

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина Сибирское отделение  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН

М.Н. Ачасов, В.В. Анашин, А.В. Боженок,  
П.Д. Воблый, В.Б. Голубев, А.А. Жуков,  
А.А. Король, С.Б. Орешкин, Е.Э. Пята,  
С.И. Середняков, Ю.А. Тихонов, Ю.В. Усов,  
Б.А. Шварц

РАЗРАБОТКА ВАКУУМНЫХ ФОТОТРИОДОВ  
ДЛЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ

ИЯФ 2005-41

НОВОСИБИРСК  
2005

## **Разработка вакуумных фототриодов для сцинтилляционных калориметров**

*М.Н. Ачасов, В.В. Анашин, А.В. Боженок, П.Д. Воблый,  
В.Б. Голубев, А.А. Жуков, А.А. Король, С.Б. Орешкин,  
Е.Э. Пята, С.И. Середняков, Ю.А. Тихонов, Ю.В. Усов,  
Б.А. Швари*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера  
630090 Новосибирск СО РАН

### **Аннотация**

Описана автоматизированная установка активировки фотокатодов вакуумных фототриодов, которая позволяет производить одновременную активировку фотокатодов для 6 приборов на одном вакуумном посту. Система автоматизации формирования фотокатодов позволяет изготавливать вакуумные приборы с различными вариантами мультищелочного, бищелочного, сурьмяно-цезиевого и некоторыми другими типами фотокатодов.

Приводится описание измерительных стендов по проверке работоспособности фототриодов в магнитном поле и измерению их характеристик: квантового выхода и коэффициента усиления.

---

# 1 Введение

Вакуумные фотоприемники, как класс приборов, регистрирующих световой сигнал, широко используются в детектирующих системах физики высоких энергий: в сцинтилляционных калориметрах, сцинтилляционных и черенковских счетчиках. Традиционное использование фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), в качестве фотоприемников, в современных многоканальных детекторах часто оказывается затруднительным по причине их больших габаритных размеров и высокой чувствительности к сильному магнитному полю ( $\sim 1$  Тл). Поэтому, во всем мире наблюдается тенденция к созданию более компактных фотоприемников, способных работать в сильных магнитных полях, например, вакуумные фотодиоды, фототриоды, фототетроды, ФЭУ с металлоканальными диодами, ФЭУ с микроканальными пластинами, газонаполненные ФЭУ.

Использование фототриодов в экспериментах по физике высоких энергий началось с появления малошумящих зарядочувствительных усилителей, поскольку характерный коэффициент усиления достаточно низок и составляет порядка 10, в отличие от ФЭУ, где коэффициент усиления –  $10^5 \div 10^7$ . По сравнению с традиционным ФЭУ, фототриод обладает следующими преимуществами: высокой стабильностью коэффициента усиления, меньшими размерами и относительно хорошей работоспособностью в сильных магнитных полях. В Институте Ядерной Физики СО РАН фототриоды нашли свое применение в таких экспериментальных установках, как сферический нейтральный детектор (СНД), криогенный магнитный детектор (КМД-2), детектор КЕДР. В детекторах использовались два типа фототриодов, диаметром 21.5 и 52 мм. Фототриоды  $\varnothing 21.5$  мм были изготовлены на автоматизированной

установке активировки фотокатодов ИЯФ [1], а фототриоды  $\varnothing 52$  мм – на Новосибирском заводе «ЭКРАН».

В настоящее время сооружается ускорительный комплекс ВЭПП-2000 на энергию до 2 ГэВ в системе центра масс и светимость  $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Изменение условий эксперимента вызвало реконструкцию некоторых систем детектора СНД [2]. Для подготовки калориметра СНД к работе на комплексе ВЭПП-2000 необходимо заменить все фототриоды третьего слоя и некоторое количество вышедших из строя фототриодов в первом и втором слоях. При этом рассматривается возможность полной замены фототриодов второго слоя калориметра  $\varnothing 21.5$  мм на приборы  $\varnothing 32$  мм, которые могут быть изготовлены в ИЯФ.

Для решения этой задачи была создана новая автоматизированная система производства фототриодов, поскольку аппаратура и программное обеспечение предшествующей автоматизированной системы значительно устарели. Кроме того, появились новые технологии изготовления фотокатодов, которые в рамках старой автоматизированной системы невозможно реализовать.

## 2 Описание калориметров ИЯФ

В экспериментах по физике высоких энергий для измерения энергии ливнеобразующих частиц (электронов,  $\gamma$ -квантов, адронов) применяются такие детекторы, как сцинтилляционные калориметры. Калориметр представляет собой блок вещества высокой плотности, в котором энергия частицы, растроченная в электромагнитных и ядерных взаимодействиях с веществом в конечном итоге трансформируется в импульс света. Калориметры используются для спектроскопии частиц от МэВ-ного диапазона до самых высоких энергий  $\sim 100$  ГэВ. В зависимости от типа регистрируемых частиц, калориметры делятся на электромагнитный (для электронов и фотонов) и адронный (для сильно взаимодействующих частиц). В качестве рабочего вещества электромагнитных калориметров могут использоваться кристаллы  $\text{NaI(Tl)}$ ,  $\text{CsI(Tl)}$ ,  $\text{BGO(Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12})$ , свинцовое стекло, жидкий аргон, криптон и ксенон.

В Институте Ядерной Физики СО РАН калориметрические методы идентификации частиц берут свое начало с калориметров на основе кристаллов NaI(Tl). На ускорительном комплексе ВЭПП-2М в период с 1995 по 2000 год проводились эксперименты с детекторами СНД и КМД-2, неотъемлемой частью которых являются электромагнитные калориметры на основе кристаллов NaI(Tl), CsI(Tl), BGO.

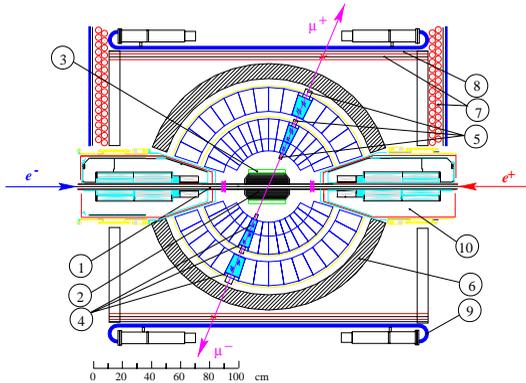


Рис. 1: Детектор СНД-2000, сечение вдоль оси пучков. 1 – вакуумная камера; 2 – трековая система; 3 – аэрогелевые черенковские счетчики; 4 – кристаллы NaI(Tl); 5 – вакуумные фототриоды; 6 – поглотитель; 7 – стримерные трубки; 8 – железный фильтр; 9 – сцинтилляционные счетчики; 10 – фокусирующие соленоиды ВЭПП-2000.

Электромагнитный калориметр СНД [3] состоит из трех слоев сцинтилляционных счетчиков на основе кристаллов NaI(Tl) и имеет сферическую форму, что обеспечивает равномерную чувствительность по телесному углу (рис.1). Счетчики первых двух слоев – толщиной  $2.9X_0$  и  $4.8X_0$ , где  $X_0 = 2.6$  см – радиационная длина NaI(Tl), находятся в общем контейнере из алюминиевой фольги толщиной 0.1 мм (рис.2). Контейнеры укреплены на несущей алюминиевой сфере толщиной 5 мм. За ней находится третий слой счетчиков ( $5.7X_0$ ). Полная толщина калориметра для частиц, летящих из центра детектора, составляет 34.7 см ( $13.4X_0$ ), полный телес-

ный угол – 90% от  $4\pi$ . Для улучшения светосбора и светоизоляции каждый из кристаллов обернут в алюминизированный лавсан. Зазор между кристаллами одного счетчика составляет 0.5 мм. Число кристаллов в слое  $520 \div 560$ , общее количество счетчиков калориметра – 1632, полная масса калориметра – 3.5 т. Коэффициент светосбора в кристаллах составляет  $7 \div 15\%$ . В качестве фотоприемников используются компактные вакуумные фототриоды  $\varnothing 21.5$  мм на первом и втором слое и  $\varnothing 52$  мм на третьем. Фототриоды второго слоя калориметра  $\varnothing 21.5$  мм предполагается заменить на приборы  $\varnothing 32$  мм. Такая замена позволит заметно улучшить соотношение сигнал/шум в калориметре за счет увеличения коэффициента светосбора.

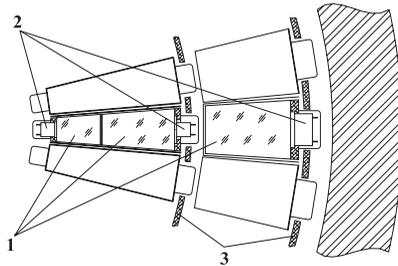


Рис. 2: Расположение кристаллов NaI(Tl) в калориметре: 1 – кристаллы NaI(Tl); 2 – вакуумные фототриоды; 3 – алюминиевые полусферы.

Электромагнитный калориметр детектора {КМД-2} конструктивно включает в себя два калориметра – цилиндрический и торцевой [4, 5]. Цилиндрический калориметр состоит из кристаллов CsI(Tl) и CsI(Na) размером  $6 \times 6 \times 15$  см<sup>3</sup>. Толщина калориметра для нормально падающей частицы составляет около  $8X_0$ . Калориметр расположен за сверхпроводящей обмоткой толщиной  $0.4X_0$ , обеспечивающей магнитное поле в области дрейфовой камеры около 15 кГс. Свет с каждого кристалла регистрируется фотоумножителем ФЭУ-60 с рабочим диаметром фотокатода 14 мм и высотой 70 мм. Полное число сцинтиляционных счетчиков – 892, их

общая масса около 2 тонн. Торцевой калориметр состоит из двух одинаковых торцов и покрывает полярные углы от  $16^\circ$  до  $49^\circ$  и от  $131^\circ$  до  $164^\circ$ . Полный телесный угол, покрываемый торцевым калориметром, составляет  $0.3 \times 4\pi$ . Калориметр расположен внутри основного соленоида и работает в продольном магнитном поле 1 Тл. Калориметр состоит из 680 сцинтилляционных счетчиков на основе кристаллов ортогерманата висмута (BGO) общим весом 450 кг. Кристаллы имеют форму прямоугольного параллелепипеда размером  $25 \times 25 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Длина кристаллов соответствует  $13.5X_0$ . Выбранный поперечный размер кристаллов близок к мольеровскому радиусу и для BGO составляет 24 мм. Все грани кристаллов полированы и светосбор осуществляется на основе полного внутреннего отражения. В качестве фотоприемников используются вакуумные фототриоды  $\varnothing 21.5$  мм.

Фототриоды диаметром 21.5 мм, используемые в калориметрах СНД и торцевом калориметре КМД-2, были разработаны и произведены в Институте ядерной физики СО РАН [7].

### 3 Основные требования к параметрам фототриодов

Достаточно компактная конструкция калориметра СНД накладывает ограничение на габаритные размеры фототриодов. Фототриоды размещаются в ограниченном пространстве между сферическими слоями кристаллов, поэтому длина колбы прибора должна быть не более  $40 \div 45$  мм. Расположение фототриодов по слоям калориметра показано на рис.2.

Физические параметры фототриодов, при использовании их в калориметре СНД, должны удовлетворять следующим условиям:

- квантовый выход фотокатода  $\geq 10\%$  ( $\lambda = 415$  нм);
- коэффициент усиления фототриода  $\sim 10$ ;
- энергетическое разрешение, измеряемое по фотопику для  $\gamma$ -квантов от радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\leq 15\%$ .

## 4 Технология изготовления фототриодов

Вакуумные фототриоды являются фотоэлектронными умножителями с одним динодом. Конструкция фототриодов, разработанных и изготавливаемых в ИЯФ показана на рис.3. Фототриод состоит из следующих основных частей: входного окна, цилиндрического

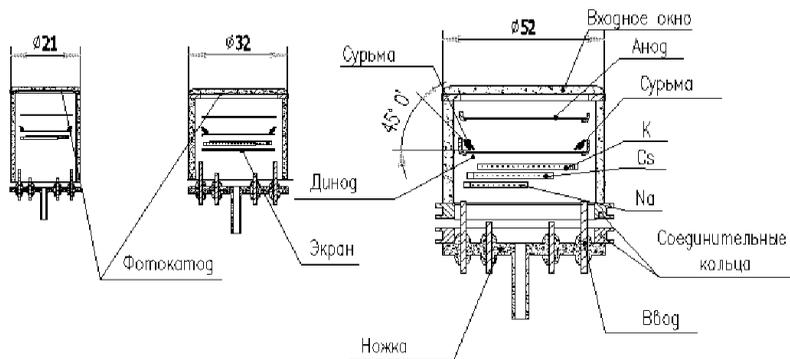


Рис. 3: Конструкция фототриодов диаметром 21,5, 32 и 52 мм.

таж электродов и технологических элементов. Динод выполнен из ленты БРАМг1-5 толщиной 0.1 мм в форме диска. Анод изготавливается из металлической сетки диаметром ячейки  $0.1 \div 1$  мм и закрепляется с помощью колец. К технологическим элементам относятся источники щелочных металлов, испарители сурьмы и тепловой экран. Электроды и технологические элементы привариваются на многоэлектродную ножку при помощи точечной сварки. При сборке, соединение стеклянных частей прибора производится при помощи водородной сварки либо индукционной сваркой через кольца из ковара. Первый вариант соединения более надежен и применяется при изготовлении большинства традиционных ФЭУ. Второй вариант предъявляет высокие требования к механической и технологической обработке коваровых колец. В силу технических возможностей Института Ядерной Физики СО РАН, выбор был сделан в пользу второго варианта. В этом случае, контакт с фото-

катодом, наносимый на входное окно прибора, можно выполнить через коваровое кольцо. Такой способ контакта с фотокатодом дает возможность увеличить отношение диаметра фотокатода к диаметру прибора, а также увеличить поверхностное межэлектродное расстояние фотокатод-анод. Коэффициенты температурного расширения (КТР) соединяемых между собой элементов (входного окна, коварового кольца, стеклянной оболочки, многоэлектродной ножки со штенгелем) должны быть близки с точностью не ниже  $10^{-6}$ . Такое требование необходимо для избежания механических повреждений при прогреве прибора (до  $600^{\circ}\text{C}$ ) во время сборки и в процессе обезгаживания прибора на вакуумном посту (до  $400^{\circ}\text{C}$ ). Для изготовления стеклянных деталей приборов использовались стекла марки С-52, С-50, С-49. Соответственно стеклянные гребенки на вакуумных постах были изготовлены из стекла марки С49-1. Для фототриодов  $\varnothing 21.5$  мм и 52 мм использовались стандартные плоские стекла марки С52-2, изготовленные на отраслевом предприятии, для фототриодов  $\varnothing 25$  мм и 32 мм входные окна изготавливались на участках керамики и оптики ИЯФ. Ножки со штенгелем  $\varnothing 18$  мм, 30 мм и 48 мм изготавливались из стекла марки С59-1 на Новосибирском заводе «Экран», на стандартных штампах. Для изготовления ножки  $\varnothing 24$  мм в Институте Ядерной Физики был изготовлен специальный штамп для завода «Экран». Входное окно фототриодов соединяется со стеклянным цилиндром методом индукционной сварки через коваровое кольцо, а для фототриодов  $\varnothing 52$  мм дополнительно к стеклянному цилиндру припаивается еще соединительное кольцо. Готовые колбы отжигаются в муфельной печи при температуре  $520^{\circ}\text{C}$  для снятия остаточного механического напряжения в стекле, возникшего при сварке. Соединение колбы с многоэлектродной ножкой, на которой предварительно был осуществлен монтаж всех необходимых электродов и технологических элементов, для фототриодов  $\varnothing 21.5$  мм и 32 мм производится при помощи индукционной сварки через коваровое кольцо, а фототриода  $\varnothing 52$  мм – при помощи лазерной сварки. При этом, к многоэлектродной ножке фототриода  $\varnothing 52$  мм предварительно приваривается соединительное коваровое кольцо с тепловой развязкой. Ме-

сто индукционной сварки отжигается в ковшах, наполненных асбестом. Чтобы обеспечить перпендикулярность между осью прибора и плоскостью входного окна, было изготовлено приспособление для заварки колбы и многоэлектродной ножки с фиксацией соединяемых частей прибора и продувкой прибора аргоном. Продувка аргоном уменьшает тепловую нагрузку на испарители сурьмы и источники щелочных металлов, не допуская их преждевременного испарения, а для бихроматов исключает контакт с воздухом. Отжиг отдельных деталей после индукционной сварки также производится в атмосфере аргона.

Для формирования фотокатода типа  $A^I B^V$  внутри прибора монтируются источники щелочных металлов на основе бихроматов и испарителя сурьмы. Бихроматы щелочных металлов помещены в нихромовые запаянные в вакууме трубки. Трубки имеют отверстия, запаянные припоем, который испаряется при предварительном обезгаживании источников металлов при температуре около  $500^\circ\text{C}$ . При формировании фотокатода слой сурьмы обрабатывается парами щелочных металлов при определенном давлении. Давление паров щелочных металлов внутри прибора можно регулировать путем нагрева соответствующей трубки, пропуская через нее электрический ток. В отличие от метода формирования фотокатода с помощью химически чистых щелочных металлов, использование данного типа источника щелочных металлов позволяет достаточно легко автоматизировать процесс напыления на фотокатод щелочного металла, допуская при этом многократное использование источника. В качестве испарителей сурьмы применяются никелевые лодочки или шарики сурьмы, закрепленные на вольфрамовой проволочке. В обоих случаях, испарение сурьмы происходит при пропускании электрического тока через испаритель. В данной работе использовалась никелевая лодочка, в которой закреплялся штабик сурьмы. Количество испарителей сурьмы зависит от диаметра формируемого фотокатода и расстояния от испарителя до плоскости фотокатода. Для фототриодов  $\varnothing 21.5$  мм, 25 мм и 32 мм используются два источника сурьмы, а для приборов  $\varnothing 52$  мм – четыре.

Формирование фотокатодов производится на автоматизированном вакуумном посту «КРИОП». Пост имеет две независимые печи с системами высокого вакуума и общую форвакуумную систему. Приборы (до 6 штук) напаяются на гребенки таким образом, чтобы разброс температуры на входных окнах фототриодов не превышал  $1^{\circ}\text{C}$ , и световой поток от двух кварцевых ламп накаливания был равномерным для всех обрабатываемых приборов. Пост обеспечивает прогрев приборов до  $400^{\circ}\text{C}$  при давлении внутри приборов  $\sim 10^{-5}$  Па. Фотокатод формируется путем обработки слоя сурьмы щелочными металлами (K, Na, Cs) при температурах  $160 \div 230^{\circ}\text{C}$ . Значение температуры зависит от типа щелочного металла и кратности использования испарителя. Система автоматизации формирования фотокатодов позволяет изготавливать вакуумные приборы с различными вариантами мультищелочного, бищелочного, сурьмяно-цезиевого и некоторыми другими типами фотокатодов, а также дает возможность многократно обрабатывать фотокатод одним и тем же металлом. После того, как фотокатоды сформированы, приборы выдерживаются около 30 минут при температуре около  $120^{\circ}\text{C}$ . В течении этого времени откачиваются излишки щелочных металлов.

Перед испытаниями на измерительных стендах, с изготовленными фототриодами проводятся следующие технологические операции. После отпаивания с вакуумного поста, у прибора срезаются технологические вводы. Оставшиеся электроды химически очищаются от окалины и гальванически покрываются никелем. Затем многоэлектродная ножка промывается последовательно в горячей дистиллированной воде ( $80^{\circ}\text{C}$ ), ацетоне и спирте. После очистки поверхность ножки заливается кремнийорганическим лаком КО-815 для уменьшения токов утечки по поверхности ножки.

## 5 Автоматизация процесса изготовления фототриодов

Одним из основных этапов при изготовлении вакуумных фотоприемников является процесс формирования или активировки фотокатодов. При изготовлении большой партии фотоприемников требуется соответствующее количество вакуумных постов и операторов, поскольку процесс активировки фотокатодов производится, как правило, для каждого фотоприемника на отдельном вакуумном посту и занимает 5 часов и более. Поэтому для решения этой задачи, в 80-х годах, в Институте ядерной физики СО РАН была создана автоматизированная установка для изготовления до четырех фототриодов на одном вакуумном посту [1]. За основу для создания автоматизированной технологии была взята технология формирования многощелочного фотокатода, разработанная в ИЯФ. Автоматизация процесса производства фототриодов позволила повысить производительность труда более чем на порядок. Так, в течение трех лет работы, было произведено около 2000 приборов  $\varnothing 21.5$  мм с характерными параметрами: квантовый выход 15% (410 нм) и коэффициент усиления 10 [7]. Одним из важных достоинств автоматизированной активировки является лучшая повторяемость характеристик производимых фототриодов. Кроме того, наличие более полной информации о процессе (протоколы, графики, файлы с данными активировки), а также возможность оперативно изменять ход технологического процесса, позволяют эффективнее оптимизировать технологию изготовления приборов, в отличие от ручного режима работы.

### 5.1 Описание автоматизированной установки

Аппаратурная реализация автоматизированной системы основывается на стандартных для ИЯФ блоках электроники в стандарте КАМАК и двух специализированных блоков в стандарте «ВИШ-НЯ» – блок управления режимами (БУР) и блок питания фототриодов (БПФТ). На рис.4 показана структурная схема одновременной активировки фотокатодов для трех приборов.

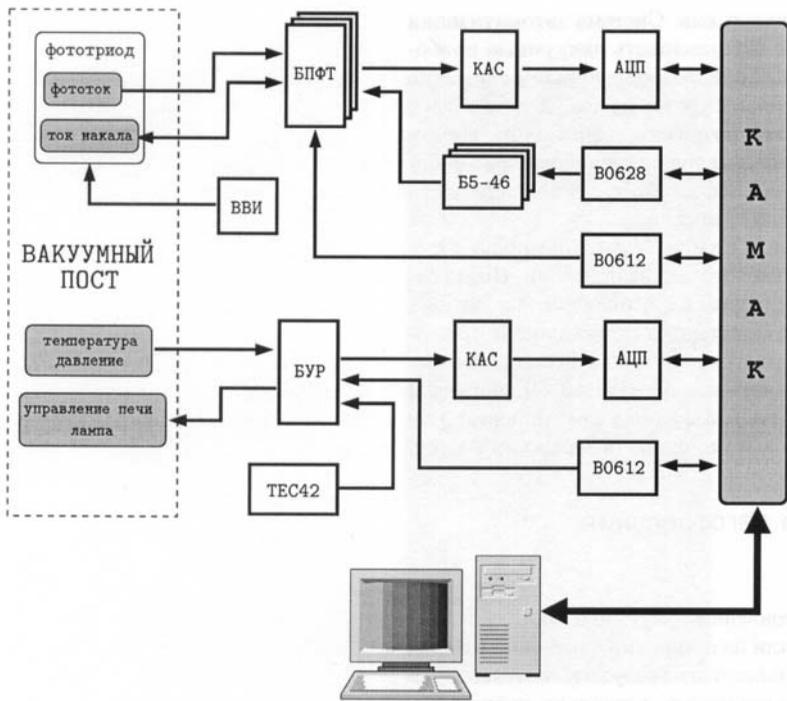


Рис. 4: Структурная схема автоматизированной установки.

Блок БУР предназначен для контроля температуры и вакуума, управления ламповой подсветкой, управления режимом работы печи: нагрев, подъем и опускание печи. Управляющий релейный регистр В0612 через БУР производит коммутацию соответствующего режима работы печи и лампы, которая запитывается от источника постоянного тока ТЕС42. Коммутатор КАС-16Г обеспечивает попеременное подключение аналоговых сигналов (температура, давление) к аналого-цифровому преобразователю (АЦП-Ц0609). Блок Ц0609 представляет собой АЦП интегрирующего типа, имеет 2 диапазона измерения ( $\pm 0.5$  В и  $\pm 8$  В) и 7 времен интегрирования входного сигнала ( $5 \div 320$  мс). Температура измеряется дифференциальной термопарой хромель-копель. В системе исполь-

зуются две независимые термопары, первая термопара контролируется программой, вторая – цифровым измерителем-регулятором типа 2ТРМ1. Измеритель-регулятор, в случае аварийного завершения работы программы, поддерживает температуру в печи ниже критической для процесса активировки. Для повышения однородности температуры и уменьшения тепловой инерции печи, внутри прогреваемого объема печи установлен вентилятор. Используя информацию с термопары, а также учитывая предысторию изменения температуры, программа поддерживает заданную температуру в пределах  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  (рис.5). Блок БПФТ (один блок на каждый прибор) служит для соединения источника питания постоянного тока Б5-46 с соответствующим источником щелочных металлов или сурьмы, измерения их тока накала и фототока. Управляющий регистр

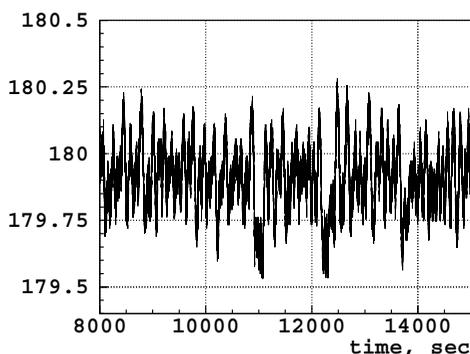


Рис. 5: Зависимость температуры от времени, в режиме стабилизации.

В0628 обеспечивает управление величиной выходного тока прибора Б5-46, а регистр В0612 управляет подключением Б5-46 к соответствующему источнику напыляемого металла в фототриоде. Для каждого прибора коммутация аналоговых сигналов (ток накала, фототок) осуществляется через коммутатор КАС-128 (или любой из серии КАСов: КАС-16Г, КАС-32Г, КАС-128Г) с последующей оцифровкой интегрирующим вольтметром Ц0609. Для измерения фототока фототриод включается в режиме работы фотоэлемента,

на анод подается положительный потенциал ( $10 \div 30$  В) относительно «земли» источника питания Б5-48 (ВВИ), диод и все остальные конструктивные части прибора находятся под потенциалом «земли», а съём токового сигнала производится с фотокатода, который далее поступает на малощумящий усилитель, преобразующий ток в напряжение (рис.6). Усилитель выполнен на основе операционного усилителя типа К140УД18 с отрицательной переключаемой обратной связью ( $R_{oc} = 500$  кОм или  $50$  кОм). Наличие двух резисторов обратной связи, с номиналами отличными на порядок, объясняется следующим обстоятельством. Основным параметром,

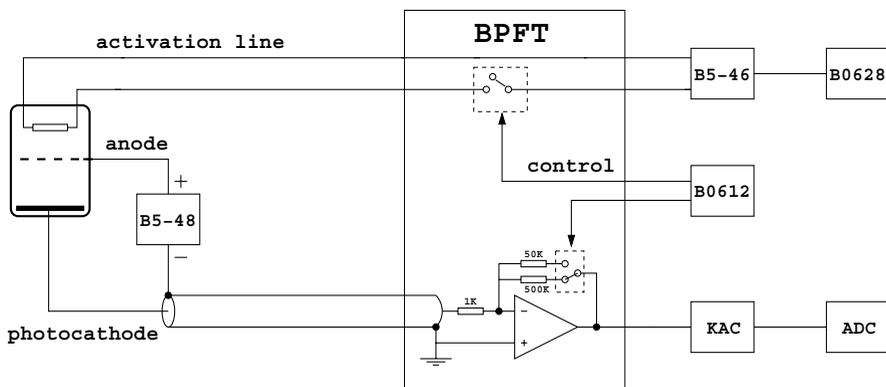


Рис. 6: Схема измерения фототока.

по которому контролируется процесс активировки, является скорость изменения фототока. Данный параметр определяется по наклону кривой фототока, измеренного в предшествующие моменты времени в заданном временном интервале, например, в течение трех секунд. Точность измерения наклона кривой фототока зависит от чувствительности измерительного тракта УСИЛИТЕЛЬ – АЦП. Следует отметить, что чувствительность АЦП (Ц0609) определяется дискретностью его преобразования, которая зависит от выбранного времени интегрирования и диапазона измерения. При заданном диапазоне, с ростом времени интегрирования дискретность увеличивается, при этом на диапазоне  $0.5$  В дискретность в  $16$  раз меньше, чем на диапазоне  $8$  В. В данном случае, вы-

бранная дискретность преобразования Ц0609 составляет приблизительно 15.6 мкВ. Тогда чувствительность по току измерительной линии УСИЛИТЕЛЬ – АЦП для 50 кОм составит  $\simeq 0.3$  нА и для 500 кОм – 0.03 нА, а точность измерения наклона, за время  $t$  секунд, соответственно не будет превышать  $0.3/\sqrt{12 \cdot t \cdot \tau} \simeq 0.1$  нА/сек и  $0.03/\sqrt{12 \cdot t \cdot \tau} \simeq 0.01$  нА/сек, где  $\tau$  – время одного измерения ( $\tau \simeq 0.2$  сек,  $t = 5$  сек). Требование к программе измерять скорость фототока на некоторых этапах активировки с точностью на уровне 0.01 нА/сек потребовало схему усилителя с двумя переключаемыми резисторами обратной связи.

Связь между компьютером и крейтом КАМАК организована последовательно через драйвер ППИ-6 и контроллер К0607. В полном объеме, для одновременной активировки шести приборов, автоматизированная установка занимает два крейта КАМАК и два крейта «ВИШНЯ».

## 5.2 Программное обеспечение

Основная сложность при одновременной активировки нескольких фототриодов заключается в том, что активировка для каждого прибора проходит с различной скоростью. Учитывая данный факт, а также особенности технологии формирования фотокатода, программа должна удовлетворять следующим требованиям:

- программа должна по заданной технологии проводить активировку одновременно нескольких фототриодов (в данном случае, до 6 штук) таким образом, чтобы обеспечить формирование фотокатодов каждого прибора в оптимальном режиме;
- каждый следующий этап активировки осуществляется при условии, что все приборы прошли предыдущий;
- система должна работать автономно, т.е. без вмешательства оператора, но при этом необходимо предусмотреть возможность повторить неудачные этапы активировки или пропустить ставшие ненужными шаги;

- предусмотреть операторный режим работы программы, который необходим при разработке новых технологий;
- сохранять все данные о процессе активировки на жестком диске для последующей их обработки и анализа;
- обеспечить мониторинг и контроль внештатных ситуаций в процессе активировки;
- в аварийных ситуациях (аварийное завершение работы программы), информация о статусе процесса должна сохраняться, чтобы после перезапуска программа продолжила активировку с прерванной стадии.

Программа, контролирующая процесс формирования (активировки) фотокатода, написана на языке Си под операционной системой LINUX. Интерфейс пользователя программы организован на базе системного пакета ncurses и пакета программ CERNLIB. В основе построения программы лежат методы системного программирования, программа разбивается на ряд параллельно исполняемых потоков. Взаимодействие и синхронизация открытых потоков осуществляется с помощью программных семафоров. Для развязки процедуры активировки и вывода данных открываются два независимо работающих во времени программных потока — графический и числовой. Реализация такой структуры обеспечивается с помощью двух кольцевых буферов данных (bufe#1 и bufe#2) и одного накопительного (bufe#0). В упрощенном варианте программа активировки, в виде блок-схемы, показана на рис.7.

На первом этапе, при запуске программы, с диска считывается файл конфигурации КАМАК-модулей, в случае его отсутствия, файл создается с параметрами предварительно установленными оператором. Поэтому, при первом запуске программы требуется инициализировать камак-модули. В программе реализовано два режима работы – автоматический и операторный. В автоматическом режиме программа работает по заданному технологией алгоритму, руководствуясь технологической картой процесса. Технологическая карта процесса, в виде двоичного файла, представляет собой набор структурированных данных, необходимых для управ-

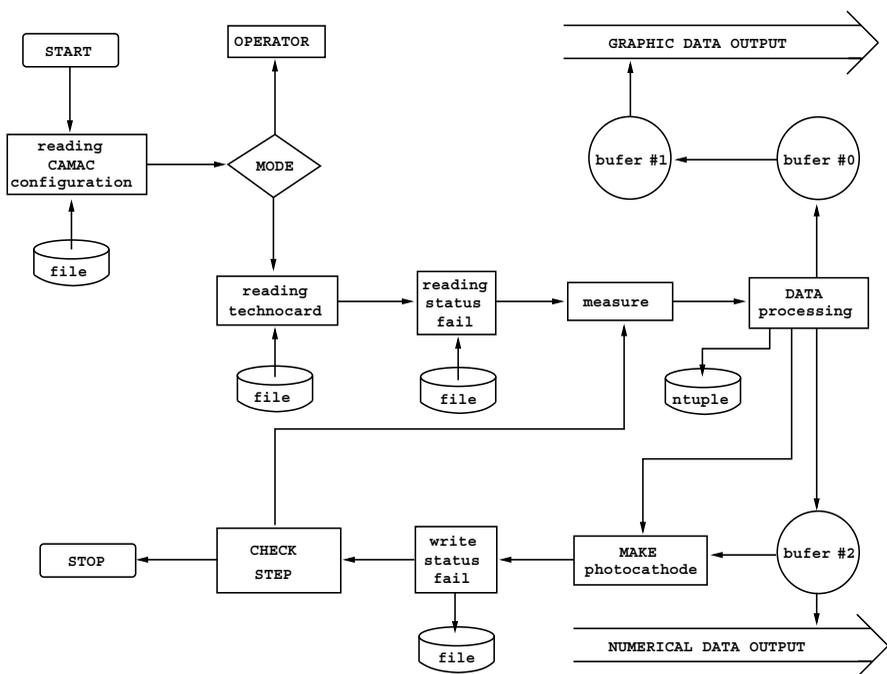


Рис. 7: Структурная схема программы активировки фотокатодов.

ления процессом активировки фотокатода. Карта включает в себя информацию об очередности обработки фотокатода щелочными металлами или сурьмой, температурных режимах обработки, информацию о темпах роста фототока, тока накала на том или ином этапе активировки и т.д., всего около 200 параметров. Заполнение и проверка карты перед началом работы производится оператором. При этом, поскольку любое обновление карты сохраняется на диске, оператор может выбрать любую ранее определенную карту.

В операторном режиме алгоритм проведения активировки произволен и зависит всецело от оператора. По существу, данный режим работы ни чем не отличается от обычного ручного, преимущество лишь только в том, что все управление производится через компьютер и все данные активировки сохраняются на диске в ntuple-файле. Операторный режим можно использовать в таких за-

дачах, как оперативная отладка некоторых этапов работы программы в автоматическом режиме, настройка технологической карты – выбор соответствующих величин параметров, оптимизация технологического цикла активировки, разработка новых технологий формирования фотокатода, проверка работоспособности измерительного тракта установки и оценка качества изготовленного фототриода.

Вывод всей необходимой информации для визуального контроля за ходом активировки осуществляется как в графическом, так и в числовом виде (текущие значения параметров). В графическом режиме на монитор компьютера выводятся графики зависимости параметров процесса от времени (фототок, ток накала текущего напыляемого металла), для каждого прибора в отдельном графическом окне. В дополнительном графическом окне выводятся графики температуры и давления от времени. Графическое окно создается с помощью программных процедур CERNLIB и обновляется с соответствующим сдвигом, определяемым шириной окна по осям x-время и y-параметр, если выводимый параметр выходит за допустимые пределы графического окна. Другими словами, графическое окно динамически отслеживает изменение величины параметра от времени и соответствующим образом передвигается в двухмерном пространстве параметр–время. Основные параметры активировки, такие как фототок, скорость изменения фототока, ток накала для каждого прибора, температура и давление, тип текущего напыляемого металла и ряд дополнительных параметров, требуемых для более полного анализа хода активировки в режиме off-line, записываются в файл специального формата – ntuple.

Далее этот файл можно анализировать в графической среде обработки экспериментальных данных PAW. Программа также позволяет следить за ходом активировки не только в текущий момент времени, но и просмотреть предысторию процесса в любой заданный момент времени в прошлом, в выбранном временном интервале. Текущее состояние всего процесса фиксируется на диске, записывается в файл-протокол и обновляется примерно раз в пять секунд (изменяемый параметр). При аварийном завершении работы

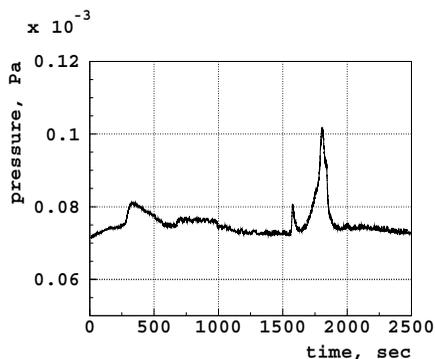


Рис. 8: Зависимость давления от времени, в вакуумной системе.

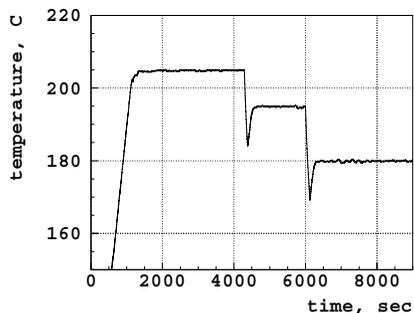


Рис. 9: Зависимость температуры от времени.

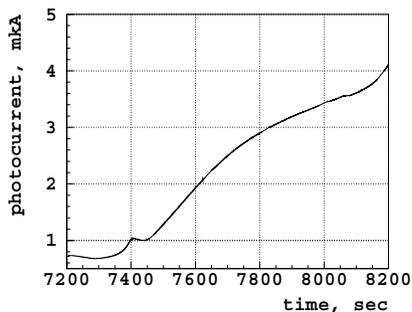


Рис. 10: Зависимость фототока от времени, на стадии напыления цезия.

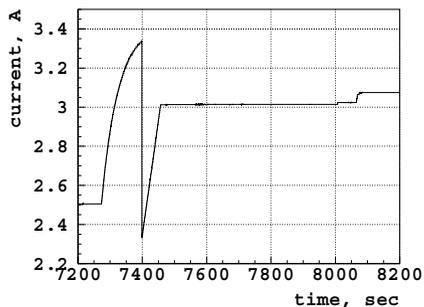


Рис. 11: Зависимость тока накала источника цезия от времени.

программы, после перезапуска, программа просматривает текущий файл-протокол и начинает активировку с указанного там последнего шага. В программе предусмотрен контроль нештатных ситуаций. Например, давление в вакуумной системе превышает норму, в этом случае программа сигнализирует звуковым сопровождением – запуск «СИРЕНЫ» (непрерывно чередующиеся гудки с частотой 1 Гц) и выдает соответствующее предупреждение на монитор.

Для иллюстрации работы программы, на рисунках 8, 9, 10, 11

приведены зависимости от времени параметров: фототок, ток накала, температура и давление, измеренные на разных этапах активировки фотокатода.

## 6 Измерение параметров фототриодов

### 6.1 Измерение квантового выхода и коэффициента усиления

Качество изготовленного фототриода определяется по измерению основных его характеристик – коэффициента усиления и квантового выхода. Методика измерений заключается в следующем. На выходе фототриода (анодной сетке), при импульсной засветке фотокатода, возникает импульс тока, соответствующий заряд которого выражается формулой:

$$Q = N_{\gamma} \cdot \eta \cdot G \cdot e,$$

где  $N_{\gamma}$  – число фотонов попадающих на фотокатод,  $\eta$  – квантовый выход,  $G$  – коэффициент усиления и  $e$  – заряд электрона. Используя вышеприведенную формулу, можно экспериментально определить квантовый выход и коэффициент усиления. В данном случае, процедура определения этих параметров сводится к следующей схеме. Тестируемый фототриод используется в качестве фотоприемника в сцинтилляционном детекторе на основе монокристалла NaI(Tl). Сцинтилляционный детектор, цилиндрической формы, представляет собой стандартный спектрометрический детектор промышленного исполнения типа СДН30, СДН31, с размерами  $10 \times 10$ ,  $25 \times 30$ ,  $40 \times 50$  мм, в зависимости от размеров проверяемого фототриода. Вначале фототриод засвечивается импульсами света от сцинтиллятора NaI(Tl), облучаемого радиоактивным источником  $^{137}\text{Cs}$ . На первом этапе измеряется произведение квантового выхода на коэффициент усиления. При этом число фотонов, попадающих на фотокатод, определяется по фотопику (0.662 МэВ) в измеренном спектре поглощения сцинтиллятора с учетом световых выходов в кристалле NaI(Tl)  $\gamma = 4 \cdot 10^4$  фотонов/МэВ и величины светосбора  $\varepsilon \simeq 90\%$ , Величина светосбора  $\varepsilon$  для сцинтиллятора

с диффузным отражением (окись магния – MgO) оценивалась по формуле [6]:

$$\varepsilon = \frac{w \cdot \xi}{1 - w \cdot K_{ref} \cdot (1 - \xi)},$$

где  $\xi$  – отношение площади фотокатода к площади полной поверхности сцинтиллятора,  $w = \exp(-\mu \cdot L)$  – вероятность прохождения сцинтилляционным светом расстояния  $L$  между источником и приемником,  $\mu$  – коэффициент поглощения света в кристалле,  $K_{ref}$  – коэффициент отражения (для отражателя MgO  $\simeq 95\%$ ). На втором этапе, с засветкой от светодиода с длиной волны 430 нм, измеряется коэффициент усиления фототриода и далее, по полученным данным, вычисляется квантовый выход. Аппаратурная реализация данной схемы измерений выполнена в стандарте КАМАК, общий вид которой и структурная схема представлены соответственно на рис.12, 13.

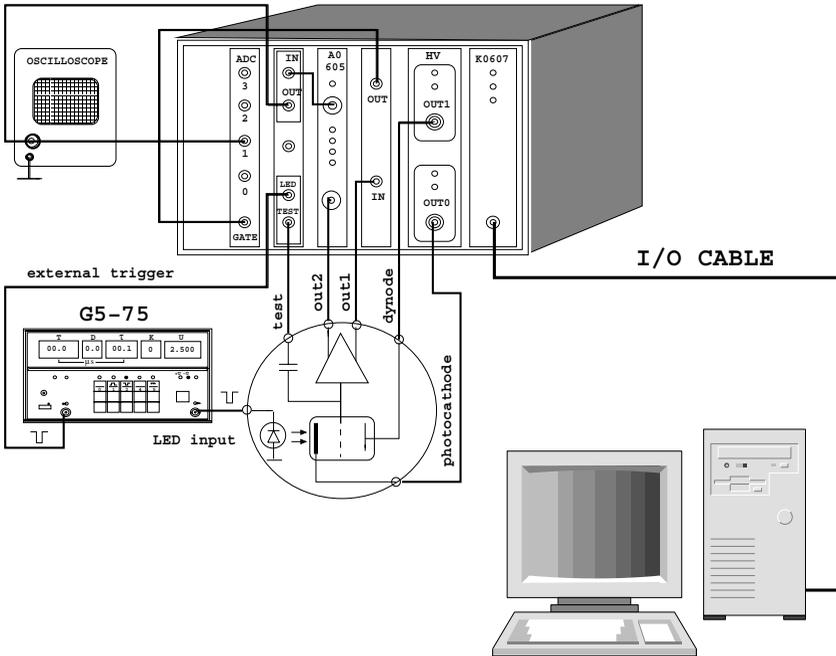


Рис. 12: Измерительный стенд.

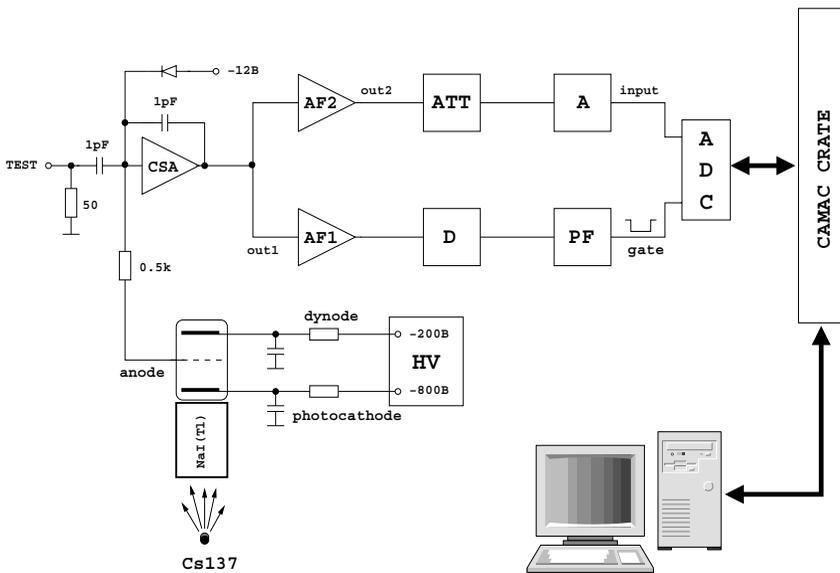


Рис. 13: Структурная схема измерений параметров фототриода. AF1, AF2 - усилитель-формирователь, А - линейный усилитель, D - дискриминатор, АТТ - аттенюатор, HV - высоковольтный источник.

Выходной сигнал зарядо-чувствительного усилителя (CSA) через усилитель-формирователь (AF2) поступает на вход аттенюатора (АТТ), затем усиливается линейным усилителем (А) в 10 раз и оцифровывается аналогово-цифровым преобразователем (ADC). Сигнал управления для АЦП формируется в отдельном камак-блоке, который включает в себя усилитель-формирователь (AF1), дискриминатор (D) и формирователь импульсов (PF).

Программа управления измерительным стендом написана на языке Си под операционной системой LINUX. Пользовательский интерфейс программы построен с использованием системного пакета ncurses и графического пакета программ CERNLIB (PAW). Программа позволяет проводить измерения в четырех независимых режимах:

- измерение произведения квантового выхода на коэффициент усиления;
- измерение коэффициента усиления;
- измерение квантового выхода;
- режим анализатора спектра.

Перед началом измерений производится настройка программы — инициализация камак-модулей, выбор режима измерений и установка параметров: числа регистрируемых событий, напряжения на фотокатоде и на диноде, коэффициента ослабления аттенюатора, амплитуды калибровочного сигнала, калибровочной емкости, энергии пика полного поглощения и коэффициента светосбора. Все установки автоматически сохраняются в файле на диске, поэтому данная процедура выполняется только в случае каких-либо изменений либо в условиях измерений, либо в самой аппаратуре. На первом шаге измерений проводится генераторная калибровка, которая состоит из двух частей — измерение пьедестала АЦП и вычисления калибровочного коэффициента. На калибровочный вход ЗЧУ подается сигнал известной амплитуды  $U_{gen}$  (рис.13) от генератора с частотой порядка 1 кГц и набирается амплитудный спектр. По амплитудному спектру определяется средний номер канала АЦП —  $A_{cal}$ , соответствующий амплитуде выходного напряжения ЗЧУ, вызванного входным зарядом  $Q_{gen} = U_{gen} \cdot C_{cal}$ . Далее вычисляется калибровочный коэффициент  $K_{cal} = Q_{gen}/(A_{cal} - A_0)$ , где  $A_0$  — пьедестал, показывающий уровень минимально регистрируемого сигнала, выраженного в каналах АЦП. Пьедестал измеряется аналогичным образом, только калибровочный сигнал на входе АЦП подавляется аттенюатором до нуля. На втором шаге следует плавный подъем высокого напряжения на диноде до  $-200 \div -250$  В со скоростью 30 В/сек, а затем на фотокатоде до  $-800 \div -1000$  В со скоростью 100 В/сек. После установки напряжения питания фототриода начинается набор спектра от радиоактивного изотопа  $^{137}Cs$ . В результате будет набран амплитудный спектр сигналов (рис.14). В данном спектре оператором выделяется фотопик (рис.15) и проводится аппроксимация его функцией Гаусса. На заключительном

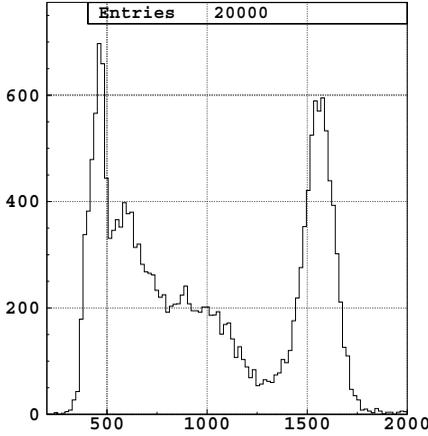


Рис. 14: Амплитудный спектр от  $\gamma$ -квантов радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$  для кристалла  $\text{NaI}(\text{Tl})$ .

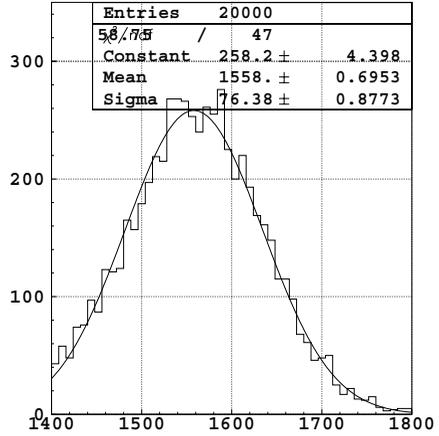


Рис. 15: Аппроксимация фотопика (662 кэВ) кривой Гаусса.

этапе, при выходе из режима анализа спектра, программа вычисляет произведение квантового выхода на коэффициент усиления с соответствующей погрешностью и энергетическое разрешение сцинтилляционного счетчика с выводом всех данных на монитор. Произведение квантового выхода на коэффициент усиление определяется по формуле:

$$\eta \cdot G = \frac{K_{\text{cal}} \cdot (A_{\text{peak}} - A_0)}{E_{\text{peak}} \cdot \gamma \cdot \varepsilon \cdot e}$$

В режиме измерения коэффициента усиления, засветка фотокатода фототриода производится от светодиода через светорассеиватель, который представляет собой цилиндр высотой 50 мм и диаметром 52 мм, покрытый изнутри диффузно-отражающей фторопластовой пленкой. Неоднородность засветки в такой конструкции не превышает 5%. Измерение коэффициента усиления осуществляется в два этапа. На первом этапе набирается спектр от светодиода

да в стандартном рабочем режиме работы фототриода. На втором этапе набирается спектр в фотодиодном режиме работы фототриода, на динод подается  $-200$  В, а на фотокатод  $-100$  В. На каждом этапе определяется положение пика с вычитанием пьедестала. При этом интенсивность засвечивания в обоих случаях одинакова и выбирается из условия получить удовлетворительный спектр в фотодиодном режиме. Регулировка интенсивности производится изменением амплитуды зажигающих импульсов от генератора Г5-75 при длительности импульсов 100 нсек. (рис.12). Учитывая данное обстоятельство, сформированный сигнал на первом этапе измерений, перед оцифровкой, дополнительно ослабляется аттенуатором, поскольку по амплитуде сигнал в фототриодном режиме превышает сигнал в фотодиодном режиме почти на порядок. Таким образом, коэффициент усиления находится по формуле:

$$G = C_{ATT} \cdot \frac{(A_1 - A_0)}{(A_2 - A_0)},$$

где  $C_{ATT}$  – коэффициент ослабления аттенуатора,  $A_1$  и  $A_2$  – средняя амплитуда сигнала (в каналах АЦП), измеренная в фототриодном и фотодиодном режимах соответственно. Следует отметить, что измеренный таким способом коэффициент усиления на  $10 \div 15\%$  ниже реального. Систематический сдвиг обусловлен тем фактом, что измеряемый уровень сигнала в фотодиодном режиме несколько завышен, поскольку фотокатод полупрозрачный и часть падающего на него света попадает на динод, вызывая дополнительную фотоэмиссию.

Третий режим работы, измерение квантового выхода, объединяет первые два режима автоматически. В режиме работы анализатора спектра, производится набор заданной статистики считыванием данных АЦП с последующим анализом спектра оператором. В любом режиме работы предусмотрена возможность сохранения набранного спектра в *ntuple*-файл либо создание *Postscript*-файла анализируемой гистограммы.

## 6.2 Испытание работоспособности фототриодов в магнитном поле

Многолетний опыт эксплуатации фототриодов в калориметрах СНД и КМД показал, что долговременная стабильность работы фототриодов во многом зависит от качества вакуума внутри прибора. Качество вакуума можно оценить по испытаниям работоспособности фототриодов в магнитном поле. Низкий вакуум приводит к тому, что при определенной величине индукции магнитного поля внутри фототриода загорается газовый разряд. Возникновение разряда связано с увеличением длины пробега электронов в магнитном поле, прежде чем они соберутся на анодную сетку. Для примера, можно привести эффект медленной деградации параметров фототриодов наружного слоя калориметра СНД, обнаруженный в прошлых экспериментах с СНД на комплексе ВЭПП-2М. Деградация заключалась в ухудшении чувствительности приборов, главным образом, в уменьшении квантового выхода фотокатода. Скорость уменьшения чувствительности фототриодов составляла около 3% в месяц. Данный эффект проявлял себя только при включенном высоком напряжении на фототриодах, независимо от режима работы ускорительного комплекса. Проверка фототриодов диаметром 52 мм, снятых с наружного слоя калориметра, в магнитном поле до 2 Тл показала, что практически во всех приборах загорался разряд, что свидетельствовало о низком качестве вакуума.

Схема проведения магнитных испытаний фототриодов заключается в следующем. Фототриод включается в рабочий режим: напряжение на фотокатоде  $-800$  В и на диноде  $-200$  В. Фотокатод засвечивается светодиодами в количестве пяти штук таким образом, чтобы обеспечить его равномерную засветку. Затем с помощью соответствующего устройства, позволяющего изменять угол наклона прибора относительно направления магнитного поля в пределах от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , производятся измерения фототока и темнового тока. Фототок определяется как разность суммарного тока, измеренного при включенной засветке, и темнового тока. Результаты магнитных измерений фототриодов  $\varnothing 32$  мм отражены в виде графиков:

зависимости фототока (в относительных единицах) от величины продольного магнитного поля ( $\alpha = 0^\circ$ ) (рис.16) и угловой зависимости фототока при фиксированном магнитном поле 2 Тл (рис.17). Для сравнения, приведены также результаты испытаний фототриодов  $\varnothing 21.5$  мм (ИЯФ), фототриодов типа R2184 и фототетродов типа R2185UV MOD  $\varnothing 51$  мм (Hamamatsu). Каждый фотоприемник, при измерениях, находился в своем стандартном режиме работы. Повышение фототока при увеличении значения угла наклона фототриода (рис.17) объясняется увеличением коэффициента вторичной эмиссии динода, поскольку фотоэлектроны бомбардируют динод под большими углами столкновения. Однако при дальнейшем увеличении угла начинает проявлять себя

противоположный эффект, связанный с уменьшением прозрачности анодной сетки для фотоэлектронов. Кроме этого, для изучения влияния рассеянных магнитных полей от элементов магнитной системы накопителя ВЭПП-2000 на работу фототриодов в детекторе СНД-2000 были проведены испытания фототриодов в слабых магнитных полях величиной до 300 Гс при различных углах наклона. Результаты испытаний представлены на рис. 18, 19.

## 7 Заключение

В настоящее время создана автоматизированная установка активировки фотокатодов вакуумных фототриодов, которая позволяет производить одновременную активировку фотокатодов для 6 приборов на одном вакуумном посту. Работа, на данный момент, находится в стадии программной отработки автоматизированной технологии формирования бищелочного фотокатода. Следует отметить, что новая автоматизированная установка дает возможность формировать фотокатоды  $A^I B^V$  разных типов, в отличие от предшествующей установки [1], при помощи которой возможно было формировать только многощелочные фотокатоды.

Для измерения характеристик фототриодов создан автоматизированный стенд по измерению их квантового выхода и коэффициента усиления, а также измерительный стенд для проверки

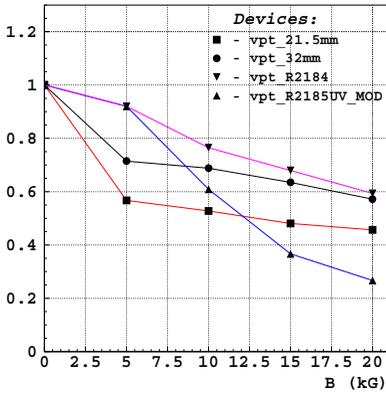


Рис. 16: Зависимость фототока (отн. ед.) от величины магнитного поля при  $\alpha = 0^\circ$

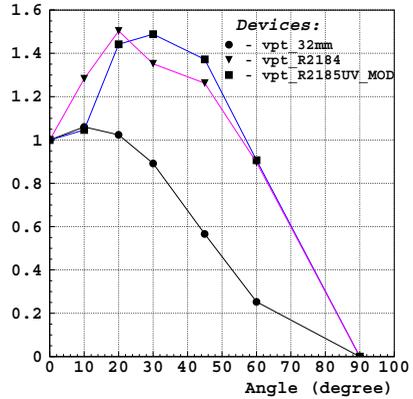


Рис. 17: Зависимость фототока (отн. ед.) от угла наклона  $\alpha$  при  $B = 2$  Тл.

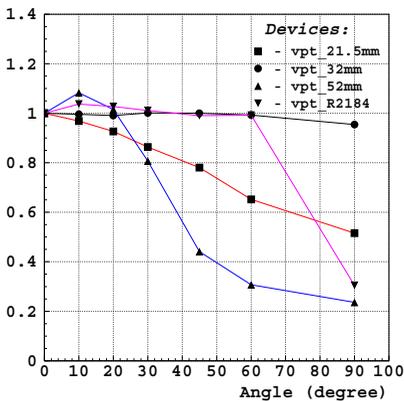


Рис. 18: Зависимость фототока (отн. ед.) от угла наклона  $\alpha$  при  $B = 100$  Гс.

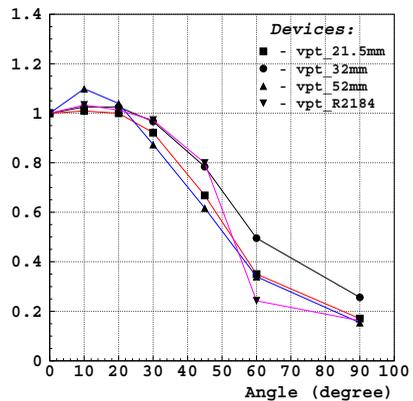


Рис. 19: Зависимость фототока (отн. ед.) от угла наклона  $\alpha$  при  $B = 300$  Гс.

работоспособности фототриодов в магнитном поле до 2 Тл.

Ближайшие планы – к концу 2005 года оптимизировать автома-

тизированной технологию активировки и наладить производство фототриодов диаметром 52 мм, необходимых для замены вышедших из строя фототриодов третьего слоя калориметра СНД.

Работа частично поддержана грантами Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-1335.2003.2, РФФИ – 03-02-16581-а, 04-02-16181-а, 04-02-16184-а, 04-07-90057-в, 05-02-16250-а.

## Список литературы

- [1] *П.М.Бесчастнов и др.*, Препринт ИЯФ 89-178, Новосибирск, 1989.
- [2] *Г.Н.Абрамов и др.*, Препринт ИЯФ 2001-29, Новосибирск, 2001.
- [3] *A.D.Vukin et al.*, Phys.At.Nucl. **56**, 1494-1496 (1993).
- [4] *Р.Р.Ахметшин и др.*, Препринт ИЯФ 2000-25, Новосибирск, 2000.
- [5] *В.М.Аульченко и др.*, Препринт ИЯФ 93-1, Новосибирск, 1993.
- [6] *А.Д.Букин и др.*, Препринт ИЯФ 84-33, Новосибирск, 1984.
- [7] *Р.М.Beschastnov et al.*, Nucl.Instrum.and Meth. **A342**, 477 (1994).

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Описание калориметров ИЯФ</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Основные требования к параметрам фототриодов</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Технология изготовления фототриодов</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Автоматизация процесса изготовления фототриодов</b>	<b>12</b>
5.1	Описание автоматизированной установки . . . . .	12
5.2	Программное обеспечение . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Измерение параметров фототриодов</b>	<b>21</b>
6.1	Измерение квантового выхода и коэффициента усиления . . . . .	21
6.2	Испытание работоспособности фототриодов в магнитном поле . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Заключение</b>	<b>28</b>

*М.Н. Ачасов, В.В. Анашин, А.В. Боженок, П.Д. Вобльй,  
В.Б. Голубев, А.А. Жуков, А.А. Король, С.Б. Орешкин,  
Е.Э. Пята, С.И. Середняков, Ю.А. Тихонов, Ю.В. Усов,  
Б.А. Шварц*

**Разработка вакуумных фототриодов  
для сцинтилляционных калориметров**

*M.N. Achasov, V.V. Anashin, A.V. Bozhenok, P.D. Vobly,  
V.B. Golubev, A.A. Zhukov, A.A. Korol, S.B. Oreshkin,  
E.E. Pyata, S.I. Serednyakov, Yu.A. Tikhonov, Yu.V. Usov,  
B.A. Shwartz*

**Development of vacuum phototriodes  
for scintillation calorimeters**

ИЯФ 2005-41

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 8.09.2005 г.

---

Сдано в набор 12.09.2005 г.

Подписано в печать 12.09.2005 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.9 печ.л., 1.5 уч.-изд.л.

Тираж 115 экз. Бесплатно. Заказ № 41

---

Обработано на IBM PC и отпечатано на  
роталпринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

*Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*