

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



7957

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛ

13 - 7957

С.Г.Басиладзе

**ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ
(ОБЗОР)**

Часть II

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

13 - 7957

С.Г.Басиладзе

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ
(ОБЗОР)

Часть II

Схемы включения ФЭУ

Для питания фотоумножителей используют обычно один источник напряжения, а потенциал каждого динода задают с помощью резистивного делителя ($67 \div 71$), как показано на *рис. 9а*. Характерной особенностью делителей временных ФЭУ является неравномерное распределение потенциалов. В средней части делителя потенциалы распределены равномерно. По мере приближения к фотокатоду величина резисторов возрастает для улучшения разрешающего времени ФЭУ, а по мере приближения к аноду - для снижения действия пространственного заряда. С целью получения наилучших временных характеристик делители к каждому фотоумножителю подбирают индивидуально, критерием подбора является получение максимальной величины усиления.

Источники стабилизированного высокого напряжения имеют ограниченный на уровне $3 \div 5$ мА выходной ток, кроме того, на величину тока делителя накладывает ограничение допустимая мощность рассеивания резисторами делителя. Поэтому при больших выходных сигналах становится заметным действие отрицательной обратной связи, вызванной током динодов. При увеличении тока динода снижается ток через соответствующий резистор делителя и междудинодное напряжение уменьшается, вызывая временный сдвиг выходного импульса. Этот эффект ограничивает выходные токи ФЭУ в импульсе на уровне $150 \text{ мА}^{/21/}$. Для увеличения диапазона импульсных сигналов ФЭУ и стабилизации их временного поло-

жения применяют шунтирование последних 4 ÷ 6 динодов конденсаторами. Для нейтрализации возможного колебательного режима рекомендуется использовать блокировочные резисторы $R_{д} = 50 \div 100 \text{ Ом}$. Минимальная величина шунтирующих емкостей равна:

$$C_{д} \geq \frac{2N_{фэ} \cdot K \cdot e}{\epsilon_{в} \cdot \Delta U_{д-а}} = \frac{N_{фэ} \cdot K \cdot e \cdot t_{э}}{N_{д} \cdot \epsilon_{в} \cdot U_{д-а} \cdot \Delta t_{э}}, \quad /6/$$

где $\Delta t_{э}$ - допустимое отклонение задержки фотоумножителя, а коэффициент 2 учитывает суммарное действие зарядов предыдущих динодов. Например, для $N_{фэ} = 100$, $\Delta t_{э} = 0,05 \text{ нсек}$, для фотоумножителя ФЭУ-30, получим $C_{д} \geq 900 \text{ пФ}$. Частота следования сигналов на выходе фотоумножителя должна в предположении постоянства сигналов быть не более: $f_{\text{макс}} \leq 1/2R_{д-а} \cdot C_{д}$, где $R_{д-а}$ - сопротивление резистора в промежутке последний динод-анод. Если $R_{д-а} = 100 \text{ К}$, в нашем примере получим $f_{\text{макс}} \leq 5,5 \text{ кГц}$. Как видим, при использовании линейных резисторов можно обеспечить высокую временную точность лишь при небольших нагрузках.

Допустимую нагрузку ФЭУ можно существенно повысить, если в последних, междиодных промежутках использовать кремневые стабилитроны, что показано на рис. 9б. Введение нелинейных сопротивлений резко снижает время восстановления потенциалов делителя. Допустимая нагрузка тогда будет определяться током делителя:

$$f \leq \frac{I_{\text{дел}} \cdot \epsilon_{в}}{N_{фэ} \cdot K \cdot e} \quad /7/$$

и увеличится примерно в 100 раз. Величину диодных емкостей в этом случае выбирают из условия /6/, где вместо $\Delta U_{д-а}$ необходимо поставить допустимое изменение опорного напряжения стабилитрона, например, для разности токов $I_{\text{дел}}$ до $0,1 \div 0,3 / I_{\text{дел}}$. Требуемые величины шунтирующих емкостей получаются большими

примерно на порядок. Недостаток данного способа питания ФЭУ состоит в необходимости подбора стабилитронов с нужным опорным напряжением. Кроме того, у высоковольтных стабилитронов сравнительно большой температурный коэффициент дрейфа опорного напряжения, достигающий $0,2\% / ^\circ\text{C}^{1/2}$, что ограничивает применимость данного способа лабораторными условиями.

Если умножитель регистрирует частицы, поступающие в течение небольших интервалов времени, причем длительность пауз сравнительно велика, положительный эффект может дать дополнительное включение очень больших блокирующих емкостей, как показано на рис. 9в. Емкость их должна быть велика настолько, чтобы суммарный заряд всех импульсов в пачке не вызвал заметного сдвига потенциалов динодов. Величины $C_{б}$ можно найти из условия /6/, умножив полученное значение на число импульсов в пачке. Шунтирующие конденсаторы малой величины применяются здесь для предотвращения колебаний, вызванных паразитными индуктивностями выводов динодов. Они монтируются непосредственно на многоконтактном разъеме ФЭУ.

Наиболее радикальным средством борьбы со сдвигом диодных потенциалов является применение отдельных источников напряжения для питания последних динодов. Число их ограничено на уровне 3 ÷ 5 допустимым выходным током источника питания, дающего наиболее высокий потенциал, если диоды питаются от отдельных источников. В том случае, когда источники питания включаются последовательно для увеличения выходных токов, их число ограничено вследствие большой разницы потенциалов между обмотками силового трансформатора в выпрямителе последнего источника. Источники постоянного напряжения подключаются к выводам, как показано на рис. 9в, электролитические конденсаторы здесь играют роль развязок от возможных колебаний в подводящих проводах от источников питания.

Влияние на временное разрешение размеров сцинтиллятора и световода

Размеры и геометрию сцинтиллятора выбирают обычно, исходя из назначения сцинтилляционного детектора. В том случае, когда размеры сцинтиллятора велики либо фотоумножитель, по условиям опыта, не может быть расположен рядом со сцинтиллятором, для более полного сбора света на фотокатод применяют световоды. Сцинтилляторы больших размеров затрудняют получение высокого временного разрешения схем совпадений.

Первой причиной является задержка распространения света по прямой между точкой прохождения частицы и фотокатодом. Эта задержка равна примерно $4,5 \text{ нсек/М}$, поэтому даже для небольшого квадратного сцинтиллятора размером $10 \times 10 \text{ см}^2$ разность времен поступления световспышки на фотокатод составит $\sim 0,5 \text{ нсек}$. Уменьшить влияние задержки можно, если использовать лучи света, отраженные от противоположного торца сцинтиллятора. По мере удаления места прохождения частицы от фотокатода прямая компонента запаздывает, а задержка прихода отраженной компоненты сокращается. Схема временной привязки, фиксирующая "центр тяжести" суммы прямой и отраженной компонент обеспечит компенсацию задержки, если потери на отражения малы, а сцинтиллятор обладает высокой прозрачностью. В работах /73,74/ описаны компенсаторы, выделяющие "центр тяжести" моментов приходов сигналов от двух ФЭУ, расположенных в торцах длинного сцинтиллятора. При длине сцинтиллятора 50 см с поперечным сечением $4 \times 3,4 \text{ см}^2$ получена точность компенсации $\pm 0,05 \text{ нсек}^{/74/}$

Второй причиной, ухудшающей временное разрешение, является разность путей, проходимых светом по различным траекториям к фотокатоду, для фиксированного места прохождения частицы, что показано на рис. 10а. Величину светового сигнала, достигшего фотокатода, при бесконечно короткой световой вспышке можно представить в следующем виде ^{/75/}:

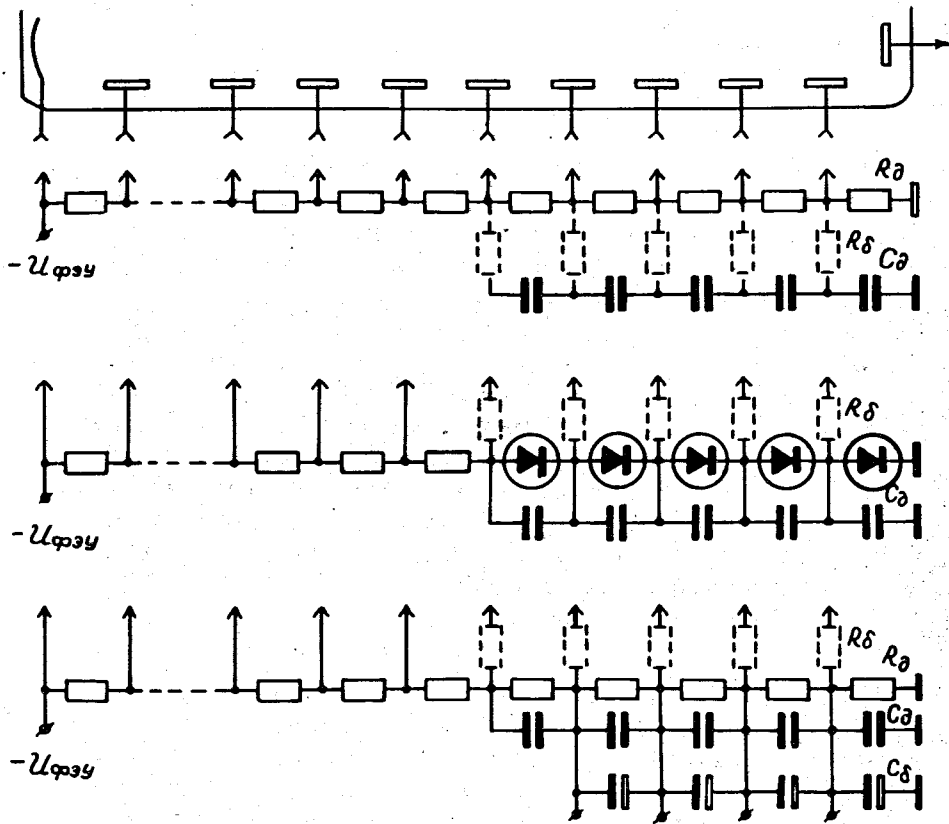


Рис.9. Схемы включения ФЭУ: а/ резистивно-емкостный делитель, б/ резистивно-емкостный делитель с введением нелинейных сопротивлений /кремниевых стабилитронов/ в цепи последних динодов, в/ резистивно-емкостный делитель с большими блокирующими емкостями и подпиткой последних динодов.

$$0, 0 \leq t \leq t_0, \quad /8/$$

$$\Phi(t) \sim \begin{cases} t^{-2}, & t_0 \leq t \leq t_0 \cdot n, \\ t^{-4}, & n \cdot t_0 \leq t, \end{cases}$$

где $n \approx 1,5$ - показатель преломления сцинтиллятора, t_0 - время распространения света по кратчайшему пути до фотокатода. Функция /8/ хорошо аппроксимируется экспонентой с постоянной времени $\tau_\rho = 0,5t_0$. Подобная закономерность собирания света подтверждается данными работы /76/ по сцинтилляторам цилиндрической геометрии. Если световая вспышка имеет конечную протяженность /рис. 10б/, время фронта нарастания сигнала на фотокатоде будет равно $2,2\tau_\rho$. В этом легко убедиться из анализа рис. 10в, где результирующая световспышка представлена как сумма реакций на короткие световспышки, составляющие $\Phi(t)$. Ухудшение переднего фронта световспышки и, следовательно, импульса фотоэлектронов приводит к ухудшению временного разрешения. При возрастании пути, приходящего светом, с $0,2$ м до $1,4$ м временное разрешение ухудшается с $1,5$ до $3,0$ нсек/ $\sqrt{N_{\text{фэ}}}$ /75/.

Третьим фактором является затухание света в сцинтиляторе больших размеров, а также потери света на отражения и в сужающихся частях световодов. При одинаковых временных параметрах импульса фотоэлектронов, согласно /30/, временное разрешение обратно пропорционально корню квадратному из числа фотоэлектронов. В сужающихся частях световодов, представляющих собой усеченные конусы, потери могут достигать 90% /77, 6/. Для лучшего светосбора необходимо выбирать длину световода, при размерах торцов $\ell_{\text{сц}}$ и $\ell_{\text{ф}}$, равной $h_{\text{с}} = 0,5n \cdot (\ell_{\text{сц}} + \ell_{\text{ф}})$. Для больших сцинтилляторов лучшие результаты дает применение секционированных световодов /78/, представляющих собой набор изогнутых пластин равной длины, компенсирующих амплитудные и временные различия световспышек, достигающих фотокатода.

Существенный вклад в ухудшение временного раз-

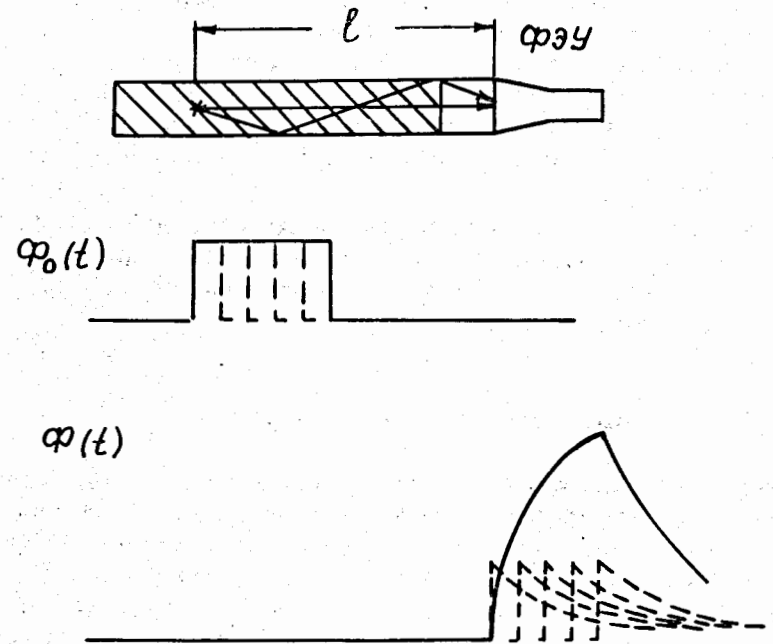


Рис.10. Влияние разности длин путей, проходимых светом /а/ от световспышки конечной продолжительности /б/, на ухудшение фронтов светового сигнала /в/, достигшего фотокатода.

решения больших сцинтилляционных детекторов может дать "гуляние" формирователя временной отметки в результате сильного увеличения динамического диапазона импульсов с выхода ФЭУ. Возрастание динамического диапазона есть следствие ослабления минимальных световспышек вблизи свободного торца сцинтиллятора из-за плохого светосбора. Для выравнивания амплитудных характеристик рабочего объема сцинтилляционного детектора применяют специальным образом расположенные отражатели^{/79/}.

Наконец, в детекторах больших размеров, как правило, наблюдается большая загрузка фоновыми частицами, что также не позволяет получить высокого временного разрешения из-за наложений импульсов.

Типы и характеристики сцинтилляторов

Основной характеристикой процесса преобразования энергии, затраченной частицей в веществе сцинтиллятора, в световую является так называемая конверсионная эффективность - $\epsilon_{\text{сц}}$, показывающая долю преобразованной энергии. Очевидно, что спектральные характеристики сцинтиллятора и фотоумножителя должны быть совмещены для наибольшего выхода фотоэлектронов, т.е. достижения наилучшего временного разрешения. Спектр светового излучения не зависит от природы ионизирующих частиц и совпадает со спектром люминисценции, вызванной ультрафиолетовым излучением. От типа и энергии ионизирующего излучения зависят в некоторой степени $\epsilon_{\text{сц}}$ и временные характеристики световспышек, что используется для идентификации частиц^{/80÷86/}. Важной характеристикой сцинтилляторов является их прозрачность к собственному излучению^{/77,78/}.

Сцинтилляторы делятся на две группы: органические и неорганические. К органическим относятся пластмассовые и жидкие сцинтилляторы, а также органические кристаллы.

Интенсивность световой вспышки сцинтиллятора подчиняется закону^{/89,90/}:

$$N_{\phi}(t) = \frac{E \cdot \epsilon_{\text{сц}} \cdot \bar{\lambda}}{h_{\text{п}} \cdot c \cdot (\tau_1 - \tau_2 + a\tau_3)} \cdot [e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} + a \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}}],$$

/9/

где E - энергия, выделенная в сцинтиляторе прошедшей частицей, $h_{\text{п}}$ - постоянная Планка, c - скорость света.

Пластмассовые сцинтилляторы являются твердыми растворами малой концентрации флуоресцирующих соединений в пластмассах, чаще всего в полистироле. Передача энергии носит двухступенчатый характер. Вначале возбуждаются молекулы растворителя, которые затем передают свою энергию молекулам сцинтиллятора. Преимуществом пластмассовых сцинтилляторов является малое время высвечивания. Постоянная τ_1 характеризует основное время высвечивания и равна $1 \div 3$ нсек. Постоянная τ_2 , характеризующая время нарастания световспышки, составляет $20 \div 30\%$ от τ_1 . Постоянная $\tau_3 \gg \tau_1$ характеризует медленную компоненту высвечивания, относительная амплитуда которой - a - обычно составляет $10 \div 15\%$. Величина τ_2 в пластмассовых сцинтилляторах сравнима с $\sigma_{\text{фэ}}$ в фотоумножителях и оказывает существенное влияние на величину разрешающего времени и на положение оптимального порога дискриминации. Заметное влияние имеет и постоянная спада τ_1 световой вспышки. К числу других достоинств пластмассовых сцинтилляторов относятся: возможность изготовления сцинтилляторов больших размеров, возможность введения примесей, необходимых для регистрации данного вида частиц^{/91÷93/}, высокая радиационная стойкость.

Жидкие органические сцинтилляторы применяют, когда имеется необходимость регистрации излучения в больших объемах вещества с повышенной разрешающей способностью. Они представляют собой растворы органических сцинтиллирующих веществ в различных жидкостях /ксилоле, бензоле, толуоле/ с добавками для регистрации данного вида излучений^{/94,95/}. Жидкие сцинтилля-

торы также обеспечивают высокие временные характеристики.

К кристаллическим органическим сцинтилляторам относятся, в основном, ароматические углеводороды - антроцен, стильбен, нафталин. Они обладают достаточно большим световыходом и сравнительно небольшим временем высвечивания.

Неорганические сцинтилляторы представляют собой кристаллы неорганических солей, чаще всего, - галогенные соединения металлов. Для увеличения световыхода в них вводятся специальные примеси других элементов, называемых активаторами. Наиболее часто применяется NaJ(Tl), обеспечивающий высокую эффективность регистрации γ -квантов и имеющий постоянную величину световыхода в широком диапазоне энергий.

В качестве сцинтилляторов могут также использоваться благородные газы и стекла. В таблице 3^{/96-98/} приведены основные характеристики различных сцинтилляторов.

Разрешающее время сцинтилляционных детекторов

Исследованию разрешающего времени сцинтилляционных детекторов посвящено достаточно большое число работ как расчетного^{/99-110/}, так и экспериментального характера^{/111-151/}.

Расчет минимального разрешающего времени сцинтилляционного счетчика можно произвести, например, на основе графиков, показанных на рис. 11^{/30/}. Величины по осям координат приведены по отношению к основной постоянной времени высвечивания сцинтиллятора. Значение результирующей временной дисперсии фотоэлектронов - $\sigma_{фр}$ находится как геометрическая сумма временных разбросов фотоэлектронов за счет начальных скоростей, углов и места вылета с фотокатода, а также спектрального состава излучения сцинтиллятора. Коэффициент γ показывает величину отношения результирующего времени нарастания световспышки на фотокатоде, обусловленную характеристиками сцинтиллятора, геомет-

Табл. 3. Основные характеристики некоторых сцинтилляторов^{/96-98/}.

| Вид сцинтиллятора | Производитель, тип сцинтиллятора | Коверсанта, эффективность (к антрацену) | λ макс, нм | τ_1 , нсек | τ_2 , нсек | τ_3 , нсек | α |
|--------------------------|---|---|--------------------|--|--|------------------------------------|--------------------------------------|
| Пластик | 0,02 p-терфенил + пропор Mitsubishi Electric NE 102A NE 111 Nash-Thompson Naton 136 Pilot Chemicals Pilot B Pilot C NE 211 | 0,43, 0,65 0,55 | 444 423 375 | 2,0 2,4 1,7 1,87 1,69 1,36 2,6 | ~0,8 0,9 0,35 0,7 0,7 0,5 | 20 12,5 12,5 11,5 12,5 | 0,08 0,12 0,12 0,13 0,12 |
| Жидкость | NE 211 | 0,78 | | 30 | | | - |
| Органические кристаллы | Антрацен Стильбен | 1,0 0,5 | 447 410 | 4,5 | 6 | 33 | 0,11 |
| Неорганические кристаллы | NaJ(Tl) | 2,3 | 413 | 230 | | 2200 | 0,19 |

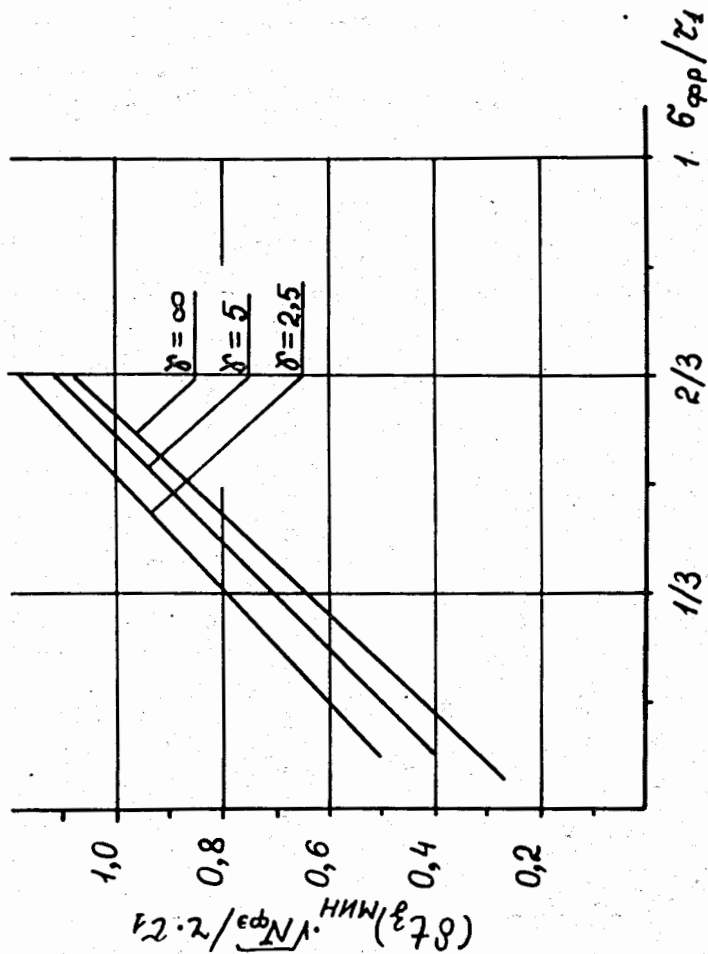


Рис. 11. График для определения минимального разрешающего времени сцинтиляционного счетчика /30/.

ней и размерами сцинтиллятора и световода, к постоянной τ_1 /коэффициент $\gamma \approx 1,2$ /.

Экспериментальные результаты по временному разрешению сцинтилляционных детекторов в сильной степени зависят от вида излучения, его энергии, типа и размеров сцинтиллятора и световода /31,111÷113/, типа фотумножителя /114÷122/ и используемой схемы временной привязки /123 ÷ 141/. Для удобства сравнения наиболее характерные результаты сведены в табл.4.

В настоящее время в улучшении временных характеристик сцинтилляционных детекторов нет заметного прогресса, что объясняется сдерживающим влиянием большого числа факторов, некоторые из которых, как например, геометрические размеры сцинтиллятора, имеют принципиально неустранимый характер.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Временные характеристики черенковских детекторов

Важным потенциальным преимуществом черенковских детекторов /152 ÷ 156/ для временных измерений является практическая безынерционность светового излучения. Однако достижению временного разрешения препятствует малое число фотонов, образуемых на единице длины. Число фотонов черенковского света, излученное частицей с зарядом $Z \cdot e$ на длине l в интервале длин волн $\lambda_1 \div \lambda_2$, равно:

$$N_{\Phi} = 2\pi \frac{Z^2 \cdot e^2}{h_{\Gamma} c} \cdot l \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \cdot \sin^2 \theta . \quad /10/$$

В твердом веществе возникает примерно 100 фотонов/см, а в газообразной среде - около 10 фотонов/см. Это составляет около 3% от числа фотонов, образуемых в сцинтилляционном детекторе с той же плотностью /152/. Для достижения высокой эффективности регистрации,

Табл.4. Экспериментальные результаты по временному разрешению сцинтилляционных детекторов.

| Авторы | Источник | Тип сцинтиллятора размеры, мм | Тип ФЭУ | Способ временной привязки | Диапазон амплитуд | δt , нсек |
|-----------------------------------|---------------------------|---|-----------------|---|----------------------|----------------------|
| Sugarman R, et al [142, 143] | ^{60}Co | Naton 136 $\varnothing 2,54 \ell = 2,54$ | 56AVP | Цувствит. дискриминатор заряда | 20% | 0,32 |
| Dardini S., et al [146] | ^{60}Co " - " | Naton 136 $\varnothing 2,54 \ell = 2,54$ $\varnothing 2,54 \ell = 22,5$ | 56AVP " - " | Дискримина- тор тока $I_{\text{п}} = 5 \text{ ма}$ " - " | 10% " - " | 0,5 0,8 |
| Bengston E., et al [31] | ^{60}Co | Naton 136 $\varnothing 2,54 \ell = 2,0$ | XP1021 | Токовый - следящий порог | 15% | 0,28 |
| Verzolini G., et al [106] | " - " | NE 111 $\varnothing 2,54 \ell = 1,0$ | " - " | " - " | " - " | 0,13 |
| Dolan K.W., et al [116] | ^{22}Na | $\varnothing 2,54 \ell = 1,0$ | " - " | " - " | " - " | 0,22 |
| | ^{60}Co | | XP1020 | | 10% | 0,16 |
| | ^{22}Na | NaJ(Tl) " - " | 56AVP XP1020 | Дискримина- тор тока $I_{\text{п}} = 2 \text{ ма}$ " - " | 10% " - " | 2,0 1,9 |

детекторов /особенно газовых черенковских/, их приходится делать достаточно больших размеров, до нескольких метров, что также снижает разрешающее время. Для более полного сбора световой энергии прибегают к преобразованиям спектра ^{157/}. Для получения малого разрешающего времени формирователи, применяемые с черенковскими детекторами, должны иметь высокую чувствительность - порядка долей миллиампера /десятков милливольт при передаче сигналов через высокочастотный кабель/, поскольку фотоумножители работают на уровне нескольких фотоэлектронов. Для радиаторов с большим показателем преломления и небольших размеров получено временное разрешение, составляющее доли наносекунды ^{158/}.

Литература

67. G.Belletini et al. NIM, 21, 106 (1963).
68. G.Belletini et al. NIM, 27, 38 (1964).
69. W.A.Gibson. RSI, 37, 8631 (1966).
70. H.F.Davis, H.A.Spore. IEEE - Trans., NS12/4, 245 (1965).
71. S.Ness, R.J.Smith-Saville. NIM, 40, 175 (1966).
72. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам. Под ред. Горюнова Н.Н., М.: Энергия, 1972.
73. I.Guyon et al. NIM, 71, 215 (1969).
74. Л.Ондриш и др. ПТЭ, 2, 1971, 110.
75. А.В.Немаров, И.Г.Фельдман. ПТЭ, 5, 57, 1972.
76. M.Cocchi, A.Rota. NIM, 46, No 1, 136 (1967).
77. В.М.Деняк и др. ПТЭ, 3, 124, 1970.
78. Annual Report, CERN, 119 (1964).
79. V.Bars, E.Markhanen. NIM, 99, No 2, 419 (1972).
80. R.V.Owen, IRE Trans., NS-9, No. 3, 285 (1962).
81. H.E.Jacson, G.E.Thomas. NIM, 36, 102.419 (1965).
82. B.Sabbah, A.Suhami. NIM, 58, 102 (1968).
83. R.N.Onge, J.A.Lockwood. NIM, 69, 23 (1969).
84. А.А.Омельяненко и др. Препринт ОИЯИ 3-5184, Дубна, 1970.
85. В.Г.Бровченко. ПТЭ, 4, 7, 1971.
86. А.А.Курашов. Идентификация импульсов от детекторов излучений, М., Атомиздат, 1972.
87. О.А.Гундер и др. ПТЭ, 3, 66, 1969.
88. В.М.Горбачев, Н.А.Уваров. ПТЭ, 3, 123, 1970.
89. L.G.Hyman. RSI, 36, No 2, 193 (1965).

90. O.Kelly. NIM, 109, 233 (1973).
91. L.J.Basile. Chem.Phys., 27, 801 (1957).
92. Г.И.Анисимова и др., ПТЭ, 1, 49, 1969.
93. О.А.Гундер и др., ПТЭ, 5, 78, 1971.
94. G.Verdenne et al. J.Physique, 24, 801 (1963).
95. R.L.Walteret, C.A.Kesley. Nucl.Phys., 46, 66 (1963).
96. Nuclear Enterprises Co, Scintillator Catalog, G.Brit. 1973.
97. T.M.Kelly, J.A.Merrigan. NIM, 109, No 2, 233 (1973).
98. P.B.Lyons, J.Stevens. NIM, 114, No 2, 313-320 (1974).
99. E.Gatti, V.Svelto. NIM, 30, 213 (1964).
100. E.Gatti, V.Svelto. NIM, 43, 248 (1966).
101. S.Donati et al. NIM, 46, 165 (1967).
102. S.Donati et al. Adv.Electron.Phys., 26, 251 (1969).
103. M.Bertolaccini et al. NIM, 51, 325 (1967).
104. S.Donati et al. NIM, 77, 179 (1970).
105. M.A.El-Wahab, M.Gassaly. Nuovo Cimento, XLII, 56 (1967).
106. G.Bertolini et al. IEE-Trans., NS-13, No 3, 119 (1966).
107. B.Sigfridsson. NIM, 54, 13 (1967).
108. M.Cochi, A.Rota. NIM, 55, 365 (1967).
109. Yu.K.Akimov. Intern. Symp. on Nucl. Electronics, v. 1, 6, Versailles, 1968.
110. Ю.К.Акимов, С.В.Медведь. Международный симпозиум ОИЯИ по ядерной электронике, ОИЯИ 13-4720, Дубна, 1969.
111. W.J.McDonald, D.A.Gedcke. Report Nucl.Res.Cent.Univers. of Alberta, Canada 1967.
112. J.B.Berks. Proc.Phys.Soc., J.Phys., B, Ser 2,1, 946 (1968).
113. E.Nardi. NIM, 95, 229 (1971).
114. M.Bonitz et al. NIM, 29, 309 (1964).
115. G.Present et al. NIM, 31, 71 (1964).
116. K.W.Dolan et al. NIM, 39, No 2, 232 (1966).
117. G.Breuze, P.Sawine. Proc.Intern.Symp.Nucl.Electronics, v. 1, Versailles, 1968.
118. R.Siegenthaler. NIM, 71, 173 (1969).
119. J.M.Schonkeren. Photomultipliers, Philips, Holland 1970.
120. H.R.Krall et al. IEEE Tr., NS-17, No 3, 71 (1970).
121. P.Chevalier et al. IEEE Tr., NS-17, No 3, 75 (1970).
122. J.Bialkowsky, M.Moszynski. NIM, 105, No 1, 51 (1972).
123. M.G.Strauss. RSI, 34, No 11, 1248 (1963).
124. D.A.Gedcke, W.J.Mc Donald. NIM, 55, 377 (1967).
125. D.A.Gedcke, W.J.Mc Donald. NIM, 56, 148 (1967).
126. D.A.Gedcke, W.J.Mc Donald. NIM, 58, 253 (1968).
127. A.Barna, B.Richter. NIM, 59, 141 (1968).
128. G.Jones, P.H.R.Orth. NIM, 59, 309 (1968).
129. R.Murn. NIM, 63, 233 (1968).
130. J.E.Griffin, W.W.Souder. NIM, 64, 85 (1968).
131. A.Tamminen, P.Jauho. NIM, 65, 132 (1968).
132. B.Remigolsky. NIM, 67, 9 (1969).

133. R.Courad. NIM, 67, 148 (1969).
134. L.J.Herbst. NIM, 70, 189 (1969).
135. L.Ondris et al. NIM, 81, 121 (1970).
136. F.P.Brady, B.E.Bonner. NIM, 81, 280 (1970).
137. O.Harms. NIM, 83, 221 (1970).
138. M.R.Maier, P.Sperr. NIM, 87, 13 (1970).
139. N.Abatissa et al. NIM, 95, 327 (1971).
140. R.Rougnay et al. NIM, 95, 333 (1971).
141. L.Karlson. NIM, 100, No 1, 193 (1972).
142. R.Sugarman et al. BNL 711, T-248 (1962).
143. A.Schwarzchild. NIM, 21, 1 (1963).
144. S.V.Muchin et al. Proc.Conf. on Nucl. Electron, Bombay, Nov. 1965, Vienna 1966, 225.
145. J.A.Miehe et al. IEEE Tr., NS-13, No 3, 127 (1966).
146. C.Dardini et al. NIM, 47, 233 (1967).
147. J.P.Hurley et al. NIM, 51, No 2, 299 (1967).
148. W.Meiling.
Материалы симпозиума ОИЯИ по наносекундной ядерной электронике, Дубна -1967, ОИЯИ 13-1700, Дубна, 1968.
149. A.Ogata et al. NIM, 60, No 2, 141 (1968).
150. М.А.Демехина и др. Препринт ЕФИ-М-7/68/, Ереван, 1968.
151. В.П.Канавец и др. ПТЭ, 4, 1969, 157.
152. Дж.Джелли. Черенковское излучение и его применение, М., ИИЛ, 1960.
153. В.П.Зрелов. Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий, М., Атомиздат, 1968.
154. А.С.Вовенко и др., Усп. физ. наук, 81, 453, 1963.
155. С.П.Денисов. Труды Межд. конф. по аппаратуре в физ. выс. энергий, Дубна IX-1970, ОИЯИ, Д-5805, 1971.
156. P.Albats et al. NIM, 95, No 1, 189 (1971).
157. А.М.Благодоров и др., ПТЭ, 4, 1968, 59.
158. A.Roberts, D.Early. NIM, 73, No 3, 336 (1969).

Рукопись поступила в издательский отдел
17 мая 1974 года