

ном пространстве. Это выражение также справедливо для сферически-симметричного потенциала достаточно общего вида, но имеющего максимум две точки поворота.

Полученное выражение (17) нормировано на полное число электронов в атоме и с точностью до слагаемого  $E_m$  в аргументе функции  $r \{U\}$  совпадает с выводами статистичес-

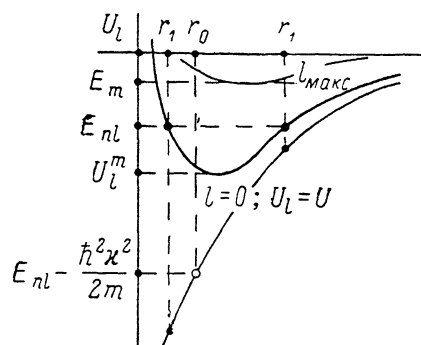


Рис. 1. К методу расчета.

кой теории атома [4]. Однако достаточно грубые представления [4] о том, что плотность электронов в фазовом пространстве равна  $2/(2\pi\hbar)^3$  и координата, импульс и энергия атомного электрона связаны классическим законом сохранения энергии, в данной работе не использовались. Что касается последнего, то его аналогом в квазиклассическом приближении оказалось выражение (7), определяющее точку стационарной фазы.

#### Литература

- [1] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. М.: Наука, 1974. 752 с.
- [2] Мигдал А. Б., Крайнов В. П. Приближенные методы квантовой механики. М.: Наука, 1966. 152 с.
- [3] Федорюк М. В. Метод перевала. М.: Наука, 1977. 368 с.
- [4] Гамбош П. Статистическая теория атома и ее применения. М.: Изд-во иностр. лит., 1951. 398 с.

Ростовский-на-Дону  
государственный университет  
Научно-исследовательский  
институт физики

Поступило в Редакцию  
27 января 1988 г.  
В окончательной редакции  
27 июня 1988 г.

### МАГНИТНЫЙ ШУМ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ

В. А. Григорьев, М. В. Быстров, Г. Ю. Перцович

В работе [1] был рассмотрен способ преодоления статической коэрцитивности доменных стенок в одноосных эпитаксиальных пленках феррит-гранатов при помощи возмущающего синусоидального магнитного поля, приложенного в легком направлении. В результате такого воздействия значительно снижается порог реагирования доменной структуры на измеряемое или управляющее магнитное поле в зависимости от того, используется ли пленка в качестве магнитного сенсора или модулятора. Можно предположить, что указанное возмущение доменной структуры переменным полем будет сопровождаться магнитным шумом, связанным с нерегулярным движением стенок — скачками Баркгаузена.

Целью настоящей работы является исследование низкочастотных магнитных шумов в эпитаксиальных пленках феррогранатов при различных амплитудах и частотах возмущающего поля, а также оценка их влияния на величину порогового сигнала.

При измерениях шумовых спектров магнитная пленка накладывалась на плоскую катушку, создающую возмущающее поле, и помещалась между поляризатором и анализатором. В качестве источника излучения использовался светодиод ближнего ИК диапазона, световой пучок которого, сколлимированный линзой, распространялся по нормали к пленке. Фотоприемником служил *pin*-диод в фотovoltaическом режиме с преобразователем фототока в напряжение. После фотоприемника сигнал подавался на вход усилителя У4-28 с внешним активным фильтром и далее на спектроанализатор СК4-72. Оптонара с исследуемым образцом представляла собой жесткую конструкцию, которая для уменьшения влияния вибрации размещалась на массивном голографическом столе внутри магнитного экрана, служившего одновременно защитой и от воздушных потоков.

Магнитный шум определялся как разница между шумами на выходе оптоэлектронной регистрирующей схемы при наличии возмущающего магнитного поля и без него. Ясно, что при слабозумящих источнике и электронной схеме влияние магнитного шума на величину порогового сигнала может стать определяющим.

Смещение доменных границ в пленке под действием внешнего поля вызывает на выходе фотоприемника напряжение, которое, согласно [2], можно записать в виде

$$U_c = R_\lambda k \frac{P_0}{2} \frac{2\delta S}{S} \sin 2\Psi \sin 2\varphi, \quad (1)$$

где  $R_\lambda$  — спектральная чувствительность фотоприемника;  $k$  — коэффициент, учитывающий потери в поляризаторе, образце и анализаторе;  $P_0$  — мощность излучения на выходе поляризатора;  $S$  — экспонируемая площадь образца;  $\delta S$  — изменение суммарной площади доменов одного знака под действием поля;  $\Psi$  — угол между поляризатором и анализатором, коэффициент экстинкции которых близок к единице;  $\varphi$  — фарадеевское вращение образца.

Магнитный шум, регистрируемый данной схемой в достаточно узкой полосе частот  $\Delta f_A$ , можно представить в следующем виде:

$$\sqrt{U_M^2} = R_\lambda k \frac{P_0}{2} \sqrt{\gamma_M^2} \sin 2\Psi \sin 2\varphi \sqrt{\Delta f_A}, \quad (2)$$

где под  $\sqrt{\gamma_M^2}$  следует понимать спектральную плотность относительных флуктуаций площади доменов, т. е. пульсаций доменных границ.

В самом общем случае, если отвлечься от конкретных механизмов перемагничивания,  $\sqrt{\gamma_M^2}$  будет, очевидно, определяться флуктуациями намагниченности образца. Для оценки порога реагирования доменных границ удобно рассматривать шум, приведенный к единичному напряжению засветки фотоприемника и единичной полосе частот, т. е. среднеквадратическую относительную плотность шума  $\sqrt{U_M^2} / U_\phi \sqrt{\Delta f_A}$ . Напряжение на выходе фотоприемника для заданного уровня засветки, согласно [2],  $U_\phi = R_\lambda k (P_0/2)(1 + \cos 2\Psi \cos 2\varphi)$ . Из (2) следует, что максимальная чувствительность к магнитному шуму достигается при  $\Psi = 45^\circ$ , тогда

$$\frac{\sqrt{U_M^2}}{U_\phi \sqrt{\Delta f_A}} = \sqrt{\gamma_M^2} \sin 2\varphi. \quad (3)$$

Таким образом, зная величину фарадеевского вращения образца и измерив магнитный шум, можно определить  $\sqrt{\gamma_M^2}$ .

На рис. 1 представлены спектральные зависимости низкочастотного магнитного шума эпитаксиальной феррогранатовой пленки состава  $(Y, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$  (кривые 3, 4) для двух амплитуд возмущающего магнитного поля с частотой 10 кГц. Там же показан низкочастотный шум светодиода (кривая 2), который в основном определял результирующий шум оптоэлектронной схемы в отсутствие магнитного шума. Частотная зависимость магнитного шума в исследуемой части спектра подчиняется  $f^{-\alpha}$  закону, а эффективное значение шума резко возрастает с увеличением амплитуды возмущающего поля (кривая 4). Кривая 3 соответствует полю возмущения ( $H_m$ ), на 20—30 % превышающему интегральную статическую коэрцитивность  $H_c$  и являющемуся оптимальным для достижения максимального соотношения сигнал / шум. Отчетливо выраженный фликкерный характер магнитного шума можно объяс-

грать тем, что возмущающее магнитное поле вызывало не только осцилляции доменных границ, но и беспорядочные, сравнительно медленные трансляции магнитных доменов. Это наблюдалось при помощи поляризационного микроскопа. Увеличение частоты возмущающего магнитного поля (рис. 2) привело к значительному снижению медленных трансляций магнитных доменов и уменьшению магнитного шума. Следует отметить, что оптимальная амплитуда возмущающего поля с ростом частоты от 1 до 200 кГц также увеличивалась (на 5—10 % в зависимости от состава образца), так как с ростом частоты возрастала статическая коэрцитивность исследуемых пленок. Однако последнее не сказывалось на величине порогового поля, измеренного на частотах в несколько сотен герц, где результирующий шум мало

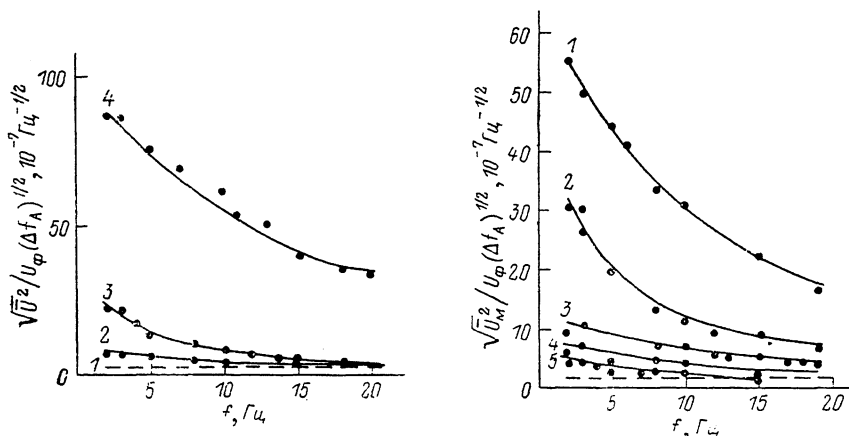


Рис. 1. Спектральные зависимости низкочастотного шума.

1 — дробовой шум фотоприемника; 2 — шум светодиода, обусловленный флуктуациями интенсивности; 3 — магнитный шум пленки при  $H_m = 1.2H_c = 1.3$  Э; 4 — магнитный шум пленки при  $H_m = 2.3H_c = 2.5$  Э, частота возмущающего поля 10 кГц.

Рис. 2. Спектральные зависимости магнитного шума для различных частот возмущающего поля.

1 — 1, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 50, 5 — 200 кГц.

отличался от расчетного значения дробового шума при данном уровне засветки. В случае преобладания магнитного шума величину порогового поля можно оценить, приравнявая (1) и (2) и учитывая, что  $\delta S/S \approx 1/2 (H_{сгн}/H_S)^2$ ,

$$H_{\text{пор}} \approx H_S \sqrt{\gamma_M^2 \Delta f_A}, \quad (4)$$

где  $H_S$  — поле насыщения образца.

Так, для кривой 5 на рис. 2 и параметров образца  $H_S = 4$  Э и  $\varphi = 1.5^\circ$  на частоте 2 Гц имеем  $H_{\text{пор}} \approx 5.4 \cdot 10^{-5}$  Э. Значение магнитного шума при 2 Гц для возмущающего поля с частотой 200 кГц только в два раза превосходит уровень дробового шума. Поэтому с увеличением частоты возмущающего поля можно рассчитывать на регистрацию низких пороговых полей ( $5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$  Э) во всем исследуемом диапазоне частот.

### Литература

- [1] Григорьев В. А., Оробинский С. П., Быстров М. В. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 18. С. 1117—1120.  
 [2] Оробинский С. П., Быстров М. В., Галкин С. Л., Григорьев В. А. // Опт. и спектр. 1987. Т. 62. Вып. 6. С. 1392—1394.

Поступило в Редакцию  
28 апреля 1988 г.