

Л. А. ГУМЕРМАН

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СТЕПЕНИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 1 IX 1947)

1. Задача измерения степени поляризации излучения есть по существу задача фотометрическая, и потому точность и чувствительность любого метода, который может быть предложен для этой цели, определяется специфическими особенностями выбранной фотометрической методики и функциональным видом связи между величинами, непосредственно измеряемыми, и теми, какие применяются для характеристики поляризованного излучения. Несмотря на очевидность и даже тривиальность этого положения, учету этой стороны дела не всегда уделялось достаточное внимание, что приводило иногда к ошибочным оценкам разных методов и их возможностей.

Во всех методах, основанных на визуальной фотометрии, уравниваются яркости двух „фотометрических полей“ и непосредственно измеряется отношение этих яркостей, причем относительная погрешность этого измерения, определяемая контрастной чувствительностью глаза, в довольно широких пределах не зависит ни от величины измеряемого отношения, ни от абсолютного значения того уровня яркости, на котором производится уравнивание. Нетрудно показать, что как в классических методах Корню и Савара, так и в том видоизменении метода Савара, которое было предложено Б. Лио⁽¹⁾, яркость одного из уравниваемых полей всегда пропорциональна интенсивности компоненты, поляризованной в „преимущественном“ направлении (I_M), а яркость другого поля пропорциональна интенсивности компоненты с перпендикулярным направлением поляризации (I_m). Таким образом, в этих методах непосредственно измеряемой величиной всегда является так называемый коэффициент деполяризации излучения

$$\Delta = I_m / I_M, \quad (1)$$

причем эта величина определяется с постоянной относительной ошибкой $\delta\Delta/\Delta$, равной ошибке фотометрирования, т. е. примерно $1-2\%$.

В отношении метода Корню, в котором поля создаются в результате прохождения пучка исследуемого излучения через соответствующим образом ориентированную призму Волластона, справедливость сказанного очевидна. Но нетрудно видеть, что метод Савара, который несомненно имеет очень большие преимущества с точки зрения простоты и удобства эксперимента, принципиально ничем не отличается от метода Корню. Даже в оптимальных условиях, когда „видимость“ интерференционной картины наибольшая, максимальная и минимальная яркость в поле зрения соответственно пропорциональны I_M и I_m . Таким образом, часто встречающееся утверждение, будто полярископ

Савара является „особенно чувствительным“ индикатором поляризованного излучения, не имеет оснований.

Нетрудно показать, что с чисто фотометрической точки зрения видоизменение методики Савара, предло кенное Лию, эквивалентно замене установки „на равенство полей“ установкой „на равный контраст“, но что и здесь по существу производится фотометрическое уравнивание „полей“, яркости которых пропорциональны соответственно I_M и I_m .

Коэффициент деполаризации Δ , непосредственно измеряемый с постоянной относительной погрешностью во всех визуальных методах, является удобной характеристикой частично поляризованного излучения лишь тогда, когда он не слишком близок к единице, т. е. тогда, когда мы имеем дело с излучением, более или менее сильно поляризованным. При изучении же света слабо поляризованного, например при изучении флуоресценции многих растворов, величина Δ не может служить достаточно чувствительной характеристикой, и излучение предпочитают характеризовать другой величиной — степенью поляризации p , которая определяется соотношением:

$$p = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} = \frac{1 - \Delta}{1 + \Delta} \quad (2)$$

Дифференцируя это равенство, мы получаем следующие выражения для абсолютной и относительной ошибки в определении величины p :

$$\delta p = \pm \frac{1 - p^2}{2} \frac{\delta \Delta}{\Delta}; \quad \frac{\delta p}{p} = \pm \frac{1 - p^2}{2p} \frac{\delta \Delta}{\Delta} \quad (3)$$

Из формул (3) видно, что в области малых значений p относительная ошибка в определении этой величины при применении визуальных методов может стать недопустимо большой. Если, например, относительная ошибка фотометрирования равна $\pm 2\%$, то $\delta p/p = \pm 20\%$ при $p = 0,05$ и $\delta p/p = \pm 50\%$ при $p = 0,02$. Из сказанного ясно, что существующие визуальные методы мало пригодны для точных количественных измерений в области малых значений степени поляризации.

2. Замена визуальной фотометрии фотоэлектрической имеет здесь принципиальное значение. Из самой структуры формулы (2) видно, что дифференциальная фотоэлектрическая схема, измеряющая разность интенсивностей $I_M - I_m$, дает возможность определять величину p с заданной относительной погрешностью, сколь бы мало ни было это значение p , если только абсолютная величина соответствующей разности $I_M - I_m$ или, что то же, чувствительность приемника достаточно велики.

Для реализации этого замысла нами был избран вариант дифференциальной фотоэлектрической методики, основанный на следующих соображениях. Пусть пучок частично поляризованного излучения проходит через анализатор, вращающийся вокруг этого пучка с циклической частотой ω . Легко видеть, что интенсивность прошедшего через анализатор пучка определяется выражением:

$$I = I_M \cos^2 \omega t + I_m \sin^2 \omega t = \frac{I_M + I_m}{2} + \frac{I_M - I_m}{2} \cos 2\omega t, \quad (4)$$

и, следовательно, если этот пучок мы заставим действовать на фотоэлектрический приемник, то постоянная составляющая фототока будет пропорциональна $(I_M + I_m)$, а амплитуда переменной составляющей будет пропорциональна $(I_M - I_m)$.

Из различных возможных вариантов методики измерения величины p , которые ясно заложены в этих соотношениях, наиболее удобным представляется нам компенсационный (нулевой) вариант, в котором индикатором компенсации частичной поляризации исследуемого излучения является обращение в нуль переменной составляющей фототока. Важным преимуществом такого рода схемы является ее полная независимость от характеристик приемного устройства и постоянства источника. В осуществленной нами по этой схеме установке вращающийся анализатор представляет круглый кусок поляроида, зажатый в цилиндрической трубке, приводимой во вращение небольшим синхронным мотором. В качестве приемника был применен вторично-электронный умножитель типа Кубецкого с сурьмяно-цезиевым катодом, разработанный С. М. Файнштейном⁽³⁾*. Для того чтобы исключить влияние ориентации электрического вектора излучения на чувствительность приемника, непосредственно перед его окном помещался деполяризатор — пластинка молочного стекла. Напряжение, снимающееся с небольшого сопротивления ($5\text{ k}\Omega$), включенного в анодную цепь умножителя, подавалось на вход трехкаскадного усилителя на сопротивлениях, усилившего только переменную составляющую этого напряжения. Для уменьшения собственных шумов усилителя была применена негативная обратная связь между вторым и первым каскадом. Напряжение с выхода усилителя подавалось на вертикальные пластинки электронного осциллографа, на экране которого получалась при наличии частичной поляризации излучения устойчивая синусоида достаточно большой амплитуды. Компенсация производилась поворотом стеклянной стопы, как в обычном поляриметре Савары. В некоторых сериях опытов осциллограф заменялся катодным вольтметром, отклонения которого приводились к нулю поворотом стопы.

3. Для проверки описанной методики мы произвели сопоставление измеренных этим способом значений поляризации флуоресценции растворов флуоресцеина в глицерине и в смесях глицерина с водой при различных значениях концентрации красителя и при возбуждении длинами волн 436 и 365 м μ . На основе общей теории влияния концентрации на флуоресценцию, развитой С. И. Вавиловым⁽²⁾, мы должны ожидать, что для всех концентраций отношение p_{436}/p_{365} будет сохранять постоянное значение. Такое же постоянство этого отношения должно сохраняться и при ротационной деполяризации, вызываемой, например, уменьшением вязкости раствора. Данные, приведенные в табл. 1 и 2, показывают, что вплоть до значений $p=1\%$ (и даже несколько меньше) это постоянство действительно сохраняется с точностью до 5%.

Эти значения точности и чувствительности методики — отнюдь не предельные. Они определяются уровнем собственных шумов нашей приемно-усилительной установки. Производящаяся в настоящее время замена широкополосного усилителя резонансным с очень узкой полосой пропускания позволит, надо полагать, значительно снизить этот уровень и улучшить точность и чувствительность метода. Помимо этого, мы производим в настоящее время разработку электрооптического устройства для замены механически вращаемого анализатора. Это устройство должно устроить вращение плоскости поляризации действующего на фотоэлемент света и сделать излишним применение деполяризатора, значительно ослабляющего действующий световой поток. Само собой разумеется, что при применении соответствующих

* Пользуюсь случаем выразить признательность Л. А. Кубецкому и его сотрудникам С. М. Файнштейну и М. Д. Грицкевич, благодаря безбедности которых я имел возможность работать с этими превосходными приборами.

Таблица 1

Концентрационная деполяризация флуоресценции растворов флуоресцеина при возбуждении длинами волн 436 и 365 м μ

Концентрация красителя (г/см ³)	Растворитель					
	глицерин			глицерин + вода (50 : 50)		
	ρ_{436}	ρ_{365}	ρ_{436}/ρ_{365}	ρ_{436}	ρ_{365}	ρ_{436}/ρ_{365}
$1 \cdot 10^{-4}$	29,4	18,4	1,61	8,2	5,4	1,51
$3 \cdot 10^{-4}$	21,8	14,2	1,54	7,2	4,6	1,56
$5 \cdot 10^{-4}$	18,0	10,8	1,55	6,0	3,8	1,57
$10 \cdot 10^{-4}$	11,2	7,6	1,48	5,1	3,3	1,54
$15 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	4,6	2,9	1,58
$20 \cdot 10^{-4}$	6,4	3,8	1,67	4,0	2,5	1,60
Средн.	—	—	1,61	—	—	1,56

Таблица 2

Ротационная деполяризация флуоресценции при возбуждении длинами волн 436 и 365 м μ

	Растворитель. Отношение глицерин : вода				
	100 : 0	90 : 10	80 : 20	50 : 50	0 : 100
ρ_{436}	29,6	26,0	22,4	7,4	0,4
ρ_{365}	19,0	17,0	15,4	5,2	0,25
$\rho_{436} : \rho_{365}$	1,56	1,53	1,45	1,43	1,6

компенсаторов описанная методика может быть применена и к исследованию эллиптически поляризованного света.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить глубокую благодарность акад. С. И. Вавилову за постоянное внимание к этой работе. Я хотел бы также поблагодарить И. С. Абрамсона за товарищескую помощь, которую он оказал мне в разработке и налаживании усилительной схемы. С благодарностью я отмечаю и работу моего сотрудника Д. Ф. Коринфского, который вложил много труда и энергии в монтаж и налаживание установки.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии Наук СССР

Поступило
1 IX 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. Луот, *Revue d'Optique*, 5, 108 (1926). ² С. И. Вавилов, *ЖЭТФ*, 13 (1943).
³ С. М. Файнштейн, *ДАН*, 56, 149 (1947).