Доклады Академии наук СССР
1955. Том 102, № 5

ФИЗИКА

Н. А. ТОЛСТОЙ

УЛЬТРАТАУМЕТР С МЕХАНИЧЕСКИМ МОДУЛЯТОРОМ СВЕТА И НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ О РЕЛАКСАЦИИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ОБЛАСТИ «БЕЛОГО ПЯТНА»

(Представлено академиком А. Н. Терениным 21 II 1955)

В 1947 г. автором совместно с П. П. Феофиловым был разработан новый метод изучения быстро протекающих физических релаксационных процессов ([1]) (люминесценция, фотопроводимость, диэлектрическая поляризация, газовый разряд и пр.). Приборы и установки, построенные на основе этого метода, были названы «тауметрами». При помощи тауметров нами, а также другими исследователями был произведен ряд работ по изучению кинетики различных физических явлений, в первую очередь люминесценции и фотопроводимости ([2]). Описанная нами методика позволяла исследовать процессы длительностью от 10^{-1} до 10^{-5} сек. В 1949 г. С. И. Вавилов выдвинул задачу — сделать метод пригодным для изучения особо быстрых процессов релаксации фотолюминесценции (до 10^{-7} сек.), указав, что интервал 10^{-5}—10^{-7} сек. до сего времени является «белым пятном» и что в этом «белом пятне» могут скрываться новые важные явления ([3]).

За последние годы автором была разработана методика, решающая задачу, поставленную С. И. Вавиловым. Соответствующие приборы были названы ультратауметрами.

Анализ метода тауметра показывает ([4]), что для продвижения в область малых длительностей необходимо решить три технические задачи: 1) получить прямоугольные импульсы (П-импульсы) возбуждающего света с очень крутыми фронтами; 2) обеспечить малую электрическую инерцию цепей фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и 3) построить чувствительный широкополосный осциллограф с совершеннно тождественными (по переходной характеристике) усилителями Y- и X-каналов.

Задача 2) решается выбором небольшого нагрузочного сопротивления (10—20 кΩ) ФЭУ и монтированием катодного повторителя непосредственно на выводных проводах ФЭУ. При этих условиях кабели, соединяющие ФЭУ с осциллографом, вносят весьма малую инерцию ($\approx 10^{-8}$ сек.).

Задача 3) решена нами путем постройки специального осциллографа для ультратауметра с горизонтальной частотной характеристикой от 2 гц до 10 Мгц в Y- и X-каналах и с коэффициентом усиления, равным 500. Приведем лишь осциллограммы (см. рис. 1), показывающие, что П-импульс (от специального электрического генератора) с крутизной фронта порядка 10^{-7}, поданный одновременно на Y- и X-усилители, «разворачивает» сам себя в виде совершенно слившихся двух прямых (рис. 1*а*). Введение инерции в 10^{-8} сек. в один из каналов, иначе говоря, уменьшение крутизны фронта П-импульса, идущего через этот канал (путем включения интегрирующей RC-цепочки, $R = 100$ ом, $C = 100$ pF), дает «петлю» (рис. 1*б*). Отличие осциллограммы 1*а* от 1*б* ясно показывает,

что дополнительная инерция порядка $1—2 \cdot 10^{-9}$ сек. еще может быть отмечена на экране осциллографа. Вместе с тем это показывает, что переходные характеристики обоих усилителей нашего осциллографа тождественны с точностью лучше, чем 10^{-9} сек. Напомним, что возможность измерять инерцию на $1^1/_2$—2 порядка меньшую, чем инерция измерительной аппаратуры, характерна для метода тауметра. Это обстоятельство особенно ясно освещено в работе С. М. Рывкина ([5]).

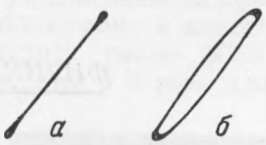

Рис. 1. Рисованные копии фотографий, снятых с экрана осциллографа.
$а — \tau_Y = \tau_X$;
$б — \tau_Y = \tau_X + 10^{-8}$

Задача 1) является наиболее трудной. Мы разработали два типа модуляторов света для ультратауметра: модулятор с электрооптическим затвором (ячейка Керра), кратко описанный в ([6]) (совместно с Н. Н. Ткачуком), и модулятор с вращающимся диском. Электрооптический модулятор позволяет изучать процессы длительностью до 10^{-8} сек., однако он модулирует только свет в видимой части спектра (нитробензольная ячейка Керра) и поэтому пригоден для исследования люминесценции лишь в красной и инфракрасной частях спектра. Механический модулятор позволяет модулировать любой, в том числе и ультрафиолетовый свет. В его конструкции мы использовали некоторый оригинальный прием для сокращения длительности фронта П-импульса, который мы здесь опишем.

Пусть мы имеем прямоугольную щель $Щ_1$, освещенную сфокусированным на нее источником света $И$ (см. рис. 2$а$). Объектив $О$ изображает эту щель в уменьшенном виде ($Щ_2$) в плоскости диска $Д$, снабженного выступами. Диск, вращаясь, «перерубает» краем выступа пучок света. Ясно, что чем больше окружная скорость диска и чем больше уменьшение, даваемое объективом $О$, тем короче фронт П-импульса света, создаваемого модулятором. Предел скорости вращения диска кладется механически-конструктивными соображениями (в конечном счете центробежным разрывом диска). Предел уменьшения изображения $Щ_2$ кладется необходимостью иметь от модулятора достаточное количество света (в конечном счете это зависит от апертуры объектива $О$). Допустим, что мы практически достигли каждого из этих пределов. Тогда фронт П-импульса света можно было бы укоротить еще в два раза, если бы щель $Щ_2$ «перерубалась» не только диском $Д$, но одновременно и вторым диском $Д'$, вращающимся навстречу диску $Д$ (рис. 2$б$) с точно такой же скоростью. Края выступов обоих дисков должны при этом встречаться точно в середине щели. Совершенно очевидно, что такая синхронизация двух вращающихся с громадной скоростью дисков практически неосуществима, если учесть потребные точности. Однако эту трудность можно легко обойти, если второй диск, движущийся навстречу первому, осуществить в виде перевернутого изображения первого диска в вогнутом зеркале. Тогда оптическая схема модулятора приобретает вид, изображенный на рис. 3$а$. Вогнутое сферическое зеркало $З_1$ в центре которого находится $Щ_2$ (уменьшенное объективом $О$

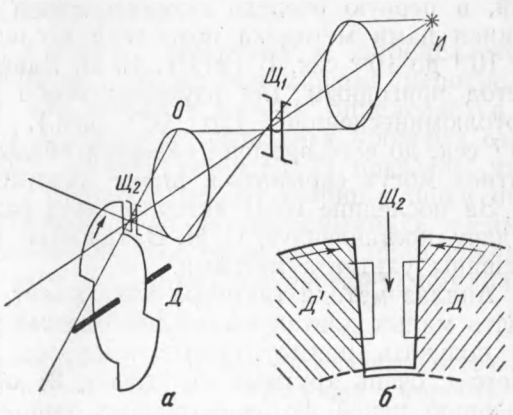

Рис. 2

изображение щели $Щ_1$), возвращает пучок света обратно, создавая действительное перевернутое изображение щели $Щ_2$ того же размера ($Щ_3$). Зеркало это немного повернуто вокруг горизонтальной оси, так что $Щ_3$ не совпадает с $Щ_2$, а располагается выше или ниже на одной вертикальной оси с $Щ_2$. Возвращенный пучок света проходит сквозь $О$ в обратном направлении, ниже или выше щели $Щ_1$, где он перехватывается маленьким зеркалом $З_2$ и направляется для возбуждения люминофора. Кварцевая пластинка $З_3$ отводит несколько процентов общего потока света в ФЭУ, осуществляющий развертку.

Поскольку все, что находится в плоскости изображений $Щ_2$ и $Щ_3$, изображается обратно зеркалом $З_1$ в этой же плоскости в перевернутом виде с сохранением масштаба, то и край диска $Д$ будет иметь своего оптического «двойника», движущегося навстречу ему и встречающегося

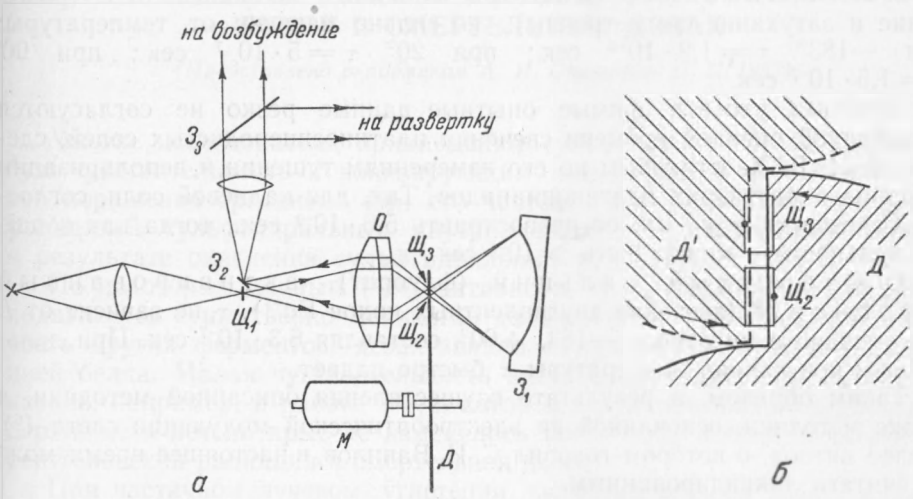

Рис. 3

с ним в середине изображений $Щ_2$ и $Щ_3$. Таким образом, возвращенный пучок света будет полностью «перерублен», когда «реальный» диск $Д$ закроет $Щ_3$ лишь наполовину и время фронта П-импульса будет сокращено вдвое (рис. 3 *б*).

Если ширина $Щ_1$ составляет 1 мм, $Щ_2$ 0,1 мм, диаметр $Д$ 20 см, скорость вращения $Д$ 12 тыс. об/мин, то время фронта составляет $8 \cdot 10^{-7}$ сек. Описанный выше прием оптического удвоения крутизны фронта дает тогда время фронта $4 \cdot 10^{-7}$ сек. Учитывая специфические свойства метода тауметра (см. выше), мы можем рассчитывать на возможность измерять гораздо более короткие времена. Действительно, как мы убедились, вариант светосильного модулятора с удвоением, в котором $Щ_2 = 0{,}5$ мм и в котором время фронта составляло всего лишь $\approx 2 \cdot 10^{-6}$ сек. (расчетная крутизна фронта была подтверждена измерениями по методу электрического дифференцирования [7]), позволял еще замечать инерцию в $5 \cdot 10^{-8}$ сек. Таким образом, практический предел возможностей ультратауметра с механическим модулятором света и использованием метода удвоения составляет, повидимому, $\approx 10^{-8}$ сек. К сожалению, достижение этого предела покупается ценой потери количества света.

Подчеркнем, что свойство тауметра и ультратауметра работать в области времен меньших, чем времена инерции узлов измерительной аппаратуры, не снимает задачи уменьшения инерции этих узлов. Это связано, во-первых, с тем, что безинерционная аппаратура позволяет наблюдать и с т и н н ы е кривые релаксации, а не их экспоненциальные

аппроксимации, что особенно ценно в случае неэкспоненциальной релаксации; во-вторых, с тем, что метод электрического дифференцирования кривых релаксации ([4, 7]), являющийся ценным дополнением метода тауметра, требует для получения количественных результатов как можно более безинерционной аппаратуры.

В заключение приведем в качестве примеров несколько результатов измерений, произведенных впервые при помощи описанного ультратауметра *.

1. Платиносинеродистый барий (желто-зеленая модификация). Время релаксации τ не зависит от интенсивности света E (разгорание и затухание симметричны) и постоянно в области температур от —183° до ≈100° (где вещество теряет кристаллизационную воду и необратимо перестает светиться), составляя $8 \cdot 10^{-7}$ сек.

2. Платиносинеродистый калий. τ не зависит от E (разгорание и затухание симметричны), но сильно зависит от температуры: при —183° $\tau = 1{,}2 \cdot 10^{-6}$ сек.; при 20° $\tau = 5 \cdot 10^{-7}$ сек.; при 90° $\tau = 1{,}5 \cdot 10^{-7}$ сек.

Отметим, что эти прямые опытные данные резко не согласуются с косвенной оценкой времени свечения платиносинеродистых солей, сделанной И. В. Хвостиковым по его измерениям тушения и деполяризации свечения в растворах платиноцианидов. Так, для калиевой соли, согласно Хвостикову, τ не может превосходить $5{,}6 \cdot 10^{-9}$ сек., тогда как в действительности τ может быть $> 10^{-6}$ сек.

3. Фтористый кальций (флуорит), активированный европием ** (свечение двухвалентных ионов Eu^{++}). τ не зависит от E и постоянно в интервале —183, +60°, составляя $6{,}3 \cdot 10^{-7}$ сек. При дальнейшем повышении температуры τ быстро падает.

Таким образом, в результате осуществления описанной методики, а также методики, основанной на электрооптической модуляции света ([6]), «белое пятно», о котором говорил С. И. Вавилов, в настоящее время можно считать ликвидированным.

Поступило
8 II 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Н. А. Толстой, П. П. Феофилов, ДАН, **58**, 389 (1947). [2] Н. А. Толстой, П. П. Феофилов, Усп. физ. наук, **41**, 44 (1950). [3] Н. А. Толстой, П. П. Феофилов, Изв. АН СССР, сер. физ., **13**, № 2, 216 (1949) (выступление С. И. Вавилова в прениях по докладу). [4] Н. А. Толстой, Тр. сессии ГОИ, посвящ. памяти С. И. Вавилова, 1953, стр. 171. [5] С. М. Рывкин, Изв. АН СССР, сер. физ., **15**, № 6, 721 (1951). [6] Н. А. Толстой, Н. Н. Ткачук, ДАН, **95**, 65 (1954). [7] Н. А. Толстой, Изв. АН СССР. сер., физ., **15**, № 6, 712 (1951). [8] И. А. Хвостиков, Тр. ГОИ, **12**, в. 104, 1 (1937). [9] П. П. Феофилов, ДАН, **99**, 731 (1954).

* Измерения произведены А. М. Ткачук.

** Монокристалл CaF_2(Eu) выращен И. В. Степановым. Спектрально-люминесцентные свойства его исследованы П. П. Феофиловым ([9]).