

Ф 174

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 681.3:537.534

На правах рукописи

Файн Валерий Эмильевич

РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС И ЕГО  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА ИОНОВ  
МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

05.13.16 Применение вычислительной техники,  
математического моделирования и мате-  
матических методов в научных иссле-  
дованиях

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна, 1988 г.

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, Аккерман  
старший научный сотрудник Абрам Фиселевич

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, Нурсанов  
профессор Владислав Владимирович

Кандидат физико-математических наук Саламатин  
Игорь Мариович

Ведущая организация - Институт атомной энергии им.И.В.Курчатова

Защита состоится 22 декабря, 1988 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании специализированного совета Д.047.01.04 при Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований, 141980 г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

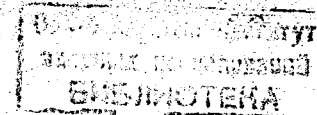
Автореферат разослан 21 ноября 1988 г.

Ученый секретарь Иванченко  
Специализированного совета Зинаида Мироновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Несмотря на успехи, имеющиеся в развитии теории переноса излучения в веществе, основанные на решении кинетического уравнения Больцмана, до сих пор не получено аналитического решения даже для простых задач, не говоря уже о сложных объектах. Такими объектами являются, например, реальные полупроводниковые системы, в которых с помощью техники ионной имплантации создаются заданные структуры. В этих условиях широкое распространение получили вычислительные эксперименты /ВЭ/ /а,б /, с помощью которых, как правило на ЭВМ, такие задачи решаются, используя определенные модельные представления о физике процессов взаимодействия и математические модели, описывающие эти процессы. Для реализации математической модели требуются соответствующие эффективные вычислительные методы. Метод Монте-Карло относится к таким вычислительным методам.

Метод статистических испытаний /метод Монте-Карло/ широко применяется для решения большого круга различных научных и прикладных задач. С его помощью успешно решаются задачи переноса излучения, математической физики, теории массового обслуживания и др. Однако наиболее интенсивно метод используется при решении проблем, связанных с переносом излучения. Прежде всего это обусловлено самой статистической природой процесса движения частиц в веществе. Достоинством его является возможность проведения ВЭ с использованием моделей, в которых осуществлена наиболее полная детализация физических процессов, для любых начальных и граничных условий, в том числе геометрических.



Хорошо известно, что решение трехмерных задач с помощью наиболее совершенных разностных схем приводит к большим временным затратам. В методе Монте-Карло переход от одномерного к трехмерному случаю связан лишь с небольшим увеличением таких затрат.

Простота и эффективность метода Монте-Карло с одной стороны и высокие требования, предъявляемые к быстродействию вычислительных машин, с другой, привели к появлению большого числа уникальных программ, ориентированных на решение узкого класса задач на заданном типе ЭВМ. В результате, на современном этапе, сложилась ситуация, в которой с каждой новой задачей требуется создание нового программного обеспечения, что ведет к стремительному росту затрат на проведение вычислительных экспериментов. С появлением ЭВМ повышенной производительности становится ясно, что традиционные способы создания программного продукта уже не в состоянии удовлетворить растущие потребности науки и техники.

С ростом мощности современных ЭВМ, совершенствованием численных методов и математических моделей круг задач, для решения которых необходимо и целесообразно использовать метод статистического моделирования, постоянно расширяется. Известно, что в таких условиях наиболее оптимальным является создание разнородного пакета прикладных программ /ППП/. Такие пакеты, позволяют решать задачи из заданной предметной области, которые не были сформулированы во время начала их разработки /в/.

Современные ППП /г, д/ должны обеспечивать не только

автоматизацию этапа программирования, но и этапов выбора математической модели, методов и алгоритмов решения задачи, интерпретации результатов. Эти требования настолько противоречивы, что удовлетворить их с помощью какого-либо одного из известных средств автоматизации программирования практически невозможно /е, ж/.

Необходимость же использования программ из библиотек, достижения "пиковой" производительности, графического представления информации, диалогового режима приводят к целесообразности создания для решения задач статистического моделирования распределенных вычислительных комплексов, состоящих из "большой" ЭВМ, например БЭСМ-6, в качестве центрального вычислителя и одной или целой сети миниЭВМ в качестве специализированных файловых, терминальных, графических и т.п. процессоров. В настоящее время не существует для отечественной вычислительной техники достаточно общих методов и средств как для реализации распределенных вычислительных комплексов, так и для создания на их основе интегрированных пакетов программ для проведения вычислительных экспериментов /з/. Поэтому разработка и реализация распределенного вычислительного комплекса на базе ЭВМ БЭСМ-6 и СМ-4, позволяющего освободить БЭСМ-6 от функций по подготовке и обработке текстовой и графической информации, управлению файлами на внешних запоминающих устройствах и терминалами, и его использование для решения задач моделирования взаимодействия ионов различных энергий с веществом является актуальной задачей.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является:

1. Разработка и реализация распределенного вычислительного комплекса на базе ЭВМ БЭСМ-6 и СМ-4, обеспечивающего создание и эксплуатацию больших пакетов прикладных программ.
2. Создание на его базе развивающегося интегрированного пакета программ "ITRIN" для моделирования прохождения ускоренных ионов через вещество.
3. Постановка и проведение с использованием созданных программно-аппаратных средств серии численных экспериментов по переносу ионов в многослойных, гетерогенных мишенях с целью получения новых физических результатов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. В диссертационной работе впервые:

1. Разработан и реализован распределенный комплекс программно-аппаратных средств, обеспечивающих создание и эксплуатацию больших программ моделирования процессов переноса ионов и, в принципе, любых частиц в веществе с применением современных средств автоматизации программирования и эффективное использование имеющегося оборудования.
2. Адаптированы на ЭВМ БЭСМ-6 современные базовые средства для статистического анализа экспериментальных данных - NBOOK и NPLOT.
3. Реализовано на ЭВМ БЭСМ-6 программное обеспечение для обмена информацией с разнотипными ЭВМ /ЕЭ ЭВМ, СМ ЭВМ, персональными ЭВМ/ по протоколу KERMIT /и/, что обеспечивает эффективное использование этой ЭВМ

в составе локальных сетей на базе аппаратуры подключения терминалов.

4. Создан интегрированный мобильный развивающийся ППП "ITRIN" для моделирования переноса методом Монте-Карло.
5. В ходе ВЭ получены данные о пространственном распределении ионов В, N, As, Sb и др., внедренных в аморфный кремний при энергиях от 1 кэВ до 10 МэВ и исследованы дифференциальные характеристики потока ионов водорода и гелия за тонкими мишенями.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ.

В результате работы реализован интегрированный программно-аппаратный комплекс, позволяющий решать на ЭВМ БЭСМ-6 задачи математического моделирования на качественно новом уровне. Комплекс целиком и отдельные его программные и аппаратные компоненты широко используются в Казгосуниверситете, ИФВЭ АН КазССР, ИЯФ АН КазССР, ОИЯИ, ИММ АН КазССР, КазПОВТИ и других организациях при решении задач моделирования двигателей внутреннего сгорания, геофизических и геохимических процессов, обработки फिल्मовой информации и полутонковых изображений, автоматизации проектирования и производства печатных плат, в учебном процессе и т.п. Результаты, полученные в ходе вычислительных экспериментов с помощью ППП "ITRIN", 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.

Использование в ППП базовых и инструментальных средств,

адаптированных на ЭВМ БЭСМ-6, и на машинах серии ЕС, 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 микролитографии, в задачах радиационной защиты, радиационного материаловедения и т.п.

#### СТРУКТУРА РАБОТЫ.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка цитируемой литературы, состоящего из 165 наименований. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста и включает 29 рисунков и 16 таблиц.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

ВО ВВЕДЕНИИ обосновывается актуальность исследований, формулируются основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна и практическая значимость.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ дан литературный обзор различных вычислительных методов, применяемых в теории переноса ионов в веществе, структура и основные этапы вычислительных экспериментов. Анализируются требования, предъявляемые задачами такого класса 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 сопровожде-

ния больших программных систем, а также для статистической обработки и графическому представлению экспериментальной информации. Обосновывается необходимость использования распределенных вычислительных комплексов для проведения сложных ВЭ методом Монте-Карло.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ 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/ 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.

В главе приведены результаты разработки и реализации унифицированного 6-ти уровневого транспортного обеспечения для специализированных процессоров, обеспечивающее 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 ОИЯИ.

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

Программное обеспечение всех специализированных процессоров работает в среде ОС РВ.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ сформулированы физическая и математическая модели процесса взаимодействия и переноса ускоренных ионов в аморфных мишенях, лежащие в основе ППП "ITRIN". Дан состав и краткая характеристика проблемно-ориентированного инструментального обеспечения для решения задач моделирования физических процессов, обеспечивающих создание развитых и мобильных пакетов.

Показана необходимость использования систем динамического распределения памяти средствами системы HYDRA и создания базы программ пакета средствами системы PATCHU-4.

Описываются работы, выполненные автором по адаптации систем PATCHU, NBOOK, 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. 1, табл. I/, пакета ITRIN, состав, структура РАМ-файла и назначение его отдельных частей. Описывается работа пользователя с пакетом, входной язык системы.

имя	!Число !	кол-во связей !			Примечания
банка!	слов !	структ.!	справоч.!		
!данных!	!	!	!		
EXPR !	29 !	9 !	1 !	1	!Описание эксперимента
GPNT !	2 !	2 !	0 !	0	!Описание точек "генерирова-
!	!	!	!		!ния" случайных чисел
LDST !	7 !	1 !	1 !	1	!Описание распределения для
!	!	!	!		!точки "генерирования"
HPNT !	2 !	1 !	0 !	0	!Описание точек "гистограм-
!	!	!	!		!мирования"
LNST !	10 !	1 !	0 !	0	!Описание гистограммы
BEAM !	10 !	0 !	1 !	1	!Описание пучка имплантиру-
!	!	!	!		!емых ионов
TARG !	1 !	1 !	0 !	0	!Общее описание мишени
SLIC !	6 !	2 !	2 !	2	!Описание материала одного
!	!	!	!		!слоя мишени
TATM !	1 !	1 !	1 !	1	!Описание свойств отдельных
!	!	!	!		!атомов, входящих в молекулу
!	!	!	!		!данного слоя мишени
HYST !	42 !	1 !	3 !	3	!Описание текущего взаимодей-
!	!	!	!		!ствия
ATOM !	4 !	1 !	0 !	0	!Описание свойств элементов
!	!	!	!		!таблицы Менделеева

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 "ITRIN". На рис. 2 показана общая схема работы интегрированного пакета и виды заданий, доступных исследователям с различным уровнем подготовки.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена обсуждению физических результатов, полученных в ходе вычислительных экспериментов на реализованном интегрированном программно-аппаратном комплексе с помощью этого пакета при исследовании:

- 1/ прохождения ионов через тонкие пленки с целью отработки новых методов детектирования частиц;
- 2/ внедрения ионов различных энергий в однородные и гетерогенные полупроводниковые структуры;
- 3/ генерирования точечных дефектов;
- 4/ применимости различных модельных представлений об элементарном акте взаимодействия ионов с атомами.

На рис. 3 представлены результаты расчетов  $\sigma_r$  и  $\sigma_z$  - среднеквадратичных отклонений радиальных распределений частиц и энергии для набора энергий ионов на разных глубинах  $z$  в мишени, выраженных в единицах среднего проективного пробега  $\bar{R}_p$ . 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.

Используя полученные в ВЭ данные о пространственном

распределении переданной энергии ионов, мы рассчитали распределение точечных дефектов, генерированных в никелевой мишени ионами гелия различных энергий.

С целью определения возможностей пакета для решения задач, связанных с рассмотрением распределения остановившихся ионов имплантированных в многослойные мишени, были проведен ряд ВЭ с гетерогенными средами и сравнение результатов с известными из литературы экспериментальными данными и расчетами других исследователей. На рис. 4 воспроизводятся результаты одного из таких экспериментов.

В ходе ВЭ выяснилось, что положенные в основу пакета "ITRIN" алгоритмы расчета углов рассеяния нуждаются в уточнении. За основу, при проектировании пакета, была положена схема из работы /и/, в которой интервал по энергии при расчете углов делится на 2 области, в каждой из которой 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 Мольера представлено на диаграмме /рис. 5/.

Следующее уточнение касается величины параметра  $\delta$  в формуле для неупругих потерь энергии в отдельных ион-атомных соударениях, предложенной в работе /л/. Расчеты, проведенные нами, по схеме индивидуальных соударений с различными параметрами  $\delta$  показали, что наилучшее согласие как по средним потерям энергии  $\Delta \bar{E}$ , так и стратглингу  $\Omega^2$

этих потерь с экспериментальными данными из /м/ для ионов гелия, прошедших через аморфную пленку углерода толщиной  $216.6 \text{ \AA}$ , достигается при значении  $\delta = 1.0$ . Из рис. 6 видно, что величина энергетического стратглинга  $\Omega^2$  наиболее чувствительна к выбору  $\delta$ , и именно величина  $\Omega^2$  должна быть критерием уточнения параметра  $\delta$ .

Расчеты основных характеристик распределения по глубине ионов  $B^+$ ,  $N^+$ ,  $P^+$  с энергией до 10 МэВ, внедренных в кремний выполнены с помощью схемы укрупненных соударений. Найденная в расчете зависимость  $R_p(E)$  описывается формулой:

$$\bar{R}_p(E) = aE^{3/2} + bE + cE^{1/2} + d \quad (E \text{ в МэВ})$$

значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  приведены в таблице

Таблица 2

ион	a	b	c	d
B	0.3202	-0.9998	4.2380	-2.0188
N	0.0568	0.4084	0.5038	0.4210
P	0.0302	-0.1250	1.8767	-0.7722

Расчетные значения  $\Delta R_p(E) = \text{const}$  отличаются от экспериментальных значений не более, чем на 30%. Для ионов фосфора расчетные значения  $\Delta R_p$  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. Полученные данные подтверждают эффективность использования ионов в мегаэлектронвольтовом диапазоне энергий для имплантации полупроводников.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ кратко сформулированы основные результаты работы.

I. Создано гибкое программно-аппаратное обеспечение 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 программно формируется в ходе диалога с исследователем.
- получение результатов вычислительных экспериментов от ЦВ на периферийную ЭВМ для их дальнейшей обработки и интерпретации средствами малой ЭВМ.
- эффективное хранение больших объемов сложно организованной информации с использованием современных запоминающих устройств и файловых систем.

II. Создан интегрированный развивающийся пакет прикладных программ "ITRIN" для моделирования замедления ионов с энергиями от 0.1 до 10000 кэВ в аморфных гетерогенных мишенях, удовлетворяющий основным требованиям, предъявляемым к ППП, за счет эффективного использования базового программного обеспечения и средств вычислительной техники, входящих в состав распределенной системы.

III. Проведены ВЭ, по результатам которых можно



сделать вывод о правильности заложенных в основу программно-архитектурных решений, а также математических моделей и алгоритмов, обеспечивающих решение на ЭВМ типа БЭСМ-6 широкого класса задач, связанных с моделированием сложных физических процессов.

IV. С помощью ППП "ITRIN" получены основные характеристики энерговыделения и пространственного распределения остановившихся ионов H, He, N, B, P, S<sup>+</sup> в кремнии и других материалах, представляющих практический интерес для полупроводниковой техники.

V. Разработанные принципы создания интегрированного ППП с использованием средств динамического распределения памяти могут быть с успехом использованы при создании новых, более совершенных пакетов и систем САПР на ЭВМ БЭСМ-6, Альбрус-Б, старших моделях ЕС ЭВМ и т.д.

АППРОБАЦИЯ И ПУБЛИКАЦИИ. Материалы диссертации опубликованы в работах /I-IV/, выполненных автором в 1980-1988 годах. Основные результаты доложены и обсуждены на I Всесоюзной конференции по Р-технологии программирования /Киев, 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./ и республиканских конфе-

ренциях 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, сент. 1982 г./ - 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 Всесоюз. конф. ч.2. Опыт применения.- К. : Ин-т кибернетики АН УССР, 1983. - С.203.
3. Потребеников Ю.К., Файн В.Э. Система PATCHY-4 на ЭВМ БЭСМ-6 // Известия АН КазССР, сер. физ.-мат. - Алма-Ата : Наука, 1982. - № 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.конф. - Алма-Ата, 1980. - С. 60.
5. Кацова А.Л., Сахнова Н.А., Толмачев В.С., Файн В.Э. Анализ набора хромосом с использованием ЭВМ. - Там же. - С. 204.
6. Потребеников Ю.К., Файн В.Э. Версия программы RCETA для ЭВМ БЭСМ-6 // Известия АН КазССР, сер.физ.-мат. - 1981. - № 4. - С. 62-64.

7. Аккерман А.Ф., Файн В.Э. Характеристики пространственного распределения ионов  $B^+$ ,  $N^+$  и  $P^+$ , внедренных в кремний при энергии 1-40 кэВ // Поверхность. - 1987. - № 3. - С.70-75.
8. Соломонов А.П., Файн В.Э. Комплекс программ обмена текстовой информацией между ЭВМ различного типа // Математика и механика. Тез. докл. VII Республиканской конф. по математике и механике. /4 - 6 сентября 1984 г./ Ч. II Вычислительная и прикладная математика. - С. 121.
9. Издебский С.Э., Файн В.Э. Программное обеспечение графического процессора распределенного вычислительного комплекса для решения сложных задач // IV Всесоюзная конференция по проблемам машинной графики. Тезисы докладов. - Серпухов: ИФВЭ, - 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 энергиях до 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 // М.т. конф. молодых ученых ИФВЭ АН КазССР. - Алма-Ата, 1988. - С. 17-20.
12. Файн В.Э., Кудашев М.М. Область применимости импульсного приближения в расчетах переноса ионов в веществе. - там же, - С. 10-15.

13. Аккерман А.Ф., Гибрехтерман А.Л., Файн В.Э., Хлупин С.И., Чернов Г.Я. Система моделей для решения задач электронной литографии методом Монте-Карло. - 1980. - С. 88.
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 : ОИЯИ, 1988. - 44 с. - /ОИЯИ, ВП-10-88-32/.
15. Файн В.Э. Программное обеспечение задач моделирования взаимодействия ионов с веществом методом Монте-Карло. // ЭВМ и научно-технический прогресс. - Алма-Ата : КазГУ, 1987. - С.5-8. - /Деп.КазНИИТИ № 1691 - КА-87 /.
16. Ассонов А.В., Траченкова О.И., Файн В.Э. Устройство сопряжения УВК СМ-4 с коммутатором ЭВМ БЭСМ-6. - там же. - С.25-30.
17. Аниховский В.Е., Иванченко И.М., Карпенко Н.Н., Назаров Ю.А., Мойсенз П.В., Седых Ю.В., Файн В.Э., Щелев С.А., ГРАД ЕС - система машинной графики на ЕС-1061. - Дубна, 1988. - 20 с. /ОИЯИ, Р10-88-227/.
18. Файн В.Э. Каданцев С.Г., Шуклетис В.Г. Система передачи файлов КЕРМИТ на ЭВМ БЭСМ-6. - Дубна : ОИЯИ, 1988. - 8 с.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

- А. Говорун Н.Н. Использование ЭВМ в научных исследованиях // Тр. Межд. совещ. по пробл. мат. модел. в ядерно-физич. исследованиях. - Дубна : ОИЯИ, 1981 -

- С. 13-21. - //ОИЯИ, Д10, И1-81-622/.
- В. Аккерман А.Ф. Система моделей для решения методом Монте-Карло задач прохождения ионов различных энергий через вещество // Материалы Восьмой Всесоюз. конф. "Взаимодействие атомных частиц с твердым телом". - М., 1987. - С. 6-7.
- В. Поляков Г.Г., Ранацкий Л.А. Система поддержки открытого мобильного пакета прикладных программ /нулевой уровень// Пакеты прикладных программ. Сб. научных трудов. - Новосибирск : ВЦ СО АН СССР, 1986. - С. 106-111.
- Г. Котов В.Е. Новая технология математического моделирования и средства ее реализации //Актуальные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. - Новосибирск : Наука, 1985. - С.201 - 207.
- Д. Самарский А.А. Пакеты прикладных программ как средства обеспечения сложных физических расчетов // Перспективы системного и теоретического программирования. Труды всесоюзного семинара. - Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1979. - С.5-14.
- Е. Марчук Г.И. Проблемы, связанные с созданием ВЦП // Мат.конф. "Вычислительные системы, сети и центры коллективного пользования. Ч.1". - Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1980. - С.6-13.
- Ж. Эфрос Л.Б. Некоторые технологические аспекты производства программной продукции. - Новосибирск, 1978. - 21 с.

- З. Каленчук-Порханова А.А., Яковлева Т.С. Техническое и программное обеспечение комплексов и систем комплексирования неоднородных ЭВМ/УСМ. - 1987. - № 2. - С.124-125.
- И. Kermit User Guide. - New York : Columbia university center for computing activities, 1985. - 250 p.
- К. Biersack J.P., Haggmark L.G. A Monte-Karlo Computer Program for the Transport of Energetic Ions in Amorphous targets // Nucl.Instr. and Meth. - 1980. - V.174. - P. 257-280.
- Л. Gen O.S., Robinson M.T. //Nucl.Instr. and Meth. - 1976.- V.132. - P. 647.
- М. Kreyach G., Muller-Jahreis U.//Rad.Effects. - 1977. - V.31. - P. 101.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Общая схема HYDRA -структуры данных ППП ИТВИМ

Рис. 2. Общая схема работы интегрированного пакета и виды заданий, доступных исследователям. (ЦВ - центральный вычислитель, ТП - текстовый процессор, ФП - файловый процессор, ГП - графический процессор).

Рис. 3. Зависимость среднеквадратичного радиального отклонения  $\sigma_r$ ,  $\sigma_z$  от относительной глубины  $z/\bar{R}$ , для расчета профиля концентрации и переданной энергии. I-6 - соответствует энергиям 1, 2, 5, 10, 20, 40 кэВ. Штриховой линией показаны значения  $\sigma_r$  из работы "Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей / А.Ф.Буренков и др. - Минск:Изд-во БГУ, 1980 г.

Рис. 4. 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.

Рис. 5. Области расчета углов рассеяния по различным приближениям потенциала Мольер:

I - по методу /к/,  $\theta = \theta_{ex}$

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

III - по формуле импульсного приближения

$$\theta = (1/\epsilon) \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_i K_1(\beta_i \kappa)$$

где  $\alpha_i, \beta_i$  - параметры функции экранирования в форме Мольер,

$K_1$  - модифицированная функция Бесселя I рода.

Рис. 6. Зависимость средних потерь энергии  $\Delta \bar{E}$  и стратлингга потерь  $\Omega^2$  для различных значений параметра  $\delta$ .

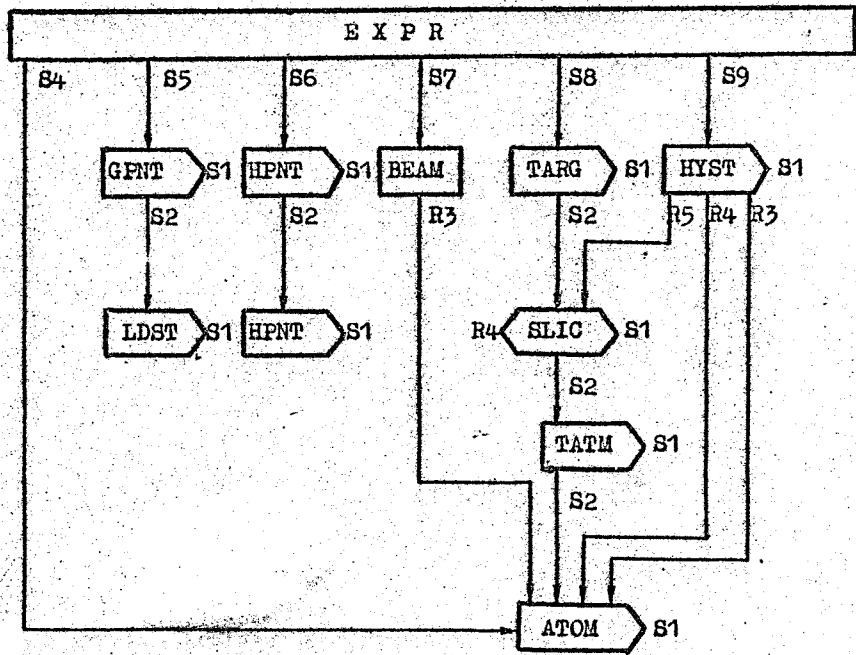


Рис. 1

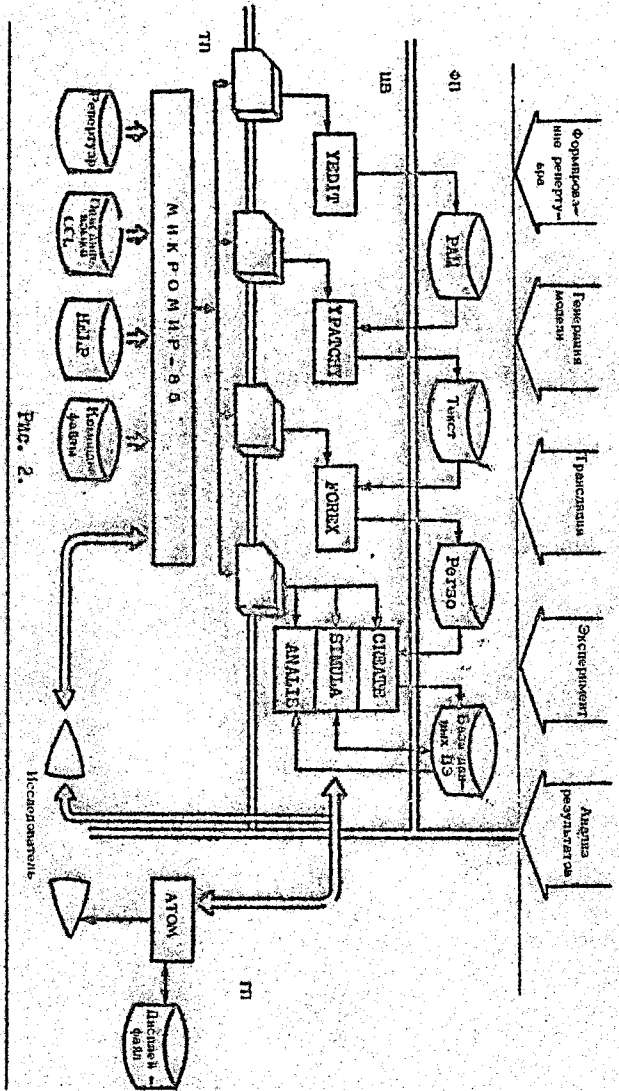


Рис. 2

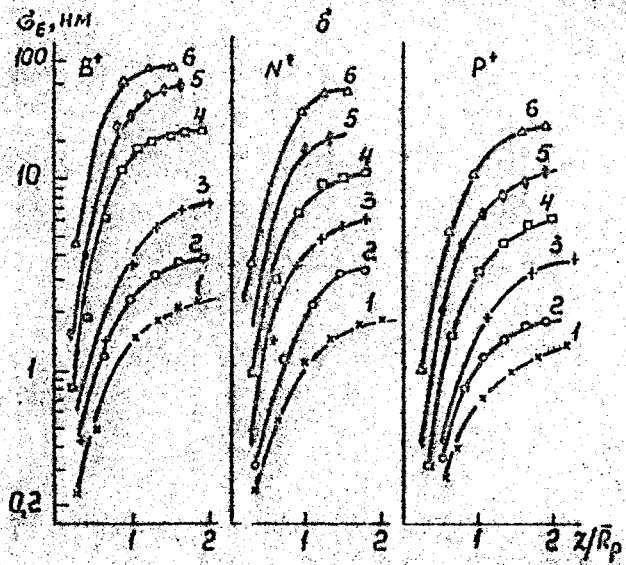
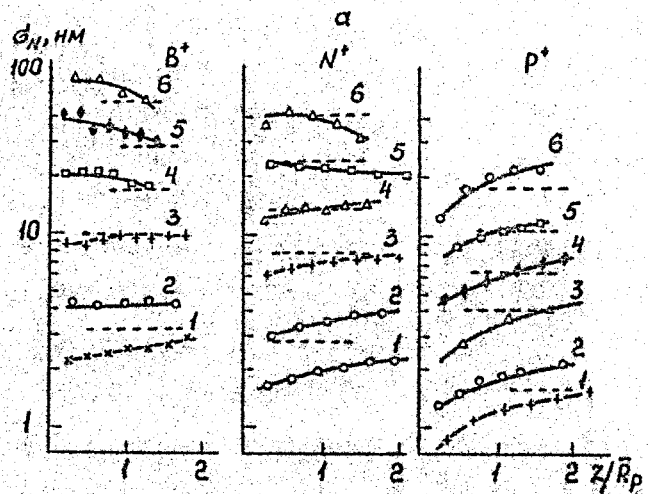


Рис. 3.

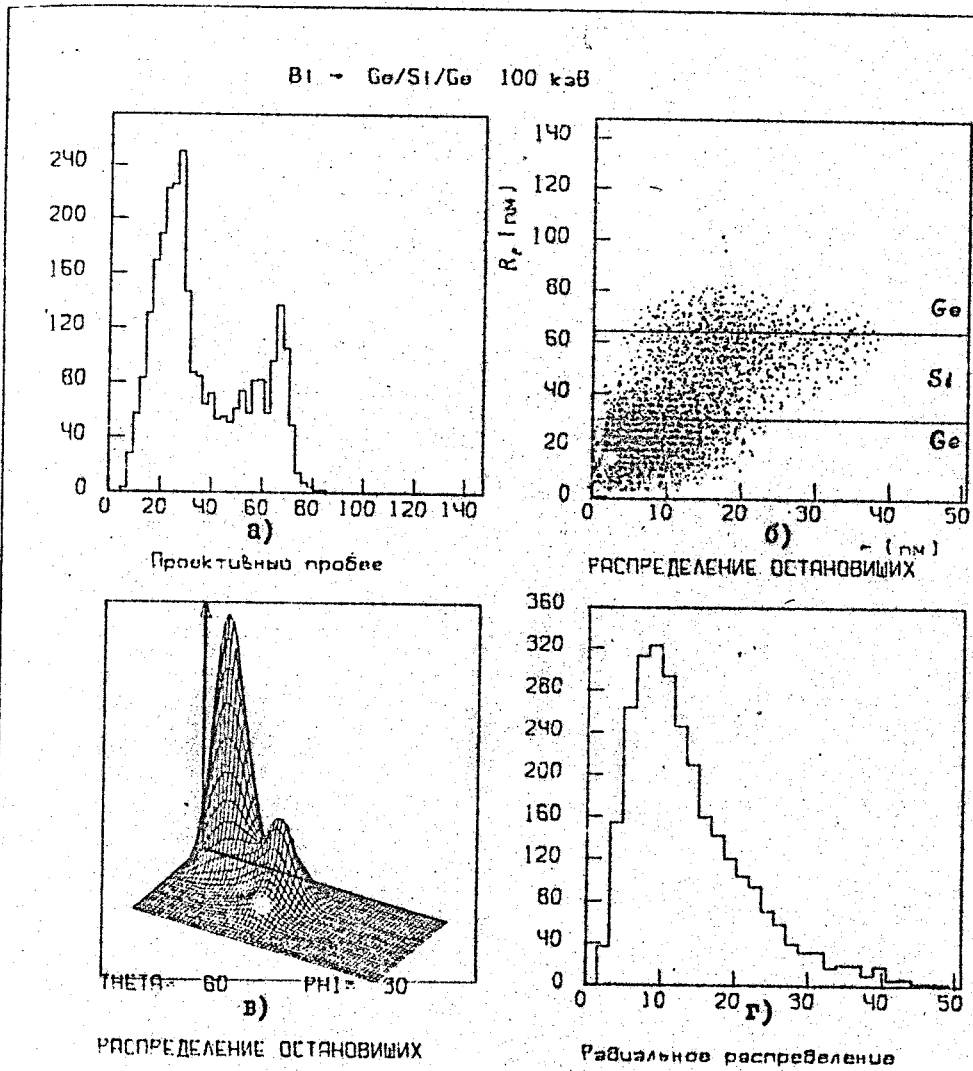


Рис. 4.

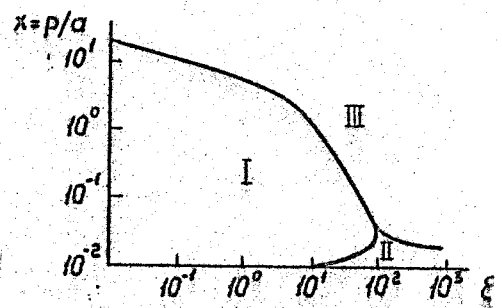


Рис. 5.

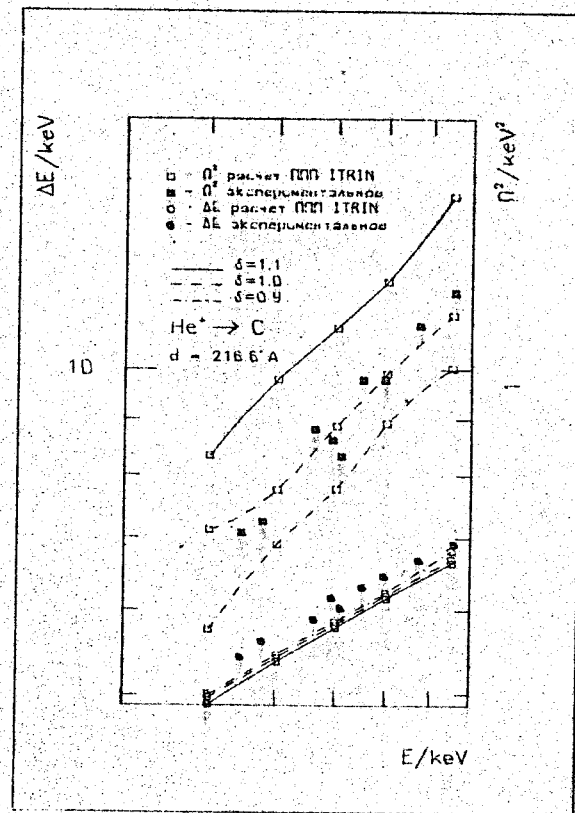


Рис. 6.