

### МНОГОКАНАЛЬНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ ГАЗОВЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Г. Д. Алексеев<sup>\*</sup>, М. А. Батурицкий<sup>\*\*</sup>, О. В. Дворников<sup>\*\*\*</sup>,  
В. А. Михайлов<sup>\*\*</sup>, В. В. Токменин<sup>\*</sup>, А. И. Хохлов<sup>\*\*</sup>, А. А. Шишкин<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской обл.

<sup>\*\*</sup> НИИ ядерных проблем Белгосуниверситета, г. Минск

<sup>\*\*\*</sup> ОАО МНИПИ, г. Минск

Обязательным элементом современных физических установок в области физики высоких энергий являются детекторы мюонов, располагающиеся во внешних слоях этих установок в силу высокой проникающей способности таких частиц. Для регистрации мюонов используются многопроволочные газонаполненные детекторы (пропорциональные камеры с анодным и (или) катодным съемом и различные виды дрейфовых трубок). Периферийное расположение мюонной системы обуславливает большие геометрические размеры детектора. Вместе с требованием высокого пространственного разрешения это приводит к большому количеству каналов – десятки и сотни тысяч в текущих и планируемых экспериментах. Обеспечить съем сигналов в данном случае можно только с помощью заказных интегральных микросхем, успешный опыт разработки которых описывается в данной работе.

В 1996–1997 гг. в НИИ ЯП БГУ были разработаны две заказные аналоговые сверхбольшие интегральные микросхемы (СБИС) восьмиканального токового усилителя-формирователя Ampl-8.3 и восьмиканального компаратора Disc-8.3. Они предназначались целевым образом для передней мюонной системы эксперимента D0 на коллайдере «Тэватрон» в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (г. Батавия, США) [1–4], однако в итоге оказались способными закрыть большую часть потребностей многопроволочных газовых детекторов, применяемых не только в физике высоких, но также средних и низких энергий. Семейство упомянутых выше микросхем получило общее название **DOM** по первым буквам словосочетания (**D**ubna+**D0**+**M**insk), отражающего имевшее место международное сотрудничество. Для достижения требуемых экспериментом D0 параметров, которые уточнялись в течение всего процесса разработки, понадобилось сделать три итерации разработки.

Электроника считывания размещается непосредственно на детекторе на восьмислойной печатной плате ADB (Aplifier Discriminator Board), разработанной в НИИ ЯП. Она содержит 32 канала усиления входных сигналов с последующим дискриминированием с постоянным порогом. Эти каналы реализованы на четырех корпусах Ampl-8.3 и четырех Disc-8.3.

Полуторагодовой опыт эксплуатации данной электроники в Фермилабе показал ее высокую надежность, устойчивость к самовозбуждению, перегрузкам

по входу и высоковольтному пробую. Используемая биполярно-полевая технология [5–8] по своему характеру является радиационно стойкой к облучению нейтронами [3, 9], что является дополнительным преимуществом данной электроники.

Кроме Фермилаба, данная электроника устанавливается сейчас в 10 тыс. каналов мюонной системы эксперимента COMPASS (ЦЕРН, г. Женева, Швейцария).

### **1. Особенности работы канала усиления и дискриминации сигналов MDT**

Ключевой проблемой разработки электроники считывания мюонных детекторов являются заказные СБИС усилителей и дискриминаторов. Требования, предъявляемые передней мюонной системой эксперимента D0, менялись и уточнялись в течение всего процесса проектирования, отражая процесс углубления понимания работы детектора – мини-дрейфовых трубок (MDT) и возможностей проектируемых микросхем, поэтому понадобилось три итерации, чтобы получить изделия, оптимизированные под данную задачу.

MDT [10] разрабатывались и изготавливались в Объединенном институте ядерных проблем (ОИЯИ). Они представляют собой блоки из восьми трубок квадратного сечения  $9,4 \times 9,4$  мм, образованные алюминиевым Ш-образным профилем толщиной 0,6 мм, с крышкой из нержавеющей стали. Внутри ячеек по центру натянута проволочка из золоченого вольфрама толщиной 50 мкм. Вся конструкция помещена в пенал из ПХВ, так как катод находится под высоким отрицательным потенциалом. Трубки заполнены газовой смесью  $\text{CF}_4 + \text{CH}_4 = 90\% + 10\%$ , обеспечивающей высокую скорость дрейфа электронов. Трубки работают в пропорциональном режиме и обеспечивают высокую скорость счета, малое время собирания заряда, позволяющее работать со 132-наносекундными циклами «Тэватрона», а также характеризуются малой скоростью старения.

Требования к усилителю определяются как свойствами MDT, так и всей системой («Тэватрон» – установка D0) в целом. Усилитель должен обладать высоким быстродействием, достаточным для обработки сигналов MDT с загрузкой до  $10^3$  импульсов в секунду на канал, определяемой светимостью модернизированного «Тэватрона». Сигнал MDT имеет примерно треугольную форму с переменной длительностью переднего и заднего фронтов, определяемой удалением траектории частицы от анодной проволочки MDT. Передний фронт, определяемый сбором электронов лавин, образуемых вблизи анода, более короткий (примерно 10–40 нс), задний, формируемый существенно менее подвижными положительными ионами, более затянут. Его типовые значения 20–150 нс. При этом интегрирование, выполняемое RC-цепями встроенной противозумовой фильтрации, не должно превышать минимальную длительность заднего фронта входного сигнала. Все это позволяет избежать применения цепей подавления полюса нулем [11].

В случае дискриминаторов для достижения требуемой точности временной привязки 4 нс переменная длительность фронтов сигнала не позволяет использовать приемлемые для многоканальных систем схемы со следящим порогом

(constant fraction и zero crossing) [12], поскольку они требуют постоянства фронтов сигнала. Из-за сложности внутренней структуры (в одном канале используются три компаратора) пришлось отказаться от очень интересной схемы двух-порогового дискриминатора [13]. Поэтому была выбрана схема дискриминатора с постоянным порогом ( $0,5 \div 5,0$  мкА), нагруженного на низкошумящий усилитель с большим коэффициентом преобразования. Входное сопротивление усилителя  $R_{in}$  должно быть согласовано с волновым сопротивлением MDT, составляющим 320 Ом. При этом согласующий резистор, включенный последовательно со входом, вместе с  $R_{in}$  образует резистивный делитель, снижающий напряжение высоковольтных выбросов примерно в шесть раз в нашем случае, когда  $R_{in} = 50$  Ом, обеспечивая дополнительную защиту от высоковольтных выбросов. Анализ поведения MDT при высоковольтном пробое газового промежутка показывает, что вход усилителя должен быть защищен от импульсов как отрицательной, так и положительной полярности.

Схема усилителя должна также обеспечивать быстрый выход из насыщения после значительных перегрузок по входу, возникающих при регистрации ливней или появлении стримерных импульсов. При этом уровень перекрестных помех должен быть достаточно низким, чтобы предотвращать ложные срабатывания дискриминаторов в соседних каналах.

Точность временной привязки и дрожание момента срабатывания дискриминаторов в каналах передней мюонной системы D0 не должны превышать 4 нс, а допустимый разброс порогов срабатывания –  $\pm 10$  % по плате и  $\pm 10$  % между средними значениями порогов по платам. Такие точностные параметры позволяют минимизировать значение высокого напряжения на анодах при достаточно широком плато счетной характеристики трубки.

Выходные каскады дискриминатора должны обеспечивать транспортировку выходных сигналов по ленточному кабелю на удаление до 30 м для последующей обработки в крейтах VME.

Перечисленные выше требования легли в основу выбора структуры и схемотехники разрабатываемой электроники.

## 2. Структура электроники

На момент начала данной работы имелось несколько типов серийно выпускаемых микросхем усилителя-дискриминатора в КМОП и биполярной технологиях. Они предназначались для работы с кремниевыми полупроводниковыми, сцинтилляционными и газонаполненными детекторами. Наиболее близким аналогом являлась схема ASD-8 [13] и ее последующая модификация ASD/BLR (Amplifier-Shaper-Discriminator with Baseline Restoration) [14]. Однако, несмотря на очевидные ее достоинства, ее нельзя было использовать из-за слишком большого входного сопротивления (120 Ом) и недостаточного усиления. Поэтому было принято решение о разработке двух новых микросхем – усилителя и компаратора, причем в отдельных корпусах для минимизации триггерных шумов и межканальных помех и увеличения выхода годных.

Количество каналов в каждой микросхеме было принято равным количеству каналов в одной MDT, т. е. восьми. При этом на печатной плате, монтируемой

непосредственно на детекторе, размещается 32 канала усиления/дискриминации, обеспечивая возможность кратчайшим путем снимать сигналы с одного октанта (1/8 слоя детектора) максимальной толщины, т. е. четырех восьмиканальных MDT.

### **3. СБИС восьмиканального токового усилителя-формирователя Ampl-8.3**

**3.1. Требования к усилителю.** Проектирование усилителя проводилось с учетом следующих требований:

- 1) максимально большой коэффициент преобразования;
- 2) возможность работы с входными импульсами обеих полярностей для расширения области применения;
- 3) диодная защита от высоковольтных импульсов обеих полярностей на входе;
- 4) каскады усиления должны строиться по дифференциальной схеме для минимизации перекрестных помех;
- 5) тип усилителя – токовый, без общей отрицательной обратной связи;
- 6) максимальная симметрия топологии СБИС усилителя для минимизации разбалансировки дифференциального выхода усилителя по постоянному току на холостом ходу;
- 7) использование дополнительного опорного каскада, полностью идентичного входному, для минимизации синфазных помех и задания рабочей точки второго каскада усиления;
- 8) достижение компромисса между быстродействием, уровнем шумов и потребляемой мощностью в многоканальной реализации СБИС.

Следует отметить, что во время всего процесса проектирования MDT рассматривалась как система с распределенными параметрами, поскольку время распространения сигнала в трубках максимальной длины достигает 20 нс, что сравнимо и даже превосходит длительность его переднего фронта.

**3.2. Схема усилителя.** Схема одного канала окончательного третьего варианта усилителя Ampl-8.3 представлена на рис. 1. Усилитель состоит из входного каскада «общая база – общий коллектор» (Q1, R28, Q2÷Q5, R7) с диодами защиты от положительных и отрицательных выбросов (Q31÷Q33) и резистором входа тестирования R39; двух дифференциальных каскадов усиления напряжения (Q6, Q7, R35, R36, R4, R5, C1A, C1B, Q8, R8) и (Q20, Q21, R37, R38, R23, R24, C4FA, C4FB, Q22, R25), разделенных эмиттерными повторителями со сдвигающими диодными цепочками Q23÷Q26, R26 и Q27÷Q30, R27; выходных эмиттерных повторителей Q13, Q9, R9 и Q14, Q10, R10 и опорного каскада Q15, R15, Q16÷Q19, R17 для стабилизации рабочей точки усилителя на холостом ходу и создания одинаковых условий для подавления синфазной помехи на первом дифференциальном каскаде, а также для снижения межканальных помех [4]. Поэтому опорный каскад сделан полностью идентичным входному, включая резистор тестового входа R40 и диодную защиту от положительных и отрицательных выбросов Q34÷Q36, обеспечивая абсолютную идентичность входных условий, в том числе и токов утечки. Схема Q11, Q12, R11, R12 определяет токи в многокаскадном токовом зеркале, задавая рабочий режим всем каскадам усиления. Каскад с

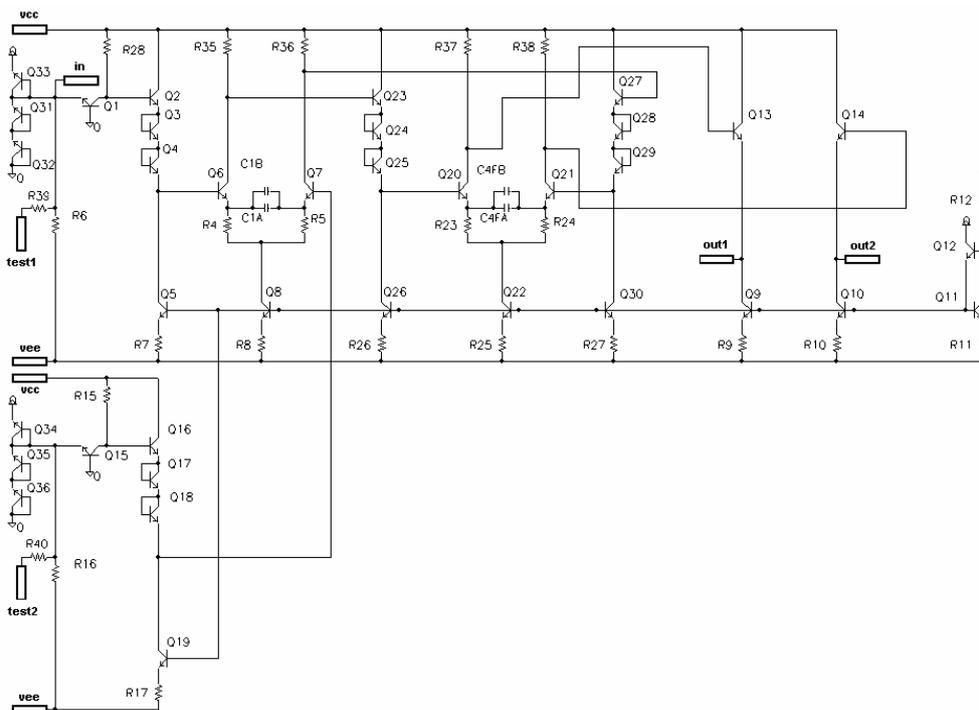


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная одного канала СБИС DOM Ampl-8.3

общей базой преобразует входной ток в напряжение на резисторе R28. Головной транзистор Q1 представляет собой СВЧ npn-транзистор с  $R_{bb} \leq 30$  Ом,  $f_T > 3$  ГГц. Он работает при коллекторном токе 0,8 мА, конфигурация с общей базой обеспечивает входное сопротивление примерно 50 Ом в широкой полосе частот.

Для получения необходимого усиления в схеме используется два дифференциальных каскада. Эмиттерные повторители с диодными смещающими цепочками Q2÷Q4 и Q16÷Q18 согласуют каскады по постоянному напряжению, выходные эмиттерные повторители Q13, Q9, R9 и Q14, Q10, R10 обеспечивают требуемую нагрузочную способность.

Для увеличения отношения сигнал/шум были предприняты следующие меры: 1) оптимизированы входные токи транзисторов с учетом как эквивалентной схемы детектора, так и собственных параметров головного транзистора; 2) вставлены фильтрующие цепи RC-CR с постоянной времени  $RC \approx CR \approx 20$  нс, сформированные транзисторами Q6, Q7 и Q20, Q21, резисторами R4, R5, R35, R36 и R23, R24, R37, R38, конденсаторами C1A, C1B и C4FA, C4FB. Интегрирование выполняется RC-цепями, образованными резисторами нагрузки и паразитными емкостями «коллектор – база»,  $C_{CB}$ , и «коллектор – подложка»,  $C_{CS}$ , транзисторов, входными емкостями эмиттерных повторителей,  $C_{IN}$ , транзисторами Q23, Q27, а также паразитными емкостями резисторов.

Дифференцирование выполняется эмиттерными резисторами и конденсаторами. Вследствие зависимости параметров RC-CR цепей и паразитных емкостей от положения рабочей точки окончательные номиналы резисторов и конденса-

торов выбирались по результатам моделирования в Pspice, где использовались модели резисторов и конденсаторов, учитывающие паразитные элементы и зависимость номиналов от рабочей точки.

Следует отметить, что описание фильтрующих свойств схемы формирователем RC-CR является в известной степени идеализацией, так как эмиттерные конденсаторы выполняют не дифференцирование в чистом виде (усилитель остается усилителем постоянного тока), а обычную высокочастотную коррекцию, увеличивающую коэффициент преобразования на высоких частотах и расширяющую таким образом полосу частот. Роль дифференцирующего конденсатора выполняет также разделительный конденсатор 1 нФ, соединяющий выход усилителя со входом компаратора.

**3.3. Топология Ampl-8.3.** Как уже говорилось, общая отрицательная обратная связь с выхода на вход не вводилась, поэтому для уменьшения разбалансировки выходных напряжений на прямом и инверсном выходах в режиме покоя предпринимались специальные меры по обеспечению полной идентичности элементов в обоих плечах дифференциальных каскадов, а также во входном и опорном каскадах «общая база – общий коллектор». При проектировании топологии схемы первостепенное внимание уделялось проблеме симметрии: входные транзисторы большой площади Q1 и Q15 располагались в непосредственной близости друг от друга, чтобы минимизировать разность их базэмиттерных напряжений  $\Delta U_{BE}$  и улучшить температурное согласование в широком диапазоне.

Таким же образом располагались резисторы R28, R15 и R6, R16, поскольку разброс их номиналов также влияет на величину разбалансировки выходного напряжения.

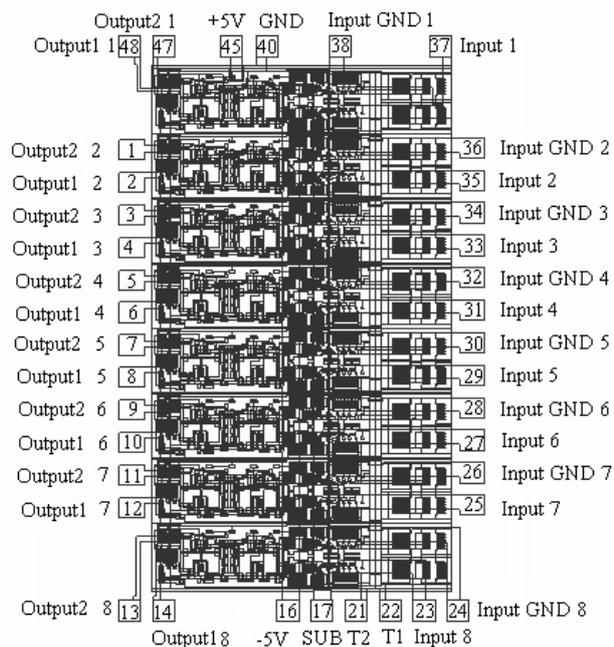


Рис. 2. Топология Ampl-8.3

Топология одного канала усилителя Ampl-8.3 (рис. 2) имеет следующие особенности:

- ширина канала 320 мкм. Она определяется размерами двух контактных площадок и минимальным зазором между ними (100 мкм + 100 мкм + 60 мкм + 60 мкм = 320 мкм). Размер кристалла восьмиканального усилителя с контактными площадками 2,3 × 3,3 мм;
- каждый канал экранирован контактом к подложке, выведенной металлическим проводником к отдельной контактной площадке (SUB), не имеющей гальванической связи с шиной напряжения питания;
- каждый канал имеет диодную защиту от положительных и отрицательных выбросов напряжения, диоды которой вносят паразитную емкость 4,26 пФ;
- каждый вход имеет отдельную шину земли InputGND, начинающуюся от базы головного транзистора. Эти точки подключаются в каждом канале к точкам земли Q12 и R12, которые, в свою очередь, подключаются к контактной площадке;
- имеется отдельная контактная площадка для вывода подложки, не связанная с отрицательным источником питания. Подавая на нее достаточно большой отрицательный потенциал, ограниченный практически напряжением пробоя подложки, можно существенно уменьшить паразитные емкостные связи между элементами ИМС и подложкой, что приводит к существенному уменьшению межэлементных и межканальных помех.

Для обеспечения строгой симметрии входного и опорного каскадов в опорный были введены функционально избыточные защитные диоды и тестовый резистор 100 кОм. Все это обеспечило удовлетворительную работу усилителя без использования внешних балансирующих элементов.

Принятые меры позволили существенно снизить перекрестные помехи, вместо дорогостоящих экранированных металлокерамических корпусов с посадкой на золотой эвтектический слой был применен более дешевый метод с использованием пластмассового корпуса с посадкой кристаллов на токопроводящий клей, что значительно уменьшило стоимость изделия в серийном производстве.

**3.4. Характеристики СБИС DOM Ampl-8.3.** Измеренные параметры усилителя третьей итерации Ampl-8.3 приведены в следующей таблице.

Таблица 1

**Характеристики Ampl-8.3**

Параметр	Значение <sup>1</sup>
Коэффициент преобразования, К, мВ/мкА	≥130 (65 на плечо)
Количество каналов в одном корпусе	8
Полярность входного сигнала	±
Дифференциальный выход	Да
Выходная нагрузка, Ом, не менее	1000
$I_{\text{noise}}$ при емкости детектора: $C_D = 0$ , г.м.с. нА	35
$C_D = 60$ пФ, г.м.с. нА	60
Длительность переднего и заднего фронтов по уровням (0,1 ÷ 0,9), нс	7
Напряжение смещения между выходами, В	≤1,5
Задержка распространения сигнала, нс	6

## Характеристики Ampl-8.3

Параметр	Значение <sup>1</sup>
Динамический диапазон <sup>2</sup> , дБ	52
Входное сопротивление, Ом	≈ 50
Ток пробоя при частоте импульсов 10 Гц и длительности 1 мкс, А: – положительная полярность – отрицательная полярность	3 10
Межканальные помехи, дБ: – при фронтах 1,8 нс – при фронтах 15 и 20 нс (имитация сигнала MDT)	– 47 – 54
Напряжение питания, В	±3...±5
Рассеиваемая мощность при питании ±3...5 В, мВт	160...640
Корпус	Пластмассовый 48-выводной 4222.48-2 ГОСТ 17476-88

<sup>1</sup> Все величины, за исключением рассеиваемой мощности, измерялись при напряжениях ±5 В.

<sup>2</sup> Для входных сигналов обеих полярностей

Выходные сигналы усилителя Ampl-8.3, нагруженного на нагрузку 1 кОм через разделительный конденсатор 1000 пФ, показаны на рис. 3. На верхней осциллограмме представлен сигнал от генератора, формирующий входной ток аналогичной формы с помощью резистора с номиналом, намного превышающим входное сопротивление схемы. На положительном и отрицательном выходах (вторая и третья осциллограммы) наблюдаются выбросы величиной примерно 10 %.

Следует особо подчеркнуть, что выбранная схемотехника и топология Ampl-8.3 предотвращают самовозбуждение не только на печатной плате, но и при тестировании в корпусах и даже на пластинках. Не было зарегистрировано ни одного случая самовозбуждения ни в одном из 50 тыс. каналов при их сборке и тестировании.

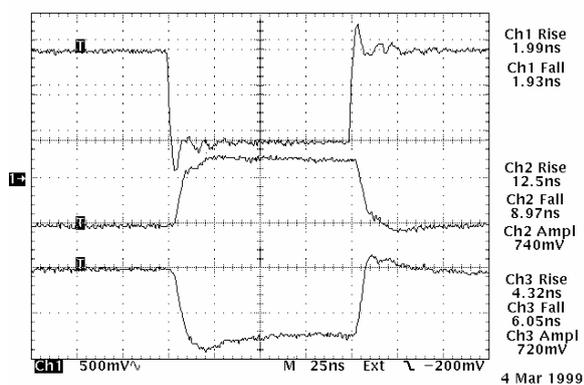


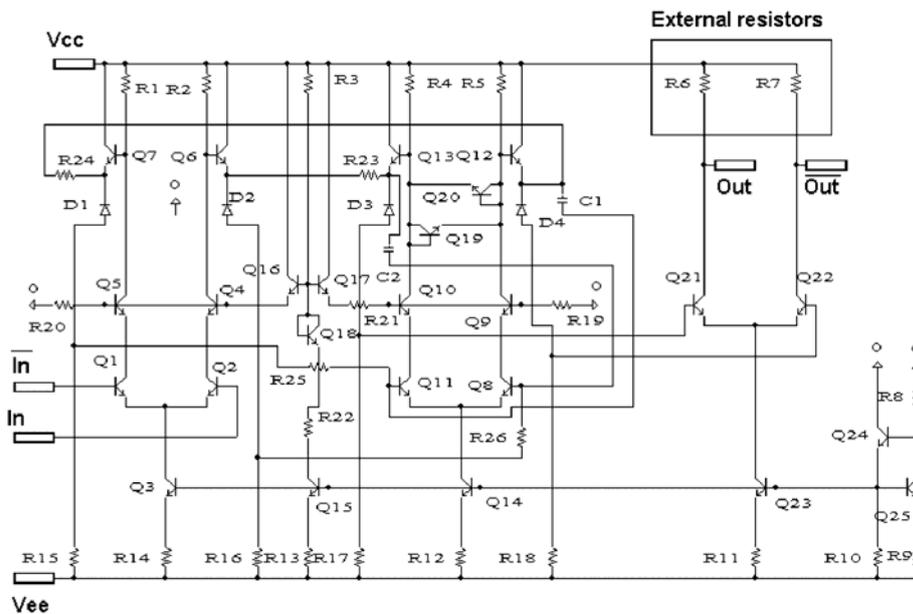
Рис. 3. Пример выходных сигналов Ampl-8.3

#### 4. СБИС восьмиканального компаратора Disc-8.3

**4.1. Основные проблемы разработки Disc-8.3.** Основной проблемой разработки компаратора было достижение максимального быстродействия при умеренной потребляемой мощности, что весьма существенно для многоканальной схемы. Эта проблема была решена за счет использования биполярных СВЧ-транзисторов в режиме малых токов.

ИМС компаратора [2] содержит восемь параллельных каналов, имеющих общие шины питания. Следует отметить, что на момент начала разработки восьмиканальные микросхемы компараторов нигде серийно не выпускались. Для расширения функциональных возможностей компаратора было принято решение не встраивать внутрь ИМС цепей задания порогового напряжения. Реализация выходных каскадов по схеме с открытым коллектором позволяет получать различные уровни выходных сигналов в диапазоне от 0 до 5 В, обеспечивая согласование по уровням с ТТЛ.

Схема электрическая принципиальная (СхЭП) одного канала показана на рис. 4. Компаратор содержит три дифференциальных каскада, первый и второй из них (с резистивной нагрузкой) обеспечивают требуемое усиление по напряжению. Третий каскад (с открытым коллекторным выходом) предназначен для работы на внешнюю нагрузку. Компаратор имеет дифференциальный вход и комплементарный токовый выход. Первый дифференциальный каскад Q1, Q2 нагружен каскадами с общей базой Q4, Q5 для уменьшения эффекта Миллера.



Р и с. 4. Схема одного канала компаратора Disc-8.3

Второй дифференциальный каскад имеет аналогичную структуру. Противоположно включенные диоды Q19, Q20 фиксируют максимальную величину напряжения между коллекторами Q9, Q10, обеспечивая увеличение быстродействия. Эмиттерные повторители Q6, Q7, Q12 и Q13 со стабилитронами D1÷D4 согласуют дифференциальные каскады по постоянному напряжению. Второй дифференциальный каскад охвачен частотнонезависимой обратной связью, осуществляемой резисторами  $R23 = R24 = 1,2 \text{ k}\Omega$ ,  $R25 = R26 = 7 \text{ k}\Omega$  и конденсаторами  $C1 = C2 = 2,1 \text{ пФ}$ , которые формируют на выходе компаратора импульсы длительностью 40 нс.

**4.2. Топология Disc-8.3.** Топология СБИС компаратора Disc-8.3 приведена на рис. 5. Размеры канала дискриминатора без контактных площадок  $320 \times 770 \text{ мкм}$ , площадь кристалла 8-канального дискриминатора с контактными площадками составляет  $1,1 \times 2,9 \text{ мм}$ . Ширина канала определяется минимальным размером контактных площадок (100 мкм) и допустимыми зазорами между ними (60 мкм).

Топология компаратора имеет следующие особенности:

- каждый канал экранирован контактом к подложке, который подключен металлической шиной к отдельной контактной площадке (SUB), изолированной от шин питания;
- шина нулевого потенциала (GND) имеет две контактные площадки, подключенные параллельно;
- стабилитроны образованы обратносмещенными эмиттерными переходами pnp-транзисторов, коллекторы которых подключены к положительной шине питания; для уменьшения влияния паразитных коллекторных емкостей в коллекторы транзисторов Q9, Q10 введены встречно включенные диоды Q19, Q20, образованные за счет дополнительной p-области, сформированной в эпитаксиальном кармане pnp-транзистора.

Следует отметить, что каналы усилителя Ampl-8.3 и компаратора Disc-8.3 имеют одинаковую ширину, что допускает их объединение в одном кристалле усилителя-дискриминатора размером  $3,3 \times 2,3 \text{ мм}$  (вместе с тестовыми элементами, метками и т. д.).

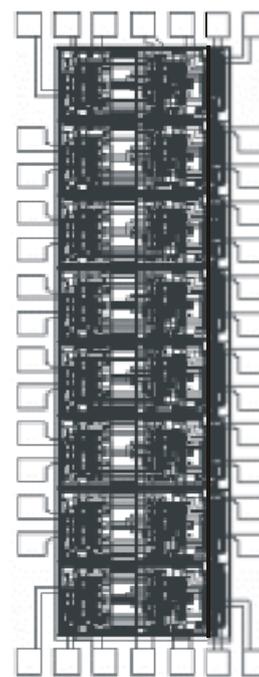


Рис. 5. Топология Disc-8.3

**4.3. Характеристики компаратора.** Измеренные параметры компаратора приведены в табл. 2. Он отличается хорошим быстродействием: при работе на согласованную нагрузку 110  $\Omega$  (скрученная пара) фронты для перепадов 1/0 и 0/1 составляют соответственно 1,8 и 2,2 нс. Каналы СБИС обладают высокой идентичностью: разность задержек срабатывания не превышает 4 нс при превышении порогового напряжения на 10 мВ, входные токи отличаются не более чем на 0,01 мкА. Выход компаратора способен работать на скрученную пару или плоский ленточный кабель длиной до 30 м.

Таблица 2

**Параметры ИМС компаратора Disc-8.3**

Параметр	Значение
Смещение по входу, мВ	$\leq 5$
Входной ток смещения, мкА	$\leq 0,1$
Входной ток, мкА	1,0
Неидентичность входных токов по каналам, мкА	0,01
Превышение над порогом, необходимое для надежного срабатывания, мВ	5
Минимальная длительность выходного сигнала, нс	40
Задержка переключения при превышении над порогом, нс: при 10 мВ при 60 мВ	36 14
Максимальная разность задержки переключения по каналам, нс: при превышении 10 мВ при превышении 60 мВ	$\leq 4$ $< 1$
Фронты выходного сигнала 01/10 при согласованной нагрузке 110 Ом, нс	2,2/1,8
Напряжение питания, В	$\pm 5$
Число каналов в корпусе	8
Потребляемая мощность, мВт/корпус	$\leq 670$
Корпус	пластмассовый 48-выводной четырехсторонний 4222.48-2 ГОСТ 17476-88

## 5. Плата усиления-дискриминации ADB

**5.1. Печатная плата.** Электроника считывания сигналов MDT располагалась на восьмислойной печатной плате ADB размером 172,6  $\times$  82,5  $\times$  1,6 мм с двухсторонним расположением элементов [15]. Для обеспечения возможности размещения ADB непосредственно на детекторе ширина платы задавалась равной ширине MDT.

На каждой плате размещалось по четыре корпуса Ampl-8.3 и Disc-8.3, образуя 32 канала съема сигналов. Последовательно со входом включены резисторы 27 Ом, составляющие часть сопротивления 270 Ом, необходимого для согласования 50-омного входного сопротивления усилителя с волновым сопротивлением MDT 320 Ом (вторая его часть – резисторы 240 Ом – располагается непосредственно внутри MDT).

Дифференциальные выходы усилителей подключаются к дифференциальным входам компараторов через разделительные конденсаторы емкостью 1 нФ. При данном номинале обеспечивается минимальный сдвиг базовой линии сигнала.

Открытые коллекторы выходов дискриминаторов нагружены на резисторы 1 кОм для возможности проверки работоспособности без подключения дополнительных нагрузок. Основной согласованной нагрузкой являются резисторы 120 Ом, включенные на противоположном конце 80-проводного плоского ленточного кабеля высокой плотности, передающего сигналы MDT на дальнейшую обработку.

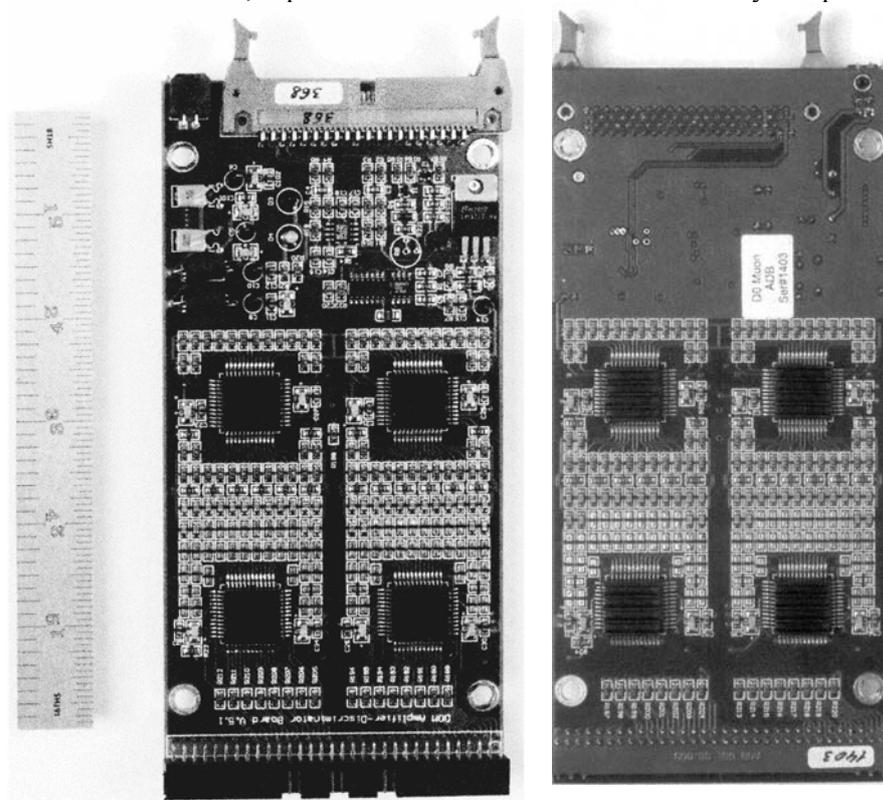
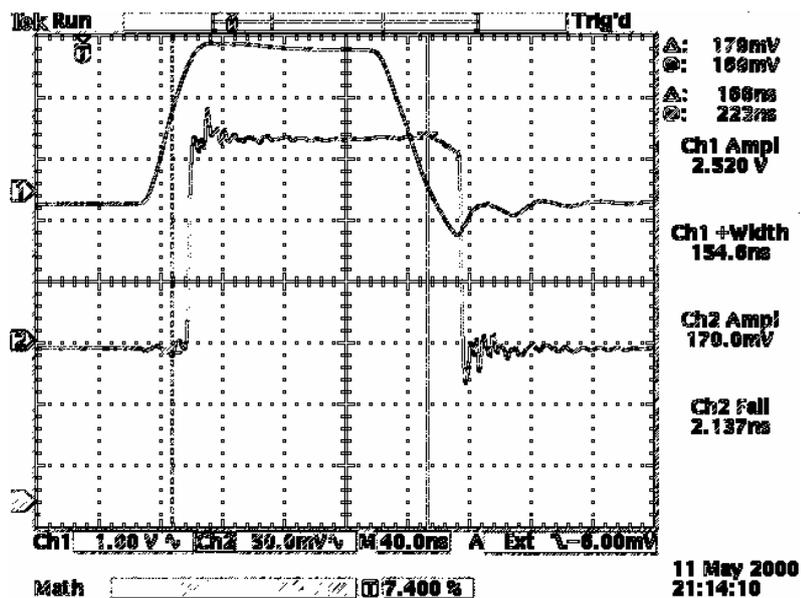


Рис. 6. Внешний вид платы ADB

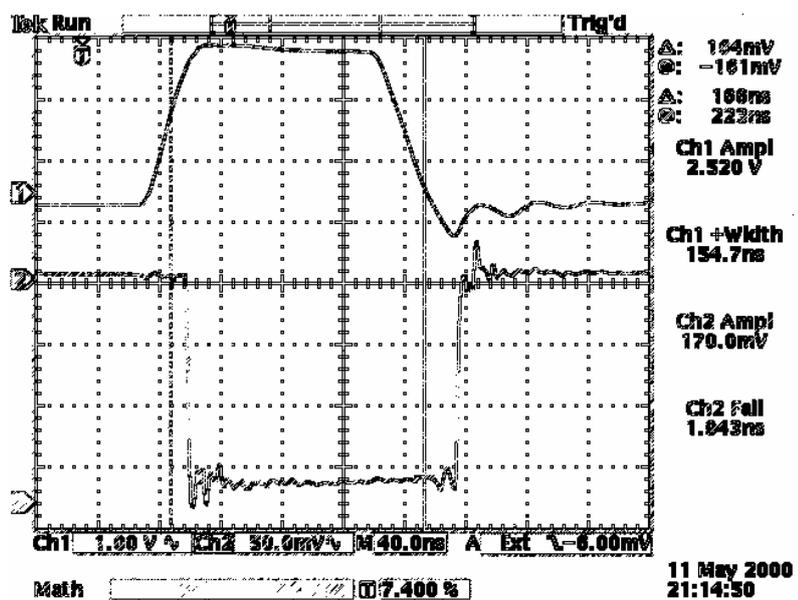
Плата имеет встроенные цепи тестирования каналов по тестовым входам  $Amppl-8.3$  и цепи контроля питания. Верхняя и нижняя стороны платы ADB показаны на рис. 6.

**5.2. Рабочие характеристики платы ADB.** Рабочие характеристики платы измерялись на стенде, прототипах и рабочих октантах (1/8 часть слоя) детектора. В табл. 3 приведены суммарные характеристики каналов, не представленные в табл. 1 и 2. На рис. 7 показан сигнал на выходах усилителя и компаратора платы ADB при подаче на вход прямоугольного импульса.

Одним из ключевых параметров системы является однородность порогов срабатывания по каналам. Для обеспечения требуемой точности восстановления треков мюонов и минимизации высокого напряжения на анодных проволочках MDT производился отбор плат с разбросом порогов срабатывания в интервале  $\pm 10\%$  по 32 каналам на одной плате и с таким же разбросом между средними значениями порогов для различных плат при среднем значении порога 1 мкА.



a



b

Рис. 7. Сигналы на выходе усилителя и положительном (а) и отрицательном (б) выходах дискриминатора одного канала платы ADB

## Характеристики платы ADB

Параметр	Значение
Количество каналов	32
Динамический диапазон входных сигналов, дБ	60
Полярность входного сигнала	Отрицат.
Входное сопротивление, Ом	$\approx 77$
Неидентичность порогов срабатывания по плате, %	$< \pm 10$
Неидентичность средних значений порогов по платам, %	$< \pm 10$
Задержка срабатывания при входном токе 2,24 мкА ( $I_{thr} = 1,12$ мкА), нс	33
Дрожание выходного сигнала, нс	0,8
Точность временной привязки в интервале $2I_{thr} \div 10I_{thr}$ при $I_{thr} = 1,12$ мкА, нс	3,6
Перекрестные помехи при пороге $I_{thr} = 0,2$ мкА, dB	-57
Защита по входу от высоковольтных импульсов обеих полярностей: конденсатор 3,5 нФ, заряженный до напряжения $\pm 3,5$ кВ, разряжается на вход ADB через резистор 240 Ом с частотой 10 Гц в течение 10 мин	Выхода из строя не наблюдается

Результирующее распределение порогов срабатывания по 1576 платам (50 432 каналам) мюонной системы эксперимента D0 показано на рис. 8. Среднее значение порога составило 1,19 мкА при среднеквадратическом отклонении 6 %.

Следует отметить, что на испытательном стенде собственные шумы электроники позволяли опускаться по порогу до 0,1 мкА, а на рабочих октантах до 0,4 мкА, тогда как рабочий диапазон порогов в мюонной системе D0 задан  $0,5 \div 2,0$  мкА. Расположение плат ADB на октанте показано на рис. 9.

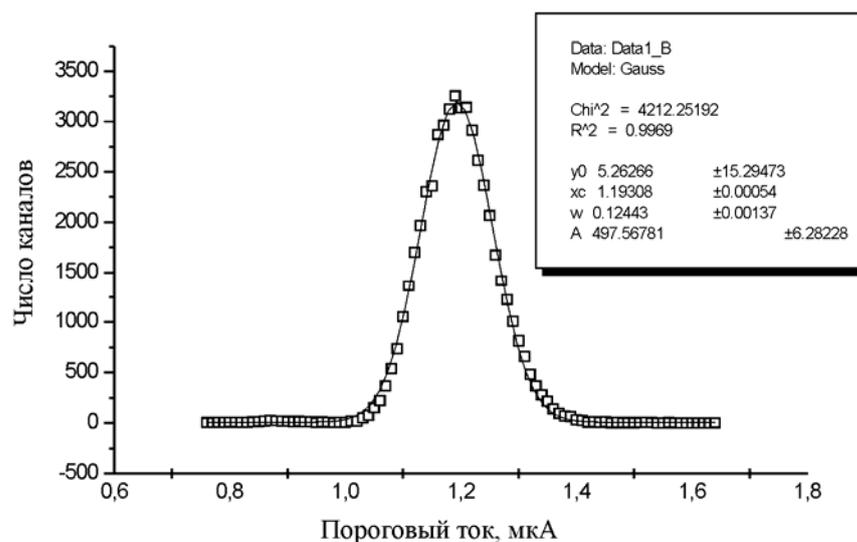


Рис. 8. Распределение порогового тока для 50 432 каналов (1576 плат ADB) передней мюонной системы D0

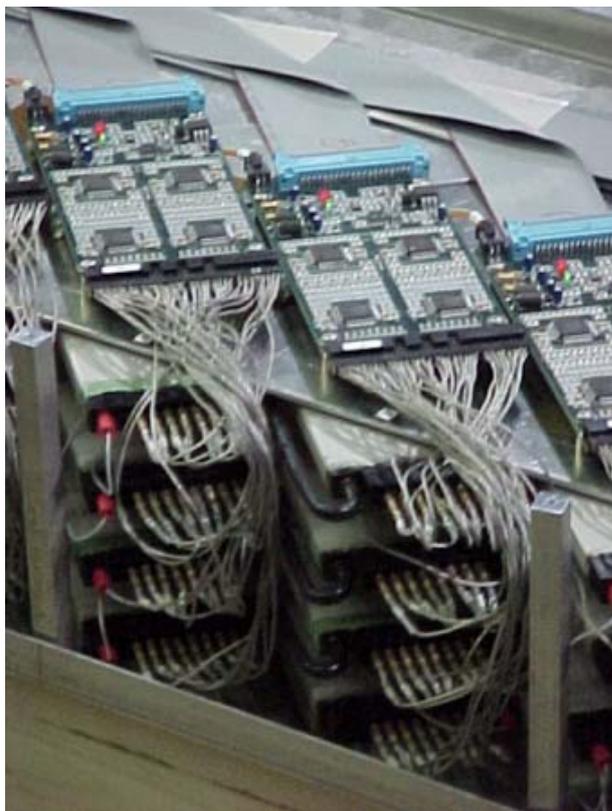


Рис. 9. Расположение плат ADB на октанте

Одним из достоинств ADB является сохранение работоспособности при больших перегрузках по входу. Даже при превышении верхней границы динамического диапазона почти в 30 раз, когда усилитель *Ampl-8.3* входит в глубокое насыщение, его выходного сигнала достаточно для переключения дискриминатора *Disc-8.3*, а уширение выходных импульсов не приводит к их наложению даже при нагрузках, на порядок превышающих допустимые в D0 [15].

Важно также, что перегрузки по входу практически не приводят к ложным срабатываниям в соседних каналах, для описания которых было введено понятие уровня перекрестных помех в сквозном канале ADB (аналоговый вход – цифровой выход), определяемого как  $-20\lg(I_{in}/I_{thr})$ , где  $I_{in}$  есть входной ток в активном канале, при котором происходит ложное срабатывание в соседнем канале,  $I_{thr}$  есть пороговое значение тока, одинаковое во всех каналах. В процессе испытаний ложные срабатывания наблюдались только при очень низком значении порога 0,2 мкА, при этом уровень так определенной перекрестной помехи составлял  $-57$  дБ [15]. Следует указать, что этот параметр надо отличать от уровня перекрестных помех в аналоговых каналах усиления, определенного в [3] как  $-20\lg(U_{out}/U_{int+})$ , где  $U_{out}$  есть дифференциальный выходной сигнал в активном канале, а  $U_{int+}$  есть величина помехового импульса положительной полярности в соседнем канале, поскольку только такой импульс может переключить

дискриминатор. Величина перекрестных помех в усилителе составляет  $-47$  дБ для сигналов с крутыми фронтами (1,7 и 1,8 нс), а для более близких к реальным (фронты 15 и 20 нс)  $-54$  дБ, что показывает эффективность принятых мер по развязке каналов как на уровне кристалла, так и печатной платы.

Высокие электрические и эксплуатационные параметры описываемой электроники, отмеченные в ходе наладки и эксплуатации в Фермилабе, создали условия для ее применения в эксперименте COMPASS (ЦЕРН, г. Женева, Швейцария) в количестве 10 тыс. каналов.

Успех данной разработки во многом зависел от хорошо налаженного сотрудничества между физиками из ОИЯИ, разработчиками из НИИ ЯП Белгос-университета и промышленностью, в частности, НИКТП «Белмикросистемы» и заводом «Интес» ПО «Интеграл», а также специалистами из ОАО «МНИПИ». На стадии разработки НИКТП «Белмикросистемы» оперативно обрабатывало на пластинах изменения в схемах, вносимые после их испытаний с прототипами детекторов в Фермилабе. Массовый выпуск микросхем сопровождался выходным контролем изделий на пластинах и в корпусах, проводившимся по методикам, разработанным в НИИ ЯП. Завод «Интес» выполнял сборку в корпус, подвергая собранные изделия электротермотренировке и термоциклированию для обеспечения их долговременной эксплуатационной надежности. НИИ ЯП осуществлял входной контроль микросхем с учетом динамических параметров. Результат этого контроля – более 96 % годных для Ampl-8.3 и 99 % для Disc-8.3 – подтвердил правильность принятых конструкционных (размещение усилителей и компараторов в отдельных кристаллах, восьмиканальное исполнение) и схемотехнических решений, а также эффективность налаженного межотраслевого сотрудничества. Полугодовой опыт эксплуатации электроники в Фермилабе продемонстрировал высокое качество электрических параметров микросхем и их высокую надежность.

Таким образом, впервые в истории отечественной микроэлектроники белорусские микросхемы были внедрены в массовом масштабе за рубежом, показав возможности белорусской науки и промышленности в области современных высоких технологий.

### Литература

1. *Khokhlov A. I. et al.* Muon System Electronics Upgrade. Technical Design Report. D0 Note #3299, Aug. 7 1997.
2. *Alexeev G. D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1999. Vol. A423. P. 157–162.
3. *Alexeev G. D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 2001. Vol. A462. P. 494–505 .
4. *Алексеев Г. Д. и др.* // III Международная научно-практическая конференция «Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество»: Докл. Мн., 2000. С. 183–188.
5. *Baturitsky M. A., Dvornikov O. V.* // Nucl. Instr. Meth. 1996. Vol. A378. P. 564–569.
6. *Baturitsky M. A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1996. Vol. A378. P. 570–576.
7. *Baturitsky M. A., Dvornikov O. V.* // Nucl. Instr. Meth. 1997. Vol. A399. P. 113–118.
8. *Baturitsky M. A., Dvornikov O. V.* // Nucl. Instr. Meth. 1997. Vol. A398. P. 308–314.
9. *Baturitsky M. A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1995. Vol. A352. P. 604–609.
10. *Abramov V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1998. Vol. A419. P. 660.

11. Григорьев В. А., Колюбин А. А., Логинов В. А. Электронные методы ядерно-физического эксперимента. М., 1988.
12. Whitaker S. The CSC System Performance. GEM TN-93-282. Jan.18–19. 1993. P. 119–161.
13. Newcomer F. M. et al. // IEEE Trans. on Nuclear Sci.1993. NS-40(4). P. 630.
14. Bevensee B. et al. // IEEE Trans. on Nuclear Sci.1996. NS-43(3). P. 1725.
15. Alexeev G. D. et al. The DØ Forward Angle Muon System front-end electronics design. // Nucl. Instr. Meth. (to be printed).

## MULTICHANNEL MONOLITHIC ELECTRONICS FOR GASEOUS WIRE DETECTORS

**G. D. Alexeev, M. A. Baturitsky, O. V. Dvornikov, V. A. Mikhailov,  
V. V. Tokmenin, A. I. Khokhlov, A. A. Shishkin**

The front-end electronics has been designed for Mini-Drift Tubes (MDTs) used for upgrading of the DØ Forward Angle Muon System (FAMUS) (Fermilab, Batavia, USA). It is based on two eight-channel ASICs of DØM family: the low-noise bipolar transresistance amplifier Ampl-8.3 and comparator Disc-8.3 designed on the basis of BJT-JFET technology. The amplifier has differential gain 130 mV/μA at 1 kΩ, input noise 35 nA r.m.s. and 60 nA r.m.s. at 0 pF and 60 pF input capacitance, respectively, leading/trailing edge 7 ns, input resistance ≈50 Ω, crosstalks –54 dB at real signals, dissipated power 160...640 mW/chip for ±3V...5V supply. The comparator ASIC output leading/trailing edges are 2.2 ns and 1.8 ns at matched 110 Ω load. Dissipated power equals 670 mW/chip. The output can drive 30 m flat ribbon cable or twisted pair line terminated by differential line driver. By four of these ASICs are located at 32-channel Amplifier/Discriminator Board. The ADB provides operation with adjustable threshold currents 0.5÷5.0 μA. Low intrinsic noise and small firing current dispersion provide ability of detector robust performance at low levels of anode high voltage (below 3.4 kV). The electronic channels save operability at large input overdrives. Above 50,000 channels have been produced and installed at the D0 and 10,000 at Muon System of COMPASS experiment (CERN, Geneva, Switzerland). Threshold distribution for 50,432 channels is presented. This electronics can be used with various gaseous wire detectors of physics experimental setups for high, middle and low energies.