

На правах рукописи

УДК 681.3:37.534

ФАИН Валерий Эмилевич

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ ЭВМ БЭСМ-6 И СМ-4
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

05.13.16 Применение вычислительной техники,
математического моделирования и математических
методов в научных исследованиях.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна, 1990

Работа выполнена в Казахском ордена Трудового Красного Знамени госуниверситете им. С. М. Кирова и Институте физики высоких энергий АН Казахской ССР.

Научный руководитель

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Аккерман
Абрам Фишелевич

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор

Корягин
Дмитрий Александрович

Кандидат технических наук

Соснин
Андрей Николаевич

Ведущая организация - Институт физики высоких энергий ИК АЭ.

Защита состоится " ____ " _____ 1990 г. в " ____ " часов на заседании специализированного совета Д047.01.04 при Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований, 141980 г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

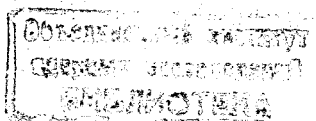
Автореферат разослан " ____ " _____ 1990 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета

Иванченко

Зинаида Мироновна



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Создание пакетов прикладных программ (ППП) для моделирования на ЭВМ сложных физических процессов и технических объектов считается наиболее перспективным направлением в вычислительной физике. Однако, широкое применение пакетной технологии сдерживается рядом факторов, связанных с:

1. Необходимостью отказа от традиционных способов разработки программ, основанных на использовании только ограниченного набора средств автоматизации программирования.

2. Отсутствием адекватных программных средств и методов моделирования, охватывающих целый класс явлений из определенной предметной области.

3. Сложностью эксплуатации больших ППП.

4. Ограниченностью физических ресурсов используемых вычислительных машин.

Для преодоления возникающих трудностей необходимо создавать интегрированные ППП, обеспечивающие автоматизацию работы исследователя на всех стадиях вычислительного эксперимента (ВЭ), таких как

- 1) подготовка ВЭ;
- 2) проведение расчетов;
- 3) накопление и хранение массивов данных;
- 4) анализ и представление результатов.

Указанные стадии предъявляют противоречивые требования к аппаратуре ЭВМ и их программному обеспечению, поэтому удовлетворить их с помощью какого-либо одного из известных

средств автоматизации программирования практически невозможно. Одновременно, трудно найти ЭВМ, имеющую в составе своего математического обеспечения все необходимые программные компоненты, а также аппаратуру, которая обеспечивала бы их эффективную работу.

Анализ соотношения возможностей зарубежных персональных ЭВМ, миниЭВМ и суперЭВМ показывает, что там возникает аналогичные противоречия, хотя и на другом качественном уровне.

Одним из способов их разрешения, в настоящее время, следует признать создание распределенных неоднородных вычислительных комплексов, позволяющих объединить возможности программного и аппаратного обеспечения каждого типа ЭВМ.

На рис. I приведен состав предлагаемого в данной работе программно-аппаратного обеспечения ВЭ. Каждая стадия ВЭ реализуется на отдельной ЭВМ и включает в себя 5 относительно самостоятельных уровней. Такой подход обеспечивает достаточную мобильность создаваемых средств, возможность простой замены одних компонент другими, которые появляются в ходе современного стремительного совершенствования средств вычислительной техники, численных методов и математических моделей. Например, на смену машинам БЭСМ-6 приходят программно совместимые с ней как суперЭВМ типа Эльбрус, так и персональные машины типа МКБ-86002, более известной под названием РЕТРО-86.

Для отечественной вычислительной техники пока не создано достаточно общих методов и средств для реализации

распределенных вычислительных комплексов и создания на их основе интегрированных пакетов программ для проведения вычислительных экспериментов. Поэтому при реализации интегрированных ППП необходим выбор достаточно сложной задачи, успешное решение которой служило бы критерием правильности предлагаемых решений.

В данной работе в качестве такой задачи была выбрана задача математического моделирования переноса ионов методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). Метод Монте-Карло широко применяется для проведения вычислительных экспериментов (ВЭ) при изучении большого круга различных научных и прикладных задач и, прежде всего, задач переноса излучения в веществе. Сфера его применения быстро растет по мере внедрения в практику новых ускорителей заряженных частиц и появления новых объектов исследований, например, ионной имплантации полупроводников, управляемого термоядерного синтеза на ионах и др.

Требования, предъявляемые к организации процесса вычислений в этом методе являются достаточно общими. Они характерны для многих научно-технических задач и поэтому метод можно рассматривать как "эталонный".

Таким образом, разработка и реализация интегрированной системы математического моделирования на основе ЭВМ типа БЭСМ-6 и СМ-4, позволяющей освободить БЭСМ-6 от функций по подготовке и обработке текстовой и графической информации, управлению терминалами и файлами на внешних запоминающих устройствах, и ее использование для решения большого класса задач моделирования взаимодействия частиц с веществом

является АКТУАЛЬНОЙ ЗАДАЧЕЙ.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является:

1) разработка программно-аппаратных средств для создания интегрированных систем математического моделирования на базе ЭВМ БЭСМ-6 и СМ-4;

2) отработка технологии использования распределенных вычислительных систем путем создания интегрированного пакета ITRAN для математического моделирования процессов переноса ускоренных ионов в веществе методом Монте-Карло;

3) использование созданных программно-аппаратных средств для проведения серии численных экспериментов по прохождению ионов в многослойных, гетерогенных мишенях и получения новых физических результатов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. В диссертационной работе впервые:

1. Разработан и реализован распределенный комплекс программно-аппаратных средств, включающий ЭВМ БЭСМ-6, в качестве центрального вычислителя и ряда управляющих мини-ЭВМ типа СМ-4 в качестве специализированных файловых, терминальных, графических и т.п. процессоров, обеспечивающих создание и эксплуатацию интегрированных систем математического моделирования. При его создании и разработке применены современные средства автоматизации программирования и методы эффективного использования имеющегося оборудования.

2. Адаптированы на ЭВМ БЭСМ-6 современные версии базовых средств для статистического анализа экспериментальных данных - HBOOK и HPLOT и ввода исходной информации - FFREAD.

3. На ЭВМ БЭСМ-6 реализовано программное обеспечение для обмена информацией с разнотипными ЭВМ (ЕС ЭВМ, СМ ЭВМ, персональными ЭВМ) по протоколу KERMIT, что обеспечивает эффективное использование таких ЭВМ в составе локальных сетей на базе аппаратуры подключения терминалов.

4. Разработана динамическая структура данных, описывающая процессы замедления заряженных частиц в веществе, предложены программные средства и методика создания на ее базе интегрированных прикладных пакетов.

5. Создан интегрированный мобильный развивающийся ППП "ITRAN" для моделирования переноса ионов в веществе методом Монте-Карло.

6. В ходе ВЭ получены данные о пространственном распределении ионов B^+ , N^+ , As^+ , Sb^+ и др., внедренных в аморфный кремний при энергиях ($t - 10^4$) кэВ и исследованы дифференциальные характеристики потоков ионов H^+ , He^+ , O^+ , N^+ , Ne^+ , Ar^+ за тонкими мишенями.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ.

В результате работы реализован интегрированный программно-аппаратный комплекс, позволяющий решать на ЭВМ БЭСМ-6/7 задачи математического моделирования на качественно новом уровне. Результаты, полученные в ходе вычислительных экспериментов с помощью ППП "ITRAN", внедрены в практику в Институте космических исследований АН СССР и Институте физической химии АН СССР. Пакет передан для эксплуатации на ЭВМ БЭСМ-6 ИФВЭ АН КазССР. Комплекс целиком и отдельные его программные и аппаратные компоненты широко используются в

Казгосунниверситете, ИФВЭ АН КазССР, ИЯФ АН КазССР, ОИАИ, ИММ КазССР, КазПОВТИ и других организациях при решении задач моделирования двигателей внутреннего сгорания, геофизических и геохимических процессов, обработки фоновой информации и полутонных изображений, автоматизации проектирования и производства печатных плат, в учебном процессе и др.

Использование в ППП базовых и инструментальных средств, адаптированных как на ЭВМ БЭСМ-6, так и на машинах серии ЕС, в том числе персональных, а в качестве основного языка программирования - языка Фортран-77, обеспечивает мобильность самому пакету. Разработанные принципы создания пакетов прикладных программ с использованием средств динамического распределения памяти могут быть с успехом использованы при создании новых, более совершенных пакетов и систем автоматизированного проектирования средств микроэлектроники, использующих процессы ионной имплантации и ионной микролитографии, в задачах радиационной защиты, радиационного материаловедения и т.п.

СТРУКТУРА РАБОТЫ.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка цитируемой литературы, состоящего из 175 наименований, 7 приложений. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста и включает 35 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

ВО ВВЕДЕНИИ обосновывается актуальность исследований, формулируются основные положения, выносимые на защиту, их

научная новизна и практическая значимость.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ анализируются требования, предъявляемые задачами моделирования к программно-аппаратному обеспечению, возникающие при этом противоречия и пути их разрешения. Анализируются успехи достигнутые в физике высоких энергий на пути создания мобильных базовых и инструментальных средств для автоматизации проектирования, реализации и сопровождения больших программных систем, а также для статистической обработки и графического представления экспериментальной информации. На примере решения задач моделирования методом Монте-Карло обосновывается необходимость использования распределенных вычислительных комплексов для проведения сложных ВЭ.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ приведены результаты, полученные в ходе реализации аппаратного и системного уровней программно-аппаратного обеспечения ВЭ (рис.1). Предложена и обосновывается архитектура распределенного вычислительного комплекса для решения больших задач моделирования на базе серийной вычислительной техники (ЭВМ типа БЭСМ-6 и СМ-4) и известных, хорошо зарекомендовавших себя на практике средств математического обеспечения.

Комплекс включает в себя: две ЭВМ БЭСМ-6/7, объединенные в двухмашинный комплекс ВК2-БЭСМ-6 (центральный вычислитель -ЦВ) с общим полем дисковой памяти и параллельным каналом связи, обеспечивающим прямое взаимодействие процессоров обеих БЭСМ-6; 4 мини-ЭВМ типа СМ-4, связанные с ЦВ через коммутатор вычислительных машин (КВМ) и контроллер связи и выполняющие каждая специализированные функции; микроЭВМ

класса "Электроника-60", микропроцессорные устройства на базе микропроцессора К580 в качестве интеллектуальных терминалов: алфавитно-цифровых и цветных растровых дисплеев, графопостроителей.

Описывается разработка унифицированной 6-ти уровневой транспортной подсистемы для специализированных процессоров, обеспечивающей выполнение машинами класса СМ-4 функций текстового, файлового, графического и сетевого процессоров и взаимодействие с ЭВМ БЭСМ-6 по физической линии и по протоколу, разработанными в ЛВТА ОИАИ.

Созданное в ходе работы программное обеспечение включает в себя программы для центрального вычислителя, для специализированных процессоров и программное обеспечение микропроцессорных терминалов.

Программное обеспечение всех специализированных процессоров работает в среде ОС РВ.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ на примере моделирования замедления ускоренных ионов в веществе предложена методика создания и использования прикладного и инструментального уровней интегрированной системы. Сформулированы основные моменты физической, математической и информационной моделей процесса элементарного взаимодействия ионов с атомами вещества и переноса ускоренных ионов в аморфных мишенях, лежащих в основе ИИИ ITRAN. Обосновывается необходимость использования динамического распределения памяти средствами системы HYDRA и создания базы программы пакета средствами системы PATCHY-4.

Дана общая структура пакета, описаны его отдельные части и выполняемые ими функции. Указаны требования предъявляемые

к квалификации исследователей при использовании ими в своих работах пакета ITRAN.

Описываются работы, выполненные автором по адаптации систем PATCHY, HBOOK, HYDRA, HPLOT, KERMIT на ЭВМ БЭСМ-6 и пакета АТОМ к составу технических средств машинной графики, входящих в состав графического процессора.

Приводится разработанная впервые в ходе данной работы для задач рассматриваемого класса HYDRA -структура данных (см.рис. 2, табл. 1), пакета ITRAN, состав и структура RAM-файла, назначение его отдельных частей. Описывается работа пользователя с пакетом, входной язык системы.

На рис. 3 показана общая схема работы интегрированного пакета и виды заданий, доступных исследователям с различным уровнем подготовки.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ обсуждаются физические результаты, полученные в ходе вычислительных экспериментов, на исследовательском уровне (рис.1) пакета ITRAN.

И.С помощью пакета изучалось прохождение различных ионов в широком энергетическом интервале через тонкие пленки с целью уточнения физической модели неупругого взаимодействия ионов с атомами мишени, нахождения функций распределения переданной энергии в каналах упругого и неупругого взаимодействия. Полученные результаты были использованы для разработки новых методов детектирования частиц.

В ходе ВЭ выяснилось, что положенные в основу пакета "ITRAN" алгоритмы расчета углов рассеяния нуждаются в уточнении. За основу, при проектировании пакета, была

Имя банка	Число слов данных	кол-во связей		Примечания
		структ. S	справоч. R	
EXPR	29	9	1	Описание эксперимента
GPWT	2	2	0	Описание точек "генерирования" случайных чисел
LDST	7	1	1	Описание распределения для точки "генерирования"
HPWT	2	1	0	Описание точек "гистограммирования"
LHST	10	1	0	Описание гистограммы
BEAM	10	0	1	Описание пучка имплантируемых ионов
TARG	1	1	0	Общее описание мишени
SLIC	6	2	2	Описание материала одного слоя мишени
TATM	1	1	1	Описание свойств отдельных атомов, входящих в молекулу данного слоя мишени
HYST	42	1	3	Описание текущего взаимодействия
ATOM	4	1	0	Описание свойств элементов таблицы Менделеева

положена схема из работы ⁴⁾, в которой интервал по энергии

⁴⁾ Biersack J.P., Nagelmark L.G. // Nucl. Instr. and meth. - 1980. - V.174. - P.257-280.

при расчете углов делится на 2 области, и в каждой расчет ведется по своей формуле. Как показали наши расчеты, для сохранения заданной точности в схему расчета необходимо ввести область III таких прицельных параметров, для которых во всем энергетическом интервале справедливо импульсное приближение. Расположение всех трех областей при использовании потенциала Мольер представлено на диаграмме (рис. 4).

Следующее уточнение касается величины параметра δ в формуле для неупругих потерь энергии в отдельных ион-атомных соударениях, предложенной в работе ¹⁾. Расчеты, проведенные нами, по схеме индивидуальных соударений с различными параметрами δ показали, что наилучшее согласие как по средним потерям энергии ΔE , так и стратглингу α^2 этих потерь с экспериментальными данными ²⁾ для ионов гелия, прошедших через аморфную пленку углерода толщиной 216.6 \AA , достигается при значении $\delta=1.0$. Из рис. 5 видно, что величина энергетического стратглинга α^2 наиболее чувствительна к выбору δ , и именно величина α^2 должна быть критерием уточнения параметра δ .

II. В ходе работы были получены характеристики пространственного распределения внедренных ионов различных энергий ($1 - 10^4$) кэВ и точечных дефектов ими созданных в гомогенных и гетерогенных мишенях.

¹⁾Oen O.S., Robinson M.T. //Nucl.Instr.and Meth. - 1976. -V.132. - P.647.

²⁾Kreysch G., Muller-Jahreis U.//Rad.Effects. - 1977. - V.31. - P.101.

На рис. 6 представлены результаты расчетов σ_N и σ_E - среднеквадратичных отклонений радиальных распределений частиц и энергии для набора энергий ионов на разных глубинах z в мишени, выраженных в единицах среднего проективного пробега R_p . Хорошо видна, установленная в данной работе зависимость указанных величин от глубины, в то время как в ряде работ их предлагается считать постоянными. На основе полученных данных предложена формула для расчета пространственных распределений внедренных ионов и переданной энергии. Каждая точка на рис.6 - результат отдельного вычислительного эксперимента продолжительностью порядка 40 минут на ЭВМ ВЭСМ-6.

Используя полученные в ВЭ данные о пространственном распределении переданной энергии ионов, рассчитаны распределение точечных дефектов, генерированных в никелевой мишени ионами гелия различных энергий.

С целью определения возможностей пакета для решения задач, связанных с расчетом распределения остановившихся ионов, имплантированных в многослойные мишени, был проведен ряд ВЭ с гетерогенными средами. Установлено, что результаты хорошо согласуются с известными из литературы экспериментальными данными и расчетами других исследователей. На рис. 7 воспроизводятся результаты одного из таких экспериментов после их обработки графическим процессором.

III. Возможности пакета были проверены в расчетах основных характеристик распределения по глубине ионов B^+ , N^+ , P^+ с энергией от 1 до 10 МэВ, внедренных в кремний. Расчеты

выполнены с помощью схемы укрупненных соударений. Найденная в расчете зависимость $N_p(E)$ описывается формулой:

$$N_p(\text{мкм}) = aE^{3/2} + bE + cE^{1/2} + d \quad (E \text{ (МэВ)})$$

значения коэффициентов a , b , c и d приведены в таблице 2.

Таблица 2

ИОН	a	b	c	d
B	0.3202	-0.9998	4.2380	-2.0188
P	0.0568	0.4084	0.5038	0.4210
O	0.0557	0.1637	1.1235	0.1071

Расчетные значения $\Delta N_p(E)$ оказались слабо зависящими от энергии ионов и отличаются от экспериментальных значений не более, чем на 30%. Для ионов фосфора значения ΔN_p меньше экспериментальных в 2.5 раза. Вероятно уширение экспериментального профиля обусловлено радиационно - стимулированной диффузией, условия протекания которой облегчаются высокой скоростью введения дефектов, составляющих в расчете $(10^5 - 10^7) \text{ см}^{-1}$ на ион. Исследованы также особенности радиального распределения внедренных ионов. Результаты подтверждают эффективность использования ионов в мегаэлектронвольтовом диапазоне энергий для имплантации полупроводников.

Исследованы и сравнены с экспериментами практически все характеристики переноса ионов, что доказывает работоспособность предложенных методов и средств, их надежность и эффективность при решении сложных задач.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ кратко сформулированы основные результаты

работы и личный вклад автора. В результате работы:

I. Создано гибкое программно-аппаратное обеспечение распределенного вычислительного комплекса, позволяющее осуществить:

- диалоговый удаленный ввод заданий для вычислительного эксперимента, подготовленных как вручную, с помощью стандартных средств обработки текстов ОС РВ, так и автоматически. В последнем случае задание на счет в виде пакета пользователя программы формируется в ходе диалога с исследователем;

- передачу результатов вычислительных экспериментов между ЦВ и периферийными ЭВМ для их дальнейшей обработки, интерпретации и графического представления средствами малой ЭВМ;

- эффективное хранение больших объемов сложно - организованной информации с использованием современных запоминающих устройств и файловых систем.

- создание развитых интегрированных ИПИ и проведение сложных вычислительных экспериментов с использованием современного базового и инструментального программного обеспечения.

II. Разработаны принципы создания интегрированных ИПИ, содержащих формальное описание информационной модели изучаемого физического процесса с использованием средств динамического распределения памяти.

Сформулированные принципы проверены в ходе многочисленных ЭЭ при решении практических задач и могут быть с успехом использованы для создания новых, более совершенных пакетов и

САПР на ЭВМ БЭСМ-6, Эльбрус-Б, старших моделях ЕС ЭВМ и т.п.

III. На базе разработанных средств создан интегрированный развивающийся пакет прикладных программ ITRAN для моделирования замедления ионов с энергиями от 0.1 до 10^4 кэВ в аморфных гетерогенных мишенях, удовлетворяющий основным требованиям, предъявляемым к ППП.

IV. Проведены ВЭ, по результатам которых можно сделать вывод о правильности заложенных в основу программно-аппаратных решений, а также математических моделей и алгоритмов, обеспечивающих решение на ЭВМ типа БЭСМ-6 широкого класса задач, связанных с моделированием сложных физических процессов.

V. С помощью ППП ITRAN получены основные характеристики энерговыделения и пространственного распределения остановившихся ионов H^+ , He^+ , N^+ , B^+ , P^+ , Sb^+ и др. в кремнии и других материалах, представляющих практический интерес для полупроводниковой техники.

В ПРИЛОЖЕНИЯХ приведены основные структуры данных, расчетные формулы, математические модели и акты о внедрении полученных результатов в ведущих научно-исследовательских организациях страны.

АППРОБАЦИЯ И ПУБЛИКАЦИИ. Материалы диссертации опубликованы в работах /I-16/, выполненных автором в 1980-1989 годах. Основные результаты доложены и обсуждены на I Всесоюзной конференции по Р-технологии программирования /Ижевск, 1983 г./, Межвузовской конференции по применению вычислительной техники и математического моделирования в научных исследованиях /Алма-Ата, 1980 г./, Восьмой

Всесоюзной конференции "Взаимодействие атомных частиц с твердым телом" /Москва, 1987 г./, IV Всесоюзной конференции по проблемам машинной графики /Серпухов, 1987 г./, Всесоюзном семинаре по взаимодействию мощных потоков энергии с веществом /Алма-Ата, 1987 г./, II Всесоюзном семинаре "Микролитография" /Черноголовка, 1988 г./, на научном семинаре ИГиМ АН СССР под руководством д.ф.-м.н. Корягина Д.А. (Москва, 1989) и республиканских конференциях и совещаниях.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. Юрченко В.В., Файн В.Э. Аппаратное обеспечение связи ЭВМ СМ-4 с БЭСМ-6 // Тез. докладов I Респ. конф. по автоматизации научных исследований (Алма-Ата, сентябрь 1982). - Алма-Ата: КазГУ, 1982. - с. 60-61
2. Соломонов А.П., Файн В.Э., Юрченко В.В. Использование методики Р-технологии при проектировании программно-аппаратного обеспечения связи ЭВМ БЭСМ-6 с СМ-4. // Тез. докл. I всеосюз. конф. Ч. 2. Опыт применения. - К.: Ин-т кибернетики АН УССР, 1983. - С. 203.
3. Потребеников Ю.К., Файн В.Э. Система РАТСНУ-4 на ЭВМ БЭСМ-6 // Известия АН КазССР, сер. физ.-мат. - 1982. - N 4. - С. 67-73.
4. Гибрехтерман А.Л., Потребеников Ю.К., Файн В.Э. Системное математическое обеспечение ЭВМ БЭСМ-6 для повышения эффективности решения задач обработки ядерно-физической информации // Межвуз. конф. по применению выч. техники и математического моделирования в научных

исследованиях. Тез. докладов. - Алма-Ата, 1980. - С.60.

5. Akkerman A.F., Pain V.E. Calculation of Energy Loss Characteristics of Accelerated Ion Passing Through Thin Targets // Phys.Stat.Sol.(b) - 1990. - V.157. - No.2. - 10 p.

6. Потребеников Ю.К., Файн В.Э. Версия программы RUCETA для ЭВМ БЭСМ-6 // Известия АН КазССР, сер. физ.-мат. - 1981. - N 4. - С.62-64.

7. Аккерман А.Ф., Файн В.Э. Характеристики пространственных распределений ионов B^+ , N^+ и P^+ , внедренных в кремний при энергии 1-40 КэВ // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1987. - N 3. - С. 48-53.

8. Соломонов А.П., Файн В.Э. Комплекс программ обмена текстовой информацией между ЭВМ различного типа // Математика и механика. Тез. докл. VII Респ. конф. по математике и механике. Ч.II. Вычислительная и прикладная математика. - Алма-Ата, 1984. - С.121.

9. Издебский С.Э., Файн В.Э. Программное обеспечение графического процессора распределенного вычислительного комплекса для решения сложных задач // IV Всесоюз. конф. по пробл. маш. графики. - Серпухов, 1987. - С.27.

10. Аккерман А.Ф., Аккерман С.А., Файн В.Э. Моменты функций пространственного распределения ионов B, N, P, внедренных в кремний при энергии 10 МэВ // Материалы Восьмой Всесоюз. Конф. "Взаимодействие атомных частиц с твердым телом". - М., 1987. - С. 79-82.

11. Файн В.Э. Архитектура базового вычислительного комплекса для решения сложных научно-технических задач // Тр. семинара молодых ученых ИФВЭ АН КазССР. Т.1. Физика

высоких энергий и вычислительная техника - Алма-Ата, 1983. - С. 26-29. - (Препринт ИФВЭ АН КазССР 88-09).

12. Файн В.Э., Юлдашев М.М., Чубисов М.А. Область применимости импульсного приближения в расчетах переноса ионов в веществе // Тр. семинара молодых ученых ИФВЭ АН КазССР. Т.2. Физика твердого тела и моделирование переноса в веществе - Алма-Ата, 1988. - С. 33-40. - (Препринт ИФВЭ АН КазССР 88-09).

13. Система моделей для решения задач электронной литографии методом Монте-Карло / Файн В.Э., Аккерман А.Ф., Гибрехтерман А.Л. и др. // Второй Всесоюзный семинар "Микролитография". Тез. докл. - Черногоровка, 1988. - С.210-212.

14. Бухарбаева А.С., Иванченко И.М., Файн В.Э. Комплекс базового программного обеспечения для статистической обработки и графического представления данных на ЭВМ БЭСМ-6. - Дубна, 1988. - 44 с. - (ОИЯИ, Б11-10-88-32).

Подписи к рисункам

Рис.1. Состав программно - аппаратного обеспечения вычислительных экспериментов на распределенном вычислительном комплексе.

Рис.2. Общая схема HYDRA- структуры данных ППП "ITRAN".

Рис.3. Общая схема работы интегрированного пакета и виды заданий, доступные исследователям (ЦВ - центральный вычислитель, ТП - текстовый процессор, ФП - файловый процессор, ГП - графический процессор).

Рис.4.Области расчета углов рассеяния по различным приближениям для потенциала Мольер:

I - по методу [1] $\theta = \theta_{BX}$

II - по формуле: $\sin^2 \theta / 2 = [1 + (2\epsilon x)^2]^{-1}$

III - по формуле импульсного приближения

$$\theta = (1/\epsilon) \sum_{l=1}^{\infty} \alpha_l \beta_l K_l(\beta_l x),$$

где α_l, β_l - параметры функции экранирования Мольер,

K_l - модифицированная функция Бесселя I рода.

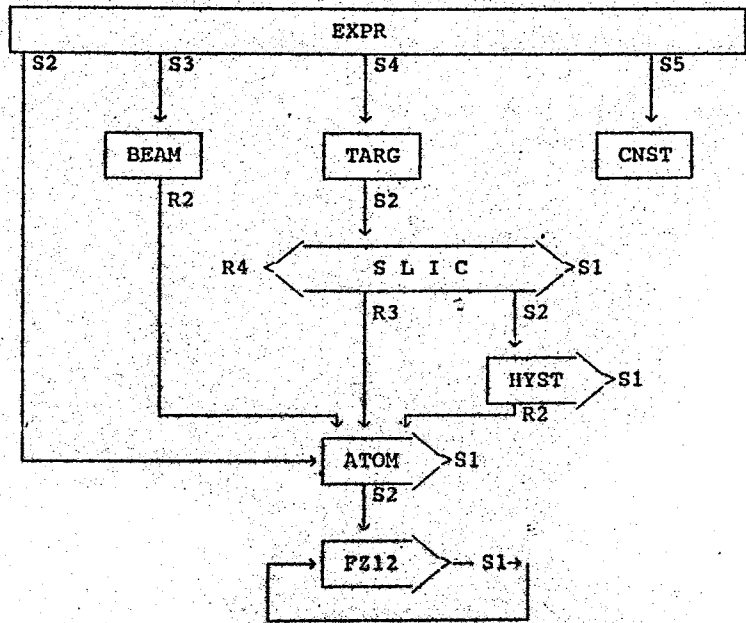
Рис. 5. Зависимость средних потерь энергии ΔE и стратлинга потерь α^2 для различных значений параметра δ .

Рис.6.Зависимость среднеквадратичного радиального отклонения σ_N и σ_E от относительной глубины z/\bar{R}_p для расчета профиля концентрации и переданной энергии. 1-6 соответствует энергиям: 1, 2, 5, 10, 20, 40 кэВ. Штриховой линией показаны значения σ_N из работы "Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей / А.Ф.Буренков и др. - Минск : Из-во БГУ, 1980 г."

Рис.7. Пространственное распределение остановившихся ионов в гетерогенной мишени. По оси ординат указано число ионов/канал. а) и г), соответственно, проекции распределения на направление z - глубина и r - радиальное отклонение.

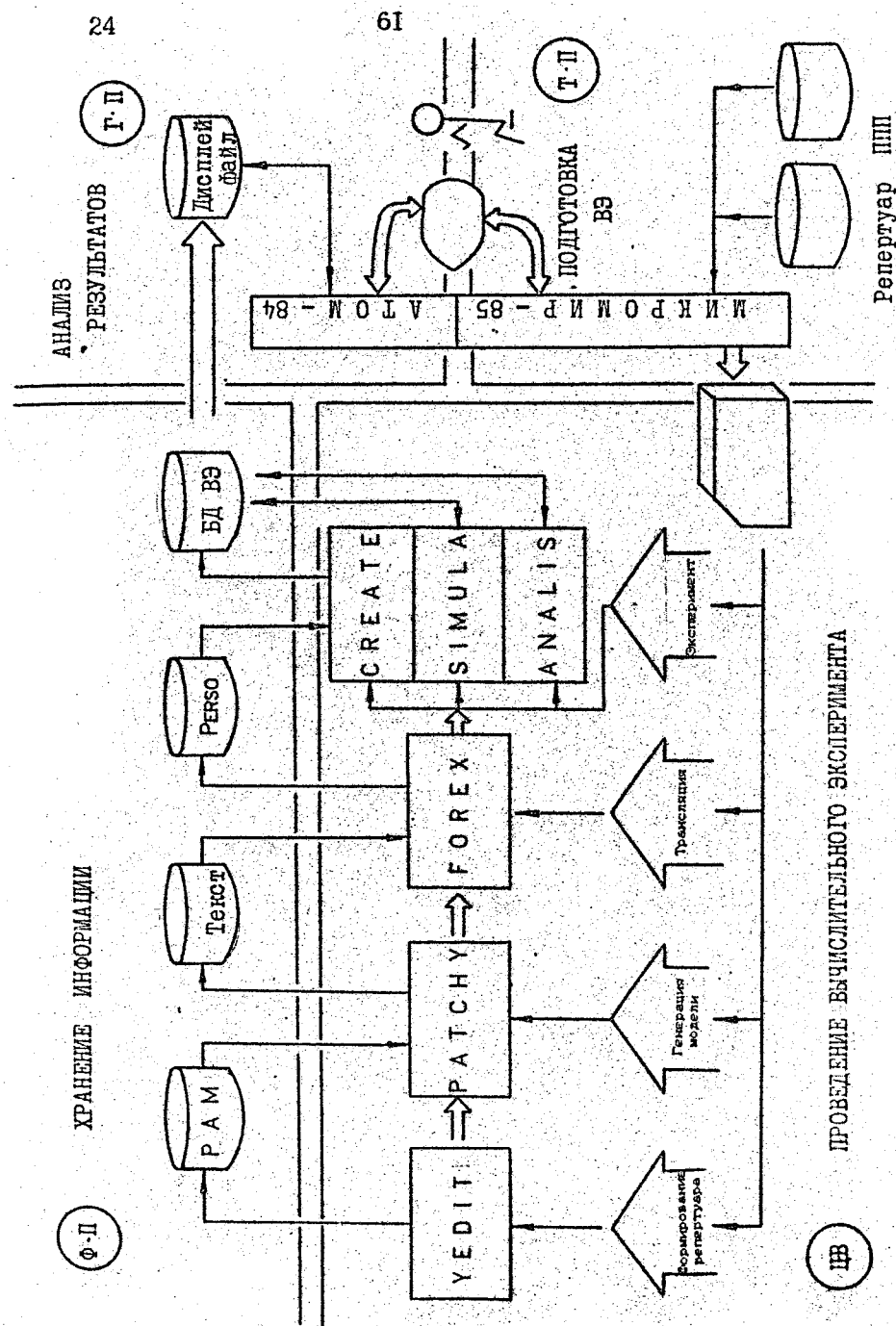
	Центральный вычислитель	Текстовый процессор	Графический процессор	Файловый процессор
Уровень исследователя	МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ			
Прикладной уровень	Проведение вычислительного эксперимента	Подготовка вз	Анализ результатов	На копление и хранение
	Информационная модель изученного процесса	Информационная модель вычислительного эксперимента		
Инструменталь- ный уровень	ОБСП	МИКРОМИП 85	АТОМ 84	FILES-11
	числ. метод			
Системный уровень	Серакс	HYDRA HPLOT		ОС "Дубля"
	Средства связи с ЦВ	Средства связи с ЦЭВИ	Унифицированная транспортная система	
Аппаратный уровень	Канал связи с ЦВ	Коммутатор выч. машин	Контроллер связи с БЭСМ-6	

Рис.1



HYDRA-структура данных информационной модели, описывающей мишень, в которой замедляются частицы

Рис.2.



ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рис.3

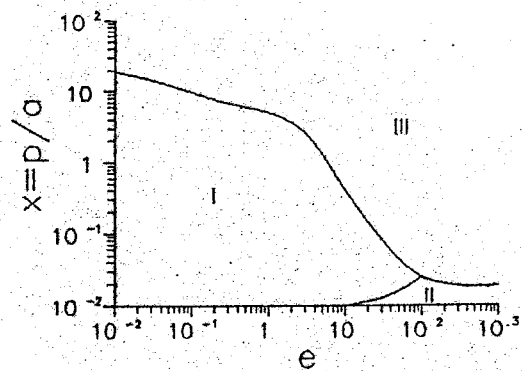


Рис. 4

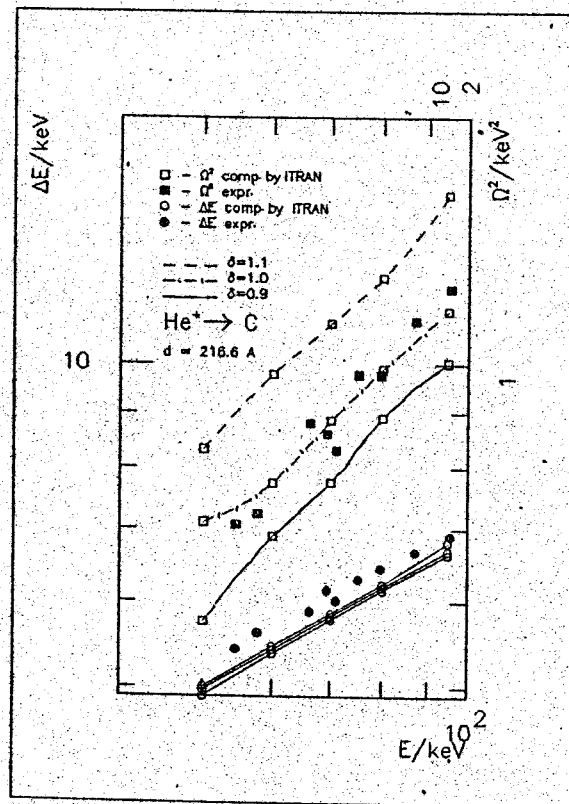


Рис. 5

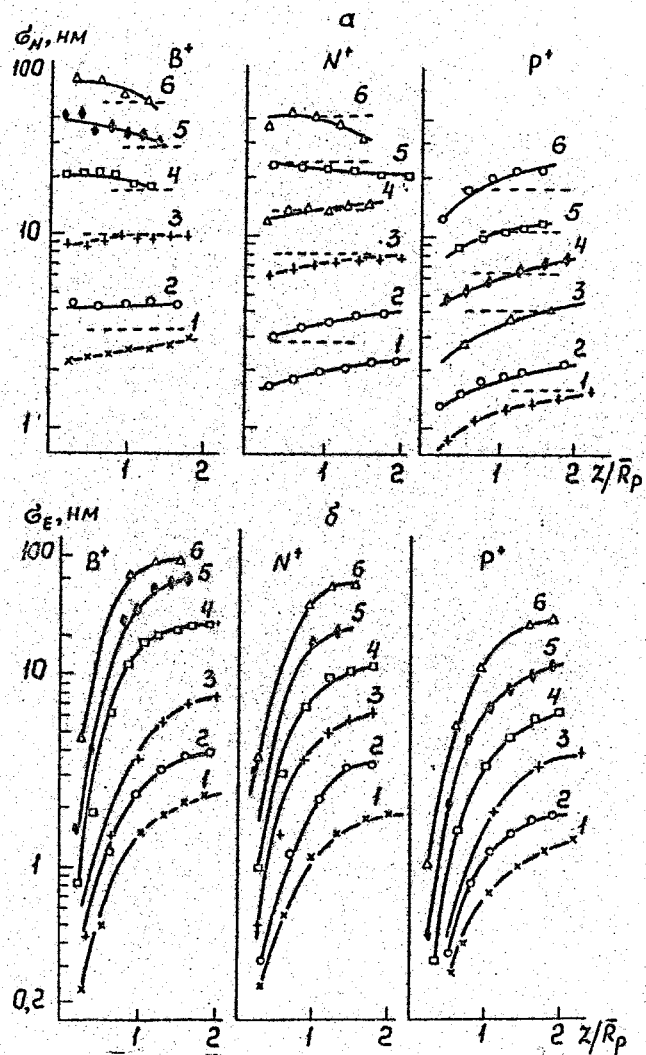


Рис. 6

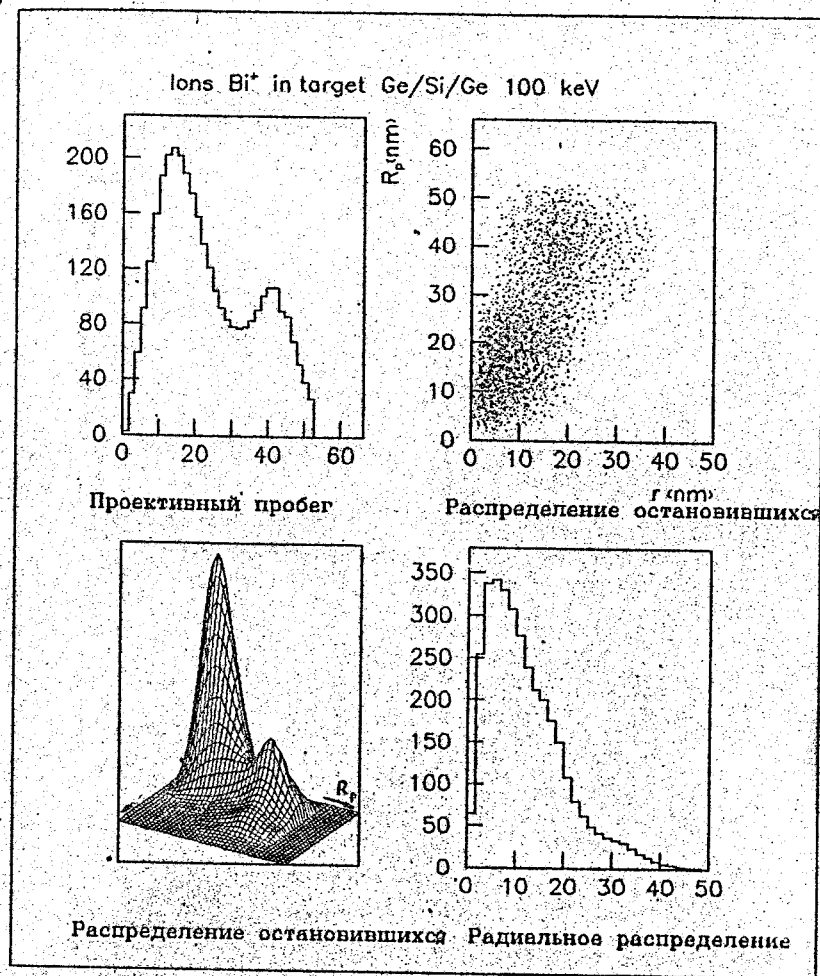


Рис. 7