

АНАЛИЗ СХЕМЫ ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПРЕДУСИЛИТЕЛЯ С УЛУЧШЕННЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2025 г. Ю. Г. Сибиряк^a, *

^a Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

* e-mail: sibiryak.yur@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.09.2024 г.

После доработки 28.10.2024 г.

Принята к публикации 19.11.2024 г.

Описана схема зарядочувствительного предуслителя (ЗЧП) для измерения энергии и времени пролета регистрируемых частиц. ЗЧП имеет два выхода. На E -выходе сигнал определяется интегралом заряда, образованного частицей в полупроводниковом детекторе. Амплитуда сигнала на этом выходе пропорциональна энергии частицы. На T -выходе сигнал повторяет форму импульса тока детектора и имеет малое время нарастания, что уменьшает ошибку временной привязки. Приведена принципиальная схема ЗЧП, даны расчеты параметров сигналов на E - и T -выходах. Приведены результаты моделирования и измеренные параметры предложенной схемы. Получен критерий целесообразности использования временного канала ЗЧП в зависимости от времени высвечивания кристалла радиатора или времени сбириания заряда. ЗЧП предназначен для использования в фотонных спектрометрах на основе кристаллов вольфрамата свинца и лавинных фотодиодов, но может быть также использован в спектрометрах с другими типами полупроводниковых детекторов.

DOI: 10.31857/S0032816225020084, EDN: GJVRBG

1. ВВЕДЕНИЕ

В ядерно-физическом эксперименте для измерения энергии регистрируемых частиц широко используются полупроводниковые детекторы, PIN-диоды и лавинные фотодиоды (ЛФД). Конечным результатом регистрации частицы такими детекторами является образование заряда в их материале. Обычно заряд имеет малую величину, особенно если детектор не имеет внутреннего усиления. Для дальнейшей обработки сигнала (усиления, фильтрации, оцифровки) заряд преобразуется в импульс напряжения с помощью зарядочувствительного предуслителя (ЗЧП).

Кроме измерения энергии частицы необходимо определить ее тип. Например, одним из методов разделения прямых фотонов от антинейтронов в фотонном спектрометре ФОС эксперимента АЛИСА (ЦЕРН) является измерение их времени пролета от точки взаимодействия

пучков до поверхности детектора, равное 4.6 м. Разница во времени пролета этих частиц составляет примерно 1 нс.

Для формирования временной отметки сигнал с выхода ЗЧП поступает на вход компаратора. Стабильность временной отметки σ_t определяется формулой [1]

$$\sigma_t = \frac{\sigma(U)}{dA(t)/dt}, \quad (1)$$

где $\sigma(U)$ – шумы на входе компаратора, $dA(t)/dt$ – скорость пересечения сигналом порога. Из формулы (1) следует, что для уменьшения ошибки временных измерений сигнал на выходе ЗЧП должен иметь маленькие шумы и большую скорость нарастания.

Показано [2], что для получения максимального отношения сигнал/шум ЗЧП должен быть выполнен по схеме активного интегратора. В такой схеме скорость нарастания реального сигнала на выходе ЗЧП будет зависеть от длительности

токового импульса на выходе детектора (рис. 1). На верхнем графике показана аппроксимация экспериментальной кривой высвечивания кристалла вольфрамата свинца PbWO_4 , которая была измерена с помощью ФЭУ, на нижнем графике показана форма выходного импульса ЗЧП с ЛФД на входе, который регистрировал световой поток кристалла. Быстрая компонента имела время нарастания 30–50 нс, при этом собственное время нарастания ЗЧП равнялось 8 нс. После достижения импульсом примерно 80% амплитуды время нарастания сигнала замедляется, и своей амплитуды он достигает примерно за 100 нс. На рис. 1 видно, что время нарастания сигнала на выходе ЗЧП определяется временем высвечивания кристалла, которое в несколько раз больше, чем время нарастания светового потока. Таким образом, использование сигналов с выхода ЗЧП для получения временной отметки не является оптимальным решением.

Известны схемы ЗЧП с двумя выходами, которые можно условно назвать медленным и быстрым выходами или E - и T -выходами. Медленный выход ЗЧП служит для измерения энергии и является выходом активного интегратора. Сигнал на быстром выходе повторяет форму импульса тока на выходе детектора, имеет короткий фронт и служит для получения временной отметки.

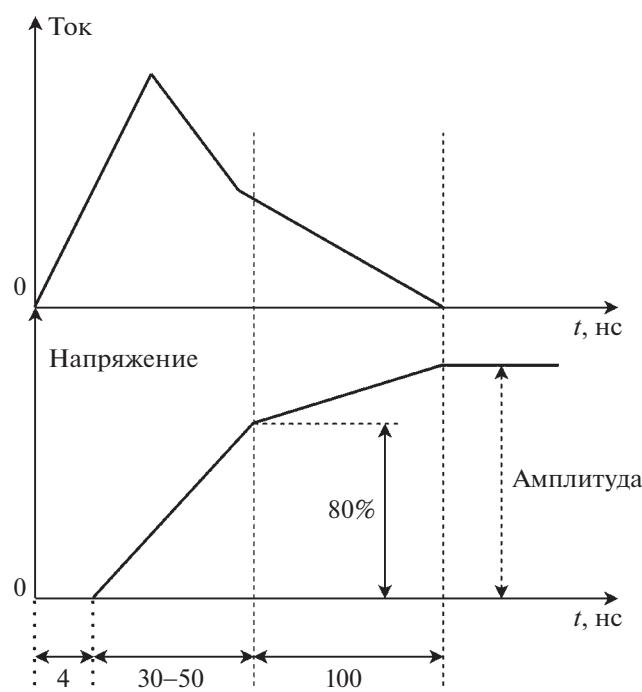


Рис. 1. Форма сигнала на выходе ЗЧП.

Например, в работе [3] предложена схема ЗЧП с двумя выходами, в которой быстрый сигнал формируется из импульса тока в цепи выходных эмиттерных повторителей. Однако реализация схемы быстрого выхода имеет существенный недостаток, так как коэффициент усиления зависит от емкости на выходе ЗЧП, например от длины подключенного коаксиального кабеля. Более того, импульс приобретает форму токового, только если емкость на выходе превышает 50 пФ.

Известна схема быстрого выхода (Fast Out), когда сигнал формируется из импульса тока второго каскада ЗЧП [4]. Однако в работе не приводятся расчеты коэффициента преобразования заряда детектора в амплитуду на быстром выходе, не исследована зависимость времени нарастания от паразитной емкости детектора, не определены шумы на этом выходе, что не позволяет оценить временное разрешение данной схемы.

В настоящей работе представлен анализ схемы ЗЧП для измерения энергии и времени пролета. Приводятся расчеты параметров сигналов на E - и T -выходах в зависимости от величины заряда, образованного в детекторе, его паразитной емкости и паразитных емкостей компонентов схемы ЗЧП. По полученным значениям проведена оценка временного разрешения. Выполнено компьютерное моделирование схемы и получены экспериментальные данные на макете ЗЧП.

2. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ЗЧП

Разработанная схема ЗЧП показана на рис. 2. За основу взята схема предусилителя, которая используется в настоящее время в фотонном спектрометре ФОС [5]. В эту схему добавлен временной канал, выполненный на транзисторах T_5 и T_8 . Одно из требований к ЗЧП – минимальная рассеиваемая мощность, так как он будет работать в модуле с примерно 6000 фотодетекторами, охлажденными до -25°C .

В первом каскаде применен полевой транзистор типа 2SK932 фирмы Sanyo, который включен по схеме “общий исток” и имеет крутизну около 35МА/В при токе стока 5МА. Далее схема отличается от классической каскадной схемы за счет введения дополнительного усилительного каскада по току на транзисторе T_2 , который работает на каскад “общая база” на транзисторе T_3 . Дополнительный каскад усиления позволяет расширить верхнюю граничную частоту схемы

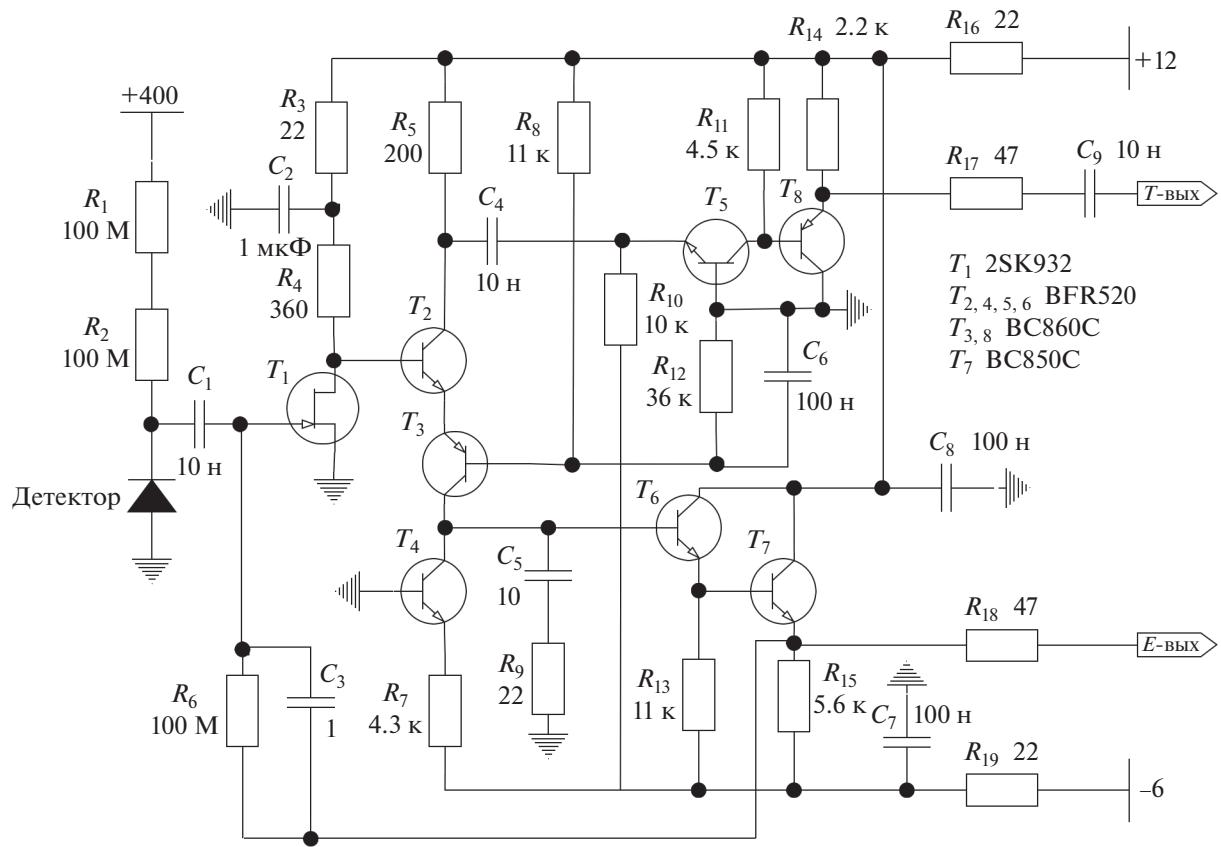


Рис. 2. Принципиальная схема ЗЧП.

при охвате ее отрицательной обратной связью. Коллектор транзистора \$T_3\$ соединен с динамической нагрузкой, выполненной на транзисторе \$T_4\$. Основное усиление схемы сосредоточено в этой точке, поэтому для изоляции высокоомной точки соединения коллекторов \$T_3\$, \$T_4\$ от входного импеданса последующего спектрометрического усилителя используется составной эмиттерный повторитель на транзисторах \$T_6\$, \$T_7\$.

Цепь обратной связи замкнута через \$C_3\$ и \$R_9\$; \$R_9\$ и \$C_5\$ осуществляют коррекцию переходной характеристики ЗЧП на высокой частоте.

Детектор подключается ко входу ЗЧП через разделительный конденсатор \$C_1\$, который должен выдерживать напряжение 500 В. Напряжение смещения подается на фотодетектор через резисторы \$R_1\$, \$R_2\$.

Выбор величин \$R_1\$, \$R_2\$ и \$C_1\$, кроме того, что величина резисторов смещения влияет на уровень шумов, влияет на форму импульса на \$E\$-выходе. Условием спада выходного импульса к базовой линии без отрицательного выброса является выполнение неравенств \$C_1 > 10C_{\text{дет}}\$ и \$R_1 + R_2 > R_6\$.

Цепочки \$R_{16}C_8\$ и \$R_{19}C_7\$ осуществляют фильтрацию питающих напряжений от наводок и шумов.

Интегрирующая цепочка \$R_3C_2\$ является дополнительным фильтром по питанию в цепи стока \$T_1\$.

2.1. Коэффициент преобразования ЗЧП

Коэффициент усиления по постоянному току без обратной связи разработанного ЗЧП рассчитывается по формуле

$$K_{6c} = S \frac{R_4 R_{bx2}}{R_4 + R_{bx2}} \frac{R_{bx2}}{R_4 + R_{bx2}} \frac{R_h}{2r_3}, \quad (2)$$

где \$S\$ – крутизна полевого транзистора; \$R_{bx2} = \beta(r_{s2} + r_{s3})\$ – входное сопротивление транзистора \$T_2\$; \$r_{s2}\$, \$r_{s3}\$ – эмиттерные сопротивления транзисторов \$T_2\$, \$T_3\$ соответственно; \$R_h = R_{k3} \parallel R_{k4} \parallel R_{bx6}\$ – эквивалентное сопротивление, образованное параллельным соединением коллекторных сопротивлений \$T_3\$, \$T_4\$ и входным сопротивлением \$T_6\$.

Формула (2) может быть преобразована к виду

$$K_{6c} = S R_h \frac{R_4 \cdot 2r_3 \beta^2}{(R_4 + 2r_3 \beta)^2} \quad (3)$$

в предположении, что \$r_{s2} = r_{s3} = r_s\$.

Величину коллекторного сопротивления можно оценить, используя выходную вольт-

амперную характеристику транзистора $I_k = f(U_{k3})$ в районе рабочей точки по формуле $R_k = \Delta U_{k3} / \Delta I_k$. Ток через T_2 , T_3 , T_4 равен 1.3 мА, тогда $R_{k3} \approx 86$ кОм, $R_{k4} \approx 143$ кОм.

Входное сопротивление транзистора T_6 вычисляется по формуле $R_{bx5} = \beta [R_{10} \parallel (\beta R_{12})] = 1080$ кОм при $\beta = 100$. Тогда R_h вычисляется как параллельное соединение R_{k3} , R_{k4} , R_{bx6} и равно 51 кОм.

Эмиттерное сопротивление $r_o = \Phi_T / I_o = 26 / 1.3 = 20$ Ом, где Φ_T – температурный потенциал.

Вычисление K_{bc} по формуле (3) с подстановкой приведенных выше параметров дает коэффициент усиления предуслителя без обратной связи, равный 11 300.

Зарядочувствительность может быть вычислена как [6]:

$$Z = \frac{K_{bc}}{C_{bx} + C_0 (K_{bc} + 1)}, \quad (4)$$

где C_{bx} – суммарная емкость детектора и входной емкости ПТ, C_0 – емкость обратной связи. В нашем случае выполняется условие $K_{bc} = 11\,300 \gg C_{bx} / C_0 = 100$, тогда $Z = 1/C_0$ и зарядочувствительность определяется только пассивным элементом – емкостью обратной связи C_0 , т. е. амплитуда сигнала на E -выходе определяется формулой

$$U_{\text{вых}}(E) = Q/C_0. \quad (5)$$

Сигналом для временного канала является импульс напряжения, снимаемый с коллектора T_2 . Для вычисления коэффициента преобразования заряда детектора в импульс напряжения на T -выходе использовалась эквивалентная схема на рис. 3. Нумерация транзисторов соответствует нумерации на принципиальной схеме (рис. 2).

Как было показано выше, амплитуда сигнала на E -выходе равна

$$U_{\text{вых}}(E) = Q/C_0 = E \cdot t/C_0,$$

где t – время собирания заряда.

Прямое преобразование Лапласа этого выражения имеет вид

$$L[U_{\text{вых}}(E)] = I_{\text{дет}} / (p^2 C_0).$$

С другой стороны, амплитуда сигнала на E -выходе вызвана импульсом тока ΔI в цепи T_2-T_3 и параллельного соединения R_h и C_h . Тогда

$$\begin{aligned} \frac{I_d}{p^2 C_0} &= \Delta I \frac{R_h}{p C_h R_h + 1}, \\ \Delta I(p) &= I_d \frac{C_h}{p C_0} + I_d \frac{1}{p^2 C_0 R_h}. \end{aligned} \quad (6)$$

Функция вещественной переменной этого выражения имеет вид

$$\Delta I(t) = \frac{I_d}{C_0} \left(C_h + \frac{t}{R_h} \right). \quad (7)$$

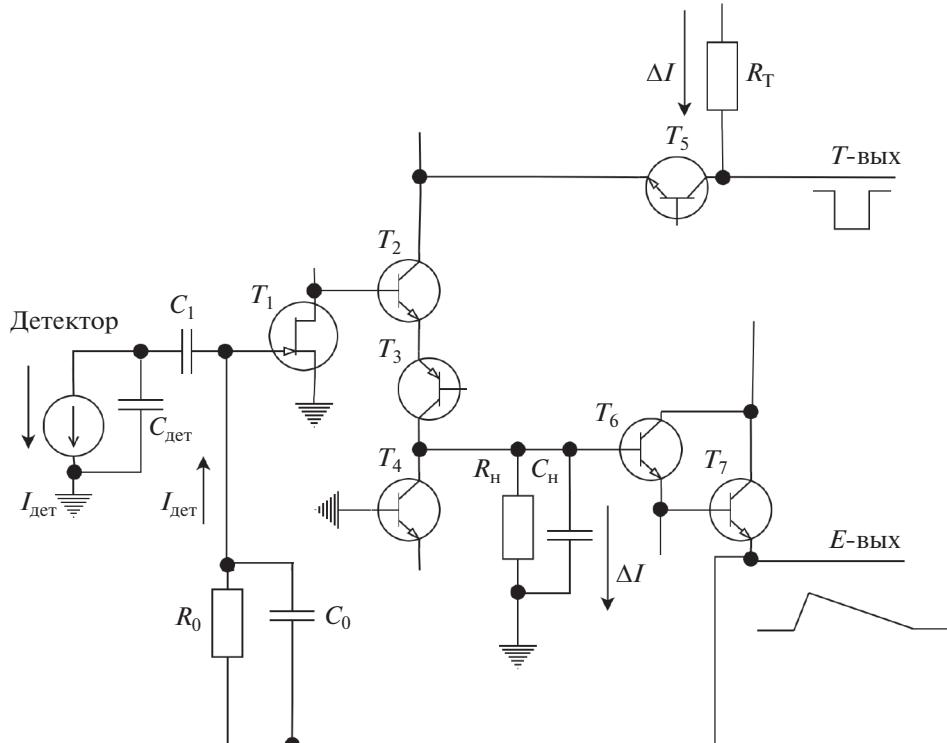


Рис. 3. Эквивалентная схема ЗЧП.

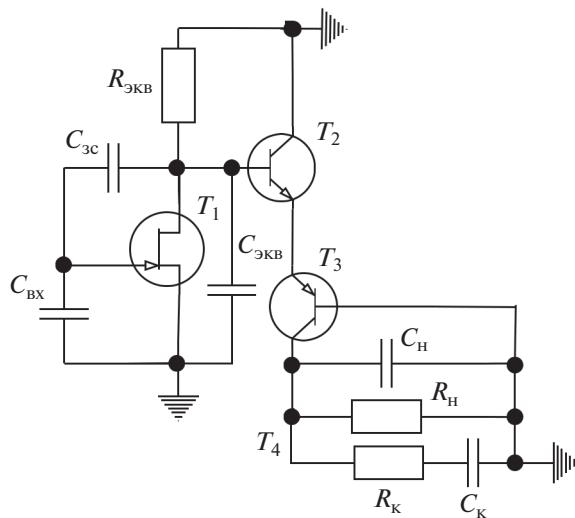
Из-за малости входного сопротивления каскада с общей базой T_5 практически весь ток ΔI будет протекать через резистор R_t , формируя импульс на T -выходе:

$$U_{\text{вых}}(T) = \Delta I R_t = \frac{I_d R_t}{C_0} \left(C_{\text{h}} + \frac{t}{R_{\text{h}}} \right). \quad (8)$$

Форма импульса $U_{\text{вых}}(T)$ состоит из мгновенного скачка с постоянной амплитудой $U_c = I_{\text{дет}} R_t \cdot C_{\text{h}} / C_0$ и нарастающей части в течение длительности импульса t , описываемой выражением $U_r = I_{\text{дет}} \cdot R_t \cdot C_{\text{h}} / (C_0 R_{\text{h}})$. Время нарастания U_c будет определяться частотной характеристикой ЗЧП.

2.2. Частотные параметры ЗЧП

Частотные параметры ЗЧП характеризуются верхней граничной частотой пропускания схемы, которая определяет минимальное время нарастания выходного импульса. Для расчета времени нарастания использована эквивалентная схема ЗЧП (рис. 4).



$$K_{\text{бс}} f_{\text{n}} = K_{\text{oc}} f_{\text{oc}}, \quad f_{\text{oc}} = \frac{K_{\text{бс}} f_{\text{n}}}{K_{\text{oc}}} = (1 + \gamma K_{\text{бс}}) f_{\text{n}}, \quad (9)$$

где f_n – частота, на которой $K_{\text{бс}}$ уменьшается на 3 дБ, f_{oc} – частота, на которой K_{oc} уменьшается на 3 дБ, γ – коэффициент передачи по цепи обратной связи.

Подставляя в формулу (9) частоты f_{oc} и f_n , которые вычисляются по формуле $f = 1/(2\pi\tau^*)$, получаем

$$\tau_{\text{oc}} = \frac{\tau_n}{1 + \gamma K_{\text{бс}}}$$

и время нарастания выходного импульса

$$t_{\Phi} = 2.2\tau_{\text{oc}} = 2.2 \cdot \frac{\tau_n}{1 + \frac{C_0}{C_{\text{ax}}} K_{\text{бс}}}. \quad (10)$$

На эквивалентной схеме ЗЧП на рис. 4 видно, что по переменному току первый каскад охвачен обратной связью через емкость $C_{\text{зс}}$, что приводит к снижению его коэффициента усиления. Следовательно, в формуле (10) необходимо вместо $K_{\text{бс}}$ по формуле (3) использовать $K_{\text{бс}}(C_{\text{зс}})$, который можно вычислить следующим образом:

$$K_{\text{бс}}(C_{\text{зс}}) = K_1 K_2 = \frac{SR_{\text{ЭКВ}} R_h}{2r_s A} \frac{1}{1 + p \frac{\tau_1}{A}} \frac{1}{1 + \tau_n},$$

где

$$K_1 = S \frac{\frac{R_{\text{ЭКВ}}}{1 + p C_{\text{ЭКВ}} R_p}}{\frac{R_p}{1 + S \frac{C_{\text{ЭКВ}} R_{\text{ЭКВ}}}{1 + C_{\text{зс}} R_{\text{ЭКВ}}} \cdot \frac{C_{\text{вх}}}{C_{\text{зс}} + 1}}} = \frac{SR_{\text{ЭКВ}}}{A} \cdot \frac{1}{1 + p \frac{\tau_1}{A}}, \quad (11)$$

$$A = 1 + SR_{\text{ЭКВ}} \frac{C_{\text{зс}}}{C_{\text{вх}} + C_{\text{зс}}}, \quad K_2 = \frac{R_h}{2r_s} \cdot \frac{1}{1 + p \tau_n},$$

здесь K_1 и K_2 – коэффициенты усиления первого и второго каскадов соответственно. Параметр A в формуле (11) является коэффициентом передачи в цепи местной обратной связи первого каскада через емкость $C_{\text{зс}}$. Тогда

$$K_{\text{бс}}(C_{\text{зс}}) = \frac{SR_{\text{ЭКВ}} R_h}{2r_s A},$$

и формула (10) преобразуется к виду

$$t_{\Phi} = 2.2 \frac{\tau_n}{1 + \frac{C_0}{C_{\text{вх}}} K_{\text{бс}}(C_{\text{зс}})} \approx 4.4 \frac{Ar_{\text{з}}}{SR_{\text{ЭКВ}}} \frac{C_{\text{вх}} C_h}{C_0}. \quad (12)$$

Поскольку ΔI формирует выходной сигнал $U(E)$ и одновременно входной сигнал для временного канала, минимальное время нарастания $U(T)$ можно вычислить по формуле (12). Оценка

времени нарастания сигнала $U(T)$ с использованием значений параметров из табл. 1, 2 дает значение, равное 7.7 нс.

Оценим величины амплитуд сигналов $U(E)$ и $U(T)$ для случая использования ЗЧП с лавинным фотодиодом типа S8664-55 (HAMAMATSU) и кристаллом PbWO_4 , охлажденных до температуры -25°C . В рабочей точке ЛФД имеет усиление 50 и паразитную емкость 80 пФ. При регистрации фотона с энергией 1 ГэВ в детекторе образуется заряд $35.2 \cdot 10^{-15}$ Кл. Тогда по формуле (5) получаем $U(E) = 29.3$ мВ.

Для вычисления $U(T)$ определим ток детектора, исходя из времени высвечивания кристалла, среднее значение которого составляет примерно 50 нс (рис. 1). Разделив заряд на время, получим ток детектора, равный $7 \cdot 10^{-7}$ А. Для временной привязки важна амплитуда скачка напряжения в момент регистрации частицы, поэтому вычислим значение только первого члена суммы в уравнении (8). Тогда при $R_t = 4.5$ кОм и $C_h = 6.5$ пФ амплитуда $U(T) = 17.4$ мВ.

По полученным данным можно вычислить скорость нарастания сигналов $U(E)$ и $U(T)$. Для сигнала на T -выходе она составит $17.4 \text{ мВ} / 7.7 \text{ нс} = 2.3 \text{ мВ/нс}$, а для сигнала на E -выходе – $29.3 \text{ мВ} / 50 \text{ нс} = 0.6 \text{ мВ/нс}$, где за время нарастания сигнала 50 нс принято время высвечивания кристалла (рис. 1). Видно, что скорость нарастания сигнала $U(T)$ в 4 раза выше, чем скорость нарастания сигнала $U(E)$, что позволяет получить более точную временную привязку. Это преимущество будет сохраняться до тех пор, пока время высвечивания кристалла, отличного от PbWO_4 , окажется меньше 13 нс, тогда скорость нарастания сигналов на обоих выходах будет одинакова. Этот параметр является критерием целесообразности использования дополнительного канала для получения временной отметки.

2.3. Временное разрешение

Шумы на выходах ЗЧП можно оценить, используя эквивалентный шумовой заряд ENC, методика вычисления которого описана в работе [8]. Для описываемой схемы ЗЧП величина ENC, приведенная ко входу в широкой полосе частот, составит примерно 2000 электронов. Тогда шумовое напряжение на E -выходе можно оценить как 270 мкВ, а на T -выходе – как 190 мкВ, принимая во внимание разницу коэффициентов преобразования заряда в напряжение на этих выходах.

Исходя из полученных данных, ошибка измерения временной отметки для частицы с энергией 1 ГэВ по формуле (1) для E -выхода составит $\sigma(E) = 470$ пс, для T -выхода — $\sigma(T) = 118$ пс.

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

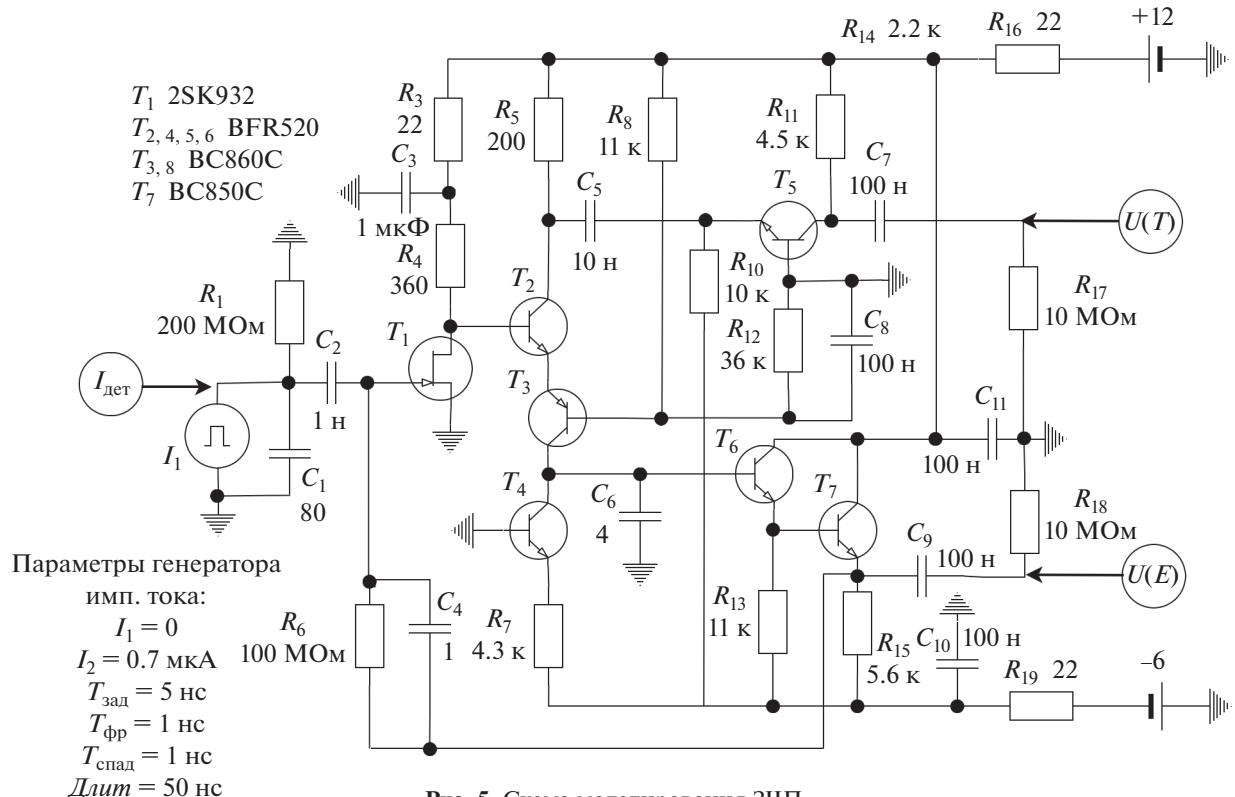


Рис. 5. Схема моделирования ЗЧП.

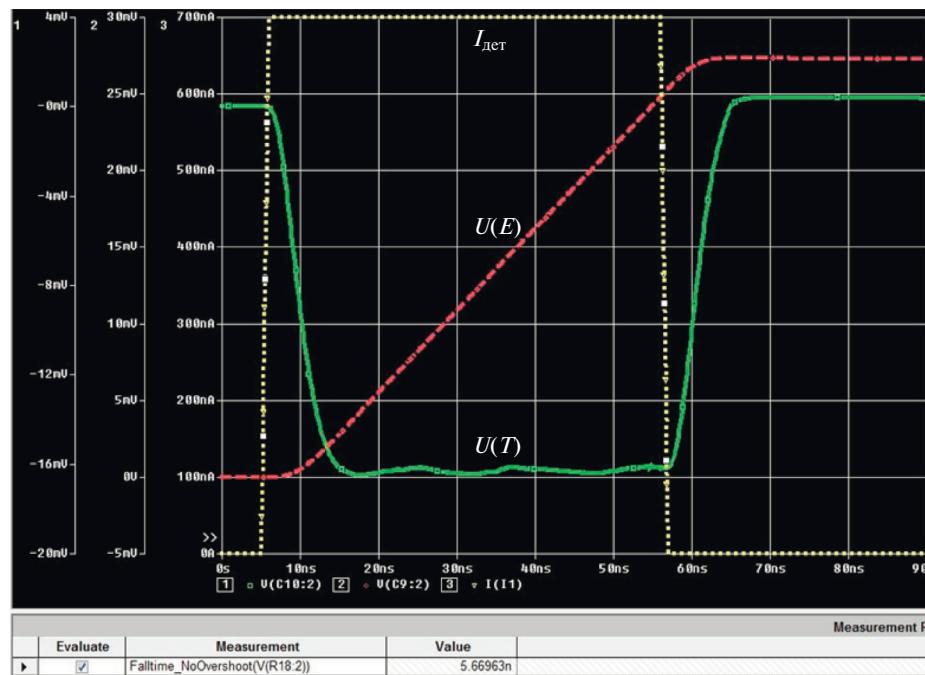


Рис. 6. Результаты моделирования схемы ЗЧП: $I_{\text{дет}}$ — импульс тока на входе ЗЧП, $U(E)$ — сигнал на E -выходе, $U(T)$ — сигнал на T -выходе.

Сигнал детектора от частицы с энергией 1 ГэВ моделировался импульсом тока $I_{\text{дет}}$ от генератора II с параметрами, показанными на рис. 5. Результаты моделирования и расчетные значения приведены в табл. 3. Из таблицы следует, что расчетные значения близки к значениям, полученным с помощью моделирования.

Таблица 3. Параметры ЗЧП – расчет и моделирование

Параметр	Расчет	Моделирование
$U(E)$, мВ	29.3	27
$U(T)$, мВ	17.4	16
$U(T)$, нс	7.7	5.7

4. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОТИПА ЗЧП

Разработан печатный монтаж и изготовлен опытный образец ЗЧП для измерения характеристик предуслителя.

На вход ЗЧП через резистор 91 кОм подавался импульс напряжения амплитудой 1.2 В и длительностью 70 нс. Таким образом имитировался токовый сигнал детектора. На рис. 7 показаны осциллограммы, измеренные осциллографом TEKTRONIX-2024. Расчетные и измеренные параметры сигналов приведены в табл. 4. Для расчета времени нарастания паразитная емкость C_h принималась равной 10 пФ.

Таблица 4. Сравнение измеренных и расчетных параметров сигналов

Параметр	Измерения	Расчет
$U(E)$, В	0.76	0.76
$U(T)$, В	0.45	0.49
Время нарастания $U(T)$, нс	11.7	12.8

Измеренные шумы (RMS) на E -выходе составляли 360 мкВ, на T -выходе – 450 мкВ, но при этом отсутствовали импульсные помехи, которые были видны на E -выходе.

Для эквивалентного импульса тока, соответствующего регистрации фотона с энергией 1 ГэВ, измеренная амплитуда сигнала на T -выходе составила 20 мВ со временем нарастания 11 нс, временное разрешение составило 264 пс. Для сравнения – в работе [10] описаны результаты измерения временного разрешения на пучке электронов. Фотодетектор представлял собой конструкцию из кристалла вольфрамата свинца,

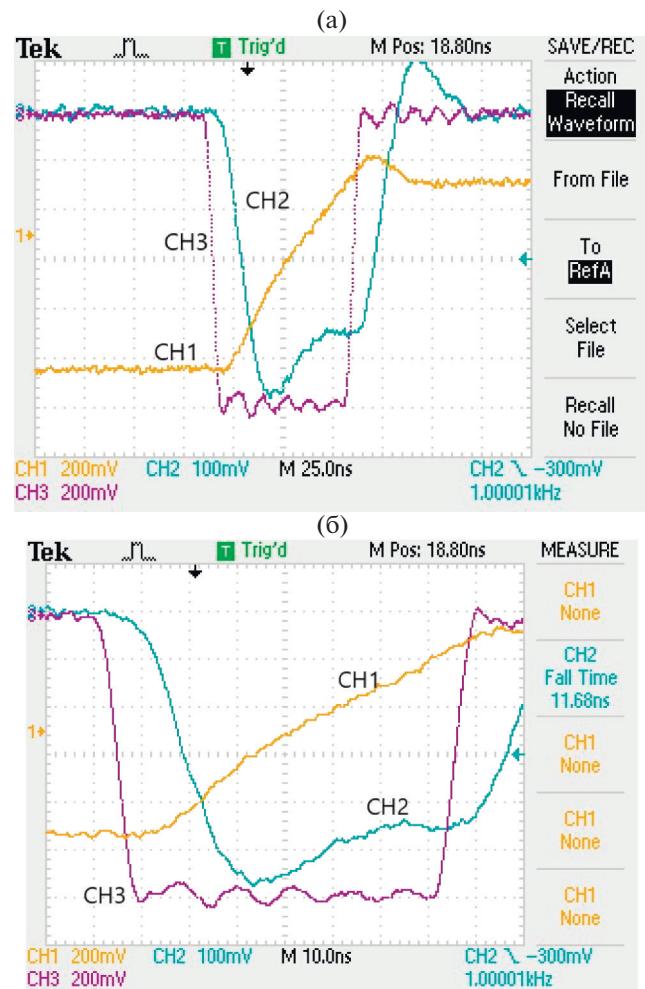


Рис. 7. Осциллограммы сигналов ЗЧП: **а** – временной масштаб 25 нс, **б** – временной масштаб 10 нс; CH_1 – сигнал на E -выходе, CH_2 – сигнал на T -выходе, CH_3 – входной импульс напряжения.

лавинного фотодиода и ЗЧП с одним E -выходом. Фотодетектор охлаждался до -25°C . Временное разрешение для энергии 1 ГэВ составило около 660 пс.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ схемы ЗЧП с двумя выходами, позволяющий измерять энергию и время пролета: на E -выходе формируется сигнал для измерения энергии регистрируемых частиц, на T -выходе – сигнал с коротким временем нарастания для получения временной отметки.

Получены формулы для расчета времени нарастания и амплитуды сигналов на выходах ЗЧП. Проведено компьютерное моделирование схемы и изготовлен макет ЗЧП для проведения измерений. Данные, полученные из расчета,

моделирования и измерений хорошо согласуются между собой.

Определен критерий применимости ЗЧП с быстрым выходом в зависимости от времени высвечивания фотодетектора.

Введение дополнительного канала в схему ЗЧП для временных измерений позволяет улучшить временное разрешение более чем в 2.5 раза для частиц с энергией 1 ГэВ при использовании в качестве фотодетектора кристаллов вольфрамата свинца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цитович А.П. Ядерная электроника. Москва: Энергоатомиздат, 1984. С. 72.
2. Radeka V. // Nucleonics. 1965. V. 23. № 7. P. 52.
3. Hamrita H., Rauly E., Blumenfeld Y. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2004. V. 531. P. 607. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.05.112>
4. Friese J., Gillitzer A., Korner H.J., Maier M.R. // IEEE Trans Nucl Sci. 1993. V. 40. № 4. P. 339. <https://doi.org/10.1109/23.256576>
5. Aleksandrov D.V., Burachas S.F., Ippolitov M. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2005. V. 550. P. 169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2005.03.174>
6. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. / Под ред. Ю.К. Акимова. Москва: Энергоатомиздат, 1989.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Москва: Мир, 1982. С. 227.
8. Klovning A., Maeland O., Sibiryak I., Rongved R. Pre-amplifier for ALICE-PHOS project (CERN) – Calculation and design. / CERN-ALICE-INT-1999-11
9. <https://www.orcad.com/ru/products/orcad-capture/overview>
10. Bogolyubsky M., Ippolitov M., Kuryakin A. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2009. V. 598. P. 702. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2005.03.174>