

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 621.375.4+537.632

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2020 г. В. Е. Зубов, И. А. Белов

Поступила в редакцию 07.12.2019 г.

После доработки 16.01.2020 г.

Принята к публикации 18.01.2020 г.

DOI: 10.31857/S0032816220030210

Разработан высокочувствительный прибор для измерения слабых магнитооптических эффектов в отраженном свете. Прибор сконструирован с использованием отечественной элементной базы и состоит из двух основных узлов: селективного усилителя и фазового детектора, настройка которых осуществляется независимо. Основную роль в реализации высокой чувствительности прибора играет фазовый детектор, эффективность которого определяется его динамическим диапазоном, составляющим более трех порядков (66 дБ), что превосходит динамический диапазон доступных в продаже аналогов.

Магнитооптические эффекты в отраженном свете, в частности эффекты Керра, являются эффективным средством для исследования поверхностных свойств ферромагнетиков. Использование оптического микроскопа для измерения отражательных магнитооптических эффектов позволяет изучать свойства ферромагнетиков на малых участках поверхности, соответствующих предельному пространственному разрешению оптического микроскопа (~0.2 мкм). Прибор получил название “магнитооптический микромагнетометр” [1]. Величина эффектов Керра очень мала: в частности, экваториальный эффект Керра в железе, представляющий собой относительное изменение интенсивности света при намагничивании образца, составляет $\sim 10^{-2}$. Для других ферромагнетиков этот эффект может быть на несколько порядков меньше. Вклад шумов в измеряемый эффект возрастает при магнитооптическом исследовании малых по площади участков ферромагнетика. Это связано с тем, что из-за уменьшения площади засветки поверхности образца уменьшается интенсивность света, попадающего в фотоприемник. Поскольку свет представляет собой поток фотонов, каждый из которых излучается случайным образом, то с уменьшением интенсивности возрастает шум по свету.

Малая величина эффектов Керра обуславливает необходимость использования высокочувствительной методики их измерения. Обычно используется модуляционный метод с применением селективного усилителя и фазового детектора, представляющего собой электронный перемножитель измеряемого и опорного сигналов. Случайного сдвига фазы между измеряемым и опорным сигналами не происходит, поскольку их частота определяется одним и тем же генератором. Селективным усилителем осуществляется предварительное сужение полосы частот, а следовательно, уменьшение шумов, осложняющих измерение полезного сигнала. На следующем этапе происходит дальнейшее уменьшение частотной полосы пропускания с помощью фазового детектора. На выходе фазового детектора регистрируется постоянная составляющая результата перемножения, выделяемая фильтром низких частот. Фазовый детектор может сужать полосу пропускания до сотых долей герца.

Из вышесказанного ясно, что основную роль в реализации высокой чувствительности описываемого прибора играет фазовый детектор, а селективный усилитель выполняет вспомогательную функцию. Эффективность фазового детектора определяется его динамическим диапазоном — отношением величины шума к величине минимального полезного сигнала, который может быть измерен прибором. В ряде случаев недостаточный динамический диапазон измерительного прибора приводит к ограничению функциональных возможностей экспериментальной установки. Например, из-за недостаточного динамического диапазона фазового детектора установки в работе [2] для регистрации магнитооптическим способом очень малой нормальной составляющей намагниченности в аморфных лентах на основе железа, предсказанной ранее, пришлось более чем на порядок ухудшить пространственное разрешение магнитооптического микромагнетометра. Это позволило увеличить интенсивность

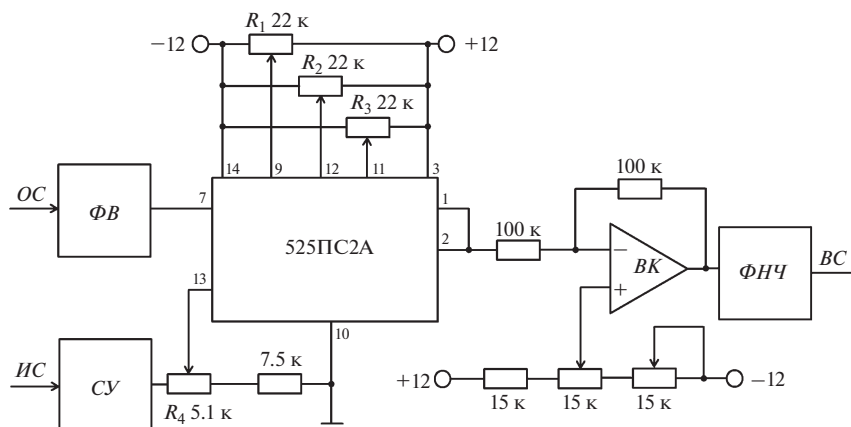


Рис. 1. Принципиальная схема прибора. *ИС* – измеряемый сигнал, *ОС* – опорный сигнал, *СУ* – селективный усилитель, *ФВ* – фазовращатель, *ВК* – выходной каскад, *ФНЧ* – фильтр низких частот, *ВС* – выходной сигнал.

света, поступающего в фотоприемник, и, как следствие, добиться роста отношения сигнал/шум измерительного канала установки.

В настоящей работе представлен прибор, имеющий динамический диапазон фазового детектора более трех порядков.

Прибор, принципиальная схема которого представлена на рис. 1, состоит из двух отдельных блоков: селективного усилителя и фазового детектора. Блоки настраиваются независимо. Селективный усилитель, стабилизаторы напряжения и корпус взяты от доступного в продаже селективного усилителя У2-8 (производился на предприятии п/я А-1333, Великие Луки, Псковской обл.). Селективный усилитель имеет ступенчатую регулировку коэффициента усиления от 0 до 120 дБ. Блок фазового детектора состоит из фазовращателя, перемножителя опорного и измеряемого сигналов, выходного каскада и фильтра низких частот.

Сдвиг фазы опорного сигнала осуществляется с помощью двух последовательных каскадов фазовращателя, собранных на основе операционных усилителей 140уд608. Суммарный максимальный сдвиг фазы опорного сигнала составляет более 300°. Далее опорный сигнал поступает на один из дифференциальных входов микросхемы 525PC2A, которая использована как аналоговый перемножитель. На другой вход подается измеряемый сигнал с селективного усилителя. Электрическая схема и общие принципы настройки микросхемы 525PC2A в режиме перемножителя описаны в работе [3]. Настройка перемножителя осуществляется следующим образом. Сначала заземляются входы 13 и 7 измеряемого и опорного сигналов соответственно. Подстройкой сопротивления R_3 устанавливается нуль на выходе 2 микросхемы 525PC2A. Затем заземляется вход 13,

а на вход 7 подается синусоидальный сигнал амплитудой 10 В. Регулировкой сопротивления R_1 устанавливается минимальное значение сигнала на выходе 2. Далее заземляется вход 7, на вход 13 подается сигнал амплитудой 10 В, а регулировкой сопротивления R_2 устанавливается минимальное значение сигнала на выходе 2. Затем устанавливается коэффициент передачи всей схемы k , равный 0.05. Для этого на входы 7 и 13 подаются синусоидальные сигналы амплитудой 10 В. Результатом перемножения двух синусоидальных сигналов являются постоянный сигнал и переменный сигнал на удвоенной частоте. Подстройкой потенциометра R_4 на выходе 2 величина постоянного сигнала устанавливается равной 5 В.

Выходной каскад, собранный на микросхеме 140уд608, предназначен для точной установки нуля перемножителя. Параметры выходного каскада подобраны таким образом, чтобы не оказывать влияния на работу микросхемы 525PC2A. Переменный сигнал отсекается фильтром низких частот, представляющим собой интегрирующую RC-цепочку. Высокая стабильность и низкие собственные шумы микросхемы 525PC2A позволяют получить большой динамический диапазон перемножения, составляющий более трех порядков.

При работе прибора величина выходного сигнала селективного усилителя выбирается близкой к максимально допустимой величине сигнала на входе микросхемы 525PC2A, которая составляет 10 В. В этом случае полностью используется динамический диапазон фазового детектора, собранного на указанной микросхеме, и выделяется полезный сигнал амплитудой от 5 мВ до 10 В, поступающий на вход микросхемы. Минимальное значение измеряемого сигнала ограничивается собственными шумами микросхемы.

Основные технические характеристики. Динамический диапазон фазового детектора 66 дБ; погрешность коэффициента передачи фазового детектора менее 1% во всем диапазоне входных сигналов и менее 5% при величине входного сигнала от 5 до 15 мВ; диапазон частот 20 Гц–100 кГц; диапазон изменения постоянной времени 1–30 с.

В продаже имеются аналогичные приборы иностранного производства, имеющие близкие параметры, но они достаточно дороги. Кроме того, они имеют меньший динамический диапазон. Например, динамический диапазон усилителя SR124 (Standford Research Systems, USA, www.thinkSRS.com) составляет 60 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кринчик Г.С.* Физика магнитных явлений. М.: Изд-во МГУ, 1985. С. 325.
2. *Зубов В.Е., Левшин Н.Л.* // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. С. 292.
3. *Тимонтеев В.Н., Величко Л.М., Ткаченко В.А.* Аналоговые перемножители сигналов в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Радио и связь, 1982. С. 32, 48.

Адрес для справок: Россия, 119899, Москва, Ленинские горы, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет. E-mail: vizubov@mail.ru (В.Е. Зубов)