

Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան ԵՐԵՎԱՆԻ ՏԻՋԻՎԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Ժամկայան Միմոն Վահանի

ԵՐԿՐՈՂԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ԷՄԻՍԻԱՅԻ ՎՐԱ ՀԻՄՆՎԱԾ
ՊԻԿՈՎԱՅՐԿԵԼԱՅԻՆ ԵՎ ԵՆԹԱՊԻԿՈՎԱՅՐԿԵԼԱՅԻՆ
ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ԼՈՒԾՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՍԲ ԴԵՏԵԿՏՈՐՆԵՐ

Ա.04.16 – «Միջուկի, տարրական մասնիկների և տիեզերական
ճառագայթների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ
Ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2008

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А. И. Алиханяна

Жамкочян Симон Ваганович

ДЕТЕКТОРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ВТОРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ
ЭМИССИИ, С ПИКОСЕКУНДНЫМ И СУБПИКОСЕКУНДНЫМ
ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.04.16 – «Физика ядра, элементарных частиц и космических лучей»

ЕРЕВАН – 2008

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում:

Ֆիզական ղեկավար՝

Ֆիզմաթ. գիտ. թեկնածու
Ա. Թ. Մարգարյան (Երֆի)

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր
Կ. Ա. Բապիրյան (Երֆի)

Ֆիզմաթ. գիտ. թեկնածու
Ա. Է. Ավետիսյան (Երֆի)

Առաջատար կազմակերպություն՝

ԵՊՀ, Երևան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2008թ. հունիսի 12-ին ժամը 14.00-ին Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում գործող ԲՈՂ-ի 024 մասնագիտական խորհրդի նիստում (375036, Երևան, Ալիխանյան եղբայրներ փ. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտի գրադարանում

Սեղմագիրը անարված է 2008թ. մայիսի 10-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտ. քարտուղար
Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր *Ջ. Դաշալյան*

Է. Դ. Գազազյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском физическом институте имени А.И. Алиханяна.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, Маргарян А.Т. (ЕрФИ)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, Испирян К. А. (ЕрФИ)
кандидат физико-математических наук, Аветисян А.Э. (ЕрФИ)

Ведущая организация: ЕГУ, Ереван

Защита диссертации состоится 12 июня 2008 года в 14.00 часов на заседании специализированного совета ВАК 024, действующего при Ереванском физическом институте им. А.И. Алиханяна (375036, г. Ереван, ул. Братьев Алиханян 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕрФИ.

Автореферат разослан 10 мая 2008г.

Ученый секретарь спец. совета,

доктор физико-математических наук *Ջ. Դաշալյան*

Э. Д. Газазян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Предел временного разрешения для современных времяизмеряющих систем, основанных на вакуумных фотоэлектронных умножителях (ФЭУ), гибридных фотонных детекторах (ГФД) и наносекундной электронике (усилители, дискриминаторы, логические элементы и аналого-цифровые преобразователи времени) составляет порядка 100 пс.

Использование вторичной электронной эмиссии вместе со сверхвысокочастотной (СВЧ) разверткой открывает новые возможности для времяизмеряющей техники. Благодаря чрезвычайно малому времени образования вторичных электронов становится возможным, путем их СВЧ развертки, измерять длительности быстропротекающих процессов с субпикосекундным временным разрешением. Детекторы, основанные на таком принципе, могут найти применение в качестве прецизионных систем измерения длин сгустков пучков заряженных частиц, систем регистрации продуктов деления.

Данная работа посвящена разработке и изучению свойств четырех детекторов нового типа, основанных на анализе электронов вторичной эмиссии с помощью СВЧ развертки.

Изученные детекторы способны регистрировать электрические сигналы, возбуждаемые одиночными вторичными электронами, с возможностью их последующей обработки при помощи наносекундной электроники. Временная структура процессов при этом может быть восстановлена с пикосекундной и субпикосекундной точностью. Описанные системы совмещают в себе, таким образом, все преимущества вакуумных ФЭУ и стрик-камер.

Цель диссертационной работы

- Разработать программные коды, предназначенные для симуляций работы детекторов.
- Провести моделирование по методу Монте-Карло предложенных прототипов новых детекторов с целью подбора для них оптимальных геометрических и других параметров, а также для получения точной оценки их временного разрешения.

- Провести экспериментальные исследования работы детектора продольных параметров сгустков с точечной мишенью на плоском катоде.

Научная новизна

- Предложены новые детекторы длины сгустков, фотонные детекторы, системы регистрации тяжелых ионов.
- Разработаны Монте-Карло коды для точных симуляций работы описанных прототипов детекторов.
- Показано, что предложенные детекторы длины сгустков способны обеспечить пикосекундное и субпикосекундное разрешение по времени.
- Предложенные системы регистрации тяжелых ионов и фотонные детекторы способны обеспечить высокое временное разрешение -- порядка 20 пс.
- Экспериментально доказана возможность регистрации сигналов с позиционно-чувствительного детектора одиночных вторичных электронов, прошедших СВЧ развертку, при помощи стандартной наносекундной электроники.

Практическая ценность работы

Разработанные при помощи языка FORTRAN, пакета ROOT и коммерческого программного обеспечения SIMION 8 программные коды могут использоваться для симуляций прототипов различных детекторов. Исследованные детекторы могут использоваться в ускорительной технике, в качестве систем регистрации запаздывающих продуктов деления с субнаносекундными временами жизни, а также в экспериментах с пучками тяжелых ионов в качестве компактного и точного инструмента измерения времени пролета.

Научные положения, выносимые на защиту

- Разработка программных кодов, предназначенных для симуляций работы прототипов новых детекторов.
- Моделирование по методу Монте-Карло предложенных прототипов детекторов с целью подбора для них оптимальных геометрических и других параметров, а также для получения точной оценки их временного разрешения.
- Регистрация одиночных вторичных электронов, прошедших СВЧ развертку, при помощи стандартной наносекундной электроники.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинарах в Ереванском физическом институте, на международной конференции Brilliant Light in Life and Material Sciences.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 4 научные работы, список приводится в конце автореферата.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 81 наименования. Общий объем работы составляет 100 страниц печатного текста, включая 71 рисунок и пять таблиц.

Содержание работы

В первой Главе изложены основные принципы работы детекторов, основанных на анализе электронов вторичной эмиссии, проводится краткий обзор существующих детекторов. Представлены схемы новых детекторов, использующих для анализа вторичных электронов СВЧ развертку, и принципы их работы:

Детектор продольных характеристик сгустка для непрерывного пучка. Схема детектора показана на рис. 1. Исследуемый пучок налетает на мишень в виде плоского эмиссионного катода или тонкой проволоки (1) и выбивает низкоэнергетические электроны вторичной эмиссии, которые затем ускоряются на интервале Z отрицательным напряжением, приложенным к катоду. Пройдя через коллиматор (2), вторичные электроны (ВЭ) фокусируются электростатической линзой (3) на экран (7) в дальнем конце установки, где расположен детектор ВЭ. По пути электроны отклоняются СВЧ дефлектором круговой развертки, состоящим из электродов (4) и четвертьволнового коаксиального СВЧ резонатора (6). Таким образом, ВЭ -изображение сгустка регистрируется на экране. Временное разрешение такого детектора обусловлено, в значительной степени, разбросом во временах пролета электронов на интервале от поверхности эмиссионного катода до коллиматора. Этот эффект может быть минимизирован путем обеспечения ускоряющего поля высокой напряженности в области у поверхности катода. Такими свойствами обладает поле тонкой заряженной нити (проволоки). Как известно,

потенциал электростатического поля проволоки радиусом r_0 относительно ее поверхности задается выражением $\phi = -2k \ln(r/r_0)$, где ϕ – потенциал поля, k – линейная плотность заряда на проволоке, r – расстояние до

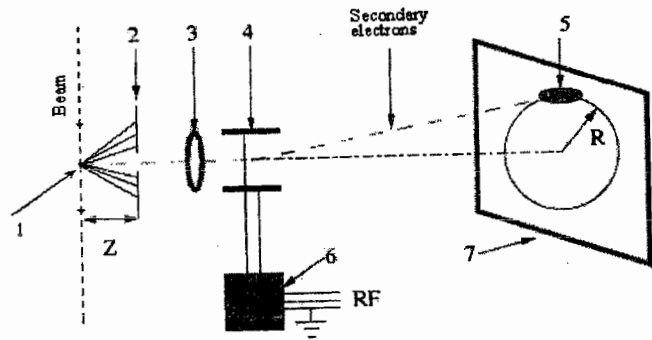


Рис. 1. Схематическое изображение детектора продольных характеристик сгустка. 1 – эмиссионная мишень, 2 – коллиматор, 3 – электростатическая линза, 4 – отклоняющие электроды, 5 – изображение вторичных электронов, 6 – СВЧ резонатор, 7 – детектор ВЭ.

поверхности проволоки, а напряженность поля определяется как $E=2k/r$. Быстрое изменение электрического потенциала ϕ вблизи поверхности тонкой проволоки видно из рис. 2, на котором показана форма потенциала в плоскости, параллельной проволоке (ось Z направлена вдоль проволоки).

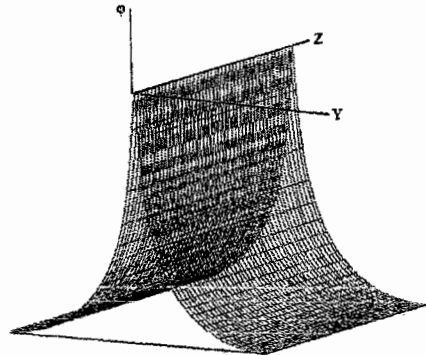


Рис.2. Форма электрического потенциала тонкой проволоки. Ось Z направлена вдоль проволоки.

Таким образом, использование в качестве эмиссионной мишени тонкой проволоки позволяет существенно повысить временное разрешение детектора.

Детекторы регистрации тяжелых ионов. Предложено использовать изохронную систему транспортировки электронов в магнитном поле с последующей их СВЧ разверткой. Расположение эмиссионной фольги перпендикулярно направлению движения заряженной частицы или сгустка позволяет минимизировать изменения в их динамических характеристиках. Схематическое изображение времяпролетной системы, состоящей из двух детекторов с отклонением вторичных электронов на 90° , показано на рис. 3. Рассмотрена также аналогичная система с отклонением электронов на 180° . Скорость частицы или сгустка в таких системах определяется из разности фаз в круговых развертках электронов, полученных с двух детекторов.

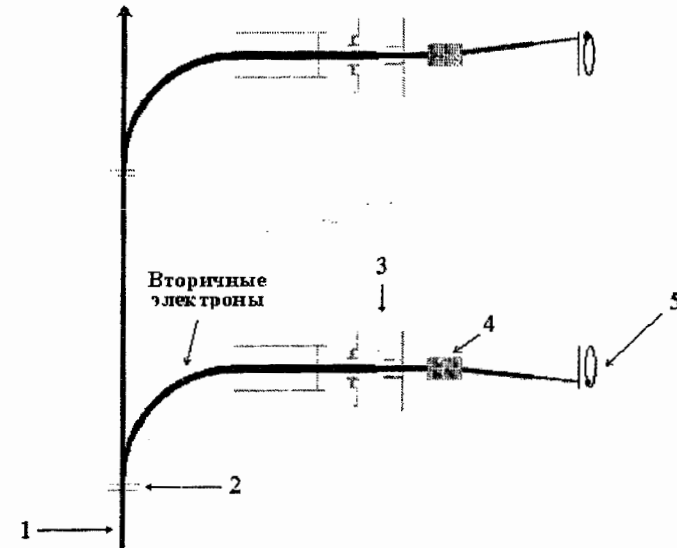


Рис. 3. Времяпролетная система с отклонением вторичных электронов в магнитном поле на 90° . 1 – исследуемая частица, 2 – эмиссионный катод и ускоряющий электрод, 3 – система фокусировки, 4 – СВЧ дефлектор, 5 – система регистрации и сбора данных.

Фотонные детекторы. Приведена схема и принцип действия пикосекундного фотонного детектора, использующего иммерсионную

линзу, состоящую из двух concentрических полусфер, внешняя из которых является фотокатодом, а внутренняя – прозрачным для электронов электродом. Такая конфигурация имеет ряд преимуществ, таких как возможность обеспечения высокого ускоряющего поля между фотокатодом и ускоряющим электродом, возможность формирования минимального поперечного сечения электронного пучка вне этого поля и полное отсутствие временного разброса для электронов с одинаковой начальной энергией. Описана черенковская система времени пролета, представляющая собой элемент DIRC (Detection of Internally Reflected Cherenkov light), соединенная с пикосекундным фотонным детектором. Использование черенковского излучения позволяет минимизировать некоторые существенные нежелательные эффекты, такие, как конечное время затухания фотонной эмиссии и различные времена дрейфа фотонов. Представлен также черенковский детектор с «лобовой» геометрией (рис. 4).

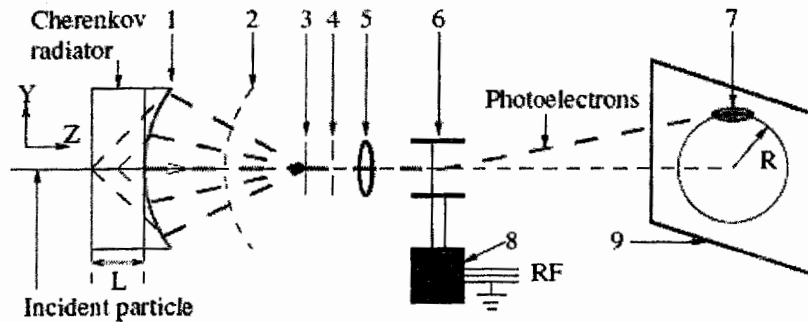


Рис. 4. Схематическое изображение черенковского детектора с «лобовой» геометрией. 1 – фотокатод, 2 – прозрачный для электронов электрод, 3 – трансмиссионный диод, 4 – ускоряющий электрод, 5 – электростатическая линза, 6 – отклоняющие электроды, 7 – изображение фотоэлектронов, 8 – СВЧ коаксиальный резонатор, 9 – детектор вторичных электронов.

Во второй Главе приведены результаты Монте-Карло моделирования детекторов, описанных в главе 1. Созданы коды на основе коммерческого программного обеспечения SIMION 8, языка FORTRAN и пакета ROOT. Для примера на рис. 5 показан смоделированный детектор тяжелых ионов с отклонением вторичных электронов в магнитном поле на 180° .

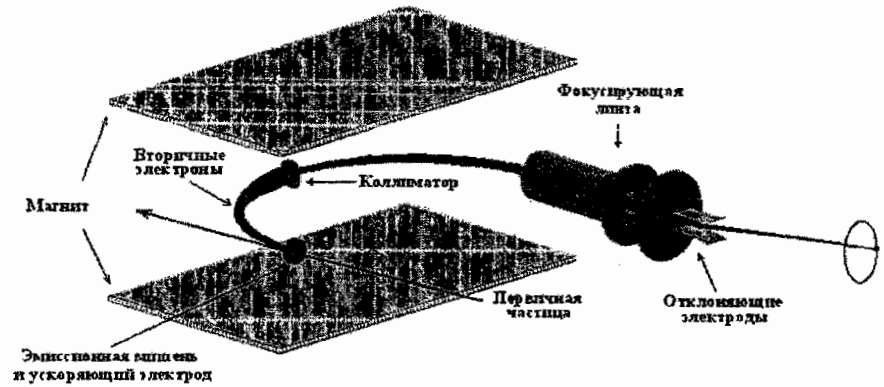


Рис. 5. Смоделированный детектор тяжелых ионов с отклонением вторичных электронов в магнитном поле на 180° .

Расчеты проведены для различных конфигураций напряжений, приложенных на ускоряющих интервалах и к элементам фокусирующих систем. Приведены сравнения с результатами, полученными другими авторами. Показано, в частности, что:

- временное разрешение детектора с точечной эмиссионной мишенью на плоском катоде может составлять $\sim 10^{-12}$ с.
- разброс времен пролета образованных вторичных электронов для системы с эмиссионной мишенью в виде тонкой проволоки существенно зависит от диаметра проволоки и может быть уменьшен до десятков-сотен фемтосекунд ($\sim 10^{-13} - 10^{-14}$ с). На рис. 6 показана полученная зависимость дисперсии времен пролета электронов от поверхности проволоки до коллиматора с диаметром отверстия 1 мм в зависимости от радиуса проволоки для различных ускоряющих напряжений. Расстояние между проволокой и коллиматором принято равным 1 см. Техническое разрешение такого детектора также может быть доведено до величины порядка десятков-сотен фемтосекунд за счет увеличения частоты поля, обеспечивающего развертку.

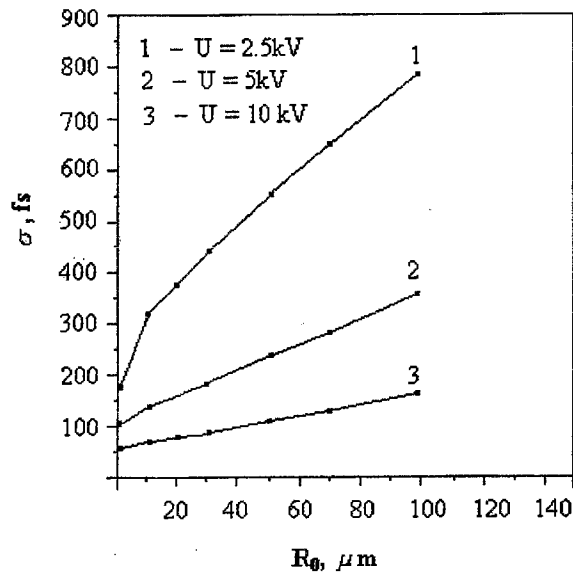


Рис. 6. Зависимость дисперсии времен пролета электронов между проволокой-катодом и коллиматором от радиуса проволоки. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют ускоряющим напряжениям - 2.5 кВ, - 5 кВ и - 10 кВ, соответственно.

- для рассмотренных систем регистрации тяжелых ионов и основанных на них времяпролетных систем временное разрешение составляет около 20 пс (20×10^{-12} с).

- предложенные фотонные детекторы также способны обеспечить временное разрешение $\sim 20 \times 10^{-12}$ с.

В третьей Главе описаны экспериментальные исследования, которые проводились на термоэлектронах, ускоренных до энергии 2.5 кэВ, для детектора с точечной мишенью на плоском катоде.

Для круговой развертки вторичных электронов была использована специальная отклоняющая СВЧ система с частотой $f = 500$ МГц, состоящая из четвертьволнового коаксиального резонатора и отклоняющих

электродов. Система сконструирована таким образом, что отклоняющие электроды служат накопительным элементом, содержащим внутри себя приложенную СВЧ мощность, и образуют часть резонансного контура со значением Q-фактора около 130. Кроме того, специальная планировка электродов позволяет избежать эффектов, связанных со временем пролета. Чувствительность дефлектора составляет порядка 1 мм/Вольт или $0.1 \text{ рад}/(\text{Ватт})^{1/2}$, что на порядок выше чувствительностей дефлекторов, использовавшихся ранее. Для достижения радиуса $R = 2$ см круговой развертки термоэлектронов с энергией 2,5 кэВ (рис. 7) была приложена мощность 1 Ватт.

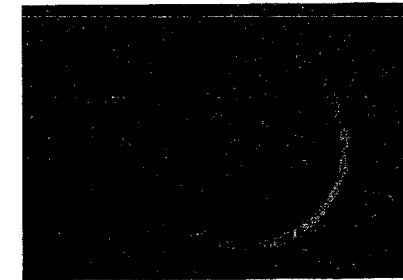


Рис. 7. Фотография круговой развертки пучка термоэлектронов с энергией 2,5 кэВ на люминесцентном экране.

Для регистрации вторичных электронов был использован позиционно-чувствительный детектор, основанный на микроканальных пластинах (МКП), схематическое изображение которого представлено на рис. 8.

Была использована система из двух одинаковых микроканальных пластин с суммарным коэффициентом усиления 4×10^7 . Позиционно-чувствительный резистивный анод (рис. 8), к которому приложено напряжение ~ 300 Вольт относительно МКП, расположен на расстоянии 3 мм от второй МКП. Для обеспечения возможности настройки системы с помощью визуального контроля в центре анода предусмотрено отверстие, и на расстоянии 3 мм от него расположен люминесцентный экран, где кинетическая энергия ускоренных под действием напряжения ~ 2 кВ электронов преобразуется в энергию видимых фотонов. Изображение визуального настроенного изображения электронов с энергией 2.5 кэВ, усиленных в МКП, также показано на рис. 9.

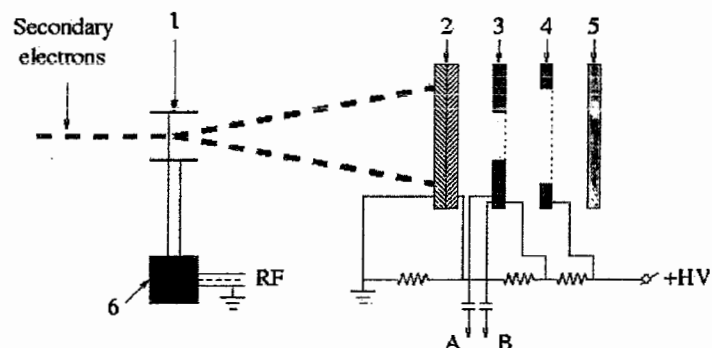


Рис. 8. Схематическое изображение позиционно-чувствительного детектора, основанного на МКП. 1 – СВЧ дефлектор, 2 – микроканальные пластины, 3 – позиционно-чувствительный анод и ускоряющий электрод, 4 – ускоряющий электрод, 5 – люминесцентный экран, 6 – коаксиальный резонатор, A и B – электрические сигналы положения с позиционно-чувствительного анода.

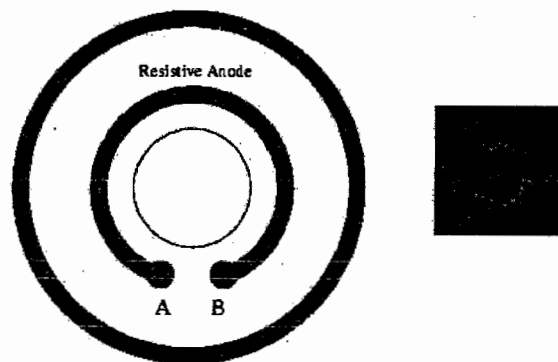


Рис. 9. Схема резистивного анода (справа) и изображение визуально настроенного изображения круговой развертки ускоренных до энергии 2.5 кэВ и усиленных в МКП электронов (слева).

В результате были получены отчетливые сигналы от усиленных в системе микроканальных пластин одиночных электронов (рис. 10).

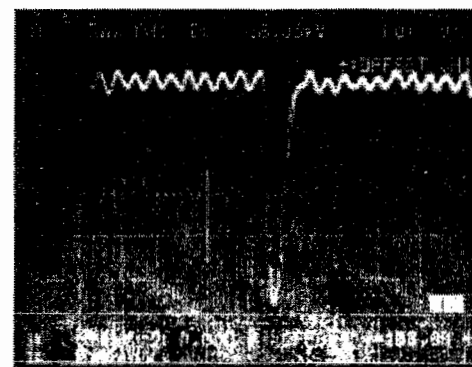


Рис. 10. Экран осциллографа, показывающий сигнал с позиционно-чувствительного анода одиночного вторичного электрона.

Заключение

Основные результаты, полученные в данной работе, следующие:

- Предложены новые детекторы длины сгустков – детектор с эмиссионной мишенью на плоском катоде и детектор с мишенью в виде тонкой проволоки, фотонные детекторы, системы регистрации тяжелых ионов [1,2].
- Разработаны Монте-Карло коды для точных симуляций работы описанных прототипов детекторов и их оптимизации. Показано, что предложенные детекторы длины сгустков способны обеспечить пикосекундное и субпикосекундное разрешение по времени. Также показано, что временное разрешение систем регистрации тяжелых ионов и фотонных детекторов составляет порядка 20 пс [3,4].
- Экспериментально доказана возможность регистрации сигналов с позиционно-чувствительного детектора одиночных вторичных электронов, прошедших СВЧ развертку, при помощи стандартной наносекундной электроники [1,2].

Список работ опубликованных по теме диссертации:

1. Margaryan, R. Carlini, R. Ent, N. Grigoryan, K. Gyunashyan, O. Hashimoto, K. Hovater, M. Ispiryan, S. Knyazyan, B. Kross, S. Majewski, G. Marikyan, M. Mkrtchyan, L. Parlakyan, V. Popov, L. Tang, H. Vardanyan, C. Yan, S. Zhamkochyan, C. Zorn, Radio frequency picosecond phototube, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 566 (2006) 321--326.
2. Margaryan, R. Carlini, R. Ent, N. Grigoryan, K. Gyunashyan, O. Hashimoto, K. Hovater, M. Ispiryan, S. Knyazyan, B. Kross, S. Majewski, G. Marikyan, M. Mkrtchyan, L. Parlakyan, V. Popov, L. Tang, H. Vardanyan, C. Yan, S. Zhamkochyan, C. Zorn, Bunch time structure detector with picosecond resolution, Proc. of int. Conf. Brilliant Light in Life And Material Sciences (Yerevan), 455 – 464, 2007 Springer.
3. S. Zhamkochyan, Thin wire secondary electron emission target for pico-femto second RF timing technique, Proc. of int. Conf. Brilliant Light in Life And Material Sciences (Yerevan), 469 – 473, 2007 Springer.
4. С.В. Жамкобян, Временное разрешение детектора формы сгустка с тонкой эмиссионной проволокой-мишенью, Известия НАН Армении, Физика, т.43, N4, с. 301 – 310, 2008.

Ամփոփում

Առաջարկված են երկրորդային էմիսիայի էլեկտրոնների՝ գերբարձր հաճախության պատիչի վրա հիմնված նոր տիպի դետեկտորներ. թանձրուկի երկարության դետեկտորներ՝ հարթ և լարային էմիսիոն թիրախներով, ֆոտոնային դետեկտորներ, ծանր իոնների գրանցման դետեկտորներ: SIMION 8, FORTRAN և ROOT ծրագրերի հիման վրա ստեղծվել են հատուկ կոդեր, որոնց օգնությամբ որոշվել են դետեկտորների օպտիմալ երկրաչափական և այլ պարամետրերը, հաշվարկվել են նրանց ժամանակային լուծողունակությունները: Ցույց է տրվել, մասնավորապես, որ, օգտագործելով որպես էմիսիոն թիրախ բարակ լար, հնարավոր է հասնել 10^{-13} – 10^{-14} վ ժամանակային ճշտության: Հետազոտված ֆոտոնային դետեկտորների և ծանր իոնների գրանցման համակարգերի համար ժամանակային ճշտությունը 20×10^{-12} վ կարգի է: Կատարվել են փորձարարական հետազոտություններ հարթ էմիսիոն թիրախով թանձրուկի երկարության դետեկտորի համար, որտեղ ցույց է տրվել միկրոխողովակային թիթեղներում ուժեղացված միայնակ երկրորդային էլեկտրոնների գրանցման հնարավորությունը սովորական նանովայրկենային էլեկտրոնիկայի օգնությամբ:

