

С 344.4

Р-94

5/II-66г.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2486



В.И. Рыкалин, Т.Г. Кмита,
И.В. Рыжиков, И.А. Новоселова

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИ. В
СВЕТА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ
ФИЗИКЕ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1965

В экспериментальной ядерной физике для регистрации ядерных частиц в настоящее время широко используются сцинтилляционные и черенковские счетчики. Основу этих счетчиков составляют фотоэлектронные умножители, поэтому определение временных и амплитудных характеристик, выбор оптимального режима питания фотоумножителей является необходимым условием успешного проведения эксперимента. При использовании в физических исследованиях многоканальных сцинтилляционных и черенковских осциллографов появляются задачи временного согласования счетчиков, калибровки и периодической проверки работы всех каналов осциллографов и регистрирующих устройств. В значительной мере решение указанных задач облегчается при применении управляемых импульсных источников света наносекундной длительности.

С целью получения коротких световых импульсов различными авторами был исследован широкий круг явлений и методов, начиная от прерывания постоянного светового потока системой вращающихся зеркал^{/1/}.

Существенным шагом в решении проблемы импульсных источников света наносекундной длительности явилось создание водородных и воздушных разрядников, которые работают как в автоколебательном режиме, так и при запуске высоковольтными импульсами с амплитудой в несколько киловольт^{/2/}. Длительность светового импульса при работе разрядников в автоколебательном режиме составляет 1-3 нсек (по ширине светового импульса на полувысоте). Газовый разряд, возникающий при замыкании контактов в ртутном реле, также позволяет получить световые импульсы длительностью в несколько наносекунд^{/3/}, причем стабильность светового импульса от ртутного реле значительно выше, чем от водородных и особенно воздушных разрядников, у которых под действием разрядов изменяется поверхность электродов. Основным недостатком газоразрядных импульсных источников света состоит в том, что практически невозможно синхронизировать работу нескольких источников. Для водородных и воздушных разрядников это связано со статистическим запаздыванием начала пробоя газового промежутка относительно приложенного электрического импульса. Свести возникающий вследствие этого разброс появления светового импульса до необходимой величины (менее 1 нсек) простыми средствами не удастся. В случае ртутных реле синхронизация невозможна из-за инерционности механической системы подвижного контакта реле. Строгая синхрон-

ность срабатывания нескольких импульсных источников света необходима для ряда применений, примеры которых будут приведены ниже.

В работе A. Whetstone /4/ был описан импульсный источник света на основе р-п перехода из кремния. Принцип работы источника основан на свечении микроплазмы при обратном пробое р-п перехода. При длительности фронтов электрических импульсов менее 1 нсек передний и задний фронты световых импульсов, по измерениям с помощью временного фотоумножителя, не превышают 1-2 нсек.

Квантовый выход, по примерным оценкам, составляет 10^{-8} фотон/электрон, причем спектральное распределение излучения таково, что на видимую область приходится не более 20% общего числа испускаемых фотонов. Длинноволновая граница чувствительности фотоумножителей, применяемых в сцинтилляционных и черенковских счетчиках, обычно лежит в области 550 - 600 нм, поэтому эффективно может быть использована приблизительно лишь десятая часть числа фотонов, излучаемых источником света на основе кремния. Основным недостатком таких источников света является необратимое уменьшение светового выхода при непрерывной эксплуатации. Так, уже за несколько часов работы источника с частотой 100 гц при световом импульсе, эквивалентном сцинтилляции от электрона, теряющего 100 кэв в пластмассовом сцинтилляторе, р-п переходы разрушаются и значительно падает выход света /5/. Сплавные р-п переходы из фосфида галлия также позволяют получать при обратном пробое короткие световые импульсы с длительностью фронтов не более 1-2 нсек /6/. Квантовый выход таких источников составляет 10^{-8} фотон/электрон. Данные по стабильности источников из фосфида галлия не приводятся.

Для получения наносекундных световых импульсов используются и так называемые "коронные лампы" /7,8/. Пороговая амплитуда электрических импульсов для известных типов "коронных ламп" составляет 300-400 в при собственном амплитудном разбросе около 10%.

Относительно высокие амплитуды электрических импульсов требуют тщательной экранировки источника света от фотоумножителя, чтобы исключить наводки на анод фотоумножителя. Кроме того, затрудняется одновременный запуск десяти и более источников света, т.к. в этом случае амплитуда электрического импульса должна составлять несколько киловольт при длительности импульса в несколько наносекунд.

В данной работе приводятся некоторые характеристики импульсных источников света наносекундной длительности на основе р-п переходов из карбида кремния и фосфида галлия, а также описывается их применение в ряде экспериментальных работ, выполняемых на синхротроне Объединенного института ядерных исследований.

Спектральные и амплитудные характеристики источников света из карбида кремния

Импульсные источники света из карбида кремния (SiC) и фосфида галлия (GaP) излучают световые импульсы при пропускании импульсов тока через р-п переходы в прямом направлении. Световые импульсы наблюдаются также и при пропускании тока в обратном направлении, однако амплитуда электрического импульса значительно превышает амплитуду импульса в случае пропускания тока в прямом направлении (при одинаковом световом сигнале).

На рис. 1 и рис. 2 приведены спектральные распределения излучения источников света и для сравнения дана спектральная чувствительность сурьмяноцезиевого фотокатода. Спектры источников снимались в режиме счета фотонов на спектрофотометре СФ-4 при ширине щели 0,5 мм. Блок-схема установки приведена на рис. 3. На источники света подавались электрические импульсы длительностью $50 \div 100$ нсек, при этом ток в импульсе через источники составлял $1 \div 3$ а. Чтобы получать одинаковую статистическую точность, в каждой измеряемой точке определялось время, в течение которого на пересчетном приборе набиралось одно и то же число импульсов (10^4) при включенном и выключенном источнике света. Эти числа приводились к единичному интервалу времени делением на время измерения, и затем находились разности приведенных величин. Измерения при выключенном источнике давали числа шумовых импульсов. Отношение сигнал/шум в максимуме спектрального распределения составляло 20.

Для измерения амплитудных характеристик использовалась установка, блок-схема которой приведена на рис. 4. С помощью этой установки была измерена зависимость амплитуды светового импульса от амплитуды импульса тока, пропускаемого через источник света. Типичные примеры таких зависимостей для источников из SiC и GaP приведены на рис. 5. Амплитуда светового сигнала определялась по положению максимума амплитудного распределения импульсов с фотоумножителя. Анализатор работал в режиме управления от генератора наносекундных импульсов.

Квантовый выход, определенный с помощью калиброванного кремниевого фотодиода, меняется в пределах $10^{-5} \div 10^{-8}$ фотон/электрон для различных образцов источников света из SiC и $10^{-4} \div 10^{-5}$ для источников из GaP. При запуске GaP источников в обратном направлении выход света обычно в 2-3 раза меньше, чем при запуске в прямом направлении. Световой импульс при запуске в обратном направлении появляется при амплитудах электрического импульса, превышающих напряжение пробоя р-п переходов из GaP /6/.

Определение амплитудного разброса основывалось на предположении, что ампли-

тудное распределение импульсов на выходе фотоумножителя близко к гауссовскому^{/8/} и, следовательно, полуширина распределения обратно пропорциональна корню квадратному из амплитуды световых вспышек. На основании этого можно считать, что $\eta^2 = \frac{a}{A} + \eta_{\text{ист}}^2$, где η — полуширина на полувысоте амплитудного распределения импульсов на выходе; константа постоянна; A — амплитуда импульсов света; $\eta_{\text{ист}}$ — полуширина на полувысоте амплитудного распределения импульсов света, т.е. собственный амплитудный разброс. Измеряя полуширины на полувысоте амплитудного распределения импульсов от фотоумножителя при каждом значении амплитуды импульсов света, можно построить зависимость η^2 от $1/A$. Экстраполируя эту зависимость, получим при $1/A = 0, \eta(0) = \eta_{\text{ист}}$. На рис. 5 приведена зависимость $\eta^2(1/A)$ при длительности электрических импульсов 23 нсек и токе в импульсе 1 а. Амплитуда импульсов света, попадающих на фотокатод, изменялась диафрагмированием светового потока от импульсного источника. Амплитудный разброс импульсных источников света, определенный описанным способом, оказался равным ($1 \pm 0,2\%$). Стабильность амплитуды импульсных источников света во времени определялась го изменению положения максимума амплитудного распределения импульсов фотоумножителя. При этом для сравнения на анализатор подавались электрические импульсы, запускающие источники света. За 10 часов непрерывной работы при сохранении положения пика от запускающих импульсов максимум амплитудного распределения импульсов фотоумножителя ушел на 1%.

Таким образом, можно считать, что амплитуда импульсов света меняется за 10 часов работы меньше, чем на 1%. Кроме того, по измерениям на осциллографе источники света не изменяют своих характеристик (с точностью до 3%) в течение 1000 часов нормальной эксплуатации (частота электрических импульсов—50 гц, длительность импульса—10 нсек, ток в импульсе через источники—1а).

Температурная зависимость амплитуды импульсов света от источников измерялась с помощью установки, блок-схема которой приведена на рис. 7. Источники света помещались в этиловый спирт, который мог охлаждаться жидким азотом, либо нагреваться электрическим нагревателем. Значение амплитуды света определялось по максимуму амплитудного распределения на выходе фотоумножителя.

Типичные температурные зависимости для источников света из SiC и GaP приведены на рис. 8.

Временные характеристики импульсных источников света

На рис. 9 изображена блок-схема установки для измерения временных характеристик импульсных источников света. Генератор электрических импульсов наносекундной длительности позволяет получить импульсы длительностью от 1 до 100 нсек при амплитуде до 2 кв.

Световые импульсы регистрировались с помощью временного фотоумножителя типа 58 AVP, обеспечивающего ток в импульсе до 1а. Собственные фронты нарастания и спада фотоумножителя не превышают 3—4 нсек.

В случае SiC источников света, запускаемых электрическими импульсами длительностью $10 \div 100$ нсек в прямом направлении, передний фронт светового импульса составляет 3—5 нсек и задний фронт не превышает обычно 10 нсек. С уменьшением длительности электрического импульса фронты импульсов света также уменьшаются, и при длительности электрического импульса по основанию в 1 нсек длительность импульса с фотоумножителя по основанию составляет 8—15 нсек для различных образцов источников света из SiC. На рис. 10а, б представлены осциллограммы импульсов фотоумножителя 58 AVP при запуске источника из SiC электрическими импульсами длительностью в 1 и 50 нсек. Собственные фронты световых импульсов от источников из GaP, запускаемых в прямом направлении, составляют 10—40 нсек. При работе в обратном направлении длительности фронтов импульсов на выходе фотоумножителя для большинства источников определяются собственными параметрами ФЭУ, независимо от длительности электрического импульса.

Осциллограммы импульсов фотоумножителя 58 AVP при работе от GaP источников представлены на рис. 11 а, б. По размытию переднего фронта импульса фотоумножителя можно определить, что разброс начала светового импульса относительно электрического значительно меньше 1 нсек. Измерения разброса с помощью время-амплитудного конвертера по блок-схеме рис. 12 дали величину менее 0,1 нсек.

На рис. 13 представлена кривая временного разрешения конвертера при совпадении световых импульсов источника света с запускающими электрическими импульсами. Амплитудный разброс импульсов на выходе фотоумножителя составлял в этом случае 8%.

При длительности электрического импульса в 1 нсек длительность светового импульса была измерена с помощью одноэлектронного метода^{/9/}. Временные распределения одноэлектронных импульсов, соответствующие световым импульсам от SiC источника и GaP источника, представлены на рис. 14 а, б. Ширина распределения на полувысоте составляет 1,4 нсек для SiC источников и 0,72 нсек для GaP источников. В работе^{/9/} GaP источник использовался для оценки аппаратурного разрешения установки.

Приведенные результаты показывают, что при исследованиях временных характеристик фотоумножителей должны применяться GaP источники. В то же время источники света из SiC менее критичны к токовым перегрузкам и могут успешно использоваться в качестве реперных датчиков для проверки и калибровок сложных годоскопических систем, т.е. в тех случаях, когда необходима высокая надежность источников света.

Практическое отсутствие временного разброса светового импульса относительно электрического и незначительность собственного амплитудного разброса полупроводниковых источников света позволяют исследовать режим работы фотоумножителей с помощью осциллографа. Это значительно облегчает выбор оптимального режима питания фотоумножителей как для спектрометрических, так и для временных измерений. Кроме того, существенно упрощается изучение ряда специфических вопросов, как, например, вопроса о динамической усталости фотоумножителя. Предполагалось, что если после большого светового импульса следует через несколько наносекунд импульс с меньшей амплитудой, то на выходе фотоумножителя электрический сигнал, соответствующий малому световому импульсу, будет значительно подавлен последствием первого сигнала. Это, действительно имеет место при насыщении фотоумножителя первым световым импульсом. Однако в линейной области работы фотоумножителя динамическая усталость не наблюдается, что легко показать, используя полупроводниковые источники света для получения парных световых импульсов с регулируемым временным интервалом между ними. На рис. 15 а, б приведены осциллограммы импульсов на выходе фотоумножителя 58 AVP при временном интервале между импульсами света 22 нсек и 5 нсек. При сближении импульсов света (рис. 15б) форма электрического импульса на выходе фотоумножителя точно соответствует сумме двух импульсов рис. 15 а, что и доказывает отсутствие динамической усталости в линейной области работы фотоумножителя. Аналогичные результаты были получены для фотоумножителей ФЭУ-33, ФЭУ-36 и ФЭУ-30. Парные световые импульсы с регулируемым временным интервалом между ними можно получить как с помощью двух источников, подавая на них сдвинутые во времени электрические импульсы, так и с помощью одного источника при запуске его парными электрическими импульсами. Оба этих метода получения парных световых импульсов дают идентичные результаты вплоть до полного наложения импульсов света. Это также доказывает, что у полупроводниковых источников света практически не наблюдается мертвого времени.

Полупроводниковые источники света позволяют достаточно точно моделировать процесс прохождения регистрируемых частиц через черенковские и сцинтилляционные счетчики. На рис. 16 а, б представлены кривые временного разрешения схемы совпадений, работающей от двух фотоумножителей, регистрирующих сцинтилляцию α -частиц Pu^{239} в пластмассовом сцинтилляторе (свет от сцинтилляций разводится на оба фотоумножителя) и световые импульсы от двух источников света из карбида кремния. Полная идентичность кривых показывает, что настройка схем совпадений и всего измерительного тракта во многих случаях может быть приведена с помощью источников света без потока частиц.

В Объединенном институте ядерных исследований импульсные источники света были успешно использованы в установке для исследования β -распада π^+ -мезона [11].

Исходя из гипотезы сохранения векторного тока, относительную вероятность β -распада пиона $\lambda = \frac{w(\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu)}{w(\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu)}$ можно определить с погрешностью, не превышающей нескольких процентов, она равна $1 \cdot 10^{-8}$. Экспериментальное исследование β -распада π^+ -мезона связано с регистрацией крайне редких событий на уровне большого постринного фона. Основные исследования этого процесса были проведены с помощью системы черенковских и сцинтилляционных счетчиков, блок-схема которой представлена на рис. 17. Пионы проходили через ряд сцинтилляционных счетчиков (1-5) и осциллировали в сцинтилляторе последнего счетчика (6), предназначенного для регистрации позитрона распада: γ -кванты от распада π^0 -мезонов регистрировались черенковскими спектрометрами (7). Между счетчиком 6 и спектрометрами были помещены сцинтилляционные счетчики (8), защищавшие спектрометры от заряженных частиц (счетчики антисовпадений). Черенковские спектрометры и счетчик 6 были включены в схему совпадений с "задержанными воротами" длительностью $8 \cdot 10^{-8}$ сек, которая запускала развертку пятилучевого осциллографа. Импульсы от всех счетчиков и спектрометров смешивались и подавались на входы пятилучевого осциллографа. Все счетчики и спектрометры были снабжены импульсными источниками света из карбида кремния, при помощи которых можно было моделировать остановку пиона и распад. Электрические импульсы подавались на все источники одновременно с помощью системы, блок-схема которой приведена на рис. 18.

Генератор наносекундных импульсов (2) и разветвитель (3) располагались рядом с черенковскими и сцинтилляционными счетчиками, дистанционное управление системой осуществлялось с помощью генератора запуска (1). Разветвитель (рис. 18 б) основан на последовательно-параллельном соединении кабелей РК-19 и позволяет без потерь развести импульс от генератора наносекундных импульсов на 12 каналов. Для устранения влияния заземления оплеток кабелей на форму импульсов применяются дроссели ДР1-3, представляющие собой ферритовые кольца $\Phi=1000$ диаметром 10 см, на которые наматываются кабели разветвителя, по 5 витков на каждый кабель. При длительности входного импульса 10 нсек с фронтами менее 1 нсек на выходе разветвителя фронты импульсов не превышают 3 нсек. Амплитуда входного импульса составляла 600 в, т.е. в каждом канале амплитуда импульса была 150 в. Ослаблением электрических сигналов, поступающих на источники, световые импульсы от них приводились к сцинтилляциям от частиц, регистрируемых счетчиками. Обычно амплитуда электрического импульса, подаваемого на источник, не превышала 100 в, для получения импульса света, соответствующего энергии электрона 1 Мэв в пластмассовом сцинтилляторе.

С помощью источников света были определены необходимые задержки для всех счетчиков и выбрано расположение импульсов от счетчиков на экране осциллографа. Источники использовались также при подборе оптимального формирования импульсов.

Особое внимание было обращено на формирование импульсов в счетчике 8. Для этого счетчика был выбран режим питания, при котором выбросы и послеимпульсы были сведены к минимуму. Счетчик 8 испытывался при помощи двух источников света, моделировавших импульс от остановки пиона и возникающий через некоторое время импульс от позитрона распада. Варьирование времени задержки и амплитуд этих импульсов показало, что позитрон распада может быть надежно зарегистрирован, если временная задержка между моментом его возникновения и остановкой пиона превышает $6 \cdot 10^{-9}$ сек.

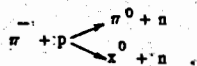
Физическая калибровка аппаратуры производилась по регистрации и последующей обработке малоинтенсивного процесса перезарядки $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ в сцинтилляторе счетчика 8.

На рис. 19, 20 представлены осциллограммы процесса перезарядки и двух типичных случаев бета-распада. Осциллограмма импульсов при одновременном срабатывании всех счетчиков, приведенная на рис. 21, показывает, что любой из этих процессов может быть моделирован импульсными источниками. В процессе измерений каждые два часа проводилась контрольная калибровка всей аппаратуры с помощью источников света.

Обработка осциллограмм показала, что временное разрешение установки составляет $2,2 \cdot 10^{-10}$ для сцинтилляционных счетчиков и $7 \cdot 10^{-10}$ сек для черенковских спектрометров. Для импульсных источников света временное разрешение составляло $2,2 \cdot 10^{-10}$ сек. На рис. 22 приведена гистограмма временных интервалов между двумя сцинтилляционными счетчиками при работе от источников света, построенная по результатам обработки 300 осциллограмм.

Следует также отметить, что при калибровке аппаратуры по процессу перезарядки π^- -мезонов поле магнита ускорителя противоположно магнитному полю при измерении эффекта. Так как известно сильное влияние магнитных полей на усиление фотоумножителей, то защита фотоумножителей от влияния поля являлась весьма важной задачей. С помощью импульсных источников света было исследовано влияние магнитного поля на фотоумножители и выбрана оптимальная экранировка.

Импульсные источники света были широко использованы и в работе по поиску аномалий в угловой корреляции γ -квантов от распада π^0 -мезонов, образующихся при захвате π^- -мезонов протонами 12 . В ряде работ было указано на возможность существования второго сравнительно слабо взаимодействующего нейтрального π -мезона, масса которого близка к массе "обычного" π^0 -мезона.



С целью поиска этого нейтрального мезона была создана большая годоскопическая установка, при помощи которой исследовалась угловая корреляция γ -квантов от распада нейтральных π -мезонов.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 23. π^- -мезоны проходили через тормозящие фильтры Φ и счетчики C_1, C_2 , работавший в режиме детектора остановок, и останавливались в жидководородной мишени M . Пары γ -квантов регистрировались годоскопической установкой, содержащей 17 сцинтилляционных счетчиков C , расположенных по окружности, и трех ковров (A_1, Γ_1, Γ_2) газоразрядных счетчиков, работавших в режиме управляемого импульсного питания. Импульсы от C_1, C_2, C_3 поступали на каскады двойных совпадений и антисовпадений, а от $C(1-17)$ — на 18-канальный каскад, выделяющий совпадения двух или более импульсов от любых счетчиков. Импульсы совпадений пучковых и годоскопических счетчиков подавались на каскад двойных совпадений, который, следовательно, выделяет только пары импульсов от годоскопических счетчиков, которые совпадают по времени с прохождением π^- -мезона через счетчики C_1, C_2 и остановкой в мишени. Импульсы совпадений запускали 5-лучевой осциллограф и генератор импульсного питания газоразрядных счетчиков. Импульсы от всех сцинтилляционных и черенковских счетчиков подавались на осциллограф, и фотографировались киноаппаратом. Чтобы смоделировать регистрируемый процесс импульсными источниками, необходимо, чтобы счетчики C_1, C_2 одновременно могли срабатывать с любой парой годоскопических счетчиков $C(1-17)$. С этой целью был разработан 18-канальный коммутатор наносекундных импульсов, запускающих источники света. Блок-схема системы запуска источников света приведена на рис. 24. На вход коммутатора импульсы подавались с генератора наносекундных импульсов (4), который запускался генератором запуска (2). Коммутатор состоит из пульта управления (рис. 25) и собственно коммутатора (рис. 26), который располагался в экспериментальном зале рядом с годоскопической установкой и генератором наносекундных импульсов. Внешний вид пульта управления и коммутатора показан на рис. 27.

На источники света счетчиков C_1, C_2, C_3 электрические импульсы подаются непосредственно с разветвителя, состоящего из последовательно-параллельно включенных кабелей РК-19 и дросселей Dp_1, Dp_2 . На источники счетчиков C_{1-17} импульсы подаются с двух параллельно включенных по ламелям шаговых искателей ШИ-25. Каждый из шаговых искателей может работать независимо от другого. Это позволяет получить световые импульсы в любой паре из восемнадцати счетчиков. Шаговые искатели могут запускаться как с помощью наборных телефонных дисков типа Н1-К при переключателе рода работы в положении "набор", так и автоматически при положении "авт." При автоматическом наборе импульсы с мультивибратора T_1, T_2 поступают на один из усилителей тока T_3, T_4, T_5, T_6 , нормально запертых положительным смещением. С коллекторов T_4, T_6 импульсы тока подаются на обмотки управления шаговых искателей. Сброс искателей в начальное нулевое положение осуществляется нажатием кнопок "сброс", либо автоматически после прохождения 18-го положения. Индикация положения шаговых искателей осуществлялась с помощью цифровых газоразрядных ламп L_1-L_4 .

Ослаблением электрических импульсов, поступающих на источники света от коммутатора, световые импульсы от источников приводились к сцинтилляциям от регистрируемых частиц. Фронты импульсов на выходах коммутатора не превышали 2 нсек.

Во время физических измерений через каждые два часа проводилась калибровка регистрирующей системы с помощью импульсных источников света.

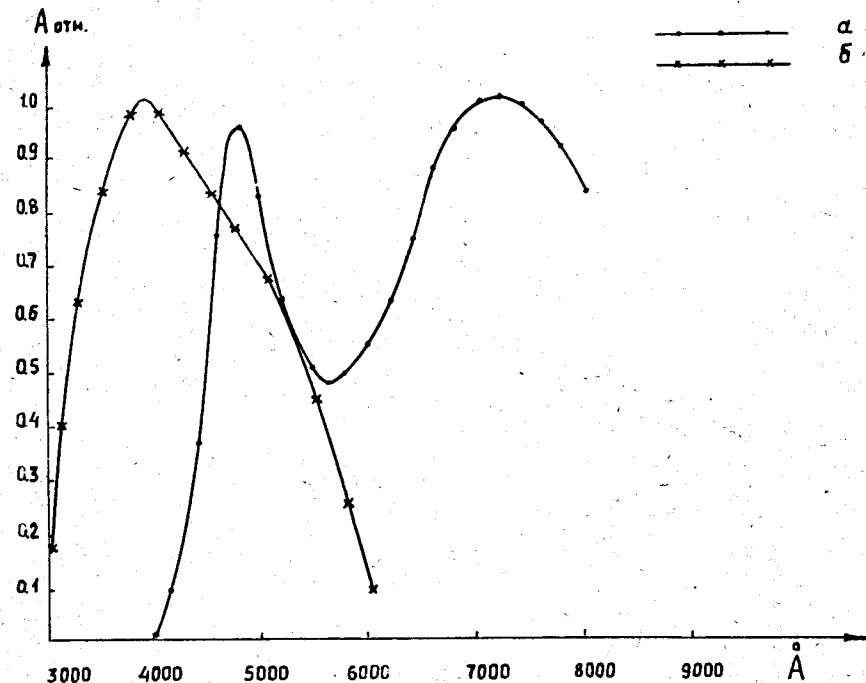
На рис. 28 и рис. 29 показаны осциллограммы одного из регистрируемых событий и несколько кадров полученных при работе одного из шаговых искателей. В последнем случае через второй искатель импульсы подавались на один из счетчиков C_{1-17} . Визуальное наблюдение импульсов от источников света на экране осциллографа позволяло периодически контролировать работу всей регистрирующей системы.

В заключение пользуемся случаем выразить благодарность Ю.Д. Прокошкину за постоянный интерес к работе и ценные обсуждения вопросов применения источников света в физических экспериментах на ускорителе; В.Г. Лапшину, Г.И. Мареевой, В.Г. Хромову за помощь в измерениях; А.Г. Ревенко и В.А. Черных за установку источников света в счетчиках и монтаж систем коммутации импульсов.

Л и т е р а т у р а

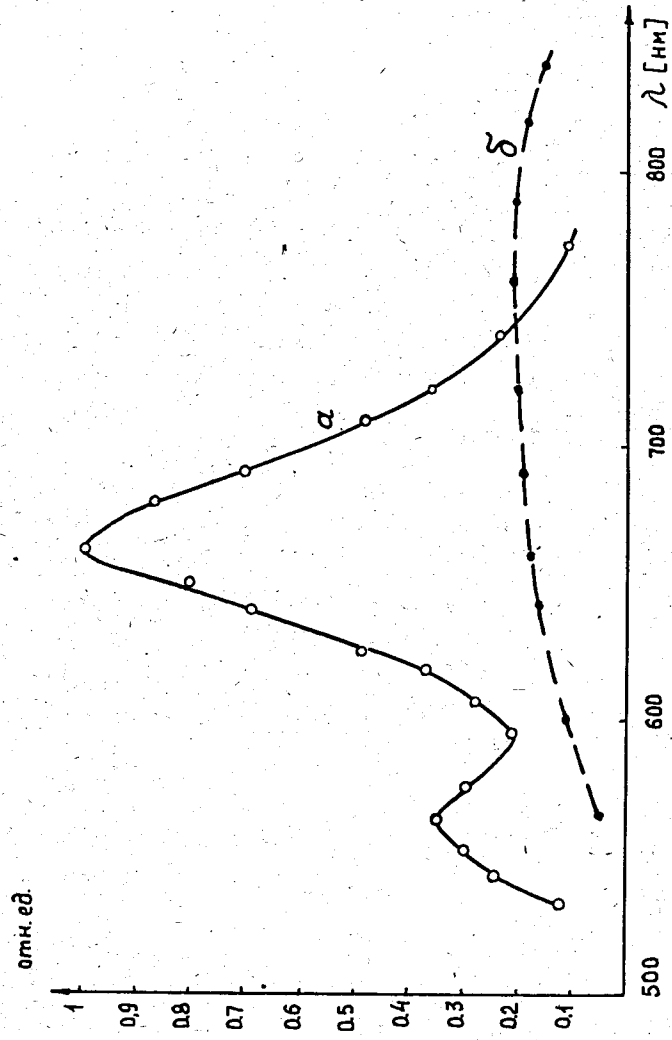
1. M.Garbuty, T.P.Vogl, J.R.Hansen. Rev. Sci.Instr., 28, 826 (1957).
2. J.H.Malmberg. Rev. Sci. Instr., 28, 1027 (1957).
3. O.A.Kerns, F.A.Kirstein, G.C.Cox. Rev.Sci.Instr., 30, 31 (1959).
4. A.Whetstone. Rev.Sci.Instr., 30, 447 (1959).
5. R.W.Kendall. IRE, 3-7, N 2-3, 202 (1960).
6. J.W.Allen, P.E.Gobbons. Nucl. Instr. and Meth., 14, 355 (1961).
7. O.A.Kerns. Proc. Int. Conf. Instr. High-Energy Phys., Berkeley, 1960.
8. К.А. Газарян, В.С. Пантуев, М.Н. Хачатурян. ПТЭ, 1, 181 (1985).
8. G.F.Garlick, G.T.Wright. Proc.Phys.Soc., B, 65, 415 (1952).
10. В.Г. Лапшин, И.Н. Омеляненко, И.В. Рыжиков, В.И. Рыкалин. Одноэлектронный метод исследования временных характеристик импульсных источников света наносекундной длительности. Препринт ОИЯИ, 1977, Дубна, 1985.
11. А.Ф. Дунайцев, В.И. Рыкалин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Петрухин. ЖЭТФ, 47, 84(1964).
12. И.М. Васильевский, В.В. Вишняков, А.Ф. Дунайцев, В.И. Рыкалин, А.А. Тяпкин. Исследование угловой корреляции γ -квантов, образованных при захвате π^- -мезонов протонами; Труды XII международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 ноября 1985 г.

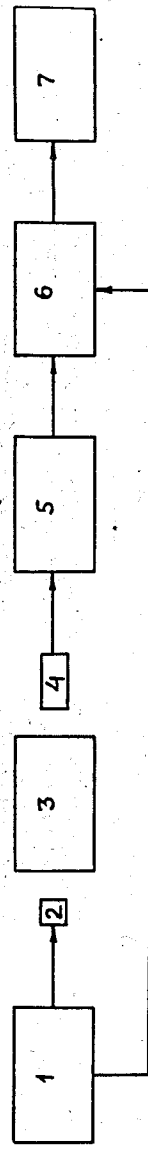


Р и с. 1 а. Спектральное распределение излучения от источника света из карбида кремния при запуске в прямом направлении.

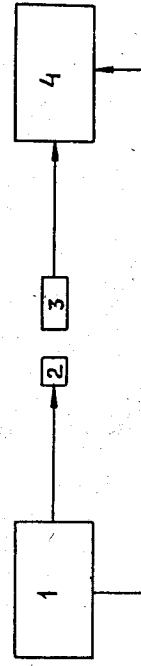
б. Спектральная чувствительность сурьмяноцезиевого фотокатода.



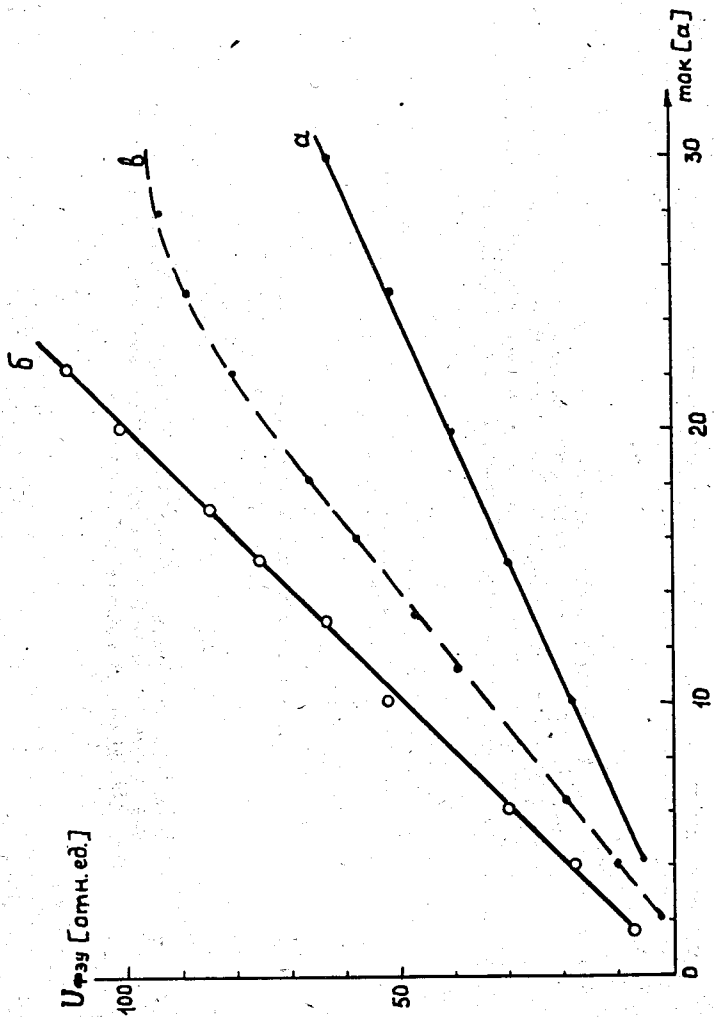
Р и с. 2. Спектральное распределение излучения от источника света из фосфида галлия при запуске в прямом (α) и обратном (δ) направлении.



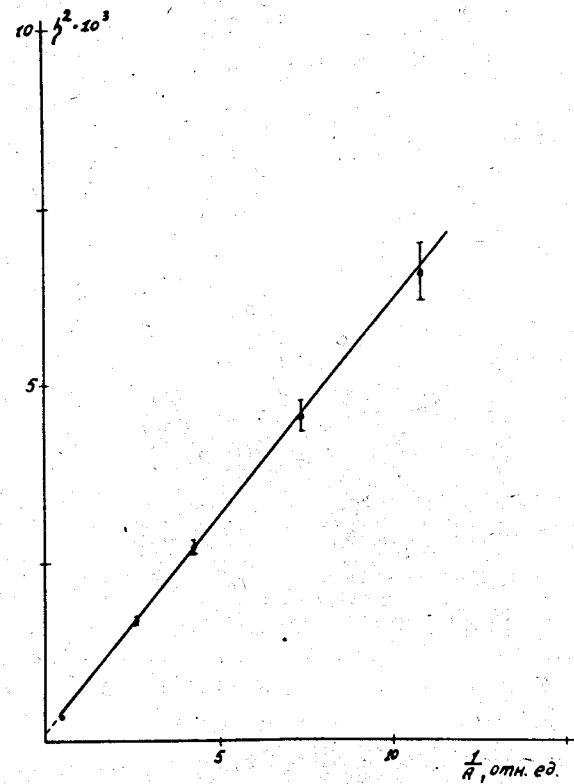
Р и с. 3. Блок-схема измерения спектрального распределения излучения источников в режиме счета фотонов. 1. Генератор электрических импульсов. 2. Источник света из карбида кремния. 3. Спектрометр типа СФ-4. 4. Фотоумножитель типа ФЭУ-28. 5. Усилитель. 6. Схема пропускания с шириной ворот, равной длительности электрического импульса. 7. Пересчетный прибор.



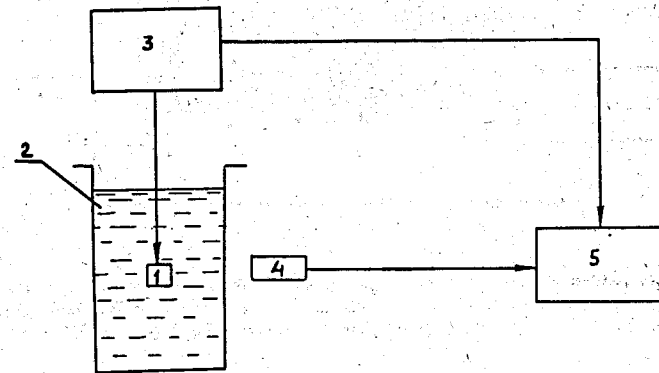
Р и с. 4. Блок-схема измерения амплитудных характеристик. 1. Генератор наносекундных импульсов. 2. Источник света. 3. Фотоумножитель типа 56 АУР. 4. 266-канальный амплитудный анализатор.



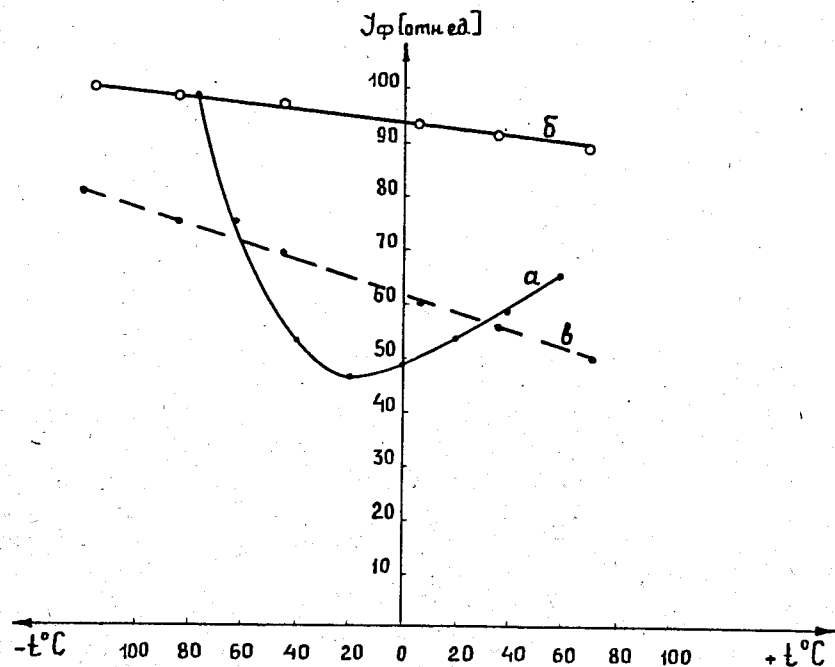
Р и с. 5. Зависимости амплитуды импульса света от тока через источник.
 а. Для источника света из карбида кремния при запуске в прямом направлении.
 б, в. Для источника света из фосфида галлия при запуске в прямом (б) и обратном (в) направлении.



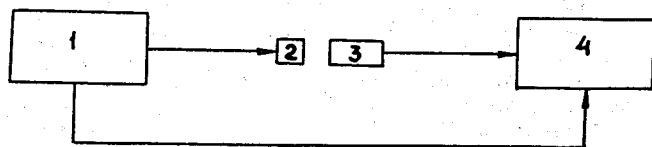
Р и с. 6. Зависимость квадрата полуширины амплитудного распределения импульсов ФЭУ от $1/A$.



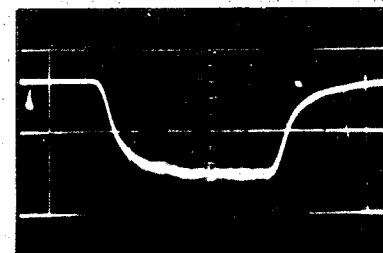
Р и с. 7 Блок-схема измерения температурной зависимости амплитуды световых импульсов полупроводниковых источников света. 1. Источник света. 2. Дьюар. 3. Генератор наносекундных импульсов. 4. Фотоумножитель типа 56 AVP. 5. 256-канальный амплитудный анализатор, работающий в режиме управления от генератора 3.



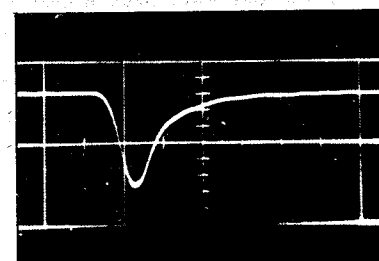
Р и с. 8. Типичные зависимости амплитуды световых импульсов источника от температуры.
 а. Для источника света из карбида кремния при запуске в прямом направлении.
 б, в. Для источника света из фосфида галлия при запуске в прямом (б) и в обратном (в) направлении.



Р и с. 9. Блок-схема измерения временных характеристик источников света. 1. Генератор наносекундных импульсов. 2. Источник света. 3. Фотоумножитель типа 56 AVP. 4. Осциллограф с полосой пропускания 1000 Мгц.

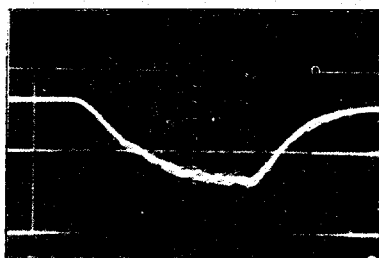


a

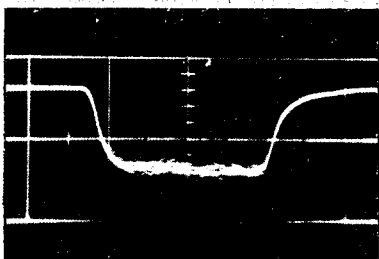


б

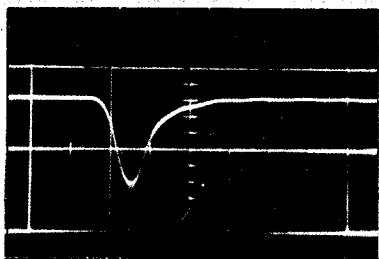
Р и с. 10. Осциллограммы импульсов света от источника из SiC :
 а. Длительность электрического импульса—50 нсек, скорость развертки—20 нсек/дел, запуск в прямом направлении.
 б. Длительность электрического импульса—1 нсек, скорость развертки—10 нсек/дел, запуск в прямом направлении.



a

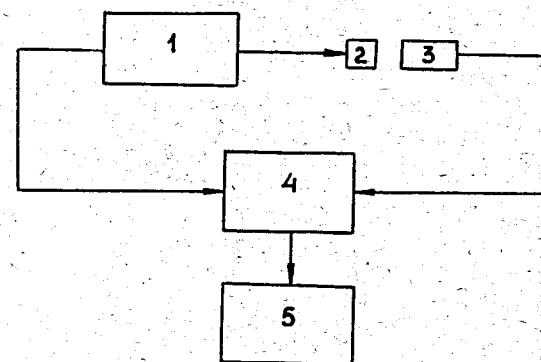


б

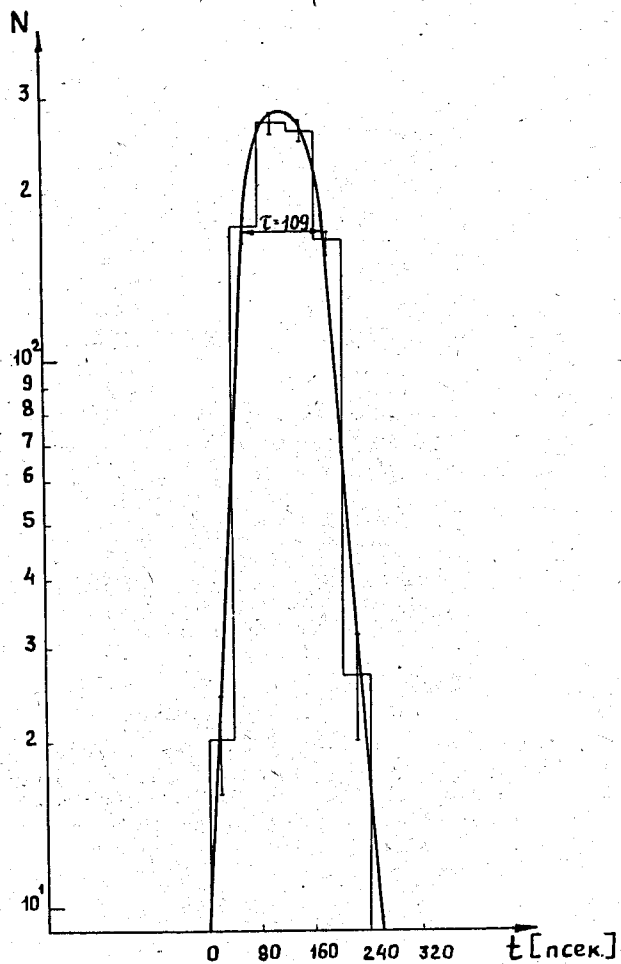


в

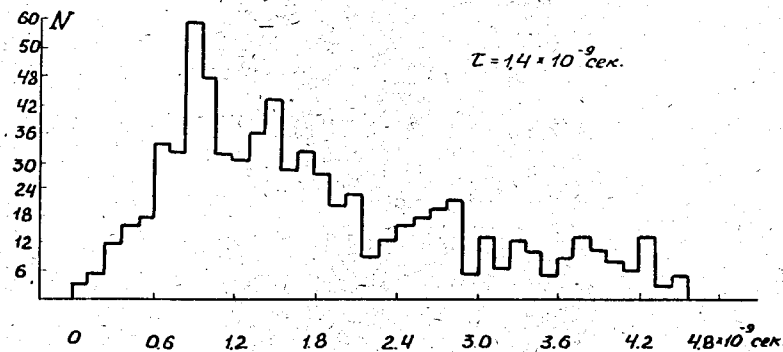
Р и с. 11. Осциллограммы импульсов света от источника света из GaP.
 а,б. Длительность электрического импульса—50 нсек, скорость развертки—
 20 нсек/дел, запуск в прямом (а) и обратном (б) направлении
 в. Длительность электрического импульса—1 нсек, скорость развертки—
 10 нсек/дел, запуск в обратном направлении.



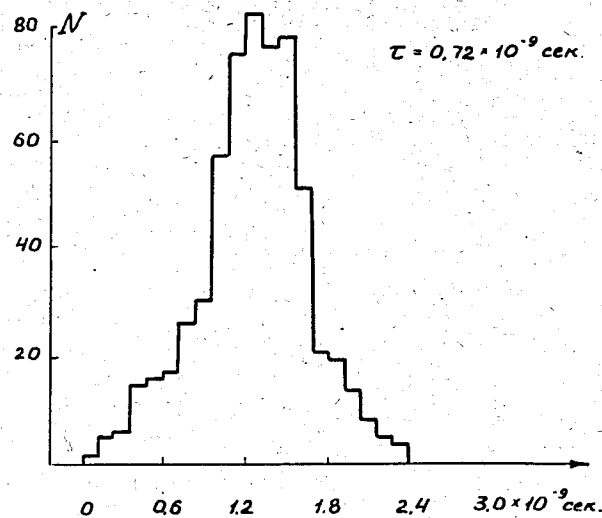
Р и с. 12. Блок-схема измерения разброса начала светового импульса источников света относительно запускающего электрического. 1. Генератор наносекундных импульсов. 2. Источник света. 3. Фотоумножитель. 4. Время-амплитудный конвертер. 5. 256-канальный амплитудный анализатор.



Р и с. 13. Кривая временного разрешения время-амплитудного конвертера при совпадении световых импульсов от источника света с запускающими электрическими.

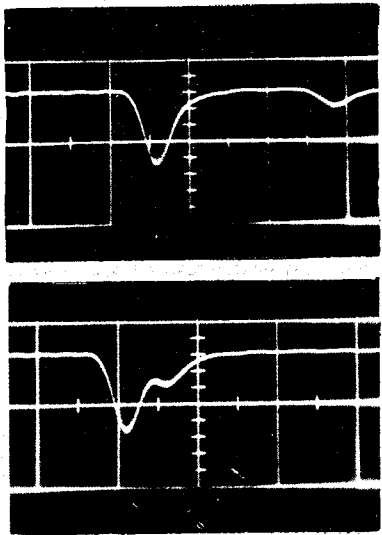


a



б

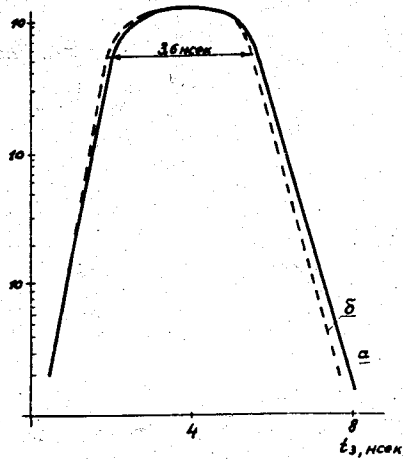
Р и с. 14. Типичное временное распределение одноэлектронных импульсов, соответствующее световому импульсу от источника света из карбида кремния (а) при запуске в прямом направлении и фосфида галлия (б) при запуске в обратном направлении. τ - ширина распределения на полувысоте.



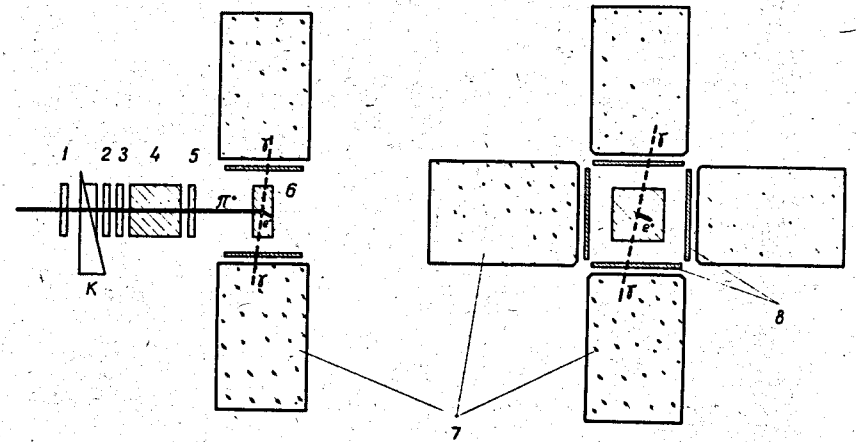
a

b

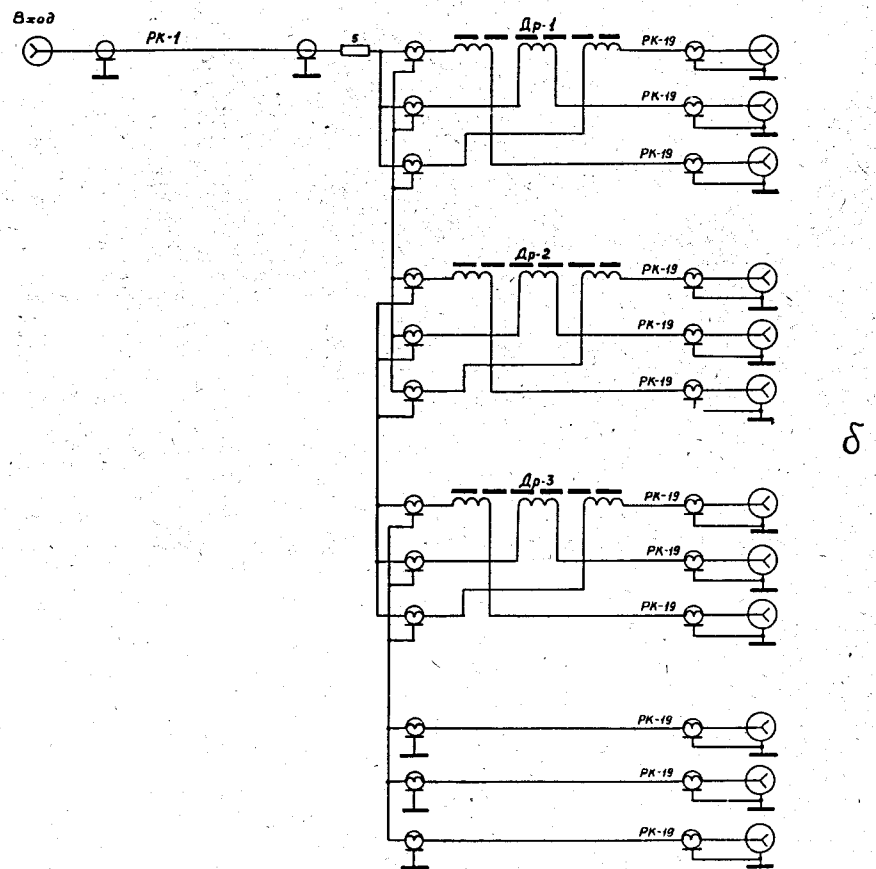
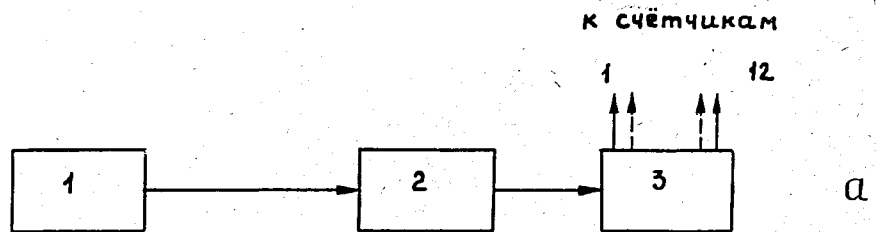
Р и с. 15. Осциллограммы импульсов фотоумножителя при интервале между световыми импульсами 22 нсек (а) и 5 нсек (б). Скорость развертки—10 нсек/дел.



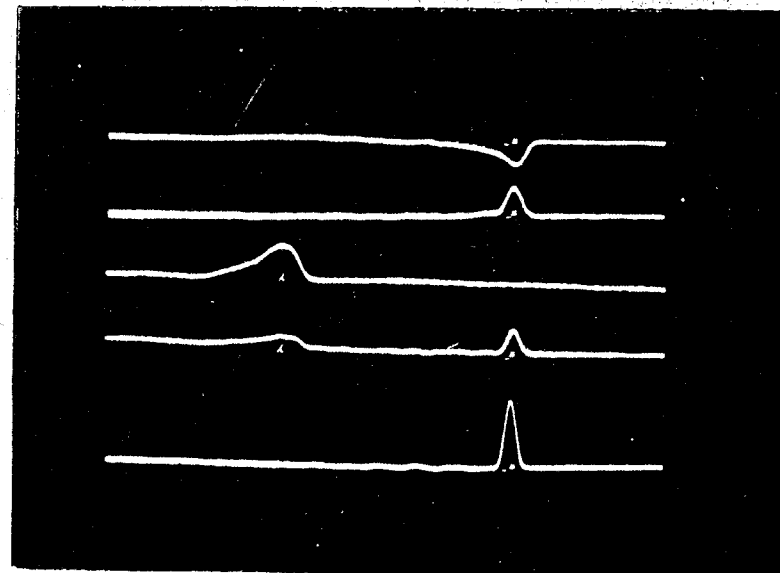
Р и с. 16. Кривые временного разрешения при работе фотоумножителей от α -частиц Pu^{239} (а) и от источников света (б), t_3 —время задержки импульсов одного фотоумножителя относительно другого.



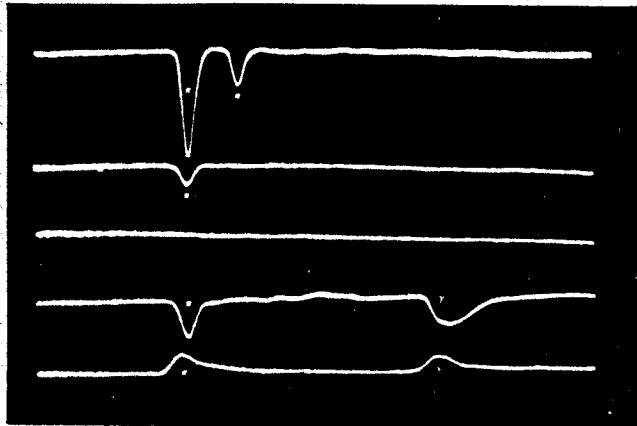
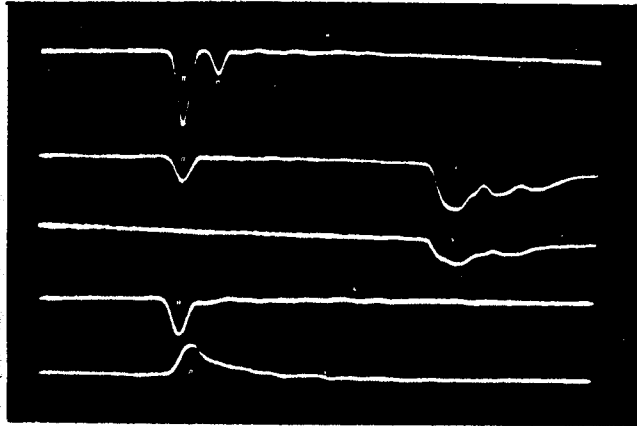
Р и с. 17. Схема экспериментальной установки для исследования бета-распада π^+ -мезона.



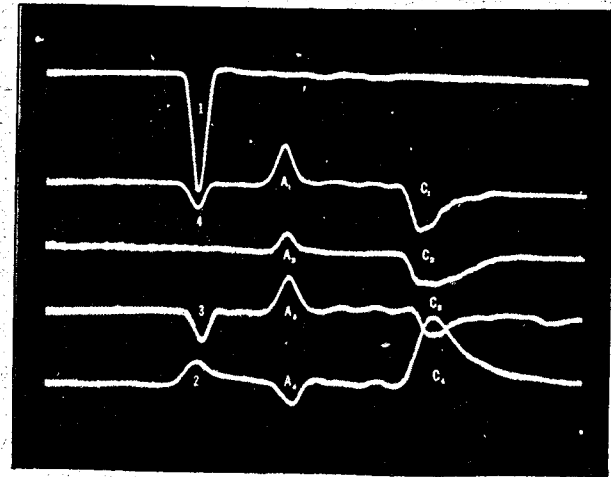
Р и с. 18. а. Блок-схема системы запуска источников света. 1. Генератор запуска. 2. Генератор наносекундных импульсов. 3. Разветвитель наносекундных импульсов.
 б. Принципиальная схема разветвителя.



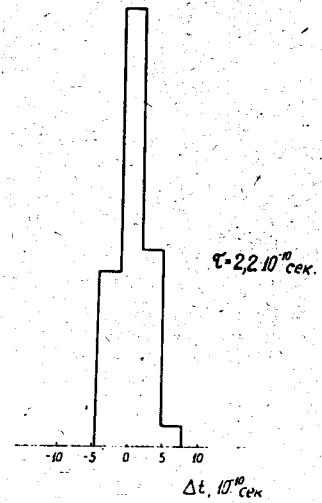
Р и с. 18. Осциллограмма случая перезарядки π^- -мезона в спитилляторе счетчика 6: у - импульсы от двух противоположных спектрометров, п - импульсы, возникающие в счетчиках 5,4,3,6 при торможении и остановке π^- -мезона. Длительность развертки для осциллограмм рис. 19,20,21-200 нсек на экран.



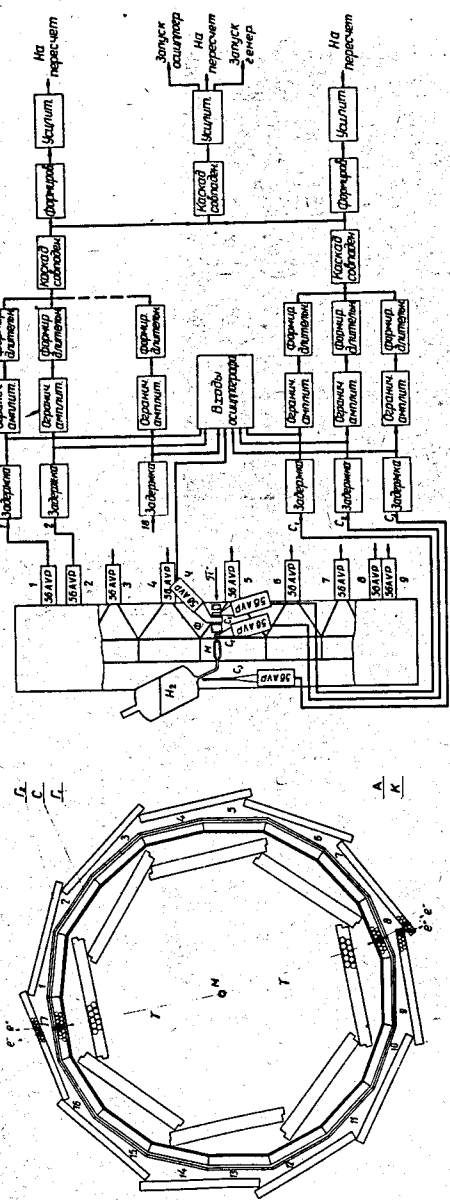
Р и с. 20. Типичные случаи бета-распада пиона; e^+ -импульсы от позитронов распада.



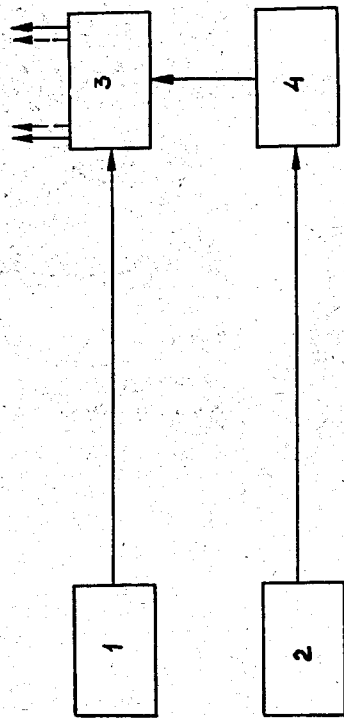
Р и с. 21. Осциллограмма одновременного срабатывания импульсных источников света во всех счетчиках и спектрометрах установки. 2,3,4,1 - импульсы от счетчиков 5,4,3,6. A_1-A_4 - импульсы от счетчиков антисовпадения, C_1-C_4 - импульсы от черенковских счетчиков.



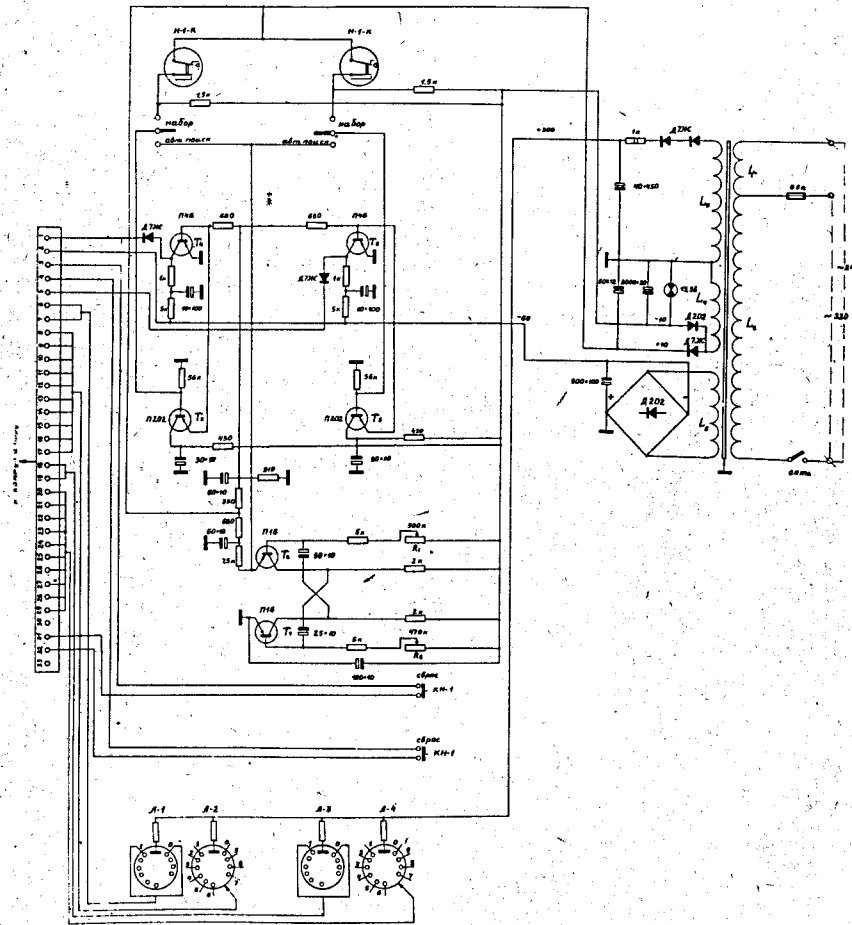
Р и с. 22. Гистограмма временных интервалов, τ - рассчитанная полуширина на полувысоте.



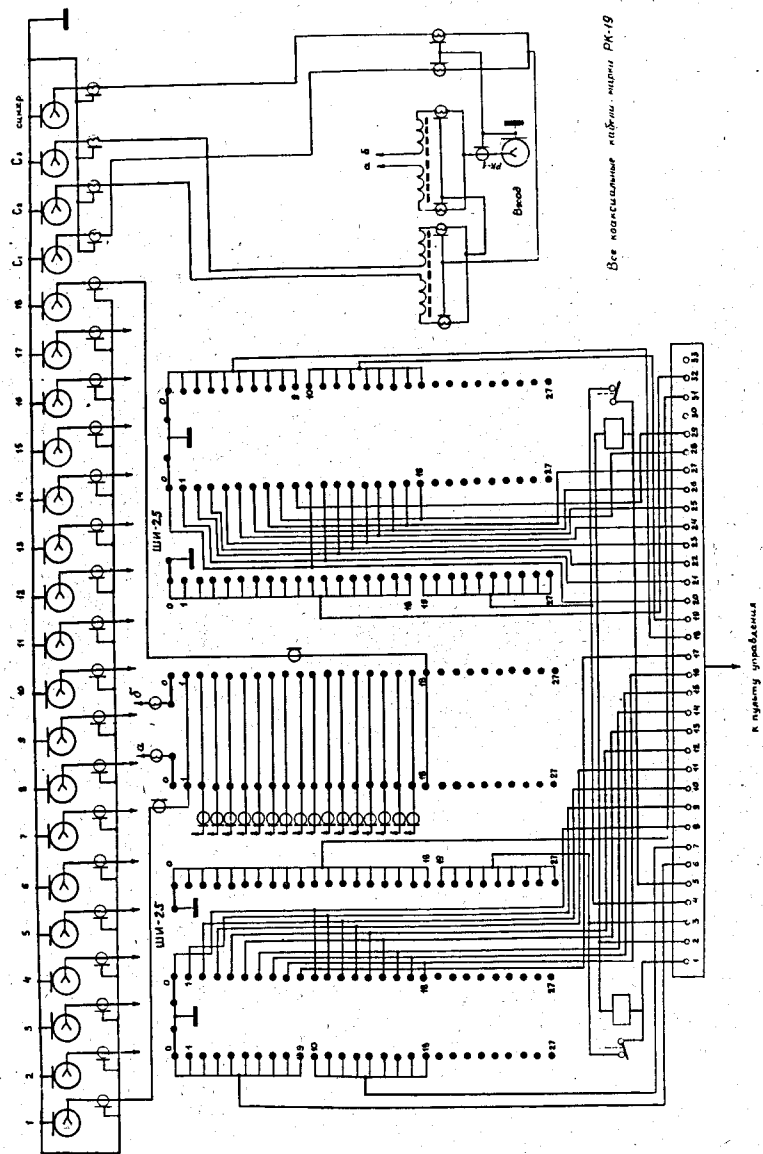
Р и с. 28. Схема экспериментальной установки для исследований угловой корреляции μ -мезонов.



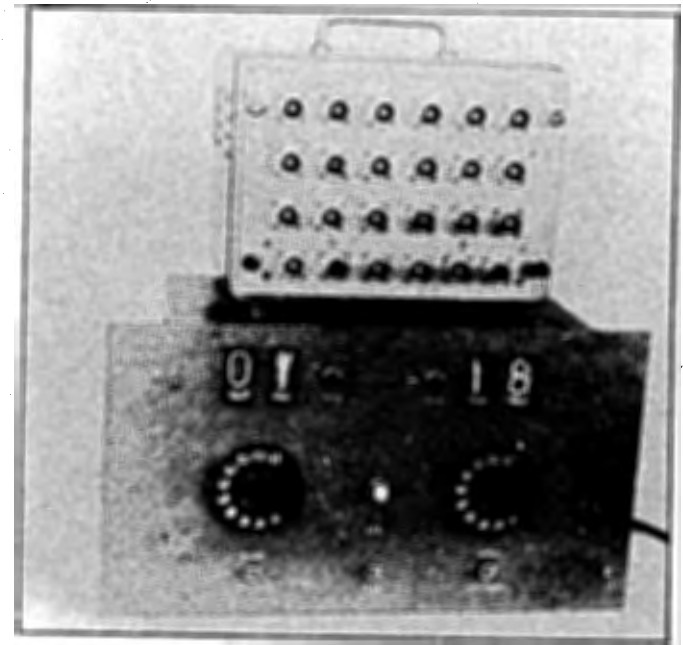
Р и с. 24. Блок-схема системы запуска источников света. 1. Пульс управления. 2. Генератор запуска. 3. Коммутатор. 4. Генератор наносекундных импульсов.



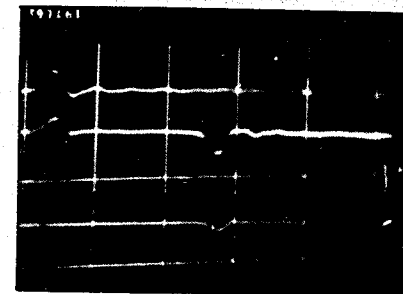
Р и с. 25. Принципиальная схема пульта управления.



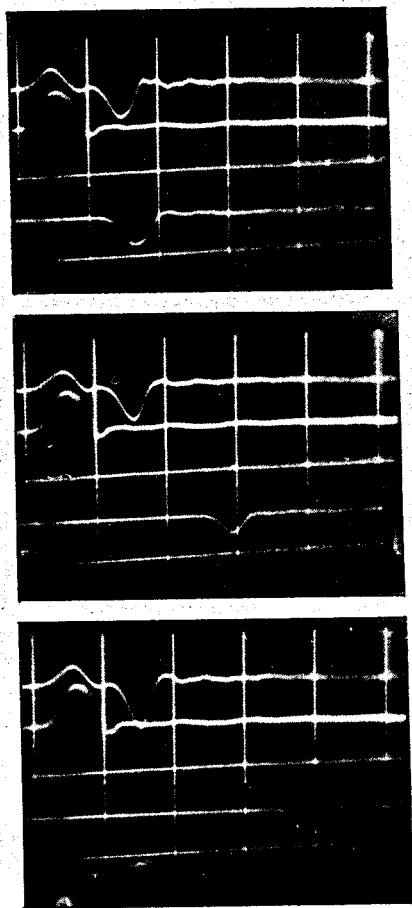
Р и с. 26. Принципиальная схема коммутатора.



Р и с. 27. Внешний вид пульта управления и коммутатора.



Р и с. 28. Осциллограмма одного из регистрируемых событий.



Р и с. 28. Осциллограммы импульсов от источников света при автоматической работе шаговых искателей.