



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 96-64

ОНФ

А.П.Воробьев, Ю.В.Роднов, А.М.Сасов
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино
Г.Л.Башинджагян, М.М.Меркин, Д.Е.Карманов
Московский государственный университет, Москва

МОДУЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРАХ

Направлено в ПТЭ

Протвино 1996

Аннотация

Воробьев А.П. и др. Модуль электромагнитного калориметра на полупроводниковых детекторах: Препринт ИФВЭ 96-64. – Протвино, 1996. – 8 с., 6 рис., 2 табл., библиогр.: 4.

Описан модуль электромагнитного калориметра на полупроводниковых детекторах с объединением сигналов с помощью линии задержки. Это позволяет сократить количество усилителей до одного на модуль без ухудшения быстродействия по сравнению с быстродействием одного детектора. Выход модуля согласован через трансформатор для работы на нагрузку 50 Ом.

Abstract

Vorobiev A.P. et al. Electromagnetic Calorimeter with Semiconductor Detectors: IHEP Preprint 96-64. – Protvino, 1996. – p. 8, figs. 6, tables 2, refs.: 4.

The electromagnetic calorimeter module with semiconductor detectors has been designed with the summing of detectors signals using an artificial delay line. This allows one to reduce the number of amplifiers per a module to the one without making worse the time response of the calorimeter. The output impedance of a module has been matched to 50 Ohm cable using a transformer.

Калориметры частиц являются в настоящее время одними из основных детекторов, которые используются в экспериментах по физике высоких энергий. С ростом энергии и интенсивности пучков возрастают требования к быстродействию калориметров и их радиационной стойкости.

Калориметры частиц с регистрирующими элементами на основе полупроводниковых детекторов, обладая высоким быстродействием, нашли пока в практике проведения экспериментов ограниченное применение, связанное с недостаточной радиационной стойкостью и большой стоимостью. Однако появление радиационно-стойких полупроводниковых материалов [1] может в дальнейшем способствовать расширению области использования полупроводниковых калориметров, а развитие полупроводниковой технологии — уменьшению стоимости полупроводниковых детекторов. Один из путей, который позволит, на наш взгляд, уменьшить стоимость калориметров, это уменьшение числа снимаемых сигналов с калориметрического модуля путем объединения сигналов с детекторов по схемам, которые аналогичны рассмотренным нами для калориметров с плоскопараллельными газовыми ионизационными камерами [2].

Настоящая работа посвящена исследованию схемы объединения сигналов с модуля электромагнитного калориметра, построенного на кремниевых полупроводниковых детекторах. Детекторы изготовлены на основе пластин монокристаллического высокоомного n -кремния высокой степени очистки фирмы Wacker. Основные характеристики кремния указаны в табл.1.

Сами детекторы представляют собой кремниевые $p-i-n$ -диоды большой площади с резким $p-n$ -переходом (рис.1). Детектор работает при обратном смещении в режиме полного объединения, рабочее напряжение $U_p = 90\text{В}$.

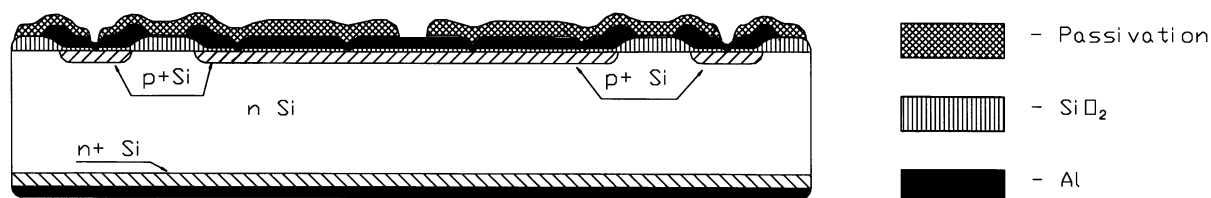


Рис. 1. Упрощенная структура детектора: толщина слоя пассивации около 1 мкм, толщина Al 0,8 мкм, толщина окисла над p^+ -областью 0,5 мкм, глубина p^+ -области около 0,5 мкм.

Таблица 1.

| | | |
|--|---|-----------------------------------|
| Тип | – | n |
| Ориентация кристаллографических осей | – | (111) |
| Диаметр | – | 100,0 мм (4") |
| Удельное сопротивление -р по всем пластинам | – | (6 ± 2) кОм · см |
| Неоднородность по р: | | |
| – для пластин из одной технологической партии кремния (из одного слитка) | – | не более 2,0 кОм · см |
| – на каждой пластине | – | не более 1,5 кОм · см |
| Время жизни неосновных носителей в слитке Si (по всем слиткам) | – | менее 1 мс |
| Разброс времени жизни | – | не специфицируется |
| Толщина пластины | – | (380 ± 15) мкм |
| Неплоскостность поверхностей пластин | – | не более 5 мкм |
| Обработка поверхностей пластины: | | |
| – лицевая | – | полировка |
| – задняя | – | шлифовка с последующим травлением |

Основные параметры детекторов представлены в табл.2.

Таблица 2.

| | | |
|---|---|--|
| Структура перехода | – | $p^+ - n - n^+$ |
| Геометрический размер | – | $30,5 \times 34,0 \text{ мм}^2$ |
| Толщина | – | (380 ± 15) мкм |
| Размер активной области | – | S 29,75 × 34,0 мм ² |
| Глубина активной области в режиме полного обеднения | – | d (380 ± 15) мкм |
| Рабочее напряжение | – | U_p . 80-100 В |
| Напряжением полного обеднения | – | $U_{n.o.} < 80 \text{ В}$ |
| Ток утечки при 120 В при T = 20°C (на детектор) | – | $I_y < 200 \text{ нА}$ |
| Емкость между p^+ -областью и задней стороной при 120 В | – | C 265-280 рФ |
| Максимальная крутизна $I(V)$ характеристики на участке 120-140 В (при T = 20°C) | – | $dI_{max} < 0,001 \times I_y$. на 1 В |

На рис.2 приведена принципиальная схема электрических соединений в модуле калориметра. В модуль входили 12 полупроводниковых детекторов, объединение осуществлялось по четырем группам по три детектора в каждой. Между детекторами помещался поглотитель из свинца толщиной 6 мм. Общая длина поглотителя составила 12 радиационных длин. Трансформатор выполнял помимо суммирования сигналов функцию развязки и согласования волновых сопротивлений калориме-

трического модуля и усилителя. Усилитель имел входное сопротивление 50 Ом, коэффициент усилителя 200 с полосой пропускания 80 МГц.

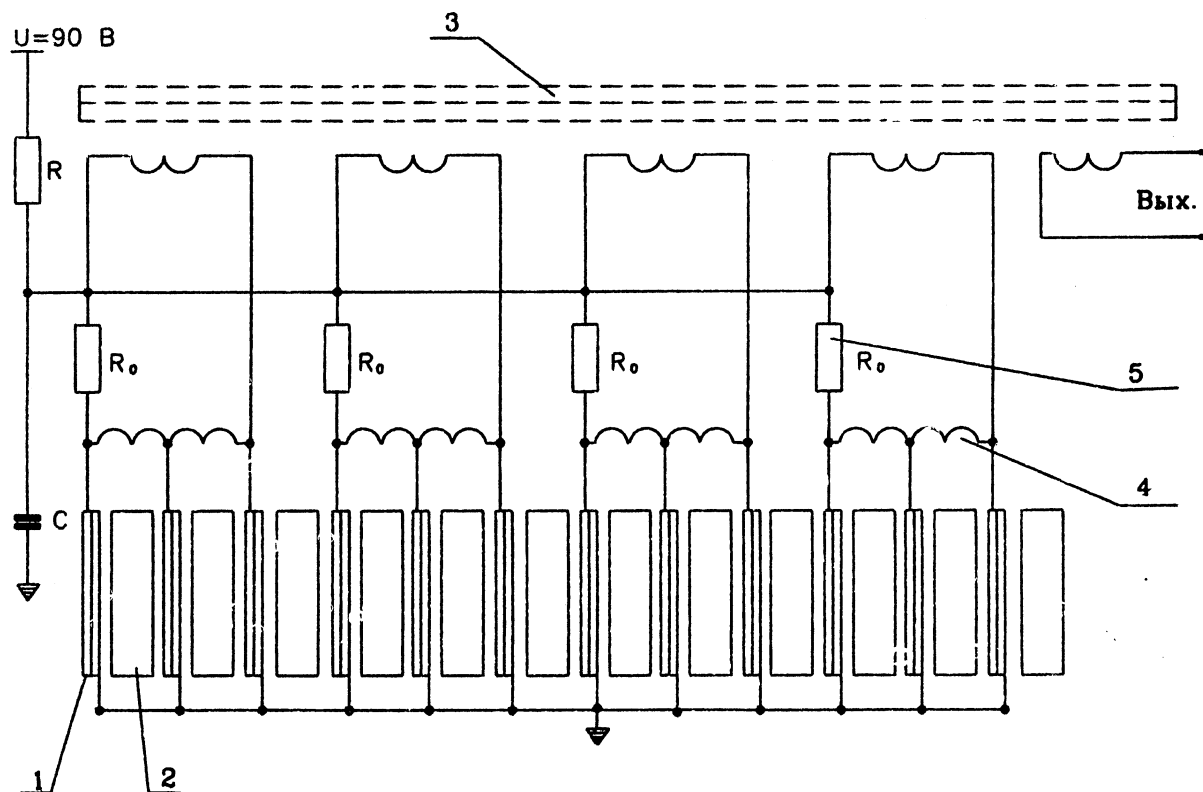


Рис. 2. Принципиальная схема электрических соединений модуля калориметра. 1 — кремневые полупроводниковые детекторы; 2 — свинцовый поглотитель; 3 — согласующий трансформатор; 4 — индуктивные элементы линии задержки; 5 — согласующие сопротивления.

Согласно теореме Рамо [3] скорость изменения заряда в объеме полупроводникового детектора определяется соотношением

$$\frac{dQ}{dt} = Q \frac{V}{W}, \quad (1)$$

где Q — заряд выделенный в полупроводнике при прохождении частицы; V — скорость дрейфа носителей заряда; W — ширина полупроводникового перехода. Выражение

$$\tau_d = \frac{W}{V} \quad (2)$$

определяет постоянную времени сбора заряда в полупроводниковом материале.

Заряд, поступающий на контактные пластины детектора и входную цепь электронного тракта, вызывает разности потенциалов на них и определяется формулой

$$U = \frac{\mu E \tau_{ex} Q}{W C_{ex}} (1 - e^{-t/\tau_d}), \quad (3)$$

где $\tau_{\text{вх}} = R_n C_{\text{вх}}$ — постоянная времени входной цепи электронного тракта с учетом емкости детектора; μE — скорость дрейфа носителей в полупроводнике при напряженности поля E .

При $\tau_{\text{вх}} < \tau_d$ формулу (3) можно записать так:

$$U = \frac{\mu E R_n Q}{W} = i_o R_n, \quad (4)$$

где $i_o = \frac{Q \mu E}{W}$. Формула (4) определяет напряжение на входе электронного тракта, которое повторяет форму тока в полупроводниковом детекторе. Отсюда можно оценить верхнюю границу постоянной времени входной цепи усилительного тракта при заданной скорости дрейфа, ширине полупроводникового перехода и емкости входной цепи с учетом собственной емкости полупроводникового детектора. Из соотношения $\tau_d = \tau_{\text{вх}}$ определяем сопротивление нагрузки детектора:

$$R_n = \frac{\tau_d}{C_{\text{вх}}}. \quad (5)$$

Формула (2) определяет при принятых нами соотношениях передний фронт импульса с детектора. Отсюда получаем необходимую полосу пропускания усилителя для данного детектора

$$f = \frac{0,35}{2,3 \cdot \tau_d}. \quad (6)$$

Определим параметры полупроводникового детектора и сопротивление нагрузки при следующих значениях параметров полупроводниковой пластины:

- емкость полупроводниковой пластины $C_o = 260$ пФ;
- проводимость полупроводниковой пластины $G_o = 6 \cdot 10^{-6}$ См;
- скорость дрейфа электронной компоненты носителей заряда в полупроводниковой пластине $V_e = 7,4 \cdot 10^6$ см/с, которая соответствует подвижности $\mu_e = 1350$ см²с·В при напряженности поля около $3 \cdot 10^4$ В/см.

Ширина полупроводникового перехода $W = 380$ мкм.

Согласно формулам (1), (5), (6) имеем $\tau = 5,1$ нс; $R_n = 38$ Ом; $f = 30$ МГц. Принимая эти значения за исходные, получаем следующие параметры для линии задержки (рис.2) согласно следующим формулам:

$$\rho = \sqrt{\frac{L_o}{C_o}}, \quad (7)$$

$$L_o = \frac{1}{(\pi f)^2 C_o}. \quad (8)$$

Отсюда $L_o = 0,43$ мкГн, $\rho_o = 40$ Ом.

Для выполнения соотношения (4) ($R_n C_{\text{вх}} < \tau_d$) принимаем $\rho_o = 25$ Ом. При этом индуктивность будет $L_o = 0,834$ мкГн. Значение входной емкости электроники не учитываем ($C_o = C_{\text{вх}}$), так как ее значение (~ 5 пФ) лежит в пределах разброса значений емкостей полупроводниковых пластин.

Таким образом, нами определены все необходимые элементы дискретной линии задержки, в которую входят полупроводниковые пластины в качестве конденсаторов.

Так как пластины имеют проводимость, которая вносит потери при передаче сигналов, оценим коэффициент передачи одной ячейки дискретной линии задержки. Согласно [4] потери в дискретных линиях задержки определяются формулой

$$\gamma = \alpha + i\beta = \sqrt{Z_o Y_o} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(R_o + i\omega L_o)(G_o + i\omega C_o)}, \quad (9)$$

где под корнем — комплексные сопротивления и проводимость индуктивных и емкостных элементов линии задержки соответственно.

В нашем случае техническая реализация индуктивного элемента линии задержки определила следующие его параметры:

$$Z_o = R_o + j\omega L_o = 0,35 + j\omega 0,334 \cdot 10^{-6},$$

отсюда потери при передаче сигнала через одну ячейку линии задержки при максимальной частоте пропускания $f = 30$ МГц составят $\alpha = 1,225$ Нп или около 10 дБ на одну ячейку (уменьшение амплитуды в 3,4 раза). С целью снижения потерь сигналов полупроводниковые детекторы были объединены в группы, сигналы с которых суммировались на трансформаторе.

На рис.3 приведена фотография осциллограммы, полученная при облучении модуля калориметра электронами с энергией 26 ГэВ/с. Высоковольтное питание, подаваемое на модуль, составляло 90 В.

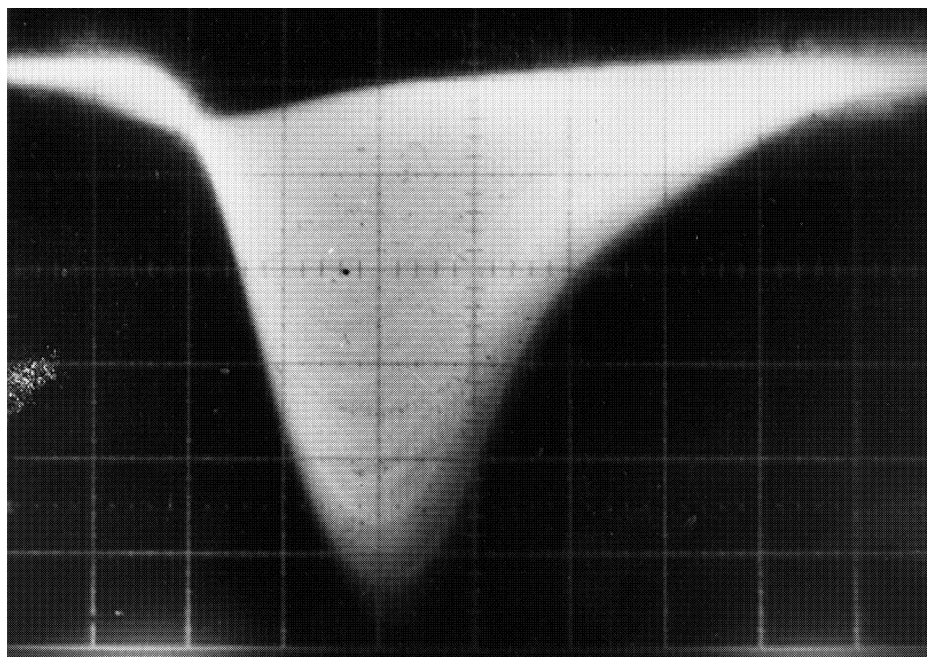


Рис. 3. Фотография импульса на выходе усилителя при облучении модуля электронами с энергией 26 ГэВ/с. Использовался усилитель с полосой пропускания 80 МГц. Цена деления по вертикали 100 мВ/дел., по горизонтали 10 нс/дел.

Время нарастания импульса на осциллограмме составляет около 18 нс, что достаточно хорошо согласуется с постоянной времени входной цепи (детектор–усилитель и постоянной времени сбора электронной компоненты заряда в самом детекторе). Необходимо отметить, что оценки параметров быстродействия велись при значении подвижности электронов с напряженностью поля $3 \cdot 10^4$ В/см, что является верхней границей времени собирания электронной компоненты носителей заряда, при которой время сбора заряда уже не уменьшается.

На рис.4 приведены результаты испытаний модуля при облучении космическими частицами. Для запуска системы сбора данных использовался сигнал вырабатываемый самим модулем. Первый пик на рис.4 соответствовал шумовому распределению импульсов детектор–усилитель, второй пик — результат облучения космическими лучами.

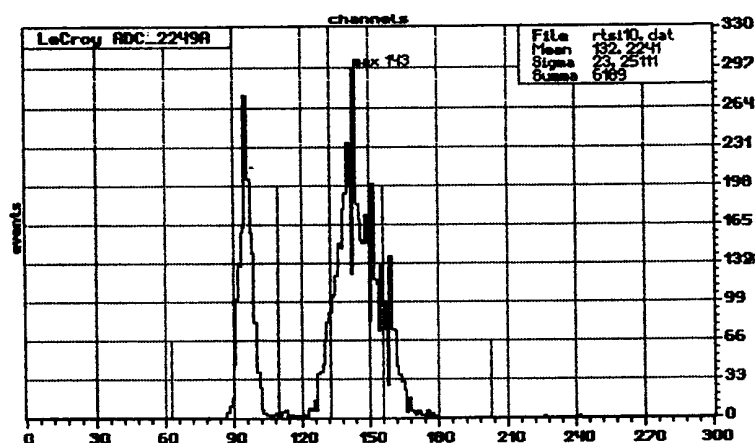


Рис. 4. Энергетическое распределение импульсов на выходе усилителя при облучении модуля космической. Напряжение питания пластины 90 В.

На рис.5 приведены результаты измерений энергетического распределения сигналов с отдельного полупроводникового детектора при облучении его α - и β -источниками. Измерения велись при подаче напряжения 90 В на детектор с усилителем, имеющим полосу 80 МГц. Первый пик на гистограмме соответствовал шумовому распределению тракта полупроводниковый детектор–усилитель. Второй пик — облучение β -источником от Sr^{90} а третий от α -источника Pu^{238} . Длительность импульса по основанию при облучении β -источником составляла 40 нс.

На рис.6 приведены гистограммы шумового распределения импульсов при подключенном калориметрическом модуле ко входу усилителя и отключенном. Измерения, выполненные по методике [3], позволили оценить шумовой вклад модуля, который составил ~ 2 тыс. электронов.

Результаты измерений показали, что большая величина затухания сигнала, связанная с проводимостью полупроводникового материала, не позволяет непосредственно объединять большое количество полупроводниковых детекторов для работы на один усилитель, как это сделано в работе [3]. Однако предложенный способ дает возможность достаточно эффективно объединять полупроводниковые детекторы в одном калориметрическом модуле путем их группирования.

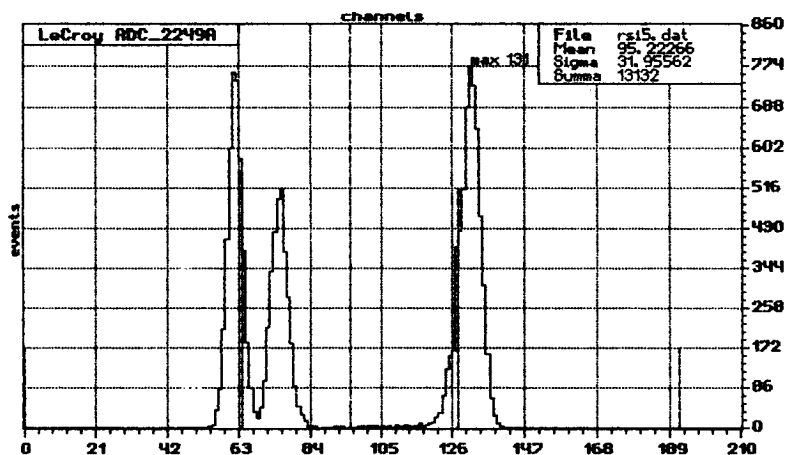


Рис. 5. Распределение импульсов на выходе усилителя при облучении кремниевой пластины от β - и α -частицы. Первый пик соответствует шумовому распределению импульсов полупроводниковая пластина — усилитель, второй и третий пики — облучению от источников Sr^{90} и Pu^{238} соответственно.

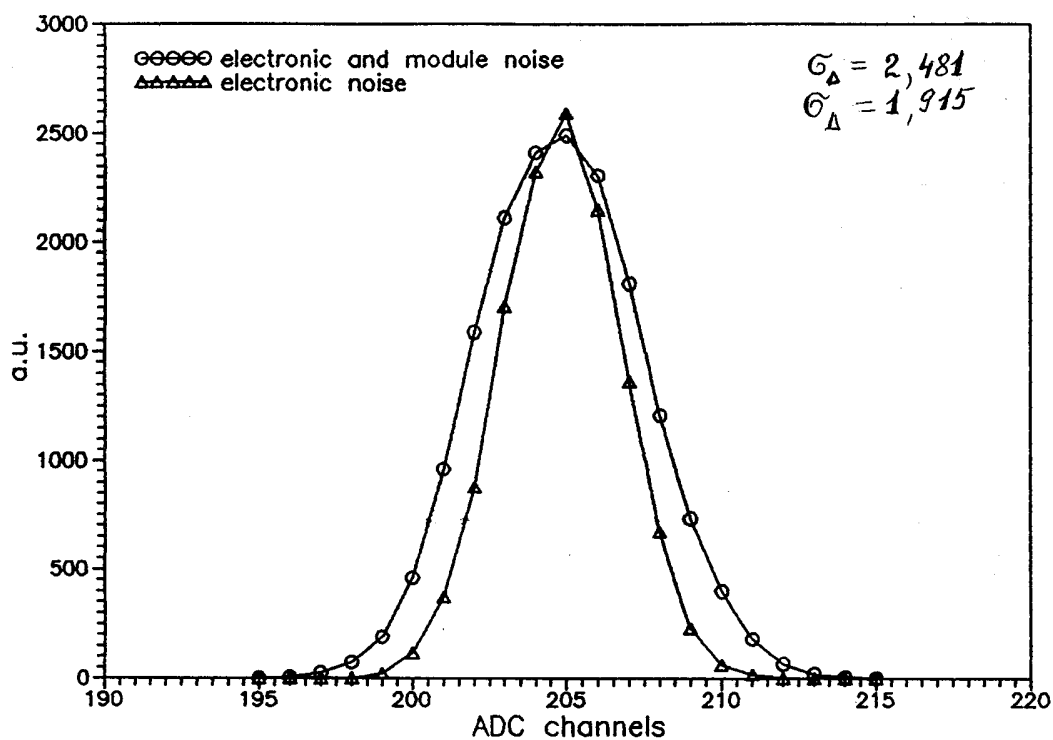


Рис. 6. Шумовое распределение импульсов на выходе усилителя при подключенном и отключенном модуле калориметра. Шумовой вклад модуля составляет 2 тыс. электронов.

Что касается быстродействия, то сам процесс сбора носителей заряда в полупроводниковом материале происходит достаточно быстро. Это позволяет использовать полупроводниковые детекторы в системах, работающих при больших нагрузках, например для выработки триггера первого уровня при экспериментальных исследованиях на ускорителях частиц. Для еще большего увеличения быстродействия необходимо уменьшить емкость детекторов, что легко реализовать путем разделения общей площади одной полупроводниковой пластины на части с последующим их объединением и суммированием сигналов на трансформаторе.

Технология производства полупроводниковых детекторов имеет ряд особенностей, требующих использования нестандартного для микроэлектроники высокоомного (до 10 кОм·см) сверхчистого кремния с временем жизни неосновных носителей порядка 5-6 мс при работе детекторов в режиме полного обеднения. Эти требования успешно преодолеваются путем использования бездефектного исходного кремния в сочетании с жесткими условиями в технологических процессах. В настоящее время технология производства позволяет получать размеры кремниевых пластин площадью более нескольких десятков квадратных сантиметров, что дает возможность создавать большие активные объемы в калориметрах.

На предложенном способе коммутации пластин легко реализовать детекторы с большими площадями без существенного ухудшения их параметров по быстродействию. Следует также отметить простоту предложенного способа, не требующего использования каких-либо дополнительных или дорогостоящих элементов.

Схема имеет высокую надежность. За все время проведения испытаний полупроводниковых детекторов (в течение 6 месяцев) не было ни одного случая выхода их из строя или заметного изменения параметров.

Авторы выражают свою благодарность В.Ф.Головкину, И.В.Зубкову, Ю.П.Петухову, Ю.П.Цюпе за помощь при подготовке и проведении эксперимента.

Список литературы

- [1] Chmil V.B., Chuntonov A.V., Krupnyi G.I. et al. // Phys. D. Appl. Phys. 1995, v.28, p.559-564.
- [2] Бабинцев В.В., Баталов А.А., Воробьев А.П. и др. — Препринт ИФВЭ 94-120, Серпухов, 1994;
Бабинцев В.В. и др. // ПТЭ, 1996, №4, с.1-5.
- [3] Ramo S. // IER. 1939, v.27, p.584.
- [4] Белецкий А.Ф. Основы теории линейных электрических цепей. — М.: Связь, 1967.

Рукопись поступила 12 августа 1996 г.

А.П. Воробьев и др.

Модуль электромагнитного калориметра на полупроводниковых детекторах.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 15.08.96. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 1. Уч.-изд.л. 0.76. Тираж 240. Заказ 762. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

