

5-92
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

P-282

Н. Вылков

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ
ВЫСВЕЧИВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ
СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

В НАНОСЕКУНДНОЙ ОБЛАСТИ

ЖТЭ, 1960, №1, с 30-33.

Дубна, 1959 год

Р-282

Н. Вылков

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ
ВЫСВЕЧИВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ
СЦИНТИЛЛЯТОРОВ
В НАНОСЕКУНДНОЙ ОБЛАСТИ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

А н н о т а ц и я

Предлагается метод измерения времени высвечивания органических сцинтилляторов, сравнимого с длительностью фронта используемого фотоумножителя. Возбуждение исследуемых образцов осуществляется γ -квантами радиоактивного препарата Co^{60} с интенсивностью 3 милликюри. Проведены измерения времени высвечивания стибьена, толана, раствора р-терфенила в фенилциклогексане и двух сцинтиллирующих пластмасс. Полученные значения постоянных времени высвечивания меняются от 5,6 до 11,8 наносекунд.

В в е д е н и е

Время высвечивания является одной из главных характеристик, определяющих качество сцинтиллирующих веществ. Интенсивность свечения органических веществ при прохождении ионизирующей частицы изменяется экспоненциально со временем; постоянную времени этой экспоненты условно называют временем высвечивания. В области физики элементарных частиц высоких энергий, где требуются хорошие разрешения по времени, материалы, используемые в качестве сцинтилляторов, должны обладать малыми временами высвечивания. Применение веществ с малыми временами высвечивания ведет к получению импульса с небольшим разбросом фронта на выходе фотоумножителя^{/1/}, а в случае использования схемы совпадений дает хорошее разрешающее время схемы^{/2/}. Поэтому в последние годы получили широкое распространение органические сцинтилляторы, как жидкие, так и твердые, обладающие временем высвечивания порядка нескольких наносекунд. Измерение столь коротких времен требует, очевидно, применения специальной методики. В связи с этим разработан ряд методов: осциллографический метод^{/3-13/}, в котором фотографируется импульс выходного тока фотоумножителя, метод изменения постоянной времени цепи нагрузки фотоумножителя^{/14-16/}, метод задержанных совпадений^{/17,18/}, энергетический метод^{/19/}, основанный на измерении мощности рассеиваемой выходным током фотоумножителя в сопротивлении нагрузки, метод короткозамкнутых линий^{/20-23/} и метод фазового флуорометра^{/24-35/}, в котором производится измерение разности фаз между модулированными световыми возбуждающими сигналами и результирующей флуоресценцией.

Все эти методы /исключая осциллографический/ предполагают почти точное воспроизведение выходным током фотоумножителя изменения во времени освещенности фотокатода сцинтиллятором, что наблюдается в том случае, когда длительность фронта импульса с выхода фотоумножителя пренебрежимо мала по сравнению со временем высвечивания. Это предположение является явно неспра-

ведливым для "быстрых" органических веществ, времена высвечивания которых оказываются сравнимыми с длительностью фронта, обусловленного размытием времени пролета электронов через фотоумножитель /2 ÷ 4 нсек/. Целью данной статьи является описание разработанного автором метода измерения времени высвечивания, сравнимого с размытием времени пролета электронов через фотоумножитель.

Форма импульса тока

Число электронов, достигающих в единицу времени анода фотоумножителя в результате эмиссии одного первичного электрона фотокатодом, статистически распределено по времени. Поскольку в литературе имеются указания как на хорошее согласие этого распределения с гауссовским законом /36/, так и на отсутствие такого согласия /37/, в дальнейшем будем предполагать, что в общем виде распределение выражается кривой $I_0(t)$. Очевидно, что

$$\int_0^{\infty} I_0(t) dt = M e, \tag{1/}$$

где e - заряд электрона, M - коэффициент усиления фотоумножителя, и время t отсчитывается с момента эмиссии электрона с фотокатода. Предполагая, что высвечивание сцинтиллятора изменяется во времени по экспоненциальному закону, число электронов, покидающих фотокатод за время dt , будет равно

$$dn = \frac{N}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} dt, \tag{2/}$$

где N - общее число электронов, покидающих фотокатод под действием сцинтилляций, τ - время высвечивания и время t отсчитывается с момента прохождения ионизирующей частицы через сцинтиллятор. Импульс тока, появившийся на выходе фотоумножителя в результате сцинтилляций, можно найти на основе интеграла наложения:

$$I(t) = \int_0^t I_0(t-x) \frac{N}{\tau} e^{-\frac{x}{\tau}} dx. \tag{3/}$$

Обозначим

$$I'_0(t) = N I_0(t)$$

Отсюда следует

$$I(t) = \int_0^t I'_0(t-x) \frac{1}{\tau} e^{-\frac{x}{\tau}} dx. \tag{4/}$$

Между распределениями $I'_0(t)$ и $I(t)$, характеризующими временные свойства фотоумножителя и интегральный ток, можно установить /см.приложение А/ следующие соотношения:

а/ Кривые $I(t)$ и $I'_0(t)$, начинаются в одной точке на оси абсцисс и в этой точке $\frac{dI}{dt} = 0$.

б/ Кривые пересекаются в той точке, где $I(t)$ проходит через максимум.

Общий вид кривых показан на рис.1. Площади этих кривых равны между собой по простому физическому соображению, что общий заряд, достигающий анода фотоумножителя, при вылете N электронов из фотокатода, не зависит от порядка вылета электронов. Для определения времени высвечивания можно применять уравнение II /приложение А/

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{1}{\tau} [I'_0(t) - I(t)], \quad /5/$$

если имеются кривые рис.1. Таким образом определяются экспериментально^{1/} кривые, соответствующие шумовому импульсу $I'_0(t)$ и сцинтилляционному импульсу $I(t)$. Кривая $I'_0(t)$ нормируется так, чтобы площади под этими кривыми были равны между собой. При этом одну из кривых нужно сместить относительно другой так, чтобы кривая $I'_0(t)$ пересекала $I(t)$ в максимум.

Однако для той области, где выполняется условие $I'_0(t) \ll I(t)$, время высвечивания определяется как /см.уравнение IV из приложения А/

$$\tau = -\frac{1}{\frac{d}{dt} [\ln I(t)]} \quad /6/$$

Получается, таким образом, очень простой с экспериментальной точки зрения метод, который требует определения только кривой $I(t)$ /и только в той области, где $I(t) \gg \gg I'_0(t)$ /. Определяем точки кривой $\ln I(t)$ и, используя прямолинейный участок кривой, определяем по уравнению /6/ время высвечивания τ .

Выбор постоянной времени цепи нагрузки фотоумножителя

Весь предыдущий анализ относится к анодному току. В действительности измеряется падение напряжения на нагрузочном сопротивлении R фотоумножителя. Поскольку параллельно этому сопротивлению всегда имеется паразитная емкость C , разумно поставить вопрос, в какой мере импульс напряжения на нагрузке воспроизводит форму анодного тока. Допустим сначала, что анодный ток меняется по экспоненциальному закону

^{1/} Например, осциллографическим методом.

$$i = I e^{-\frac{t}{\tau}} \quad /7/$$

В этом случае напряжение на сопротивлении нагрузки имеет вид /38/

$$u = \frac{R I}{1 - \frac{cR}{\tau}} \left[e^{-\frac{t}{\tau}} - e^{-\frac{t}{cR}} \right] \quad /8/$$

Если имеется неравенство $cR < \tau$, то после некоторого времени второй член в скобках становится пренебрежимо малым по сравнению с первым, кривые напряжения и тока подчиняются тому же закону /7/. Можно точно рассчитать время t_1 , через которое член $e^{-\frac{t}{cR}}$ становится более чем в K раз меньше первого члена. Из условия

$$e^{-\frac{t_1}{\tau}} \geq K e^{-\frac{t_1}{cR}} \quad /9/$$

следует

$$t_1 \geq \frac{2,3 \log_{10} K}{\alpha - 1} \tau, \quad /10/$$

где $\alpha = \frac{\tau}{cR}$. В связи с этим надо сделать два замечания. Во-первых, необходимо выполнение условия $cR < \tau$, и желательно, чтобы $cR \ll \tau$ в той степени, в которой это не снижает чрезмерно амплитуду импульса напряжения. Во-вторых, уравнение /10/ остается справедливым и при учете длительности фронта фотоумножителя, так как временной разброс электронов равносителен удлинению выходного импульса.

Экспериментальный метод

Для определения кривой $I(t)$ применен вариант метода короткозамкнутых линий. Принцип метода показан на рис.2а. Импульс, отраженный с изменением знака от короткозамкнутого конца линий, вычитается из первоначального импульса спустя интервал времени, равный двойному значению времени задержки линий. Заметим, что амплитуда отрицательного результирующего импульса U_p равна разности амплитуды отраженного импульса и мгновенному значению первоначального импульса, соответствующему моменту $t = T$ /измерения времени производятся по отношению к моменту прохождения первоначального импульса через максимум/. Поскольку амплитуда отраженного импульса не зависит от времени задержки линий /конечно, в некоторых пределах/, амплитуда отрицательного результирующего импульса однозначно указывает на мгновенное значение исследуемого сцинтилляционного импульса, соответствующее разным временам, определяемым временем задержки линий. Практически сначала определяется кривая зависимости амплитуды отрицательного импульса от задержки линии $U_p = U_p(T)$,

а потом вычитанием ординат U_p из максимального значения U_{pM} /рис.26/ получается падающая часть импульса напряжения с выхода фотоумножителя. Вышеизложенный принцип осуществляется с помощью устройства, схема которого изображена на рис.3. Отрицательный импульс с выхода фотоумножителя подается на вход схемы формирования короткозамкнутыми линиями. Положительный импульс /поскольку в этом случае первоначальный импульс отрицательный/ проходит через пиковый детектор, на выходе которого получается импульс той же амплитуды, но растянутый во времени. Этот импульс подается через катодный повторитель на измерительную схему. Измерительная схема состоит из стандартного усилителя-дискриминатора и пересчета ПС-10000. Измерение амплитуд /в относительном масштабе/, соответствующих разным длинам формирующей линии, производится при поддержании постоянной скорости счета путем изменения порога дискриминатора. Если скорость поддерживается постоянной, то порог дискриминатора пропорционален вероятнейшему значению статистического распределения импульсов по амплитудам /см.приложение Б/. По статистическим соображениям постоянное значение скорости счета было выбрано таким образом, чтобы среднее значение числа импульсов равнялось 10^4 при выдержке, равной 10 сек.

Примененный фотоумножитель ФЭУ-33 питался напряжением 3000 в с делителем:
 $R_1 = 440$ ком; $R_2 = 185$ ком; $R_3 = 360$ ком; $R_4 = 420$ ком; $R_{5-II} = 220$ ком; $R_{12} = 440$ ком; $R_{13} = 570$ ком; $R_{14} = 1,3$ Мом, $R_{15} = 2,2$ Мом. Последние три диода развязаны емкостями $C = 0,05$ мкф.

Поскольку входное сопротивление коаксиального кабеля РК-50, передающего сигнал к детектору, равно 150 ом, а входное сопротивление формирующего кабеля также равно 150 ом, анодная нагрузка фотоумножителя равнялась 75 ом. Оценивая паразитную емкость на выходе фотоумножителя $C \approx 20$ пф, получаем постоянную времени:

$$CR = 20 \cdot 10^{-12} \cdot 75 = 1,5 \text{ нсек},$$

что является нижним теоретическим пределом измеряемых величин времени высвечивания. Схема опыта показана на рис.4. Как видно, детекторный каскад собран на вакуумной лампе. Для этой цели используется высокочастотный триод 6С4П /сетка связана с анодом/. Внутреннее сопротивление эквивалентного диода равно:

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{S} = \frac{1}{19 \cdot 10^{-3}} \approx 50 \text{ ом}.$$

Так как паразитная емкость на выходе детекторного каскада не превышает 5 пикофарад, постоянная времени схемы заряда паразитной емкости меньше 1 наносекунды. Паразитная емкость детекторной лампы нейтрализуется посредством подстроечной емкости, включенной в анод первой лампы. Внешний вид установки показан на рис.5.

Результаты

Вышеизложенным методом были проведены измерения времени высвечивания нескольких органических сцинтилляторов. Исследуемые образцы устанавливались непосредственно на фотокатод и возбуждались γ -квантами источника Co^{60} с интенсивностью 3 милликюри. На рис.6 и 7 изображены экспериментальные кривые, соответственно, в линейном и логарифмическом масштабах по оси ординат. Как видно, в логарифмическом масштабе кривые становятся прямыми, и отклонения экспериментальных точек от прямых не превышают 5%, т.е. не выходят за пределы точности измерения. Из наклона прямых были определены значения времени высвечивания, указанные в нижеследующей таблице:

Т а б л и ц а 1

№ №	Сцинтиллирующее вещество	τ нсек
1.	Стильбен	9,4
2.	Дифенилацетилен /толан/	8,8
3.	3% р-терфенил + 0,2% РОРОР в фенилциклогексане	6,3
4.	5% р-терфенил в полистироле	5,6
5.	1,5% тетрафенилбутadiен в поливинил- толуоле	11,8

По произведенным оценкам полная точность измерений около 10%.

З а к л ю ч е н и е

Предложенный метод пригоден для определения с удовлетворительной точностью времени высвечивания в наносекундной области, где нельзя пренебречь длительностью фронта фотоумножителя. Полученные значения времени высвечивания трудно сравнивать с имеющимися в литературе данными, так как этот параметр зависит не только от рода возбуждения, температуры и размера сцинтиллятора, но также от метода и условий его изготовления и продолжительности облучения образца. Для примера в таблице 2 приведены некоторые литературные данные для кристалла стильбена.

Т а б л и ц а 2

№.№ пп	Литература	Вид пробы	Возбуждение	τ нсек.
1.	/8/	Кристалл	γ - кванты	6
2.	/23/	--	--	8,5
3.	/17/	--	--	5,7
4.	/26/	--	Ультрафиолетовое излучение	3,1
5.	/26/	--	γ - кванты	8
6.	/20/	--	--	13
7.	/16/	--	--	6,9
8.	/16/	--	α - частицы	7,2
9.	/12/	--	Рентгеновское излучение	8,2
10.	/31/	--	Ультрафиолетовое излучение	3.
11.	/31/	Порошок	--	1,7
12.	/13/	Кристалл 0,25 дюйм	Рентгеновское излучение	≤ 3
13.	/13/	-- 0,5 дюйм	--	6,4
14.	/10/	Кристалл	γ - кванты	4
15.	/7/	--	α - частицы	4,2
16.	/7/	--	β - частицы	4,7

П р и л о ж е н и е А

Для нахождения связи между кривыми $I(t)$ и $I_0'(t)$ в уравнении /4/ производится замена переменных:

$$\xi = t - x.$$

Тогда

$$I(t) = \frac{\epsilon^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau} \int_0^t I_0'(\xi) \epsilon^{\frac{\xi}{\tau}} d\xi. \quad (I')$$

Дифференцирование уравнения /I/ по времени дает искомую связь

$$\frac{dI}{dt} = \epsilon^{-\frac{t}{\tau}} I'_0(t) \epsilon^{\frac{t}{\tau}} - \frac{\epsilon^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau^2} \int_0^t I'_0(\xi) \epsilon^{\frac{\xi}{\tau}} d\xi =$$

$$= \frac{1}{\tau} [I'_0(t) - I(t)] \quad /II/$$

Если поделить /II/ на I(t), получается уравнение:

$$\frac{d}{dt} [\ln I(t)] = \frac{1}{\tau} \left[\frac{I'_0(t)}{I(t)} - 1 \right], \quad /III/$$

и, наконец, в той области, где $I(t) \gg I'_0(t)$:

$$\frac{d}{dt} [\ln I(t)] \approx -\frac{1}{\tau}, \quad /III'/$$

откуда следует

$$\tau = -\frac{1}{\frac{d}{dt} [\ln I(t)]} \quad /IV/$$

Приложение Б

Пусть $f(u)$ - дифференциальное распределение числа импульсов /за единицу времени/ в зависимости от амплитуды напряжения. Если изменить значение любого параметра, влияющего на амплитуды импульсов /так, чтобы, например, все импульсы увеличивались в K раз/, то получается новое распределение $f'(u)$.

Но, поскольку площади, ограниченные кривыми $f(u)$ и $f'(u)$ должны быть равны между собой /и равны общему числу импульсов/, имеется соотношение

$$f'(ku) = \frac{1}{k} f(u). \quad /V/$$

Если установить для распределения $f(u)$ порог дискриминации, равный u_0 , то скорость счета будет равна:

$$F = \int_{u_0}^{\infty} f(u) du. \quad /VI/$$

Если же установить для нового распределения $f'(u)$ порог дискриминации

$$u'_0 = \kappa u_0,$$

то легко доказать, что скорость счета не изменится. В самом деле, скорость счета равна во втором случае:

$$F' = \int_{\kappa u_0}^{\infty} f'(u) du. \quad /y11/$$

Введя замену переменных

$$u = \kappa x,$$

получаем

$$F' = \kappa \int_{u_0}^{\infty} f'(\kappa x) dx = \int_{u_0}^{\infty} f(x) dx = F,$$

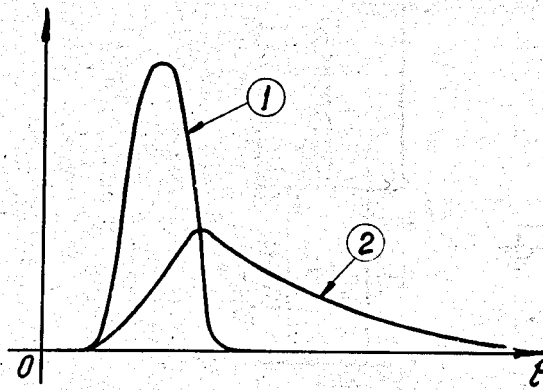
что и требовалось доказать.

Л и т е р а т у р а

1. Post R.F., Schiff L.I., Phys.Rev. 80, 1113, 1950.
2. Lundby A., Phys.Rev. 80, 477, 1950.
3. Broser V.I., Kallmann H., Zeits. f.Naturf. 2a, 439, 1947.
4. Broser V.I., Kallmann H., Zeits.f. Naturf. 2a, 642, 1947.
5. Collins G.B., Phys.Rev. 74, 1543, 1948.
6. Kelley G.G., Goodrich M., Phys.Rev. 77, 138, 1950.
7. Kallmann H., Brucker G.J., Phys.Rev. 108, 1122, 1957.
8. Post R.F., Shiren N.S., Phys. Rev. 78, 80, 1950.
9. Post R.F., Phys.Rev. 79, 735, 1950.
10. Singer S., Neher L.K., Ruehle R.A., Rev. Sci. Instr. 27, 40, 1956.
11. Sugarman R.M., Nucleonics 15, 94, 1957.
12. Phillips H.B., Swank R.K., Rev. Sci. Instr. 24, 611, 1953.
13. Swank R.K., Buck W.L., Rev.Sci. Instr. 1955, 26, 15.
14. Broser V.I., Kallmann H., Reuber C., Zeits.f.Naturf. 5a, 79, 1950.
15. Wright G.T., Garlick G.F., Brit.J.App.Phys. 5, 13, 1954.
16. Bittman L., Furst M., Kallmann H., Phys. Rev. 87, 83, 1952.
17. Lundby A., Phys. Rev. 80, 477, 1950.
18. Берлович Э.Е., Шияев Б.А., ПТЭ 1, 62, 1958.
19. Wright G.T., Proc. Phys. Soc. (B) 69, 358, 1956.
20. Elliot J.O., Liebson S.H., Myers R.D., Ravilious C.F., Rev.Sci. Instr. 21, 631, 1950.

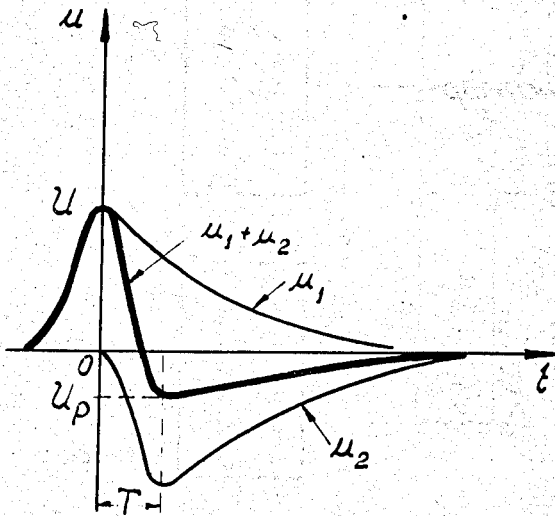
21. Ravillious C.F., Elliot J.C., Liebson S.H., PhysRev. 77, 851, 1950.
22. Liebson S.H., Nucleonics 10, 41, 1952.
23. Martinson O., Isaacs P., Brown H., Ruderman I., Phys.Rev. 79, 178, 1950.
24. Tumerman L.A., Journal of Phys.USSR, IV, 151, 1941.
25. Галанин М.Д., ДАН СССР, 73, 925, 1950.
26. Liebson S.H., Phys. Rev. 80, 907, 1950.
27. Schmillen A., Zeits.f.Physik, 135, 294, 1953.
28. Бонч-Бруевич А.М., Молчанов В.А., Широков В.И., Изв.Акад.наук, 20, 596, 1956.
29. Bailey E.A., Rollefsohn, G.K., Journ.Chem.Phys. 21, 1315, 1953.
30. Hanle V.W., Kotschak O., Scharmann A., Zeits.f.Naturf. 6a, 202, 1951.
31. Birks J.B., Little W.A., Proc. Phys. Soc. (A) 66, 921, 1953.
32. Ravillious C.F., Farrar R.T., Liebson S.H., Journ. Opt.Soc.Am. 44, 238, 1954
33. Rohde V.F., Zeits.f.Naturf. 8a, 156, 1953.
34. Hanle V.W., Janson H.G., Zeits.f.Naturf. 9a, 791, 1954.
35. Килин С.Ф., Павлов А.А., Розман И.М., ПТЭ, 2, 50, 1956.
36. Льюис И., Уелс Ф., Миллимикросекундная импульсная техника, Москва, 1956.
37. Swank R.K., Nucleonics, 12, 14, 1954.
38. Бонч-Бруевич А.М., Применение электронных ламп в экспериментальной физике, Москва, 1955.

Работа поступила в издательский отдел 21 января 1959 года

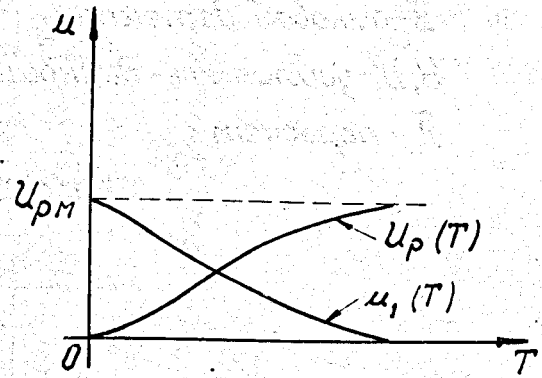


- ① - Кривая $I_0'(t)$
- ② - Кривая $I(t)$

Рис. 1

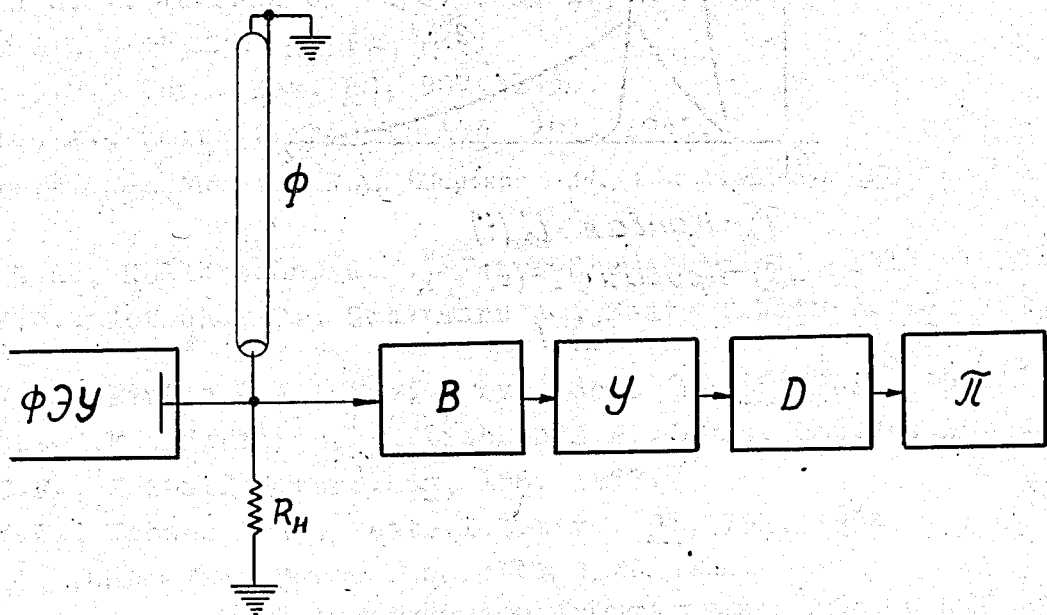


(a)



(б)

Рис. 2.



Φ - формирующая линия.
 B - пиковый детектор.
 $У, D$ - усилитель-дискриминатор
 Π - пересчет

Рис. 3.

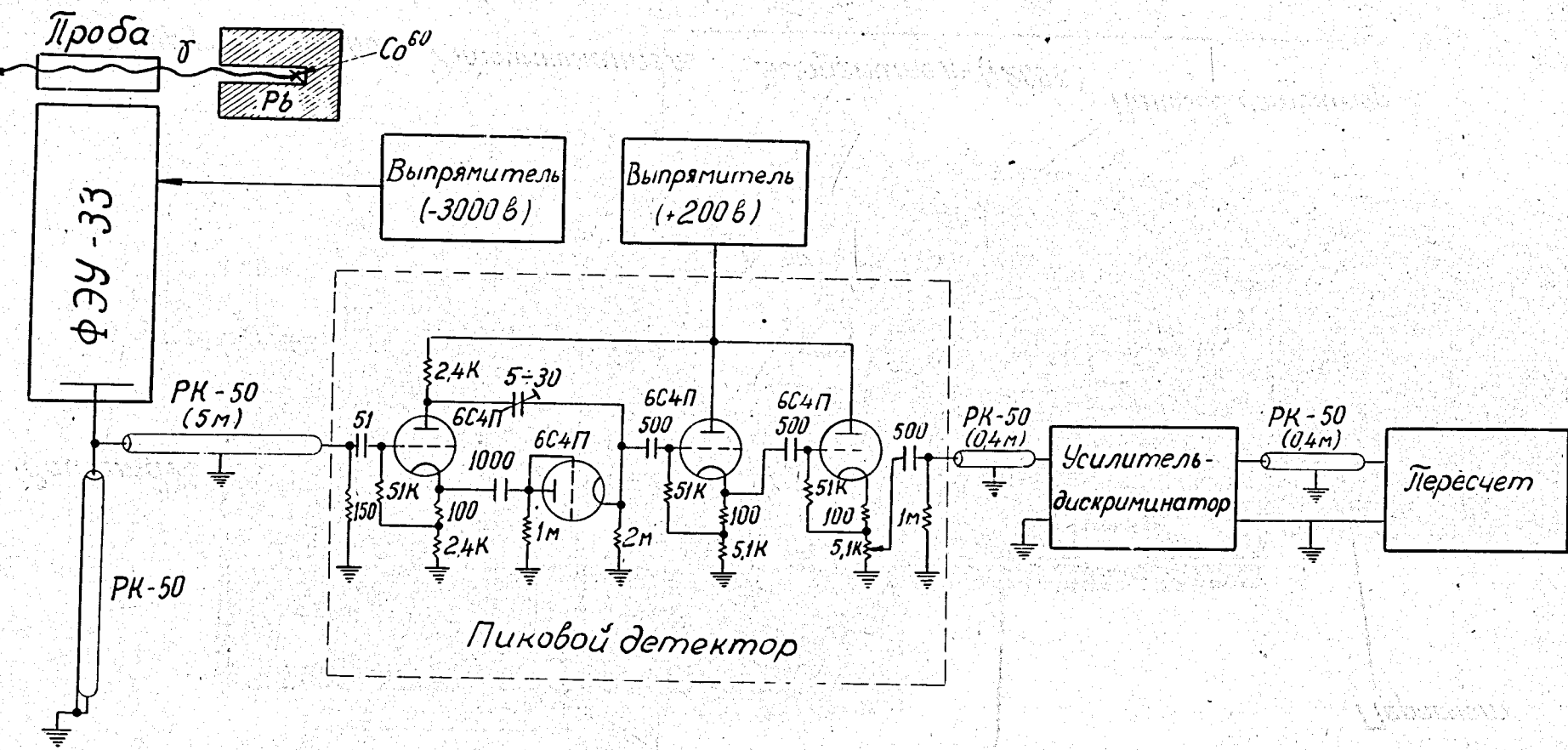


Рис. 4.

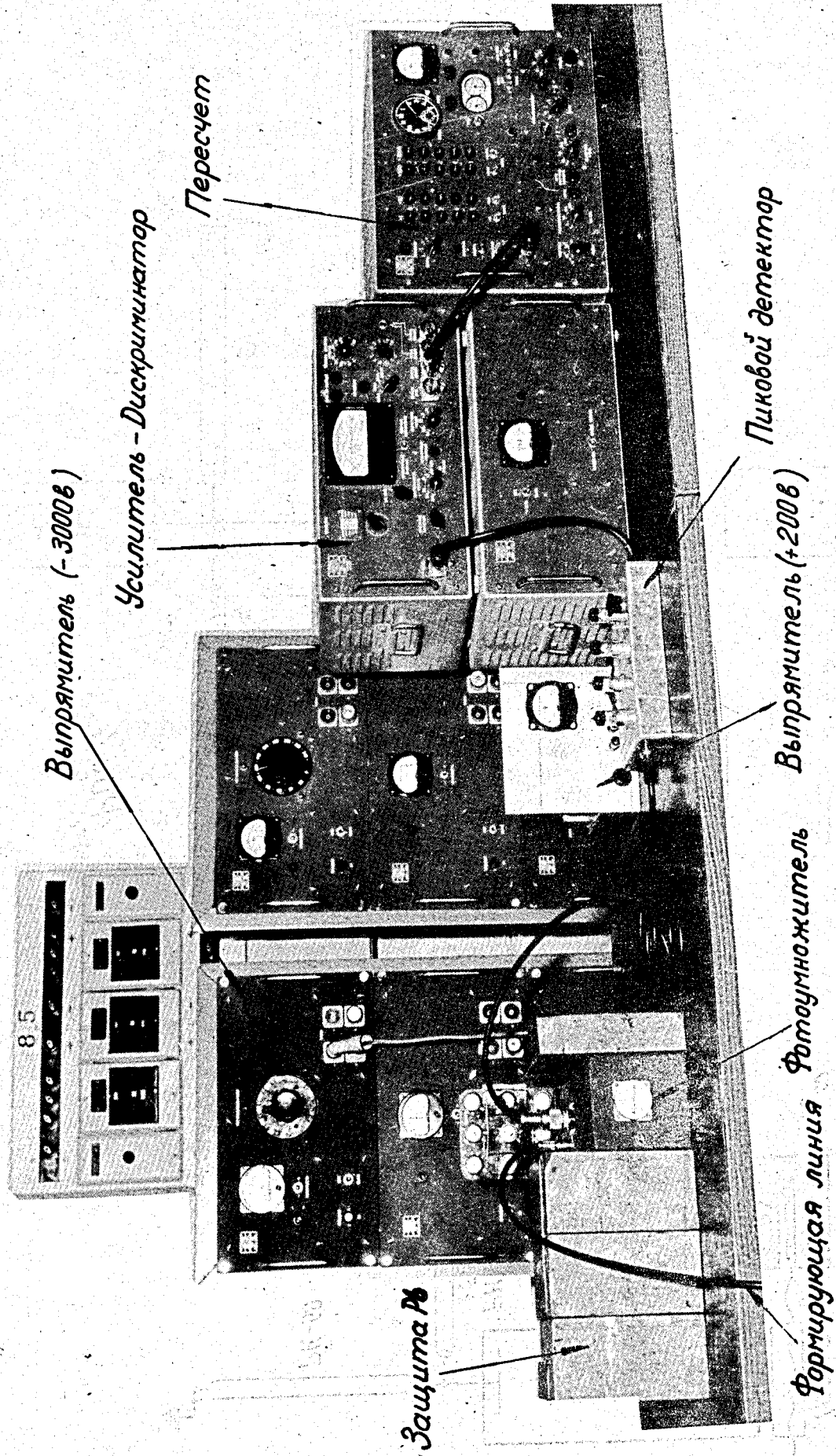


Рис. 5.

Рис. 6.

- ① - Стильден.
- ② - Дифенилацетилен.
- ③ - 3% р-мерфенил + 0,2% РОРР в фенилциклогексане.
- ④ - 5% р-мерфенил в полистироле.
- ⑤ - 15% тетрафенилбутадиен в поливинилпирролине.

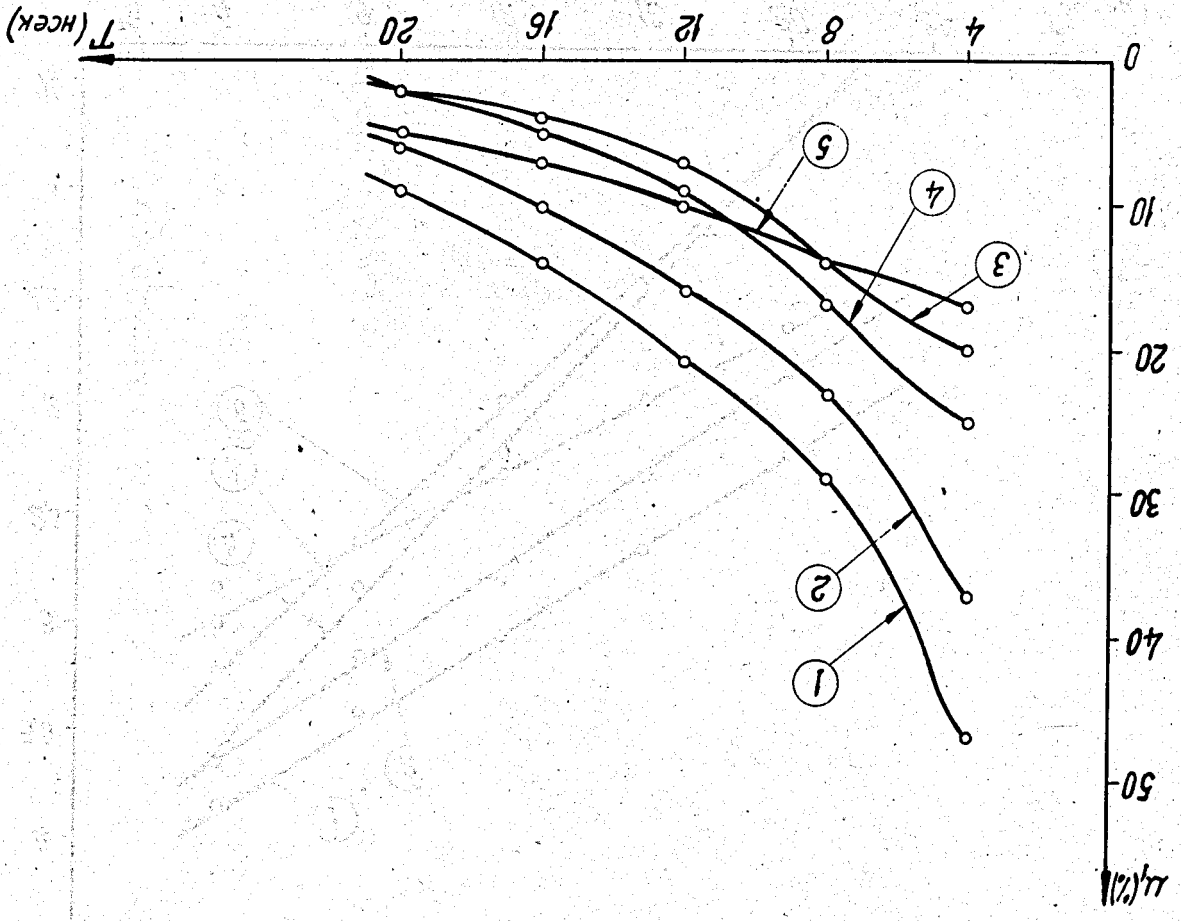


Рис. 7.

