

ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ШУМОВОЙ ЗАРЯД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ СОГЛАСОВАНИЯ ИМПЕДАНСОВ ДРЕЙФОВОЙ СТРОУ-ТРУБКИ И УСИЛИТЕЛЯ

А. П. Кацук^а, Н. А. Кучинский^б, О. В. Левицкая^а, С. А. Мовчан^б

^а Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН, Гатчина, Россия

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Схема согласования импедансов дрейфовой строу-трубки и усилителя влияет как на амплитуду сигнала, так и на величину шума усилителя, что в итоге определяет координатное разрешение детектора, минимальную величину порога и минимальное газовое усиление детектора, необходимое для эффективной регистрации сигнала. Исследовано пять схем согласования усилителя и строу-трубки длиной 2,5 м. Показано, что с практической точки зрения способ согласования строу-трубки с усилителем с помощью резистора при отсутствии согласования на дальнем конце строу-трубки приемлем. В этом случае эквивалентный шумовой заряд усилителя равен $ENC = 4000–5000$ электронов при $C_{дет} = 20–30$ пФ.

A choice of schematics for impedance matching of the straw drift tube and amplifier impacts both the signal and noise. Optimal straw-amplifier impedance matching is important for a good straw spatial resolution and track registration efficiency with a minimal electronic threshold and gas gain. Five schemes of impedance matching were tested with the straw $L = 2.5$ m. The results have shown that simple straw-amplifier impedance matching by the resistor and non-matching at the furthest straw end is useful. In this case the amplifier equivalent noise charge is in the range $ENC = 4000–5000 e^-$ at $C_{det} = 20–30$ pF.

PACS: 07.50.Qx; 07.77.Ka; 29.40.Cs; 29.40.Gx; 84.30.Le; 84.37.+q

ВВЕДЕНИЕ

Для современных «трекеров» — координатных детекторов заряженных частиц, используемых в физике высоких энергий, требуется пространственное разрешение порядка 100 мкм. В настоящее время для создания трекеров широко используются тонкостенные дрейфовые строу-трубки (straw tubes). Для получения такого высокого разрешения необходимо учитывать много различных факторов, в том числе качество согласования импедансов дрейфовой строу-трубки и усилителя. Выбор схемы согласования влияет как на величину сигнала, так и на величину шума, соответственно, определяет пространственное разрешение детектора и режим его работы: минимальный рабочий порог, минимальное газовое усиление и рабочее напряжение детектора, необходимые для эффективной регистрации сигнала.

Покажем это на конкретном примере тонкостенных дрейфовых строу-трубок с диаметром катодов 10 мм, диаметром анодных проволочек 30 мкм и длиной трубок 2,5 м.

Строу-трубка должна рассматриваться как длинная линия с распределенными параметрами L , C ($L = 1,2$ мкГн/м, $C = 9,5$ пФ/м), причем имеющая довольно высокое характеристическое сопротивление, $R_c \sim 350$ Ом. Для предотвращения искажения сигналов в линии необходимо согласование импедансов нагрузки с характеристическим сопротивлением трубки как на ближнем (со стороны усилителя), так и на дальнем конце. Высокое погонное сопротивление тонкой анодной проволоочки (вольфрам), равное ~ 120 Ом/м, приводит к частотной зависимости импеданса длинной линии, что затрудняет согласование, приводит к потерям сигнала, зависящим от координаты, а также значительно увеличивает электрические шумы. В настоящей работе показано, что электрические шумы из-за отражения от концов длинной линии увеличивают эквивалентный шумовой заряд, причем существенно при неполном согласовании импедансов со стороны усилителя. Наилучшим является способ согласования импедансов нагрузки и строу-трубки с использованием активного элемента (транзистора), так называемое «холодное» согласование. Как показано в работе, согласование импедансов с использованием резистора, или «горячее» согласование со стороны усилителя, при разомкнутом дальнем конце строу-трубки (обрыв линии) незначительно увеличивает эквивалентный шумовой заряд по сравнению с холодным согласованием, что упрощает схему согласования.

ЭЛЕКТРОНИКА

В современных трекерах, выполненных на дрейфовых строу-трубках, число каналов достигает нескольких тысяч, вместе с тем отсутствуют микросхемы, специально разработанные для строу-трубок. В работе выполнены измерения эквивалентного шумового заряда и обсуждаются различные способы подключения строу-трубки к микросхеме CARIOCA [1, 2]. Интегральная микросхема CARIOCA, разработанная для многопроводных пропорциональных камер (МПК), имеет относительно низкое входное сопротивление, $R_a = 50$ Ом. Это 8-канальная схема, каждый канал которой содержит на входе зарядочувствительный предусилитель (один предусилитель — рабочий, второй — «плавающий») для облегчения подключения по постоянному току к последующим дифференциальным каскадам; далее следуют дифференциальные каскады основного усилителя-формирователя, восстановителя базового уровня, дискриминатора и LVDS-драйвера на выходе микросхемы. На рис. 1 приведена блок-схема одного канала, а на рис. 2 — принципиальная схема интегрирующего предусилителя микросхемы CARIOCA.

Предусилитель интегрирует импульсный ток детектора, преобразуя заряд в импульс напряжения на входе основного усилителя. Усилитель-формирователь (фильтр) обеспечивает дифференцирование поступившего сигнала, при этом дополнительно компенсирует длинный «хвост» входного сигнала, вызванный дрейфом положительных ионов в газе (компенсация полюса нулем), что обеспечивает близкое к $CR-RC^2$ формирование короткого импульса с пиковым временем ~ 12 нс. Такое формирование требуется для работы при высоких нагрузках порядка 1 МГц/канал. Эта особенность схемы исключительно важна для трекеров на строу-трубках, так как физика развития сигнала в строу-трубке одинаковая с МПК, а нагрузка на трубку достигает величин порядка 1 МГц.

В настоящей работе измерялся эквивалентный шумовой заряд, обозначаемый ниже сокращенно ENC (Equivalent Noise Charge), для пяти вариантов согласования импедансов строу-трубки и усилителя:

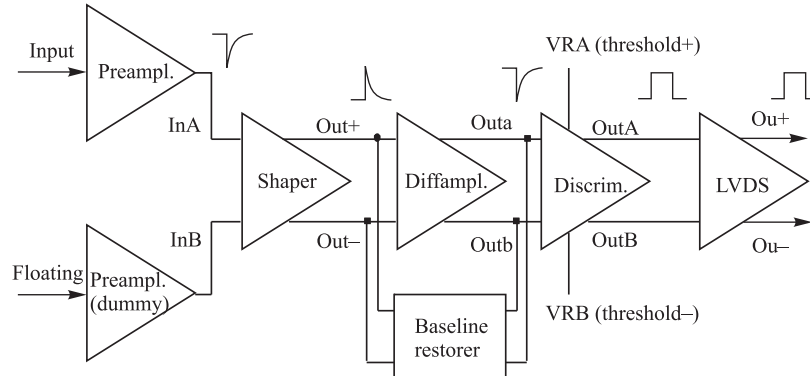


Рис. 1. Блок-схема одного канала 8-канальной микросхемы CARIOCA

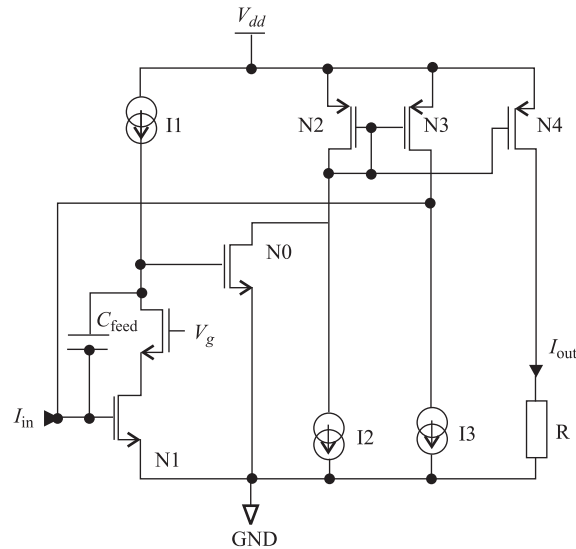


Рис. 2. Схема предусилителя микросхемы CARIOCA для сигнала отрицательной полярности

- схема с прямым подключением строу-трубки к микросхеме CARIOCA при горячем согласовании трубки на дальнем конце;
- схема с горячим согласованием на обоих концах трубки;
- схема с холодным согласованием со стороны усилителя и горячим согласованием трубки на дальнем конце;
- схемы с обрывом линии на дальнем конце при горячем согласовании со стороны усилителя;
- схемы с обрывом линии на дальнем конце при холодном согласовании со стороны усилителя.

В лабораторных измерениях совместно с дрейфовыми трубками использовалась 16-канальная плата CARDIAC, заимствованная из [3], на которой смонтированы две микросхемы CARIOCA и одна управляющая микросхема DIALOG. Управляющая микросхема

DIALOG обеспечивает стандартизацию импульса по длительности с регулируемой задержкой, а также задает для микросхемы CARIOCA пороги, причем отдельно в каждом канале. Последнее вызвано имеющимся у микросхемы CARIOCA, причем значительным, разбросом от канала к каналу положения базовой линии на входе дискриминатора. Микросхема DIALOG позволяет выполнить счет импульсов в каждом канале в заданном интервале времени, например, 1 с. Эта функциональная особенность была предложена в работе [4] для встраивания в микросхему с целью реконструкции шумового распределения, т. е. измерения эквивалентного шумового заряда. Кроме этой 16-канальной платы, в работе использовались две 8-канальные платы собственной разработки: CARIOCA_hot и CARIOCA_cold для выполнения шумовых измерений, но также для пучковых тестов с целью измерения пространственного разрешения и эффективности регистрации частиц строу-трубкой.

Известные публикации по микросхеме CARIOCA неполные и противоречивые [1].

По этой причине прежде всего необходимо было измерить зарядовую чувствительность и оценить шумовые параметры усилителя. Последнее выполнено фитированием измеренной чувствительности усилителя от емкости детектора с помощью формулы (1). По результатам фитирования найдены чувствительность при нулевой емкости детектора, $S(0) = 18 \text{ мВ/фКл}$, и коэффициент усиления по напряжению, $A = 2700$:

$$S(0) = \frac{1}{C_f}, \quad S(C_{\text{дет}} + C_{\text{вх}}) = \frac{1}{C_f} \left(1 + \frac{C_{\text{дет}} + C_{\text{вх}}}{AC_f} \right)^{-1}. \quad (1)$$

Полагая $A \approx g_{m1}R_f$, можно найти эффективное сопротивление R_f в цепи обратной связи интегратора (рис. 3) при известной, взятой из [1], крутизне первого транзистора микросхемы CARIOCA $g_{m1} = 30 \text{ мА/В}$. Это позволило определить искомые параметры шума: $i_n = \sqrt{4kT/R_p}$ через $R_p = R_f = 90 \text{ кОм}$ и $e_n = \sqrt{4kTR_s}$ через $R_s = 28 \text{ Ом}$.

Для измерения ENC в единицах заряда, фКл и электронах, и сравнения результатов с расчетом была произведена калибровка порогов дискриминатора, выставляемых на практике, как правило, в единицах напряжения, мВ. На рис. 4 приведена схема, использованная для измерения зарядовой чувствительности микросхемы CARIOCA путем впрыскивания известного заряда в различные точки схемы.

При подключении усилителя к строу-трубке чувствительность уменьшается из-за деления тока и затухания сигнала в линии. Полученные значения чувствительности приведены в табл. 1.

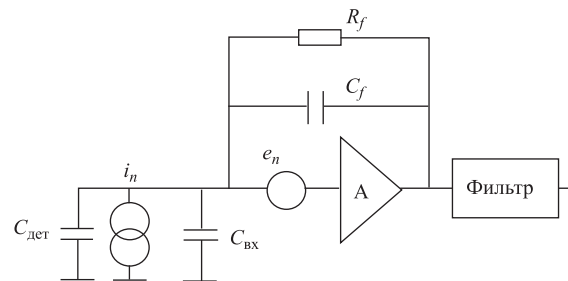


Рис. 3. Типовая блок-схема зарядочувствительного предусилителя с генераторами шума

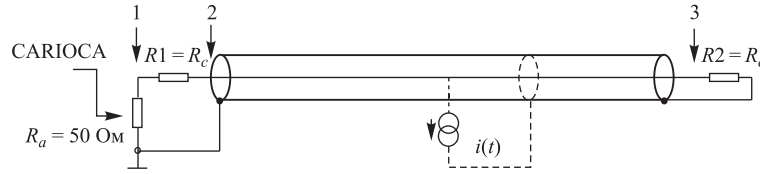


Рис. 4. К измерению чувствительности при различных способах согласования импедансов

Таблица 1. Зарядовая чувствительность в зависимости от способа согласования импедансов

Точка впрыскивания заряда	Зарядовая чувствительность S , мВ/фКл	Сигнал	Комментарий
1	18	1	CARIOCA
2	8,3	0,46	С резисторами $R1$ и $R2$
3	4,5	0,25	С резисторами $R1$ и $R2$
	11,2	0,62	Открытый дальний конец

На рис. 5 приведены результаты калибровки порога в единицах заряда для двух плат электроники CARIOCA_hot и CARIOCA_cold. Найденный линейным фитированием наклон калибровочных прямых соответствует зарядовой чувствительности усилительного тракта до дискриминатора при нулевой емкости детектора.

Схема горячего согласования CARIOCA_hot с согласующим резистором $R1 = 300 \text{ Ом}$, включенным последовательно с входным сопротивлением предусилителя CARIOCA $R_a = 50 \text{ Ом}$ без строу-трубки, имеет чувствительность 18 мВ/фКл в соответствии с (1), а схема холодного согласования CARIOCA_cold с входным сопротивлением 350 Ом — 15 мВ/фКл , что согласуется с коэффициентом усиления по току ($\alpha \approx 0,8$) используемого в схеме с общей базой (ОБ) биполярного транзистора BFR93. Схема ОБ, включенная на входе CARIOCA_cold, отличается по параметрам шума: меньший последовательный,

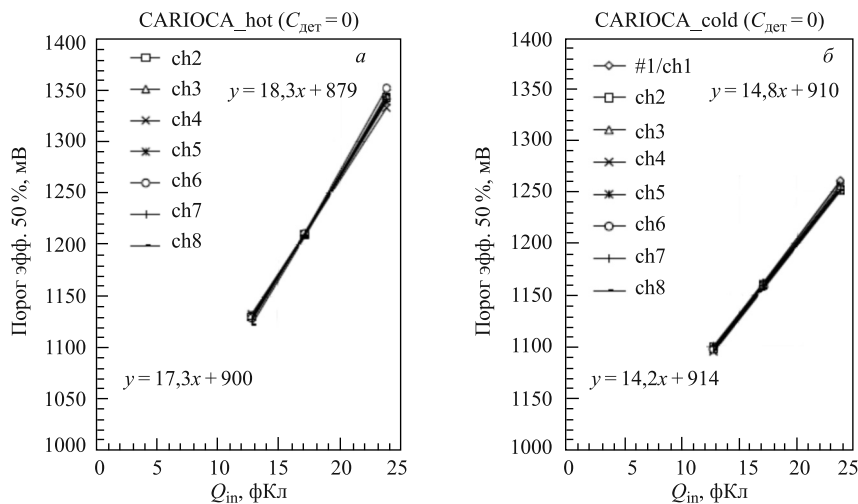


Рис. 5. Калибровка порогов 8-канальных усилителей: а) с горячим согласованием CARIOCA_hot; б) с холодным согласованием CARIOCA_cold. Наклон линий определяет чувствительность канала в мВ/фКл

но больший параллельный шум. Однако это преимущество незаметно из-за высокого омического сопротивления анодной вольфрамовой проволоочки строу-трубки, которое и вносит основной вклад в ENC.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТА ЭКВИВАЛЕНТНОГО ШУМОВОГО ЗАРЯДА

Ниже приведена методика, позволяющая по результатам измерения шумового счета на выходе дискриминатора от порога в заданном канале измерить ENC на входе этого канала. Известно, что шумовой счет f_n как функция порога выражается следующей формулой:

$$f_n = f_{n0} \exp \left[-\frac{Q_{th}^2}{2\sigma_n^2} \right] = f_{n0} \exp \left[-\frac{Q_{th}^2}{2ENC^2} \right], \quad (2)$$

где Q_{th} — порог в единицах заряда; $\sigma_n = ENC$ — эквивалентный шумовой заряд (средне-квадратичное значение шума, приведенное ко входу); f_{n0} — шумовой счет на выходе дискриминатора при нулевом пороге, который можно определить по граничным частотам полосы пропускания f_a и f_b линейного фильтра, следующего за предусилителем:

$$f_{n0} = \sqrt{\frac{\int_{f_a}^{f_b} f^2 w(f) df}{\int_{f_a}^{f_b} w(f) df}} = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{f_b^3 - f_a^3}{f_b - f_a}}. \quad (3)$$

Формула (3) называется формулой Райса [4–6], которая указывает на ожидаемое в 1 с число пересечений нулевого порога случайным сигналом с постоянной спектральной плотностью $w(f)$. В данном случае фильтр — это весь линейный тракт усиления, начиная с усилителя-формирователя, на вход которого с предусилителя-интегратора поступает случайный сигнал в форме напряжения, до выхода восстановителя базовой линии (см. рис. 1). Оценим f_{n0} по переходной характеристике усилителя-формирователя с пиковым временем $T_p = 12$ нс и фронтом импульса $t_{\phi} \approx 8$ нс на уровне 0,1–0,9. Известно, что в этом случае верхняя частота может быть найдена как $f_b \approx 0,35/t_{\phi} = 43,7$ МГц, и, пользуясь формулой (2) при условии $f_b \gg f_a$, находим частоту Райса $f_{n0} = 1/\sqrt{3} f_b = 25,3$ МГц. Согласно [5], частота Райса для микросхемы CARIOSA $f_{n0} = 25$ МГц и $\log_{10}(25 \cdot 10^6) = 7,4$. Логарифмирование выражения (2) по основанию 10 с заменой переменных $x = Q_{th}^2$ и $y = \log_{10}(f_n)$ позволяет перейти от выражения (2) к выражению (4) и найти ENC по тангенсу угла наклона прямой линии:

$$\frac{y}{\log_{10}(f_{n0})} + \frac{x}{2ENC^2 \frac{\log_{10}(f_{n0})}{\log_{10}(e)}} = 1 \Rightarrow ENC = \frac{0,466}{\sqrt{|\text{tg угла наклона}|}}. \quad (4)$$

Второй параметр прямой линии $y(0) = \log_{10}(f_{n0}) = 7,4$ — точка пересечения прямой с вертикальной осью — указывает на то, что распределение центрировано [4, 5].

На рис. 6 «линеаризация», т. е. переход от экспоненциальной зависимости (2) к линейной (4), и «центрирование», т. е. переход к нулевому порогу, выполнены соответствующим фитированием результатов измерения шумового счета для различных способов

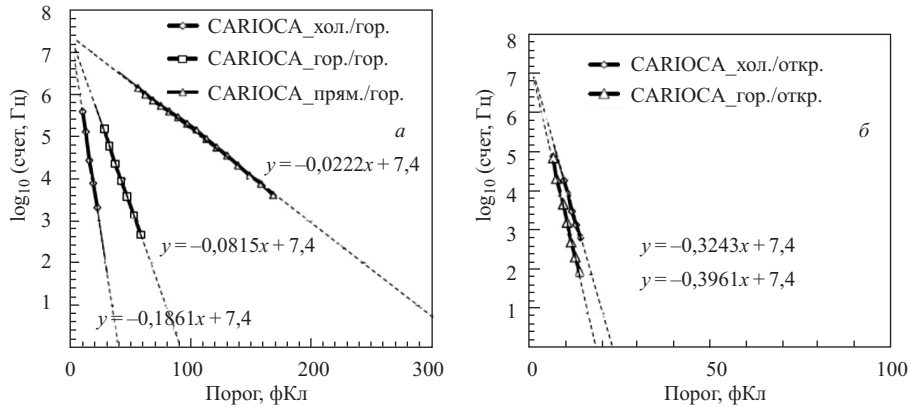


Рис. 6. Прямые линии соответствуют различным способам согласования импедансов строу-трубки и усилителя: чем больше наклон, тем меньше шум. а) Дальний конец строу-трубки согласован резистором $R_2 = 350$ Ом; б) открытый дальний конец

согласования импедансов. Прямые для любого шума имеют общую вершину, соответствующую фундаментальной частоте Райса (3). В соответствии с формулой (4) чем больше наклон линий, тем меньше ENC.

Результаты измерения наклона линий для трех схем с горячим согласованием на дальнем конце приведены графически на рис. 6, а, а результаты измерений для двух других схем с открытым дальним концом — на рис. 6, б. Полученные значения наклона линий сведены в табл. 2. Измерения выполнены в одних и тех же условиях, так что относительно друг друга надежны. Для упрощения здесь приведены данные для одного канала, другие каналы дают аналогичные результаты.

Измерение ENC позволяет определить и установить минимальный рабочий порог дискриминатора (порог электроники), который принимается обычно равным $5 \times \text{ENC}$. При таком выборе рабочего порога частота $f_{n0} = 25$ МГц, соответствующая шумовому счету при нулевом пороге согласно формуле (2), подавляется до уровня 93 Гц (8 кГц при $4 \times \text{ENC}$). Из табл. 2 можно видеть влияние ENC не только на выбор рабочего порога, но и на рабочий режим детектора. Например, приведены значения минимально необходимого газового усиления детектора в предположении, что установленный электронный порог соответствует первому кластеру первичной ионизации в рабочем газе, т. е. соответствует примерно третьему первичному электрону. Оценки сделаны в предположении, что за пиковое время $T_p = 12$ нс регистрируется $\sim 10\%$ наведенного заряда.

Как видно из табл. 2, для одинаковой эффективности регистрации сигнала, т. е. для одинакового порога в первичных электронах, необходимое газовое усиление при несовершенном согласовании импедансов строу-трубки с усилителем может в 2–3 раза возрасти. Последнее нежелательно, так как приводит к преждевременному старению детектора и сокращению его времени жизни.

Результаты расчетов эквивалентного шумового заряда в зависимости от емкости детектора ($C_{\text{дет}} + C_{\text{вх}}$) для различных способов согласования импедансов строу-трубки и усилителя CARIOCA приведены на рис. 7. Сдвиг линий относительно нуля обусловлен присутствием параллельно $C_{\text{дет}}$ паразитной емкости $C_{\text{вх}} \sim 20$ пФ (здесь это многодиодная

Таблица 2. Результаты измерения эквивалентного шумового заряда для различных способов согласования импедансов строу-трубки и усилителя CARIOCA. Определены минимальная величина порога регистрации и минимально необходимая величина газового усиления

Параметры	Способ согласования импедансов				
	Прям./гор. ($R_a = 50 \text{ Ом}$, $R_p = 600 \text{ Ом}$, $R_s = 3000 \text{ Ом}$)	Гор./гор. ($R_p = 600 \text{ Ом}$, $R_s = 600 \text{ Ом}$)	Хол./гор. ($R_a = 350 \text{ Ом}$, $R_p = 600 \text{ Ом}$, $R_s = 300 \text{ Ом}$)	Гор./откр. ($R_p = 90 \text{ кОм}$, $R_s = 600 \text{ Ом}$)	Хол./откр. ($R_a = 350 \text{ Ом}$, $R_p = 90 \text{ кОм}$, $R_s = 300 \text{ Ом}$)
Тангенс угла наклона прямой	-0,0222	-0,0815	-0,1861	-0,3961	-0,3243
ENC, фКл	3,13	1,63	1,08	0,74	0,82
ENC, электроны	19562	10187	6750	4628	5114
ENC расчет, электроны	19552	8965	6655	5131	4856
$\partial \text{ENC} / \partial C$, электроны/пФ	375	152	102	169	120
Порог $5 \times \text{ENC}$, фКл	15,64	8,16	5,4	3,70	4,09
Порог $5 \times \text{ENC}$, электроны	97737	51010	33757	23138	25572
Минимально необходимое газовое усиление для регистрации трех первичных электронов	325790	170034	112523	77128	85240

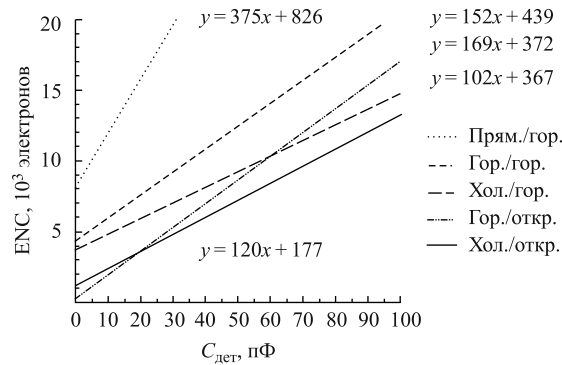


Рис. 7. Эквивалентный шумовой заряд в зависимости от емкости детектора — расчет

защита усилителя от искрового разряда в детекторе плюс емкость монтажа). В схеме с согласованием «гор./откр.» этот эффект сдвига отсутствует, так как относительно большой резистор $R1 = 300 \text{ Ом}$ разделял детектор и диодную цепочку защиты. Важно отметить здесь, что паразитная емкость $C_{вх}$ с целью уменьшения ее вклада в ENC должна быть предельно минимизирована.

Сравнивать схемы следует по наклонам линий. Прямое подключение трубки с высоким характеристическим сопротивлением к усилителю с низкоомным входным сопроти-

влением ($R_a = 50$ Ом) даже при согласовании трубки на дальнем конце ($R_2 = 350$ Ом) приводит к значительным шумам $\partial ENC/\partial C = 375$ эл./пФ, что эквивалентно шумовому резистору $R_s = 3000$ Ом, на порядок большему, чем омическое сопротивление анодной проволоочки. Такой эффект можно объяснить увеличением амплитуды шумовых импульсов при их отражении от низкоомного ближнего конца линии. В то же время при горячем согласовании измерение и расчет дают в 2,5 раза меньшее значение шума $\partial ENC/\partial C = 152$ эл./пФ, а при холодном — в 3,5 раза меньшее $\partial ENC/\partial C = 102$ эл./пФ. При обрыве согласующего резистора на дальнем конце трубки параллельный шум уменьшается, так как сопротивление резистора, включенного параллельно усилителю, увеличивается на два порядка: $R_p = 90$ кОм (CARIOCA). Последовательный шум по наклону линий меньше в случае холодного согласования $\partial ENC/\partial C = 120$ эл./пФ и больше в случае горячего согласования $\partial ENC/\partial C = 169$ эл./пФ. Однако, как показывают измерения, эффект отражения шумов в случае открытого дальнего конца строу-трубки при горячем согласовании со стороны усилителя незначительно увеличивает эквивалентный шумовой заряд особенно при малых $(C_{дет} + C_{вх}) < 30$ пФ.

Расчет неплохо совпадает с измерением, если считать вклад в шум омического сопротивления вольфрамовой проволоочки с диаметром 20–30 мкм доминирующим.

ВЫВОДЫ

В работе показано, что схемы с несогласованным дальним концом строу-трубки, но с горячим (резистор) или холодным (транзистор) согласованием со стороны усилителя эквивалентны в пределах 10% при $20 \leq (C_{дет} + C_{вх}) \leq 30$ пФ, что соответствует длине строу-трубок 2,0–3,0 м. Эти схемы дают величину эквивалентного шумового заряда в пределах $ENC = 4000–5000$ электронов. Собственно усилитель вносит вклад в шум порядка 1000 электронов. С практической точки зрения оптимальным решением является схема с горячим согласованием, при этом можно использовать микросхемы, разработанные для пропорциональных и дрейфовых камер. При разработке специальной микросхемы для строу-трубок холодное согласование со стороны усилителя остается предпочтительным. При указанном выше значении ENC минимально достижимый порог электроники составляет величину порядка 4–5 фКл, а газовое усиление строу-трубки, необходимое для регистрации первого кластера ионизации, должно быть не менее 10^5 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Moraes D. et al.* CARIOCA — A Fast Binary Front-End Implemented in 0.25 μm CMOS Using a Novel Current-Mode Technique for the LHCb Muon Detector // Proc. of the 2001 IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems, Sydney, Australia, May 6–9, 2001. V. 1. P. 360–363.
2. *Bonivento W. et al.* Design and Performance of the Front-End Electronics of the LHCb Muon Detector // Proc. of the 11th Workshop on Electronics for LHC and Future Experiments, Heidelberg, Germany, Sept. 12–16, 2005. CERN-2005-011. CERN-LHCC-2005-038. P. 363–367.
3. *LHCb Collab.* The LHCb Detector at the LHC // J. of Instrumentation. JINST. 2008. V. 3. S08005. P. 205.

4. *Kashchuk A.* Method for Test and Diagnostics of the On-Detector Front-End Electronics for the LHCb Muon System. LHCb-2002-013. CERN. Geneva, 2002. P. 13.
5. *Kashchuk A. et al.* Pre-Installation Tests of MWPCs for the LHCb Muon System // Proc. of IEEE Nuclear Science Symp., Dresden, Germany, Oct. 22, 2008. NSS'08 IEEE. P. 2812–2815.
6. *Rice S. O.* Mathematical Analysis of Random Noise // Bell System Tech. J. 1945. V. 24. P. 46–156.

Получено 15 апреля 2010 г.