

МНОГОПРОВОЛОЧНАЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНАЯ КАМЕРА С ПАДОВОЙ СТРУКТУРОЙ НА КАТОДНОЙ ПЛОСКОСТИ

12 июня 2016г, вер 05

espiride@gmail.com † ‡

Аннотация

Исследована множественность срабатываний пропорциональной камеры с падовой структурой на катодах.

1. Введение

В рамках программы модернизации мюонной системы ЛНСб эксперимента был изготовлен прототип пропорциональной камеры с падами на катодной плоскости. В разработке использовались требования и рекомендации, выработанные при создании этой системы и изложенные во множестве трудов, из которых отметим только ^{[1], [2]}. Для камеры с падовой структурой множественность срабатываний при перпендикулярном входе частицы до сего времени остается проблемой. Причин множественности две. Это деление наведенных токов на соседние катодные пады и взаимные емкости падов при конечных величинах входных сопротивлений предусилителей. Если в первом случае путем усреднения можно повысить пространственную точность, правда с возможной потерей эффективности, то для другого множественность приводит к большой ошибке. Отметим, что приведенные в ^[3] оценки взаимных емкостей релевантны, так как их значения можно установить только при 3D-моделировании.

Цели, предпринятых усилий, можно сформулировать следующим образом:

- Установить электрическую схему камеры, что делается в рамках программы “Maxwell”. На данное время это только емкостная модель,
- На основании формул, приведенных в труде “Sauli” ^[4] и, полагая известной подвижность ионов, определить упрощенный вид наведенных токов и с помощью программы “Maxwell” установить их пространственное распределение. Пользуясь пакетом “Garfield”, сгенерировать данные первичной ионизации.
- И наконец определить вероятность перекрестных наводок.

† ‡ Спириденков Э.М., старший научный сотрудник Петербургского института ядерной физики, Отделение физики высоких энергий, отдел ОРЭ.
Gatchina, Leningrad dst., 188350, Russia.

2. Камера, формулы “Sauli”, тест Maxwell

Параметры газового промежутка камеры:

$h := 2.5$	anod-cothode distance, mm	$\epsilon_0 := 8.85$	pF/m
$s := 2$	wire spacing, mm	$V_0 := 2.62$	kV
$a := .015$.5*diameter of the wire, mm	$\mu := 1.33 \cdot 10^{-4}$	mm ² /(ns*kV)
		$Q_0 := 16$	fC all avalanche charge

Формулы “Sauli”:

$$C := 2 \cdot \pi \cdot \frac{\epsilon_0}{\left(\pi \cdot \frac{h}{s}\right) - \ln\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{a}{s}\right)}$$

$C = 7.964$ pF/m Емкость проволочки .

$$E(x, y, V_0) := C \cdot \frac{V_0}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{1 + \tan\left(\pi \cdot \frac{x}{s}\right) \cdot \tanh\left(\pi \cdot \frac{y}{s}\right)^2}{\tan\left(\pi \cdot \frac{x}{s}\right)^2 + \tanh\left(\pi \cdot \frac{y}{s}\right)^2}}$$

$E(0, a, V_0) = 25.021$ kV/mm Напряженность поля на поверхности проволочки.

$E(0, 2.5, V_0) = 0.59$ kV/mm На поверхности катода

Тест Maxwell:

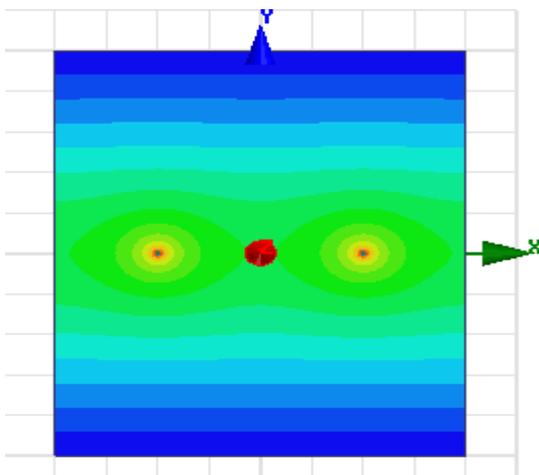


Рис.1 X/Y Plot потенциала поля.
Координаты проволочек X=-1, 1mm

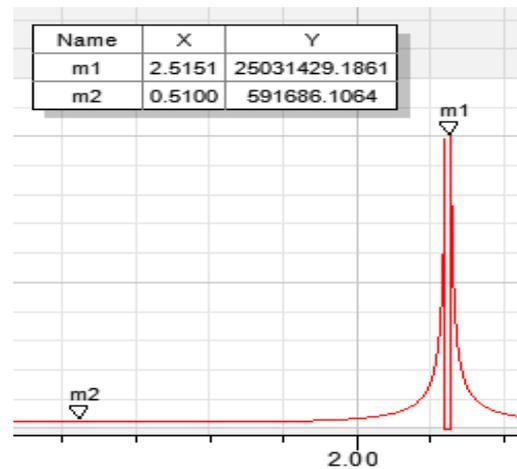


Рис.2 Plot напряженности поля
вдоль линии параллельной оси Y

Обозначения:

""	"dw"	"wL"	"wR"	"up"
"dw"	11.07	-3.97	-3.99	-3.11
"wL"	-3.97	9.45	-1.51	-3.98
"wR"	-3.99	-1.51	9.48	-3.97
"up"	-3.11	-3.97	-3.98	11.06

Таб.1 Значения емкостей, pF/m

dw, up нижняя и верхняя грани рис.1 ,
их потенциал $V_c=0V$.

wL, wR левая и правая проволоочки,
 $V_w=2620V$

Итак суммарная емкость проволоочки/верхняя, нижняя грани равна $7.95pF/m$ и это значение практически совпадает с посчитанном по формуле "Sauli". Также важно отметить практическое совпадение напряженностей поля на поверхностях ниточек и катодной плоскости. В колонке "Y" рис.2 представлены значения напряженности поля в положениях маркеров с размерностью " $V/meter$ "

3. 3D Maxwell и емкостная модель камеры

1

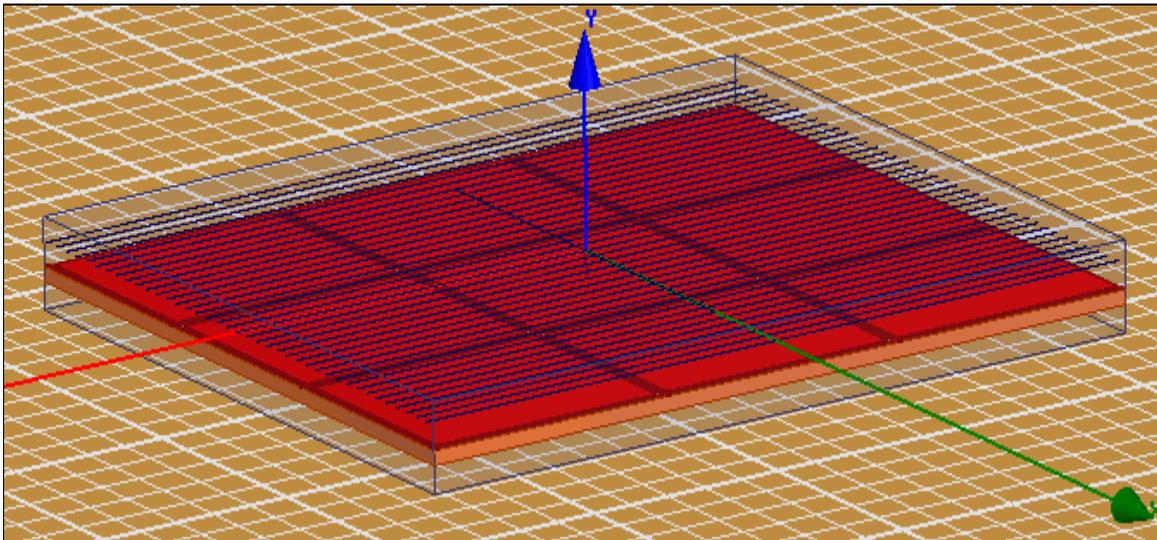


Рис.3. Фрагмент камеры, принятый для моделирования.

Камера как конструкция включает в себя два газового промежутка или камер в другой терминологии. Рис.3 дает представление об одной из этих камер. Другая расположена симметрично относительно нижней грани фрагмента рис.3. При этом противоположные пады соединены между собой.

На рис.3 нет линии вывода сигналов с падов на края камеры. Это сделано специально. Результаты расчетов взаимных емкостей пада, расположенного в центре рис.3, с соседними по осям "X" и "Z" представлены таб.2.

Прокомментируем данные таблицы. Емкость центрального пада, обозначенного как "pC2" равна " $6.95pF$ " и она включает в себя следующие наиболее значимые значения;

$$pC2/pL2 \text{ или } pR2 = .42pF$$

$$pC2/pC1 \text{ или } pC3 = .33pF$$

емкость на пад слева и справа по оси "X"
емкость на пад вниз и вверх по оси "Z"

$pC2/wC = 1.49pF$
 $pC2/up = .58Pf$
 $pC2/str = 3.3Pf$

емкость на соответствующий “wire” пад
 емкость на противоположный катод
 емкость на охранный стрип.

""	"pL3"	"pL2"	"pL1"	"pC3"	"pC2"	"pC1"	"pR3"	"pR2"	"pR1"	"wL"	"wC"	"wR"	"str"	"up"
"pC2"	-0.01	-0.41	-0.01	-0.33	6.95	-0.33	-0.01	-0.42	-0.01	-0.03	-1.49	-0.03	-3.3	-0.58

Таб.2. Величины взаимных емкостей центрального пада изображения рис.3.

Оценим влияние сигнальных линий на взаимные емкости. Увеличим число падов и введем линии вывода сигналов как это представлено на рис.4. Отметим,

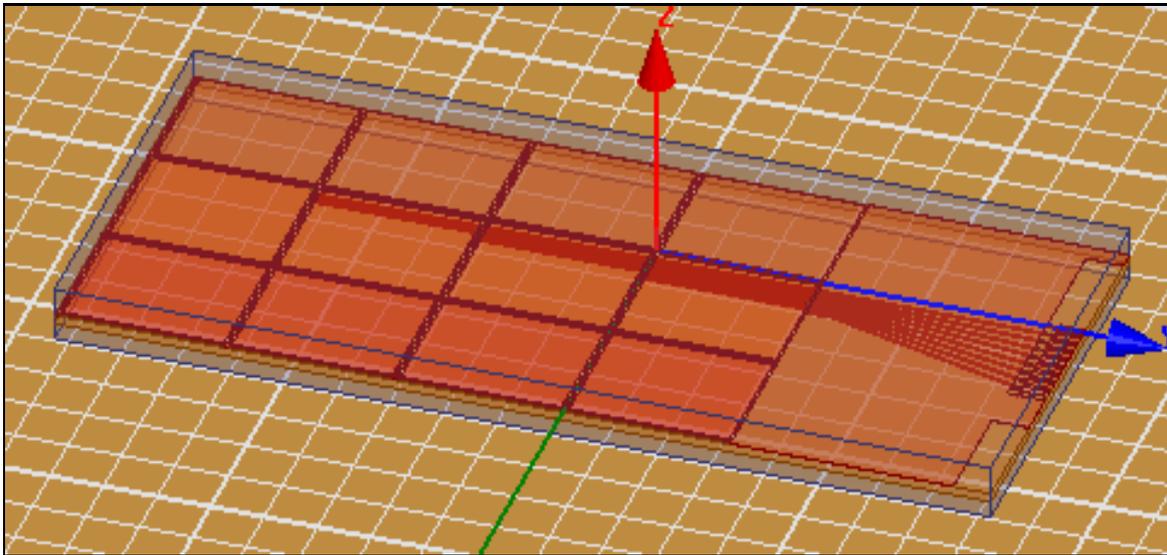


Рис.4. Фрагмент камеры, принятый для моделирования

что также убраны “wires”. Было установлено, что их влияние уменьшает взаимные емкости на 5% , но значительно увеличивает время счета и не только.

Результаты расчетов представлены в таб.3. Пады верхнего ряда обозначаются

""	"pL0"	"pL1"	"pL2"	"pL3"	"pC0"	"pC1"	"pC2"	"pC3"	"pR0"	"pR1"	"pR2"	"pR3"	"up"	"G_s"
"pC0"	-0.15	-0	-0	0	15.38	-1.12	-0.74	-0.52	-0.44	-0.01	-0	0	-1.38	-11.02
"pC1"	-0	-0.15	-0	-0	-1.12	17.59	-1.15	-0.53	-0.01	-0.44	-0.01	-0	-1.38	-12.79
"pC2"	-0.01	-0.01	-0.16	-0	-0.74	-1.15	18.09	-1.08	-0	-0.01	-0.44	-0.01	-1.38	-13.09
"pC3"	-0.1	-0.1	-0.11	-0.45	-0.52	-0.53	-1.08	18.33	-0	-0	-0.01	-0.44	-1.39	-13.6

Таб.3. Собственные и взаимные емкости элементов рис.4.

как “pL0,...,pL3” справа налево, пады центрального и нижнего рядов как “pC0,...,pC3” и “pR0,...,pR3”.

Введение сигнальных линий существенно изменила картину значений емкостей. В частности в таб.4 показаны величины взаимных емкостей центрального пада рис.3 и соответствующего пада рис.4.

	"pC1"	"pC3"	"pL2"	"pR2"		"pC1"	"pC3"	"pL2"	"pR2"
"pC2"	-0.33	-0.33	0.42	-0.42	"pC2"	-1.15	-1.08	-0.16	-0.44

Таб.4. Взаимные емкости центрального пада рис.3 и соответствующего пада среднего ряда рис.4.

Уточним расклад емкостей, посчитав их величины при отсоединенных от падов сигнальных линиях.

	"pC0"	"pC1"	"pC2"	"pC3"	"L0"	"L1"	"L2"	"L3"
"pC0"	10.9	-0.3	-0	-0	-0	-0.8	-0.7	-0.5
"pC1"	-0.3	9.5	-0.3	-0	-0	-0	-0.7	-0.5
"pC2"	-0	-0.3	8.1	-0.3	0	-0	-0	-0.6
"pC3"	-0	-0	-0.3	6.5	0	0	-0	-0

Таб.5. Взаимные емкости падов центрального ряда и их сигнальных линии.

	"L0"	"L1"	"L2"	"L3"
"L0"	5.32	-0.05	-0.01	-0
"L1"	-0.05	7.14	-0.12	-0.01
"L2"	-0.01	-0.12	10.37	-0.15
"L3"	-0	-0.01	-0.15	11.91

Таб.6. Взаимные емкости сигнальных линии.

Из данных таблиц следует, что сигнальные линии увеличивают взаимные емкости падов до четырех раз. Расположение сигнальных линии и их размеры обсудим ниже.

4. Емкостная связь падов и множественность срабатываний

К каждому паду подключается канал регистрации сигналов, включающий в себя предусилитель, усилитель-формирователь и пороговый дискриминатор. Конечность входного сопротивления и взаимные емкости приводит к делению наведенных токов между падами. И если эти сигналы превышают порог дискриминатора, то имеет место так называемая множественность срабатываний. Смоделируем образование сигналов, предполагая, что наведенный ток соответствующий первичным электронам ионизации не выходит за пределы одного пада. И в заключении найдем вероятность множественности при разных порогах.

Используя программы пакета "Garfield" был сгенерирован массив данных XYZ – координат расположений первичных электронов трека ионизации перпендикулярного анодной плоскости

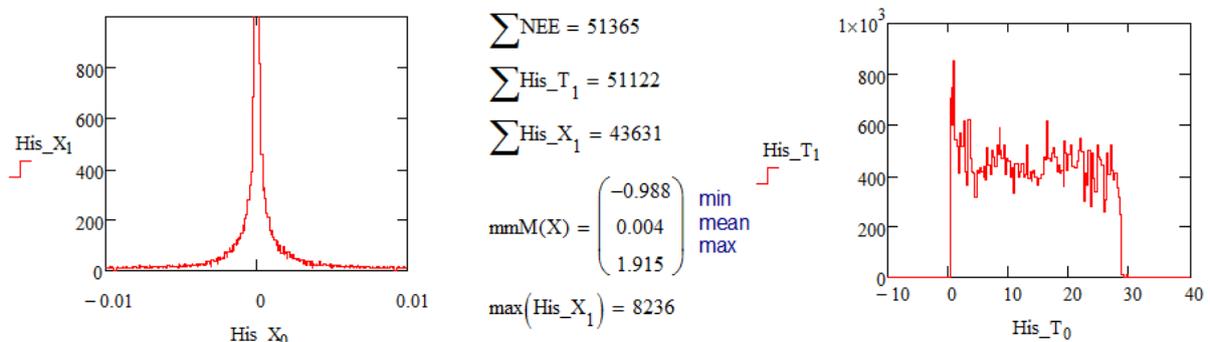


Рис.5 Гистограммы X- позиций первичных электронов трека ионизации и моментов их прихода на анодную проволочку. Размерность оси X первой гистограммы "mm", у второй "ns"

Упомянем также, что правая гистограмма рассчитана для трека ионизации, проходящего через анодную проволочку. Среднее число электронов на треке в двух газовых промежутках равно 100 и разброс их времени прихода 30ns. Как это обосновано в [5] за форму наведенных токов принимаем выражение $t_0/(t+t_0)$, где $t_0 = 2.2\text{ns}$, а амплитуду катодного тока равной половине анодного т.е. пренебрегаем наведенным током на соседние анодные проволочки. Другое упрощение более существенно. Считаем, что газовое усиление распределено по экспоненте и для каждого электрона независимо. Последнее позволяет рассматривать процесс образования сигналов линейным. Подробности такого подхода описаны в [6].

Теперь обратимся к формированию сигналов входа дискриминатора. Рис.6 представляет такой сигнал как реакция на каждый электрон, приходящий на анодную проволочку. Его пиковое значение приравнено к единице и времени равном 10ns. На следующем рисунке показан вид реальных импульсов с минимальной и максимальной амплитудой после суммирования реакций на все электроны трека событий сгенерированного массива данных.

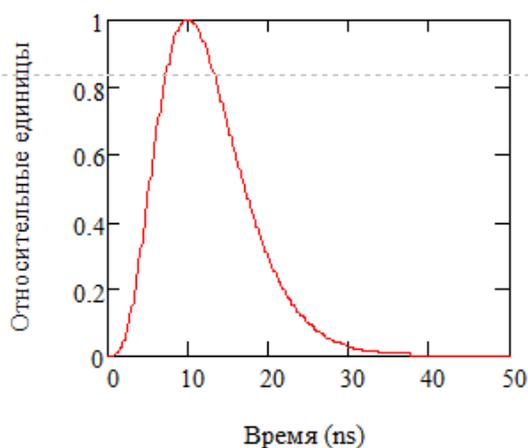


Рис.6. Реакция на электрон, приходящий на анодную проволочку.

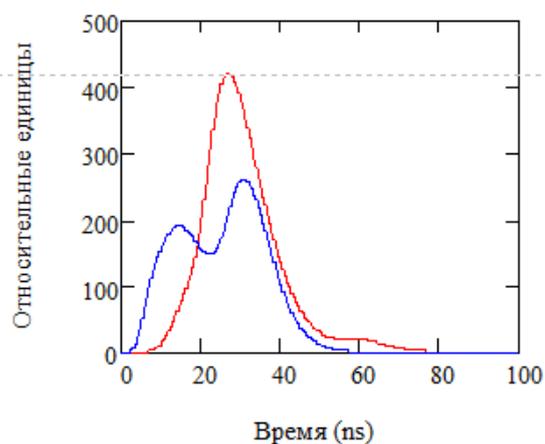


Рис.7. Импульсы входа дискриминатора
— С макс. пиковым значением.
— С мин. но увеличенным в 25 раз.

Строим гистограмму распределения максимальных значений выходных импульсов и гистограмму числа электронов на треке событий.

Гистограмма рис.9 приведена для сравнения и оценки влияния времен формирования и распределения газового усиления. При выбранных временных параметрах “shaping”а среднее значение распределения рис.9. сместилось со 100 электронов до 60. Влияние газового усиления не существенно.

Минимальное значение распределения рис.8 равно 10 электронам. Это означает, что при пороге в 10 электронов камера имеет сто процентную эффективность с вероятностью 95%, исходя из сгенерированного объема событий. Реально такой эффективности никто не наблюдал и причины сего имеют другие объяснения.

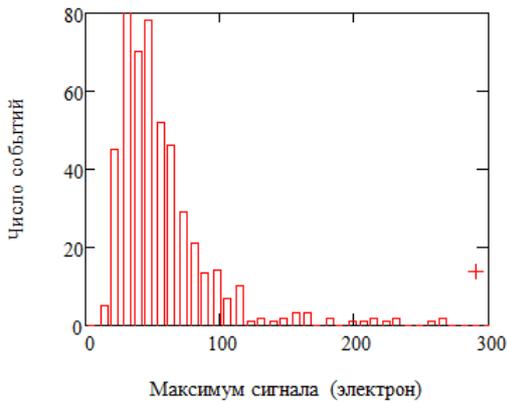


Рис.8. Гистограмма максимумов сигнала

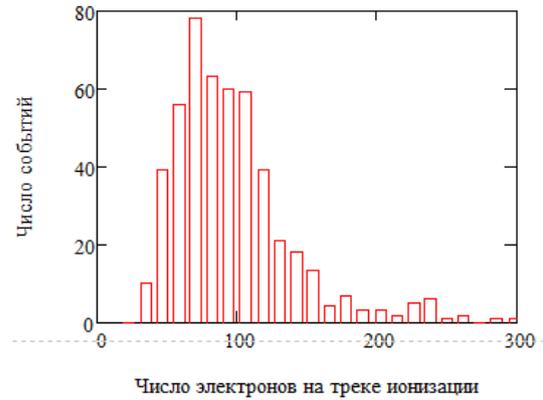


Рис.9. Гистограмма числа электронов на треке событий

Рис.10 представляет емкостную модель двух падов с подключенными источниками сигналов и резисторами входов предусилителей без их входных емкостей. Значения элементов кроме сопротивлений выбраны для случая с наибольшей взаимной емкостью (“pC1/pC2”, см. таб.4.) и увеличены в два раза. Сигнал “pad_1” через взаимную емкость падов “C1”, а также обратный ток источников после деления на емкости “wires_pad – pad2” и блокировочной емкости “C6” попадают на “pad2”. Оценим вид и величину такого прохождения и построим распределение его наибольших значений.

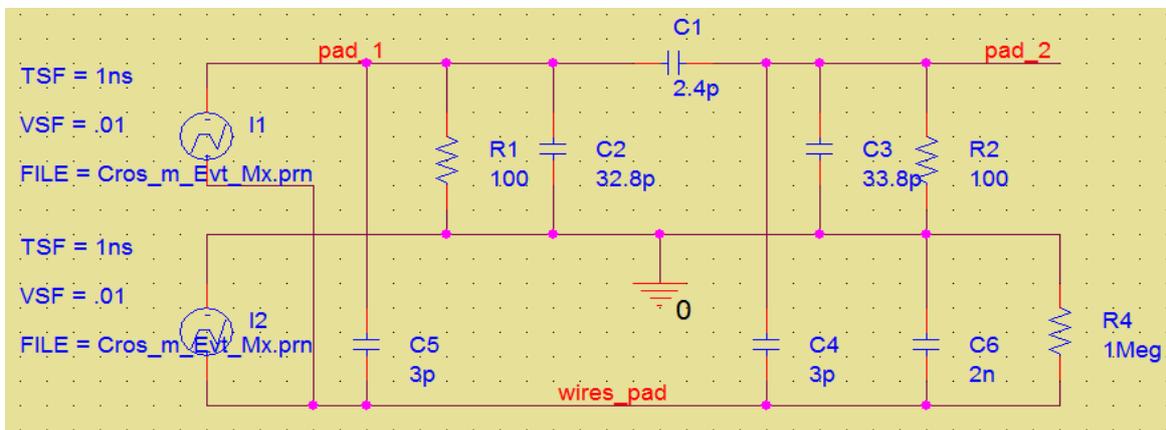


Рис.10. Эквивалентная схема для двух падов.

В силу простоты схемы нет проблем с подсчетом переходных функций и импедансов, а также их обратных преобразований. Имея выражение для сигналов на выходе схемы (“pad2”), находим максимумы и строим их распределение для двух значений входного сопротивления предусилителя. Вид этих распределений дан на рис.11,12.



Рис.11. Распределение наибольших значений перекрестной наводки, $R1, R2 = 100 \text{ Ohm}$.



Рис.12. Распределение наибольших значений перекрестной наводки, $R1, R2 = 50 \text{ Ohm}$.

Данные гистограммы служат иллюстрациями полученных результатов. Следующие два графика, рис.13,14, являются численным итогом, где приводятся вероятности множественности срабатываний в зависимости от значений порога дискриминатора при двух величинах входного сопротивления предусилителя.

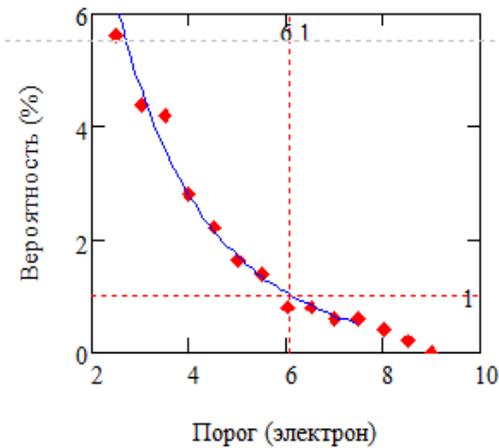


Рис.13. Зависимость вероятности множественности от порога дискриминатора. $R2 = 100 \text{ Ohm}$

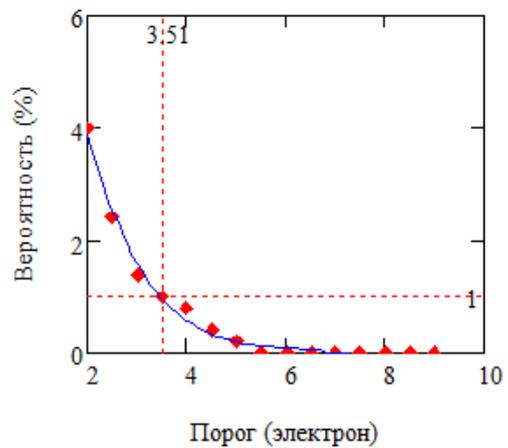


Рис.14. Зависимость вероятности множественности от порога дискриминатора. $R2 = 50 \text{ Ohm}$

Итак для принятой конструкции пропорциональной камеры можно утверждать, что множественность срабатываний падков составляет величину порядка 1% для порога дискриминатора в 3.5 электрона при входном сопротивлении предусилителя в 50 Ом, а также 6.1 электронов для сопротивления в 100 Ом. Данное заключение сделано для формирования в 10ns до максимума импульса одноэлектронной реакции. Понятно, что при более медленном формировании вероятность множественности уменьшается.

5 Наведенные токи, их деление между падам и множественность

Согласно теореме Шокли наведенный ток пада катодной плоскости при движении заряда Q_0 со скоростью, задаваемой вектором V , равен произведению $Q_0 \cdot (E \cdot V)$, где E – вектор напряженности электрического поля в месте расположения заряда при условии, что пад имеет единичный потенциал, а остальные электроды заземлены. Распределение наведенного тока на катодную плоскость определено в [5]. Перейдем к его интегральному выражению, как это представлено следующей формулой

$$I_p G(\lambda, K_2, K_3) := \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\text{atan}(\sqrt{K_3} \cdot \tanh(K_2 \cdot \lambda))}{\text{atan}(\sqrt{K_3})} + 1 \right)$$

Здесь λ нормированное на анод-катод расстояние в катодной плоскости относительно положения заряда, движение которого вызывает наведенный ток.

K_2, K_3 параметры, значения которых требуют определения. А именно на катодном паде устанавливался единичный потенциал и находилась напряженность поля на поверхности одной из анодных проволочек. При фитировании полученных данных определялись значения параметров. Нормированные результаты показаны на рис.15. Имея эти данные, не сложно посчитать границы множественности с однопроцентной вероятностью при разных порогах, что и представляет рис.16.

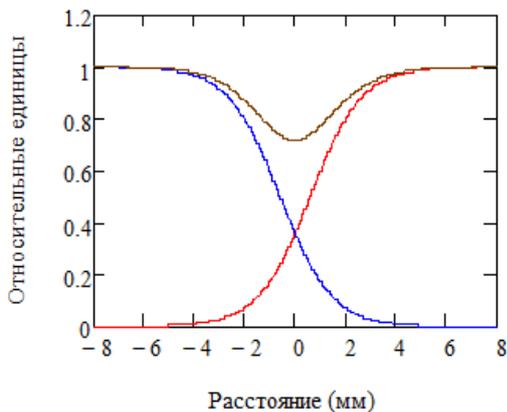


Рис.15. Наведенные токи двух соседних падов и их сумма в зависимости от положения трека ионизации.

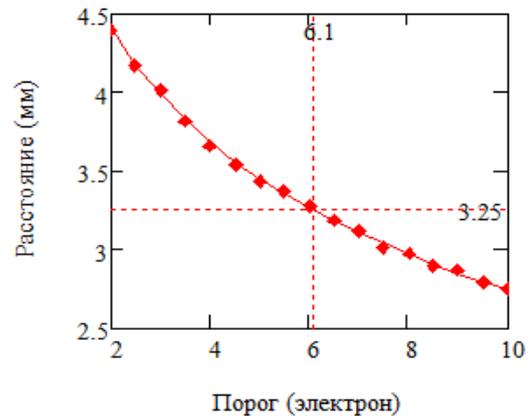


Рис.16. Положение трека ионизации при однопроцентной вероятности множественности для разных порогов.

Предположим, что пад равномерно засвечен. Тогда исходя из его площади и выше полученных результатов можно утверждать, что на данной выборке событий, в 22% случаев имеем множественность из-за деления наведенных токов и лишь в 1% из-за емкостной связи. Отменим существенность этого заключения.

При множественности срабатываний возможно их усреднение при пренебрежении емкостной ошибки. Отметим, что ошибка емкостной связи имеет свои признаки для режектирования.

6 Сигнальные линии и их расположение

Катодные плоскости изготовлены из металлизированного стеклопластика, на одной из которых со стороны анодных проволоочек вытравлена падовая структура, а на другой стороне сигнальные и охранные линии. Охранные линии соединены с землей, сигнальные с соответствующими падами. Рис.17 и 18 дают представление о их расположении и соединении с падами.

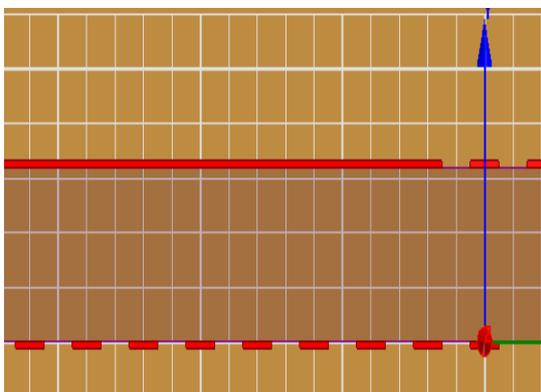


Рис.17. Расположение сигнальных и охранных линии.

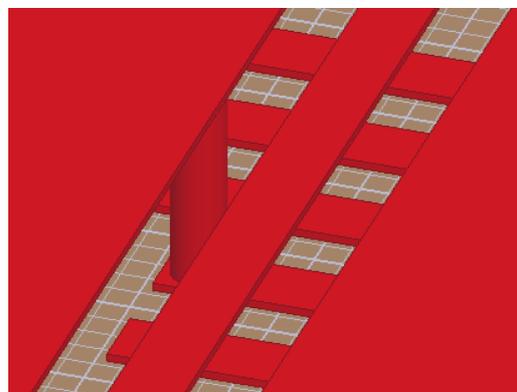


Рис.18. Иллюстрация соединения сигнальной линии с падом.

Каждая сигнальная линия расположена между двумя охранными. Первая охранный линия (справа на рис.17) позиционирована между падами, что приводит к уменьшению их взаимной емкости с “.44Pf” до “.15Pf” (см. таб.3). Следующая линия сигнальная (пад “PC3”, рис.4) находится на краю падов и ее влияние на взаимные емкости тем самым уменьшено. Расположение остальных линии не столь значительно.

Другим вопросом, требующим выяснения, является выбор ширины линий и из зазоров. Но этот выбор в основном ограничен технологическими возможностями.

Отметим для порядка, что охранные линии необходимы не только для исключения связи между сигнальными линиями, но и для уменьшения емкости сигнальная линия/пад.

7 Заключение

Итак можно утверждать, что для разработанной камеры с падовой структурой на катодных плоскостях множественность срабатываний из-за емкостной связи порядка 1% при пороге регистрации событий в 6 электронов. И эта величина более чем на порядок меньше множественности при делении наведенных токов между падами.

-
- [1] A.Vorobyov et al. Wire Pad Chamber for LHCb Muon System. LHCb note 2000-003.
- [2] W.Riegler. Detector Physics and Performance Simulations of the MWPCs for the LHCb muon system. LHCb note 2000-060.
- [3] W.Riegler. Crosstalk, Cathode Structure and Electrical Parameters of the MWPCs for the LHCb Muon System. LHCb note 2000-061.
- [4] F.Sauli. Principles of operation of multiwire propotional and drift chambers, Geneva, 1977.
- [5] E. Mathieson and J.S . Gordon, Nucl. Instr. and Meth. 227 (1984) 277.
- [6] E. Spiridenkov et al., Electronics noise and time resolution of the multiwire proportional chamber. LHCb-99-039, 05 Nov 1999.