

АВТОМАТИЧЕСКИЙ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР

А. В. Малаховский

Описана простая по конструкции установка для записи дисперсии магнитооптического вращения и экваториального эффекта Керра в видимой и близкой ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, основанная на измерении отношения перпендикулярной составляющей светового потока к постоянной при периодическом перемагничивании образца. Чувствительность порядка 0.0004° .

Описанные в литературе автоматические поляриметры [1-4] представляют собой следящие системы, реагирующие непосредственно на поворот плоскости поляризации света. Во всех этих поляриметрах используется модуляция плоскости поляризации света источника, что приводит к модуляции светового потока на выходе системы. Сигналом для отработки следящей системы служит появление первой гармоники в модуляции потока при отклонении анализатора от положения минимального пропускания.

В предлагаемом спектрополяриметре и поляризатор и анализатор неподвижны во время измерения. Для определения угла магнитооптического вращения используется связь между модуляцией потока на выходе анализатора и магнитооптическим вращением при периодическом перемагничивании образца. Вследствие наличия периодического перемагничивания образца (с частотой $40 \div 80$ гц) предпочтительно применение данного спектрополяриметра для исследования образцов ферромагнитных (или ферримагнитных) материалов с небольшой коэрцитивной силой. Предлагаемый спектрополяриметр проще по устройству, чем поляриметры со следящей системой. В нем отсутствуют: следящая система высокоточного вращения анализатора, система преобразования угла поворота анализатора в электрический сигнал и устройство для модуляции плоскости поляризации.

Рассмотрим принцип действия спектрополяриметра. Как известно, поток на выходе анализатора при прохождении через него плоскополяризованного света равен

$$\Phi = \Phi(\pi/2) \sin^2 \alpha, \quad (1)$$

где α — угол отклонения анализатора от положения полного затемнения; $\Phi(\pi/2)$ — поток, проходящий через анализатор при максимальном раскрытии, т. е. при $\alpha = \pi/2$.

Если плоскость поляризации света, падающего на поляризатор, поворачивается на небольшой угол $\Delta\alpha$ вследствие магнитооптического эффекта, то из (1), ограничиваясь первыми тремя членами в разложении по малому параметру $\Delta\alpha$, получим соответствующее изменение потока

$$\Delta\Phi \approx \Phi(\pi/2) \left(\sin 2\alpha\Delta\alpha + \cos 2\alpha\Delta\alpha^2 - \frac{1}{3} \sin 2\alpha\Delta\alpha^3 \right). \quad (2)$$

Сначала отбросим в (2) второй и третий члены, а затем рассмотрим, при каких условиях это можно сделать. В таком случае (2) заменится на равенство

$$\Delta\Phi \approx \Phi(\pi/2) \sin 2\alpha\Delta\alpha, \quad (3)$$

и из (1) и (3) получим

$$2\Delta\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \frac{\Delta\Phi}{\Phi}. \quad (4)$$

Угол α измеряется по лимбу на анализаторе. Остается измерить величину $\Delta\Phi/\Phi$, т. е. отношение амплитуды переменной составляющей потока, обязанной периодическому перемагничиванию образца, к постоянной составляющей. Точно такая же величина измеряется, например, и в экваториальном эффекте Керра, хотя здесь и нет вращения плоскости поляризации, т. е. предлагаемый спектрополяриметр может быть использован для измерения любых эффектов, пропорциональных отношению $\Delta\Phi/\Phi$.

Теперь проанализируем, при каких условиях (2) перейдет в (3). Третьим членом в (2) можно пренебречь по сравнению с первым, если

$$\Delta\alpha^2 \ll 3. \quad (5)$$

Например, если требуется точность 1%, то максимальный угол магнитооптического вращения, который при этом можно измерить, будет $\Delta\alpha \leq 10^\circ$, при точности 0.1% $\Delta\alpha \leq 3^\circ$.

Вторым членом можно пренебречь, если

$$\operatorname{tg} 2\alpha \gg \Delta\alpha. \quad (6)$$

Этому условию можно удовлетворить с любой точностью при любом $\Delta\alpha$. Так, для $\Delta\alpha = 3^\circ$ при точности 1% получаем $\alpha \geq 40^\circ$. Однако большей частью нет необходимости соблюдать условие (6). Нетрудно заметить, что при хорошей прямоугловности сигнала от перемагничивания (прямоугольная петля гистерезиса или амплитуда поля значительно больше поля насыщения) второй член в (2) практически не вносит вклада в переменную составляющую, и им можно пренебречь без особых условий. Но в этом случае (а также во всех других случаях, но в меньшей степени) второй член создает дополнительную постоянную составляющую. Поэтому, чтобы (4) оставалось справедливым, должно соблюдаться условие: $\sin^2 \alpha \gg \cos 2\alpha \Delta\alpha^2$, или, что то же,

$$\frac{\operatorname{tg} 2\alpha \operatorname{tg} \alpha}{2} \gg \Delta\alpha^2. \quad (7)$$

Это условие менее жесткое, чем (6) и также может быть выполнено с любой точностью при любом $\Delta\alpha$. Например, для $\Delta\alpha = 3^\circ$ при требуемой точности 1% из (7) получаем $\alpha \geq 25.5^\circ$. При $\Delta\alpha \leq 1^\circ$ и для точности 1% (7) заменится простым соотношением

$$\alpha \geq 10\Delta\alpha. \quad (7a)$$

До сих пор мы считали, что при $\alpha = 0$ поток равен нулю: $\Phi(0) = 0$. Однако это не так вследствие имеющейся всегда неидеальности поляризаторов и поверхности образца. Имеет также значение неточность установки p - или s -поляризации при измерении магнитооптического вращения в случае косоугольного падения света на образец (подробнее об этом см. [5]). Нетрудно показать, что, для того чтобы (4) оставалась в силе, необходимо выполнение условия

$$\Phi(\pi/2) \sin^2 \alpha \gg \Phi(0). \quad (8)$$

При малости $\Phi(0)$: $\Phi(\pi/2) \sin^2 \alpha \approx \Phi(\alpha)$ и тогда вместо (8) имеем

$$\Phi(\alpha) \gg \Phi(0). \quad (8a)$$

В таком виде условие точности формулы (4) очень удобно для практического использования. При малых углах вращения $\Delta\alpha \leq 0.5^\circ$ это условие практически оказывается единственным.

Если принимать во внимание только несовершенство поляризаторов, то величина $K = \Phi(\pi/2)/\Phi(0)$ будет характеризовать их качество. Используемая нами пара поляризаторов (поляроидные пленки) имеет

в видимой области спектра (рис. 3) $K \geq 5 \cdot 10^3$. Из (8) получаем, что с таким качеством поляризаторов точность 1% обеспечивается при $\alpha \geq 8^\circ$.

При учете только дробового шума ФЭУ отношение сигнала к шуму на аноде ФЭУ запишется в виде [6]

$$\rho = k \frac{\Delta\Phi}{\sqrt{\Phi}}, \quad (9)$$

где k — коэффициент, зависящий от чувствительности фотокатода и ширины полосы пропускания электронного устройства. Подставляя (1) и (3) в (9), получим

$$\rho = 2k \cos \alpha \Delta\alpha \sqrt{\Phi (\pi/2)},$$

т. е. отношение сигнал—шум уменьшается при увеличении угла α . Следовательно, нужно выбирать минимальный угол α , удовлетворяющий наиболее сильному из условий (7), (7а) или (8), (8а).

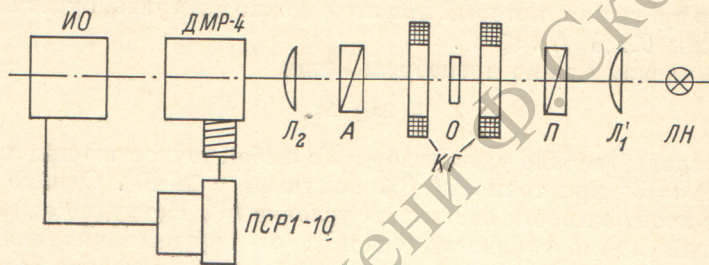


Рис. 1. Блок-схема установки.

При измерении экваториального эффекта Керра все перечисленные требования естественным образом отпадают. Влияние качества поляризатора на точность измерений, конечно, остается, но оно значительно меньше рассмотренного выше.

Блок-схема установки изображена на рис. 1. Свет от лампы накаливания ЛН проходит через собирающую линзу L_1 , поляризатор P и попадает на образец O , помещенный в переменное магнитное поле, создаваемое кольцами Гельмгольца (КГ). Свет, прошедший через образец (или отраженный при измерении эффекта Керра), пройдя еще анализатор A и линзу L_2 , собирается на входной щели монохроматора ДМР-4. Прошедший свет попадает на измеритель отношения переменной и постоянной составляющей потока на измеритель отношения переменной регистрируется самопишущим потенциометром ПСР1-10, вал протяжки бумаги которого механически связан с барабаном монохроматора. Таким образом, на ленте потенциометра записывается дисперсионная кривая исследуемого эффекта. Монохроматор установлен на выходе системы. Это создает удобство в настройке и дает возможность работать на свете, так как посторонние засветки, проникающие через монохроматор, очень малы по сравнению с полезным остронаправленным пучком света.

Блок-схема измерителя отношений изображена на рис. 2.

Световой поток, выходящий из монохроматора, попадает на катод ФЭУ, вообще говоря, любого, в зависимости от интересующего диапазона длин волн. В нашей установке это ФЭУ-27 или ФЭУ-39. С тем, чтобы для усиления и переменной и постоянной составляющих использовать только усилители переменного тока, применена стопроцентная модуляция (прерывание) тока фотоумножителя путем подачи переменного напряжения частотой 2.5 кГц и формы, близкой к прямоугольной на катод ФЭУ [7]. Это напряжение вырабатывается специальным RC-генератором (Г). Прерывание электронного потока эквивалентно прерыванию светового потока, но прерывание светового потока с такой высокой частотой создать гораздо труднее. Получающееся на аноде ФЭУ переменное напряжение усиливается усилителем U_1 , смонтированным в одном блоке с ФЭУ, а затем уси-

лителем $У_2$. Далее сигнал проходит через катодный повторитель $КП_1$ и попадает на детектор $Д_1$ и интегрирующую цепочку $ИЦ$. Детектор $Д_1$ имеет сглаживающий фильтр с большой постоянной времени (~ 0.5 сек.), который сглаживает не только пульсацию с частотой 2.5 кгц, но также и модуляцию, обязанную перемагничиванию образца с частотой в диапазоне $40 \div 80$ гц. В результате на выходе детектора $Д_1$ мы получаем усиленное постоянное напряжение, пропорциональное постоянной составляющей потока.

Интегрирующая цепочка $ИЦ$ имеет постоянную времени ~ 1 мсек., поэтому пульсации с частотой 2.5 кгц сглаживаются и остается низкочастотная модуляция, вызванная магнитооптическими эффектами. Выделенная интегрирующей цепочкой переменная составляющая исходного сигнала усиливается усилителем $У_3$ и поступает на синхронный детектор $СД$, выполненный на поляризованном реле РП-4. Постоянная времени $СД$ имеет два значения: ~ 0.2 или ~ 2 сек. Синхронный детектор управляется

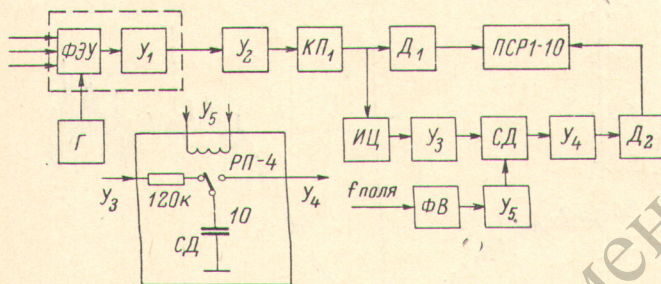


Рис. 2. Блок-схема измерителя отношений.

тем же напряжением, которое создает магнитное поле. Предварительно это напряжение проходит через фазовращатель $ФВ$ с регулируемым сдвигом фазы и усилитель $У_5$.

Полоса пропускания тракта усиления переменной составляющей лежит приблизительно от 40 до 250 гц. Такая полоса позволяет усиливать почти прямоугольные сигналы от перемагничивания ферромагнитных образцов с частотой $40 \div 80$ гц, только незначительно искажая фронты. Поэтому синхронный детектор (при соответствующей настройке фазы и длительности опроса) измеряет амплитуду самого исследуемого сигнала, а не его первой гармоники.

Как видно из рис. 2, синхронный детектор является одновременно и прерывателем, преобразующим постоянное напряжение в переменное, которое затем усиливается усилителем $У_4$ и детектируется обычным детектором со сглаживающим фильтром $Д_2$. Синхронный детектор поставлен не в конце усилительного тракта, а в середине, где максимальный линейно усиливаемый сигнал более чем в 10 раз превосходит номинальный полезный сигнал. Соответственно мы получаем возможность измерять напряжение, в котором шум по крайней мере в 10 раз превосходит полезный сигнал.

Отношение постоянных напряжений, полученных на выходе детекторов $Д_2$ и $Д_1$ и пропорциональных переменной и постоянной составляющим светового потока соответственно, измеряется и записывается самопишущим потенциометром ПСР1-10 [8, 9].

Спектрополяриметр позволяет автоматически записывать дисперсию магнитооптического вращения и экваториального эффекта Керра в видимой и близкой ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

Прибор имеет десять пределов измерения и обеспечивает измерение отношений переменной составляющей к постоянной от 1:1 до 1:1000. Чувствительность по постоянной составляющей ~ 10 мв. по переменной составляющей ~ 10 мкв. Без регулировки усиления полного сигнала

можно производить запись при изменении постоянной составляющей в 5 раз, с регулировкой усиления — не менее чем в 100 раз.

Градировка прибора для абсолютных измерений производится двумя способами. Во-первых, можно откалибровать прибор, осуществив имитацию сигнала с $\Delta\Phi/\Phi=1$. Для этого на катод ФЭУ, кроме напряжения с частотой 2.5 кгц, подается еще напряжение с частотой перемагничивающего поля, которое также осуществляет полное прерывание электронного потока (само поле при этом снимается), и регулировкой усиления переменной составляющей добиваются показания 1 на первом пределе измерения. Во-вторых, можно откалибровать записанную кривую, проведя измерение магнитооптического вращения на какой-нибудь длине волны абсолютным способом (например, с помощью модуляции плоскости поляризации). Однако при равных условиях чувствительность спектрополяриметра оказывается намного выше, поэтому не всегда возможно осуществить калибровку вторым способом с приемлемой точностью.

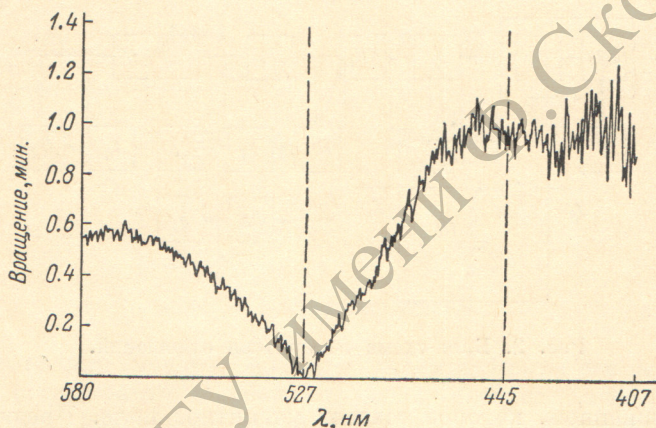


Рис. 3. Запись меридионального эффекта Керра для марганцевого феррита.

Точность измерения (без учета шумов) на всех пределах одинакова. Она определяется нелинейными искажениями усилителей и детекторов ($\sim 1\%$) и нестабильностью усиления усилителей переменной составляющей ($\sim 1\%$), т. е. максимальная аппаратная ошибка не превосходит 2%. Полная погрешность измерения находится, конечно, с учетом выполнения условий (7) и (8), а также с учетом шумов, которые видны непосредственно при записи. Шумы характеризуют также и чувствительность спектрополяриметра. Она определяется как абсолютная величина случайных отклонений от среднего значения и равна в нашем случае 0.0004° , т. е. лучше, чем у известных автоматических поляриметров [1-4]. Чувствительность ограничивается в основном яркостью источника света, светосилой оптической системы (куда входят и размеры образца) и постоянной времени синхронного детектора, т. е. параметрами, от которых зависит величина шума на выходе прибора. Увеличивая эти параметры, можно еще существенно увеличить чувствительность спектрополяриметра. Кроме того, чувствительность, выраженная в градусах, сильно зависит от таких характеристик образца, как прозрачность (в случае эффекта Фарадея) или коэффициент отражения (в случае эффекта Керра).

Для иллюстрации работы спектрополяриметра на рис. 3 приведена запись дисперсии меридионального эффекта Керра в пленке марганцевого феррита (с примесью 20% Fe_2O_3) при s-поляризации падающего света. Угол падения 60° . Запись велась при постоянной времени СД ~ 2 сек. Ширина выходной щели монохроматора 1 мм, что соответствует ширине полосы $\sim 100 \text{ \AA}$ в приведенном диапазоне длин волн. Фотоумножитель ФЭУ-27. В коротковолновой части шум увеличивается из-за резкого паде-

ния чувствительности ФЭУ. При длине волны 527 нм происходит смена знака вращения: слева вращение отрицательно, справа — положительно.

В заключение хочу искренне поблагодарить И. С. Эдельман за полезные обсуждения и советы, а также К. Г. Боцьева за помощь при проверке на макете отдельных элементов схемы.

Литература

- [1] А. А. Заика, В. И. Литвак. Измерительная техника, № 5, 69, 1957.
- [2] Р. Я. Кеймах, В. И. Кудрявцев. Приборостроение, № 5, 3, 1964.
- [3] Ю. А. Шаронов. Опт. и спектр., 25, 930, 1968.
- [4] I. G. Forsythe R. Kiesebach, V. E. Shashona. Appl. Opt., 6, 699, 1967.
- [5] А. В. Малаховский. Опт. и спектр., 28, 369, 1970.
- [6] Н. А. Соболева, А. Г. Берковский, Н. И. Чечик, Р. Е. Елисеев. Фотоэлектронные приборы. Изд. «Наука», 1965.
- [7] Н. И. Алиновский, Б. К. Пахтусов. ПТЭ, № 5, 179, 1968.
- [8] D. E. Aspnes. Rev. Sci. Instr., 38, № 11, 1663, 1967.
- [9] Е. А. Виноградов, Т. А. Шамонов. Ж. прикл. спектр., 8, 870, 1968.

Поступило в Редакцию 14 апреля 1971 г.
