

УДК 537.624.9,537.862

АСПЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК СО СЛОЖНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

© 2020 г. А. В. Матюнин¹, *, Г. М. Николадзе¹, П. А. Поляков¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: physphak@mail.ru

Поступила в редакцию 02.12.2019 г.

После доработки 23.12.2019 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Рассматриваются технические устройства, позволившие существенно расширить временной диапазон исследуемых процессов импульсного намагничивания и перемагничивания магнетиков, имеющих форму пластин или плоских пленок (пленок ферритов-гранатов с анизотропией типа “легкая плоскость”, монокристаллов бората железа и др.), а также обеспечить максимально возможную точность измерений.

DOI: 10.31857/S036767652005021X

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе мы остановимся на нескольких устройствах, разработанных нашей научной группой и позволивших при исследовании быстропотекающих переходных процессов обеспечить необходимую точность получаемых экспериментальных данных.

НАМАГНИЧИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАГНЕТИКАХ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ВРЕМЕНИ

Конструкция намагничивающего устройства (*НУ*) показана на рис. 1 [1]. Все его элементы размещены на основании из листового текстолита толщиной 10 мм. Основным элементом является полеобразующая полоска *1*. Для уменьшения времени затухания вихревых токов полоска набрана из проволочек, последовательно с каждой из которых включено демпфирующее сопротивление r_{add} . Чтобы повысить пространственную однородность магнитного поля сопротивления резисторов ($r'_{add} = 200$ Ом), подключенных к каждой из четырех крайних проволочек (по две с каждой стороны полеобразующей пластины), выбраны меньше величины остальных 34 резисторов ($r_{add} = 270$ Ом). Также в вырезе, сделанном в основании *НУ*, размещено 8 дополнительных резисторов r''_{add} (МЛТ-2), результирующее сопротивление которых (вместе с сопротивлениями демпфирующих резисторов и проволочек), равно волновому

сопротивлению коаксиального кабеля K_1 , по которому импульс тока поступает в *НУ*.

Измерения показали, что собственное время установления тока в рассматриваемом *НУ* равно 5.2 ± 0.5 нс. При использовании упомянутых выше источников импульсов тока с длительностью фронта $\sim 3-7$ нс можно получить импульсы магнитного поля с $\tau_f \sim 6-8$ нс.

Наш опыт показывает, что применение проводочек с демпфирующими резисторами при надлежащем подборе их величин позволяет не только

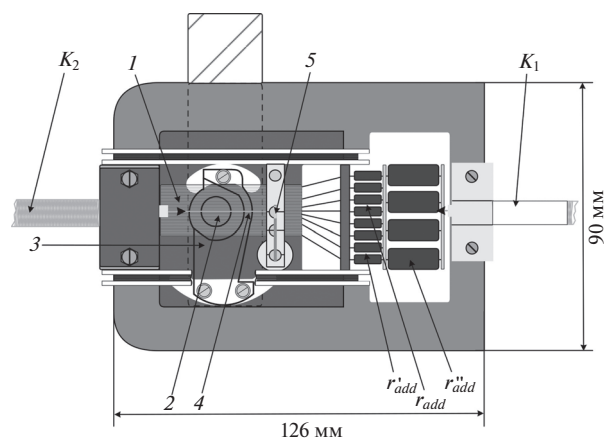


Рис. 1. Конструкция намагничивающего устройства: 1 – полеобразующая полоска; 2 – образец; 3 – столик для образца; 4 – съемный виток; 5 – вертикальный стержень для настройки съемного витка на минимум индукционной помехи; K_1 , K_2 – входной и выходной коаксиальные кабели.

уменьшить до приемлемых значений время затухания вихревых токов (в отличие от намагничивающих устройств в виде отрезков полосковых линий [2]), но и повысить пространственную однородность магнитного поля.

При проведении эксперимента образец 2 помещается на столик 3, который может поворачиваться на угол $\sim 20^\circ$. Таким образом достигается требуемая ориентация характерных направлений в образце (например, осей легкого намагничивания относительно направления магнитного поля).

Регистрация поведения намагниченности исследуемого образца осуществляется с помощью съемного витка 4. Важным элементом конструкции является вертикальный стержень 5 с помощью которого осуществляется настройка съемного витка на минимум индукционной помехи, наводимой в нем самим импульсным магнитным полем. По кабелю K_2 сигнал, считанный с исследуемого образца, поступает в канал регистрации.

При желании, для регистрации поведения намагниченности и, в частности, для наблюдения динамических доменов может быть использован магнитооптический эффект Керра. Рассматриваемая конструкция НУ удобна для размещения над ней соответствующих оптических элементов. В этом случае реализуется наиболее эффективный метод исследования физики переходных процессов, основанный на анализе поведения суммарного магнитного потока образца и изучении реальных механизмов намагничивания [3].

Настоящее намагничивающее устройство разработано конкретно для исследования особенностей импульсного перемагничивания пленок ферритов-гранатов с анизотропией типа “легкая плоскость” [4] и может быть использовано при исследовании процессов с минимальной длительностью $\tau \sim 30\text{--}50$ нс. При импульсном перемагничивании известных магнитных материалов соответствующие скорости перемагничивания достигаются, если поле $H_p \geq 5\text{--}20$ Э. В то же время, минимальное поле H_{pmin} , при котором еще возможно перемагничивание, для этих материалов близко к $1.5\text{--}2$ Э, а время перемагничивания в полях $H_p = H_{pmin}$ достигает $2\text{--}100$ мкс. Таким образом, можно исследовать импульсное перемагничивание в довольно широких интервалах полей и длительностей, на которые, например, приходится существенная часть кривой импульсного перемагничивания и в пределах которых могут проявиться интересные механизмы импульсного перемагничивания [5]. Кроме того, данное устройство возможно использовать и при исследовании импульсного намагничивания пленок ферритов-гранатов с анизотропией типа “легкая плоскость” [6].

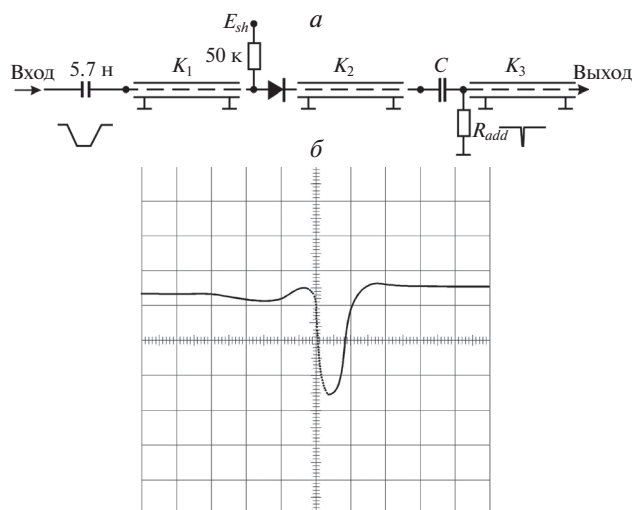


Рис. 2. (а) Схема формирования импульсов на силовом полупроводниковом диоде 2Д308В: K_1, K_3 — входной и выходной коаксиальные кабели; E_{sh} — смещающее напряжение; C — конденсатор для изменения длительности импульса; K_2 — коаксиальный кабель для получения преобразованного импульса. (б) Осциллограмма импульса тока с амплитудой $I_A = 5$ А, полученного при $C = 4.7$ пФ. Масштаб по вертикали — 1.6 А/см, по горизонтали — 1 нс/см.

ОБОСТРИТЕЛЬ ИМПУЛЬСОВ НА СЕРИЙНОМ СИЛОВОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ДИОДЕ

Следующее разработанное нами устройство — обостритель импульсов на серийном силовом полупроводниковом диоде (типа 2Д203В) [6]. Здесь для формирования импульсов используется обостритель с лавинным пробоем полупроводниковых диодов [7]. Как было показано в [8], для формирования крутых перепадов напряжения (и тока) в ряде случаев можно воспользоваться серийными полупроводниковыми диодами. Схема формирования импульсов приведена на рис. 2а. Преобразуемый импульс по коаксиальному кабелю K_1 поступает к обостряющему диоду. Длительность фронта этого импульса τ_{f1} равна 3 нс, его амплитуда может изменяться от 750 до 900 В. Для обеспечения достаточной надежности работы данной схемы длительность входного импульса не превышает 20 нс. Чтобы повысить амплитуду преобразованного импульса на диод подается смещающее напряжение E_{sh} , величина которого выбирается несколько меньшей напряжения статического пробоя диода. Преобразованный импульс выделяется в кабеле K_2 .

Дифференцирующая RC-цепь образована конденсатором C и отрезками коаксиальных кабелей K_2 и K_3 . По последнему сформированный короткий импульс поступает к перемагничивающему устройству. Для уменьшения постоянной времени RC-цепи параллельно кабелю K_3 может быть подключено дополнительное сопротивление R_{add} (с номиналом от 50 до 200 Ом).

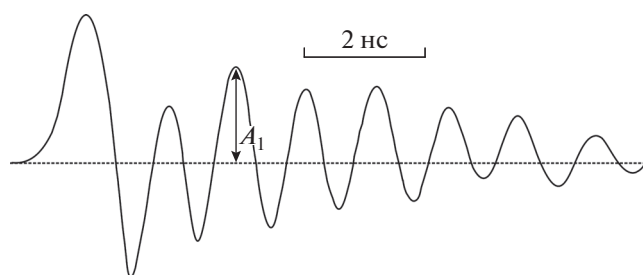


Рис. 3. Пример осциллограммы, отражающей свободные колебания намагниченности пленки феррита-граната с анизотропией типа “легкая плоскость”. $H_I = 7$ Э, $H_S = 10$ Э.

При изменении емкости конденсатора C в пределах от 3 до 9 пФ длительность импульса на выходе кабеля K_3 изменяется от 0.5 до 1.5 нс. В качестве примера на рис. 2б приведена осциллограмма импульса тока с амплитудой $I_A = 5$ А, полученного при $C = 4.7$ пФ. Видно, что длительность импульса тока (на уровне $0.5I_A$) близка к 0.8 нс. Длительность фронта импульса не превышает 0.3 нс.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим некоторые результаты, полученных при помощи вышеописанных устройств.

На рис. 3 приведен пример осциллограммы, полученной при помощи обострителя импульсов на серийном силовом полупроводниковом диоде (а также при помощи вышеописанного намагничивающего устройства) и отражающей свободные колебания намагниченности пленки феррита-граната с анизотропией типа “легкая плоскость” [6]. Сигнал получен для пленки со следующими данными: состав – $(\text{LuBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$, толщина – 4 мкм, намагниченность насыщения $M_S = 16$ Гс, эффективное поле плоскостной анизотропии $H_{K_p} = 1160$ Э, эффективное поле двухосной анизотропии $H_{K_2} = 62$ Э, постоянная затухания Ландау–Лифшица $\lambda = 4.5 \cdot 10^6$ Гц. Исходное состояние насыщения достигалось с помощью установочного магнитного поля $H_S (=10$ Э), прикладываемого в плоскости пленки вдоль одной из осей легкого намагничивания. Импульс инициирующего магнитного поля с длительностью $\tau_I \approx 0.8$ нс и амплитудой $H_I = 7$ Э прикладывался вдоль другой оси (перпендикулярной первой). Видно, что в течение примерно первых двух периодов наблюдается некоторая “непериодичность”, связанная с влиянием самого инициирующего импульса.

Для последующих периодов наблюдается монотонный спад амплитуды колебаний и изменение сигнала может быть представлено простой аппроксимирующей функцией:

$$\varepsilon_{II}(t) = A_1 e^{-\delta t} \cos 2\pi f t, \quad (1)$$

где за начало отсчета времени принимается момент, когда напряжение сигнала достигает первого регистрируемого максимального значения A_1 (см. рис. 6), δ – коэффициент затухания свободных колебаний. Согласно работе [11],

$$\delta = \frac{4\pi M_S + H_{K_p}}{2M_S} \lambda. \quad (2)$$

Используя известную зависимость частоты колебаний от установочного поля H_S , можно определить значения эффективных поле двухосной H_{K_2} [9] и плоскостной H_{K_p} [10] анизотропий. Постоянная затухания определяется с помощью выражений (1) и (2). Очевидно, что обсуждаемый метод формирования инициирующего импульса применим и к исследованию свободных колебаний в других пленочных материалах с разными типами анизотропий, в которых частота колебаний не превышает 1.5–2 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше устройства, разработанные нашей научной группой, позволяют в значительной мере увеличить временной диапазон исследуемых переходных процессов в магнетиках, имеющих форму пластин или плоских пленок (пленок ферритов-гранатов с анизотропией типа “легкая плоскость”, монокристаллов бората железа и др.), а также обеспечить необходимую для однозначной интерпретации получаемых результатов точность и достоверность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колотов О.С., Матюнин А.В., Миронец О.А., Погужев В.А. // ПТЭ. 2004. № 6. С. 103; Kolotov O.S., Matyunin A.V., Mironets O.A., Pogozhev V.A. // Instrum. Exp. Tech. 2004. V. 47. № 6. P. 817.
2. Колотов О.С., Мусаев Т.Ш., Погужев В.А. // ПТЭ. 1987. № 3. С. 155; Kolotov O.S., Musaev T.S., Pogozhev V.A. // Instrum. Exp. Tech. 1987. V. 30. № 3. P. 670.
3. Колотов О.С., Лобачев М.И., Погужев В.А. // ПТЭ. 1973. № 1. С. 218.
4. Топоров А.Ю., Валейко М.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. № 7. С. 134.
5. Глазер А.А., Кашинцев А.С., Колотов О.С. и др. // ФММ. 1992. № 2. С. 154.
6. Колотов О.С., Матюнин А.В., Миронец О.А. // ПТЭ. 2009. № 2. С. 148; Kolotov O.S., Matyunin A.V., Mironets O.A. // Instrum. Exp. Tech. 2009. V. 52. № 2. P. 290.
7. Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В. // ПТЭ. 1981. № 4. С. 135.
8. Зуенко С.И. // ПТЭ. 1985. № 1. С. 113.
9. Ильичева Е.Н., Ильищенко Е.И., Колотов О.С. и др. // ФТТ. 2003. № 6. С. 1037; Il'yicheva E.N., Il'yashenko E.I., Kolotov O.S. et al. // Phys. Sol. St. 2003. V. 45. № 6. P. 1087.
10. Il'yashenko E.I., Il'yicheva E.N., Kolotov O.S. et al. // J. Optoelect. Advan. Mater. 2004. V. 6. № 3. P. 931.