для ферромагнитных металлов в диапазоне с.в.ч. составляет  $10^{-4} \div 10^{-5}$  см.

В связи с этим нами были исследованы многослойные пленочные системы, представляющие собой совокупность слоев ферромагнитного металла ( $17\text{Fe } 80\text{Ni } 3\text{Mo}$ ), разделенных друг от друга изолирующими прослойками монооксида кремния. Было проведено сравнительное исследование прохождения с.в.ч.-энергии через однослойные пленки различной толщины и многослойные пленочные системы, а также их влияния на изменение параметров объемного резонатора.

В результате измерения коэффициентов прохождения (по мощности) установлено, что «прозрачность» многослойной пленочной системы значительно превосходит «прозрачность» однослойной пленки с толщиной, равной суммарной толщине слоев ферромагнитного металла в многослойной

системе. В частности, для многослойной системы с десятью слоями по 1000 Å каждый коэффициент прохождения имеет такое же значение, как для однослойной пленки толщиной ~2000 Å. Для однослойной пленки толщиной 10<sup>4</sup> Å коэффициент прохождения практически равен нулю. Последнее находим объяснение в рамках обычной электродинамики.

Рассмотрим случай нормального падения волны с частотой  $\omega$  на слой металла произвольной толщины  $d$ . Воспользовавшись известным выражением (4) для амплитуды прохождения и ограничиваясь в разложениях по  $k\delta$  ( $k = \omega/c$ ;  $c$  — скорость света,  $\delta$  — глубина скин-слоя) членами первого порядка, коэффициент прохождения по мощности можно представить в виде

$$P = |p|^2 = 2(k\delta)^2 \left( \operatorname{sh}^2 \frac{d}{\delta} + \sin^2 \frac{d}{\delta} + k\delta \left( \operatorname{sh} 2 \frac{d}{\delta} + \sin 2 \frac{d}{\delta} \right) \right). \quad (1)$$

В многослойной пленочной системе в результате отражений на границах слоев будут распространяться волны как в прямом, так и в обратном направлениях. При этом эффективный коэффициент прохождения будет отличаться от коэффициента прохождения для однослойной пленки. Так, для простейшей системы, состоящей из двух изолированных слоев ферромагнитного металла, суммарная толщина которых равна  $\frac{1}{2}d + \frac{1}{2}d = d$ , нетрудно показать, что эффективный коэффициент прохождения имеет вид

$$P_{\text{эф}} = |p_{\text{эф}}|^2 = 2(k\delta)^2 \left( \operatorname{sh}^2 \frac{d}{\delta} + \sin^2 \frac{d}{\delta} + k\delta \left( \operatorname{sh} 2 \frac{d}{\delta} + \sin 2 \frac{d}{\delta} - \Delta \right) \right), \quad (2)$$

где

$$\Delta = \left( \operatorname{sh} \frac{d}{\delta} - \sin \frac{d}{\delta} \right) \left( \operatorname{ch} \frac{d}{\delta} - \cos \frac{d}{\delta} \right). \quad (3)$$

Величина  $\Delta$  всегда является положительной. Поэтому из сравнения (1) и (2) следует, что  $P_{\text{эф}} > P$ . Это неравенство усиливается, если пленка разбивается на большее число изолированных слоев. Последнее означает, что разбиение толстого слоя ферромагнитного металла на более тонкие, изолированные друг от друга слои приводит к тому, что эффективная глубина скин-слоя всей многослойной системы в целом значительно увеличивается. При этом, естественно, возрастает объем вещества, участвующего во взаимодействии со сверхвысокочастотным полем, а следовательно, и реакция тонкопленочного элемента на это поле.

Экспериментальным подтверждением сказанному являются результаты измерения сдвига собственной частоты резонатора, обусловленного изменением вещественной составляющей комплексной с.в.ч.-восприимчивости при перемагничивании однослойных пленок и многослойных пленочных систем. Поскольку в слабых магнитных полях, далеких от ферромагнитного резонанса, мнимая составляющая с.в.ч.-восприимчивости, ответственная за потери с.в.ч.-энергии, намного меньше вещественной составляющей, изменением добротности резонатора при перемагничивании пленки и многослойной системы пренебрегали.

На рис. 2 приведена зависимость относительного сдвига собственной частоты резонатора  $\Delta\omega/\Delta\omega_{\text{max}}$  от толщины однослойной пленки (кривая 1). При малых толщинах рост этой величины происходит линейно.

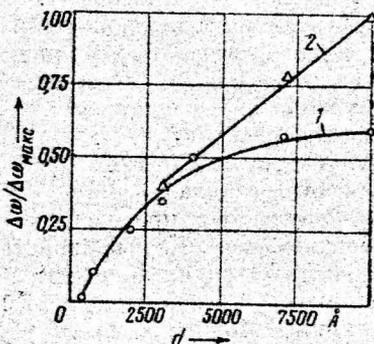


Рис. 2. Зависимость относительного сдвига собственной частоты резонатора от толщины однослойных пленок (1) и суммарной толщины слоев ферромагнитного металла в многослойной системе (2)

затем, начиная приблизительно с  $3000 \text{ \AA}$ , замедляется, а при толщине пленки  $\sim 10\,000 \text{ \AA}$  наблюдается тенденция к насыщению. Последнее означает, что во взаимодействии с с.в.ч.-полем в данном случае участвует лишь поверхностный слой пленки ( $d \sim 5000 \text{ \AA}$ ) и дальнейшее увеличение ее толщины мало сказывается на сдвиге частоты резонатора. Приведенная зависимость находится в согласии с результатами измерения коэффициента прохождения, согласно которым коэффициент прохождения для пленки толщиной  $\sim 10^4 \text{ \AA}$  практически равен нулю. Для многослойных систем, суммарная толщина ферромагнитных слоев которых равна толщине соответствующей однослойной пленки, величина  $\Delta\omega / \Delta\omega_{\text{max}}$  всегда больше, чем для однослойных пленок (кривая 2) и линейно увеличивается с ростом числа слоев. Измерения показали, что во всяком случае линейность сохраняется до суммарной толщины  $30\,000 \text{ \AA}$  (30 слоев по  $1000 \text{ \AA}$ ). Последнее означает, что для исследованных многослойных систем эффективная глубина скин-слоя превышает суммарную толщину слоев ферромагнитного металла.

Результаты проведенного исследования позволяют утверждать, что сверхвысокочастотные свойства многослойных пленочных систем в слабых магнитных полях обладают важным преимуществом перед однослойными пленками, поскольку они оказывают на с.в.ч.-поле значительно большее влияние. Можно ожидать, что при соответствующей разработке технологии изготовления многослойных пленочных систем они найдут применение в качестве своеобразного магнитного материала для создания малогабаритных, экономичных и быстродействующих устройств сверхвысокочастотного диапазона.

Институт физики  
Сибирского отделения Академии наук СССР  
Красноярск

Поступило  
23 VI 1965

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Л. В. Киренский, И. С. Эдельман, Физ. мет. и металловед., 10, 340, 1964.  
<sup>2</sup> В. В. Кобелев, Петли гистерезиса одноосных ферромагнитных пленок, М., 1961.  
<sup>3</sup> W. Dietrich, W. Proebster, Elektronische Rudschau, 14, 2, 47 (1960). <sup>4</sup> А. Е. К а н л а н, Радиотехника и электроника, 9, 10 (1964).