

439  
A-248

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

15/III-65 ✓

1977



В.Г. Лапшин, М.Н. Омеляненко, И.В. Рыжиков,  
В.И. Рыкалин

АБСОЛЮТНО ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ОДНОЭЛЕКТРОННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ  
ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА  
НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

*ТТЭ, 1966, №1, с 149-153.*

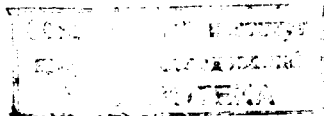
1965

1977

В.Г. Лапшин, М.Н. Омеляненко, И.В. Рыжиков,  
В.И. Рыкалин

ОДНОЭЛЕКТРОННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ  
ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА  
НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Направлено в ПТЭ



2991/3  
ар.

Импульсные источники света наносекундной длительности на основе электролюминесцентных диодов находят в последнее время широкое применение в экспериментальной ядерной физике и ряде других областей физического эксперимента. В экспериментальной ядерной физике импульсные источники света используются, в основном, для моделирования процесса прохождения ядерных частиц через систему сцинтилляционных и черенковских счетчиков и для исследования временных и амплитудных характеристик фотоумножителей<sup>/1,2/</sup>. В ряде случаев моделирования прохождения ядерных частиц длительность световых импульсов может изменяться в широких пределах, т.к. основная информация, получаемая с помощью сцинтилляционных и черенковских счетчиков, определяется амплитудой и моментом начала электрического импульса на выходе счетчика. Однако часто требуется получить с помощью импульсных источников световые импульсы длительностью  $0,5 \pm 3 \cdot 10^{-9}$  сек. Например, при моделировании двух событий, происходящих в одном счетчике и разделенных во времени интервалом в несколько наносекунд, необходимы импульсы света длительностью не более  $3 \cdot 10^{-9}$  сек ( $3 \cdot 10^{-9}$  сек – характерное время высвечивания пластических сцинтилляторов). Для исследования временных характеристик фотоумножителей длительность светового импульса от источника света должна быть заведомо меньше  $10^{-9}$  сек, т.к. только в этом случае форма электрического сигнала на выходе фотоумножителя будет определяться его собственными параметрами. Следовательно, представляет интерес изучение возможности получения световых импульсов длительностью менее  $10^{-9}$  сек.

Обычно измерение длительности светового импульса производится осциллографированием электрического импульса фотоумножителя, с помощью которого регистрируется световой импульс. Предельные временные характеристики фотоумножителя можно определить параметрами импульса на аноде фотоумножителя, вызванного единичным фотоэлектроном. На рис. 1 представлен усредненный по нескольким десяткам осциллограмм электрический импульс, соответствующий выбиванию единичного фотоэлектрона из катода временного фотоумножителя типа 56 AVP. Из приведенного рисунка видно, что собственные фронты нарастания и спада фотоумножителя 56 AVP составляют  $1,6 \cdot 10^{-9}$  и  $2,6 \cdot 10^{-9}$  сек соответственно при ширине на полувысоте импульса  $2,8 \cdot 10^{-9}$  сек. Учитывая, что в настоящее время нет еще фотоумножителей, значительно превосходящих по временным характеристикам фотоумножители типа 56 AVP, можно считать практически невозможным исследование с помощью прямого осциллографирования импульсов света длительностью менее  $10^{-9}$  сек. Ясно также, что необходим иной подход к решению такой задачи.

В данной работе описан одноэлектронный метод определения временных характеристик световых процессов и приведены результаты измерений этим методом длительностей световых импульсов от электролюминесцентных диодов из карбида кремния (SiC).

#### Принцип метода и постановка опыта

В основе одноэлектронного метода измерения временных характеристик световых процессов лежит дискретная структура света, т.е. тот факт, что свет состоит из отдельных фотонов.

Допустим, что есть некоторая последовательность одинаковых световых импульсов и чувствительность приемника позволяет регистрировать отдельные фотоны с эффективностью близкой к 100%.

Рассмотрим конкретный случай, когда за счет ослабления светового потока, приемник в среднем регистрирует один сигнал на десять световых импульсов. Естественно предположить, что количество фотонов, падающих на приемник, распределено по закону Пуассона  $P_k = \frac{(\bar{n})^k}{k!} e^{-\bar{n}}$ , где  $P_k$  в данном случае - вероятность падения на приемник  $k$  фотонов и  $\bar{n}$  - среднее число фотонов, падающих на приемник в течение светового импульса.

Вероятность отсутствия фотонов  $P_{k=0} = e^{-\bar{n}} \approx 0,9$ , откуда  $\bar{n} \approx 0,1$  и  $P_{k=1} = \bar{n} e^{-\bar{n}} = 0,09$

Найдем отношение  $\frac{P_{k>1}}{P_{k=1}}$ , характеризующее вероятность того, что сигнал приемника соответствует нескольким фотонам  $\frac{P_{k>1}}{P_{k=1}} = \frac{1 - P_{k=0} - P_{k=1}}{P_{k=1}} = \frac{1 - e^{-\bar{n}} - \bar{n} e^{-\bar{n}}}{\bar{n} e^{-\bar{n}}} = \frac{\bar{n}}{2} = 0,05$ , т.е. с вероятностью 95% сигнал приемника соответствует одному фотону.

Измеряя число фотонов, зарегистрированных в интервалах времени от  $t$  до  $t + \Delta t$ , и строя распределение количества фотонов в этих интервалах в зависимости от  $t$ , можно определить форму светового импульса, т.к. число фотонов в интервалах от  $t$  до  $t + \Delta t$  пропорционально интенсивности света в этих интервалах. Точность измерения формы световых импульсов этим методом определяется количеством фотонов в указанных интервалах, поэтому, увеличивая время измерения либо частоту импульсов света, можно получить любую статистическую точность определения формы импульса.

В работе<sup>/3/</sup> показано, что сигнал, регистрируемый на аноде фотоумножителя при достаточно малом количестве фотонов, падающих на фотоумножитель в течение импульса, с вероятностью близкой к 1 будет соответствовать единичному фотоэлектрону, выбитому из фотокатода. Например, если при квантовой эффективности 10%, на 10 световых импульсов регистрируется один сигнал на выходе фотоумножителя, то он с вероятностью 95% соответствует выбиванию одного фотоэлектрона. Таким образом с помощью фотоумножителя можно измерять длительность световых импульсов, используя одноэлектронный метод. Этот метод был ранее использован<sup>/4/</sup> для определения времен жизни возбужденных атомных уровней. Было получено временное разрешение не хуже  $5 \cdot 10^{-9}$  сек.

Известно, что временной разброс момента появления импульсов на аноде фотоумножителя, в основном, определяется флуктуациями времени пролета в промежутке фотокатод - первый диод и для временных фотоумножителей составляет  $1 - 3 \cdot 10^{-10}$  сек<sup>/5/</sup>, т.е. существует реальная возможность получения с помощью одноэлектронного метода временного разрешения порядка  $10^{-10}$  сек.

В работе<sup>/6/</sup> одноэлектронный метод был применен для исследования времен высвечивания жидких и пластических сцинтилляторов, что позволило получить временное разрешение установки лучше  $10^{-9}$  сек.

Авторами одноэлектронная методика использована для измерения времени высвечивания электролюминесцентных диодов из карбида кремния при возбуждении их электрическими импульсами длительностью  $10^{-9}$  сек по основанию.

Измерения были проведены двумя различными методами: фотографированием одноэлектронных импульсов фотоумножителя с экрана осциллографа с полосой пропускания 1000 Мгц и последующего временного анализа, а также с помощью время-амплитудного конвертора и последующего анализа на многоканальном анализаторе.

Блок-схема первого метода приведена на рис. 2.

Генератор 1 типа "Совво" позволяет получить импульсы длительностью около  $10^{-9}$  сек по основанию с амплитудой до 1 кв.

Напряжение питания фотоумножителя подбиралось таким образом, чтобы средний импульс от одного фотоэлектрона давал отклонение луча около 5 мм. Развертка осциллографа запускалась сигналом от генератора 1. С экрана осциллографа импульсы фотографировались нормально открытым киноаппаратом. Осциллограммы импульсов обрабатывались с помощью диакопа. Момент прихода импульса определялся по точке пересечения касательной к прямолинейному участку фронта нарастания импульса с линией развертки.

Описанным методом было исследовано десять сплавных p-n переходов на основе SiC.

На рис. 3 приведено типичное временное распределение одноэлектронных импульсов которое соответствует импульсу от сплавного p-n перехода. Хотя этот метод нагляден и дает высокую точность, он практически не применим к измерению световых импульсов большой длительности, так как обработка одного короткого импульса (возбуждающий электрический импульс  $10^{-9}$  сек) занимает 14 часов рабочего времени.

Поэтому одновременно с измерениями осциллографической методикой разрабатывалась новая схема измерительной установки, позволяющая использовать многоканальный амплитудный анализатор для записи временных распределений одноэлектронных импульсов.

Блок-схема установки приведена на рис.4.

Одноэлектронные импульсы с выхода ФЭУ поступают на один вход время-амплитудного конвертора 7. На другой вход подается импульс от генератора 1. Одновременно импульсы с ФЭУ подаются на дифференциальный дискриминатор 5, с помощью которого отбираются импульсы с амплитудами, соответствующими "окну" дискриминатора. Эти импульсы подаются на схему совпадений, на второй вход которой поступают импульсы от генератора 1. Сигналы совпадений запускают 256-канальный амплитудный анализатор 8. С выхода время-амплитудного конвертора импульсы подаются на вход анализируемого сигнала многоканального анализатора.

Время-амплитудный конвертор преобразует интервал времени между двумя входными импульсами в амплитуду и позволяет, таким образом, преобразовать временной спектр в амплитудный. Линейность время-амплитудного конвертора в рабочем диапазоне составляла 1,2% при ширине канала  $6 \cdot 10^{-11}$  сек. Для определения собственного временного разрешения системы можно использовать источник света с заранее известным фронтом нарастания. Однако этот фронт должен быть не более  $10^{-9}$  сек, а измерение времен в таком диапазоне и является целью работы. Поэтому пришлось исследовать ряд импульсных источников света различных конструкций и выбрать в качестве эталонного импульсный источник с лучшими временными характеристиками.

На рис. 5 приведено временное распределение одноэлектронных импульсов от эталонного источника, запускаемого электрическим импульсом длительностью  $10^{-9}$  сек.

Это распределение позволяет утверждать, что собственное временное разрешение системы, по крайней мере, лучше приведенного распределения, ширина на полувысоте которого составляет  $0,72 \cdot 10^{-9}$  сек. На рис. 6 и 7 приведены типичные распределения, соответствующие световым импульсам от сплавных переходов при запуске их в прямом и обратном направлениях соответственно.

Результаты измерений временных характеристик световых импульсов от переходов из карбида кремния, полученных с помощью осциллографического метода и время-амплитудного конвертора, находятся в хорошем согласии, что видно из сравнения рис. 3 и 6.

На рис. 8 и 9 приведены типичные временные распределения, соответствующие световым импульсам от диффузионных p-n переходов из SiC при запуске их в прямом и обратном направлениях соответственно.

При снятии всех приведенных временных распределений использовалась лишь центральная часть фотокатода диаметром 3 мм. Освещение всего фотокатода приводит к размытию временных распределений, что связано с зависимостью времени пролета электронов в фотоумножителе от расстояния точки выбивания фотоэлектронов до центра фотокатода.

На рис. 10 представлены временные распределения одноэлектронных импульсов, соответствующие световым импульсам от стандартного импульсного источника света при освещении центральной части (а) и всего (б) фотокатода.

Заметное уширение временного распределения при освещении всего фотокатода, характеризующее зависимость времени пролета фотоэлектронов от точки выбивания, указывает на возможность исследования временных характеристик фотоумножителей с помощью одноэлектронного метода.

### З а к л ю ч е н и е

Приведенные результаты показывают, что одноэлектронная методика измерения временных характеристик световых импульсов позволяет исследовать световые импульсы длительностью менее  $10^{-9}$  сек при интенсивности, соответствующей попаданию на фотокатод нескольких фотонов в течение светового импульса.

Эти два фактора - высокое временное разрешение и предельно низкая интенсивность падающего света дают возможность надеяться, что описанная методика найдет широкое применение при измерении времен релаксации носителей в полупроводниках с излучательной рекомбинацией, при измерениях зависимости времен релаксации от длины волны и т.д. Открывается возможность исследования временных характеристик фотоумножителей на уровне отдельных фотоэлектронов, что совершенно исключает субъективный фактор зависимости получаемых временных характеристик от амплитуд световых импульсов, с помощью которых проводятся измерения.

В заключение авторы пользуются случаем поблагодарить Цао Го-чжэна за любезно предоставленный время-амплитудный конвертор и Ю.Д.Прокошкина за ряд полезных обсуждений и постоянный интерес к работе.

### Л и т е р а т у р а

1. А.Ф.Дунайцев, В.И.Рыкалин, Ю.Д.Прокошкин, В.И.Петрухин, ЖЭТФ, 47, 84 (1984).
2. А.Ф.Дунайцев, В.И.Петрухин, Ю.Д.Прокошкин, В.И.Рыкалин, "Скоростной пятилучевой осциллограф". Препринт ОИЯИ 1588 (1984).
3. L.G.Hyman, R.M.Schwartz. Rev. Sci. Instr., 35, 393 (1964).
4. W.R.Bennett, J.A.Javan, E.A.Ballik. Bull. Am. Phys. Soc., 5, 496 (1960).
5. G.Pietri, J.Nussli, M.Brautl. Proc. of Intern. Symp. on Nucl. Electronics, Paris (1963).
6. J.Koehlin, A.Raviart. Nucl. Instr. Meth., 29, 45 (1964).

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 января, 1985 г.

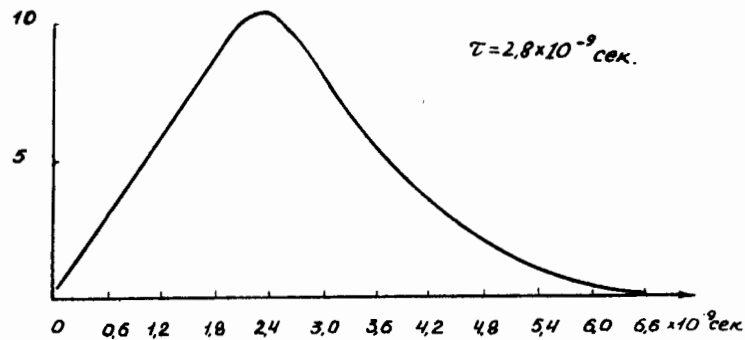


Рис. 1. Форма электрического импульса фотоумножителя 56 AVP, соответствующего выбиванию одного фотоэлектрона с фотокатода.

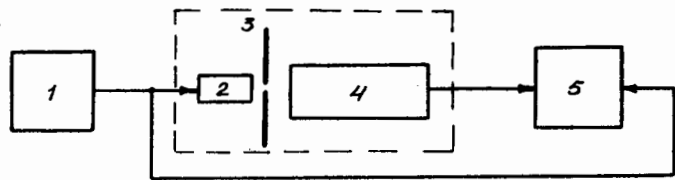


Рис. 2. Блок-схема измерения временных характеристик световых импульсов электронным методом с помощью осциллографа.

1. Генератор наносекундных импульсов типа "Cossor"
2. Электр люминесцентный диод
3. Диафрагма
4. Фотоумножитель типа 56 AVP
5. Осциллограф с полосой пропускания 1000 Мгц.

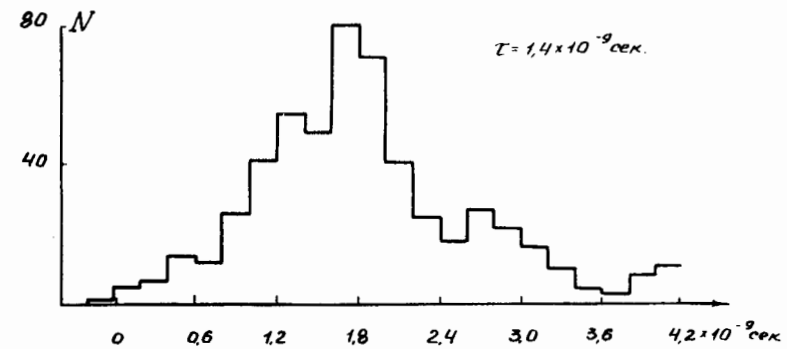


Рис. 3. Типичное временное распределение одноэлектронных импульсов, соответствующие световому импульсу от сплавного перехода из SiC, запущаемого в прямом направлении. N - число импульсов на выбранный интервал времени  $\Delta t$ .  $\tau$  - ширина распределения на полувысоте.

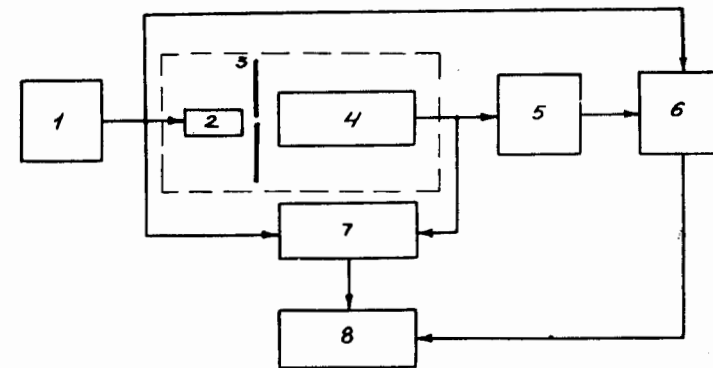


Рис. 4. Блок-схема измерения временных характеристик световых импульсов с помощью время-амплитудного конвертора и многоканального анализатора.

1. Генератор наносекундных импульсов типа "Cossor".
2. Электр люминесцентный диод.
3. Диафрагма.
4. Фотоумножитель типа 56 AVP
5. Дифференциальный дискриминатор.
6. Схема совпадений.
7. Время-амплитудный конвертор.
8. 256-канальный амплитудный анализатор.

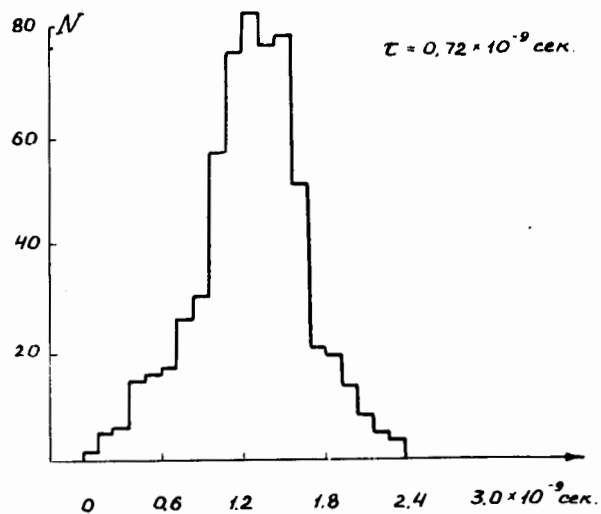


Рис. 5. Временное распределение одноэлектронных импульсов, соответствующее световому импульсу от эталонного источника световых импульсов.

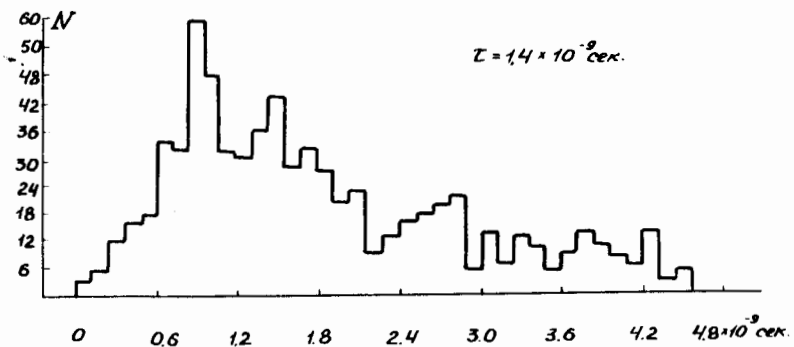


Рис. 6. Типичное временное распределение одноэлектронных импульсов, соответствующее световому импульсу от сплавного p-n перехода при запуске в прямом направлении.

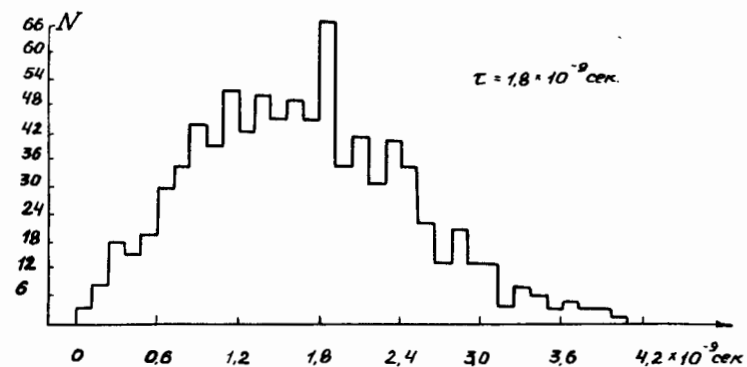


Рис. 7. Типичное временное распределение одноэлектронных импульсов, соответствующее световому импульсу от сплавного p-n перехода при запуске в обратном направлении.

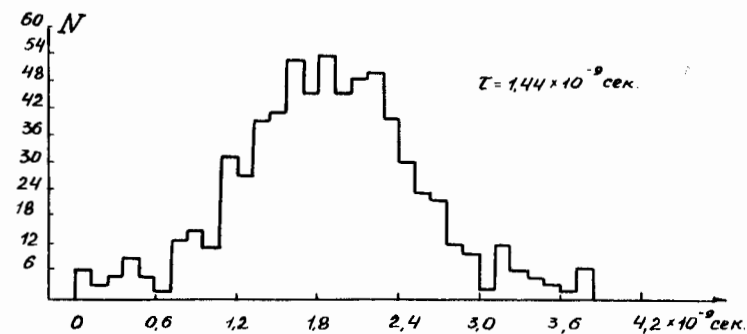


Рис. 8. Типичное временное распределение одноэлектронных импульсов, соответствующее световому импульсу от диффузионного p-n перехода на основе SiC при запуске в прямом направлении.

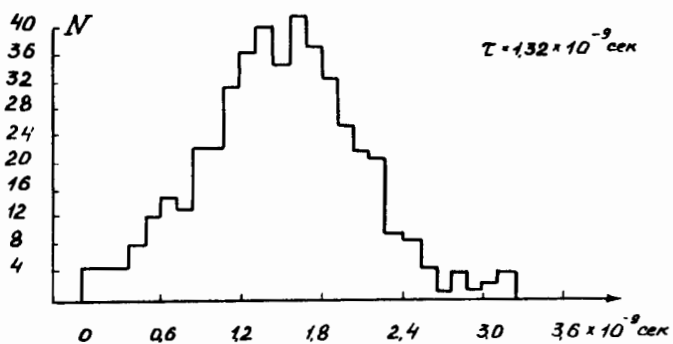


Рис. 9. Типичное временное распределение одноэлектронных импульсов, соответствующее световому импульсу от диффузионного р-п перехода на основе SiC при запуске в обратном направлении.

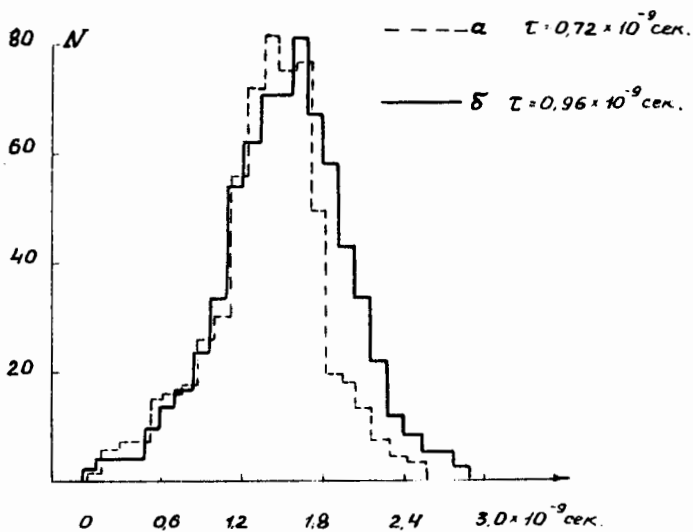


Рис. 10. Временные распределения, соответствующие освещению центральной части фотокатода (а) и всего фотокатода (б).