

индекс 3624



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ФФИ-776(3)-85

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНФОРМАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО АТОМНОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

С.С. ДАНАГУЛЯН

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАКТА
С МАЛОЙ УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТЬЮ ПУЧКА

ЕРЕВАН-1985

S.S.DANAGULIAN

CALCULATION AND MODELING OF ELECTRON BEAM LINE
WITH A SMALL ANGULAR DIVERGENCE OF BEAM

The algorithm of calculation and optimization of parameters of the Yerevan Physics Institute electron beam line is described. The beam parameters are Monte-Carlo simulated. The effect of experimental factors on final particle distribution is discussed. Coordinate, angular and momentum distributions of the beam particles are presented.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1985

Введение

Для продолжения исследований по изучению природы излучения и рассеяния электронов высоких энергий в кристаллических средах при малых углах влета в Ереванском физическом институте создан тракт выведенных электронов с маленькой угловой расходимостью пучка. Угол расходимости определяется критическим углом каналирования [1], который для кристалла алмаза равен $\sim 0,1$ мр в случае плоскостного каналирования и $\sim 0,2$ мр - в случае осевого, при энергии электронов 4500 МэВ.

В настоящей работе описан процесс расчета электронного тракта. Расчет проводился в два этапа. На первом этапе проводилась оптимизация параметров тракта с выбором необходимого количества магнитных элементов. Оптимизация состояла в нахождении расстояний между магнитными элементами и вычислении градиентов полей линз и напряженностей полей поворотных магнитов для формирования параллельного пучка. На втором этапе проводились численное моделирование электронного тракта с учетом экспериментальных условий и дальнейшая оптимизация параметров тракта. Метод расчета состоит в просчете и наборе статистики большого числа

траекторий, проходящих через канал, с учетом начальных распределений, полученных на эксперименте, и дестабилизирующих факторов, влияющих на качество пучка.

Существует ряд работ, в которых описаны программы, решающие подобные задачи [3-5]. Однако отсутствие пакетов самих программ, а также специфика данной задачи обусловили создание своей программы (TRANSP). Программа написана на языке ФОРТРАН, расчеты проведены на ЭВМ БЭСМ-6.

Оптическая система тракта

Схема электронного тракта приведена на рис. I. Оптическая система состоит из двух дуплетов квадрупольных линз ($Q_1 - Q_4$) и двух отклоняющих прямоугольных магнитов (BM1 и BM2). Протяженность тракта составляет 50 метров. В двух точках тракта помещены коллиматоры C_1 и C_2 , которые очищают пучок от сопутствующего "ореола" и формируют до нужных размеров. Формирование параллельного пучка заканчивается в конце большого экспериментального зала, после чего пучок транспортируется в малый зал, где расположена экспериментальная установка.

Расчет и оптимизация электронного тракта

Расчет и оптимизация тракта проводились с помощью программы TRANSP [2]. Программа предназначена для нахождения оптимальных условий формирования и транспортировки пучков заряженных частиц через магнитно-оптическую систему. Расчет и согласование параметров системы происходит итерационным методом, заключающимся в корректировке параметров предварительной системы, задаваемой пользователем, до тех пор, пока не станут выполняться

требования, накладываемые на конечные параметры пучка. Элементы, которые могут быть рассмотрены в системе, включают в себя квадрупольные линзы, поворотные магниты, сепараторы скорости скрещенного поля. Проводка пучка через магнитную систему осуществляется матричным методом, эффекты второго порядка не учитываются.

В качестве параметров предварительной системы в данной задаче были заданы ориентировочные величины градиентов полей линз, углы отклонения в поворотных магнитах, расстояния между элементами, энергия частиц. В процессе расчета менялись количество линз и их очередность. В целях максимального удаления пучка от нейтрального фона, возникшего в коллиматоре C_1 , знаки углов отклонения в поворотных магнитах выбраны одинаковыми.

Результаты расчета приведены в таблице, в которой используются следующие обозначения: FH - фокусирующая линза, DH - дефокусирующая линза, BM - поворотный магнит, G - градиент поля линзы, H - напряженность магнитного поля поворотных магнитов, ℓ - расстояние до предыдущего элемента. Для линзы Q_1 приведено расстояние до коллиматора C_1 .

Таблица

Магнитный элемент	Тип элемента	Геометрическая длина элемента (м)	ℓ (м)	G (гс/см) H (кгс)	Угол поворота (град)
Q_1	FH	0,9	0,6	350	-
Q_2	DH	0,9	3,57	300	-
BM1	BM	3	1,12	0,62	0,72
Q_3	FH	0,9	9,45	132,15	-
Q_4	DH	0,9	17,21	56,5	-
BM2	BM	1,3	5,85	1,992	I

Численное моделирование электронного тракта

На втором этапе расчета проводилось численное моделирование процесса формирования и транспортировки пучка в малый экспериментальный зал с учетом экспериментальных условий. Учитывались следующие факторы, приводящие к погрешностям: многократное рассеяние частиц пучка в остаточном газе, неоднородность и нестабильность магнитных полей, несоосность элементов системы, начальные координатный, угловой и энергетический разбросы частиц.

Структура программы расчета (TRANSP) приведена на рис.2. Программа написана на языке ФОРТРАН. Моделирование проведено методом Монте-Карло с использованием стандартных подпрограмм RNDM и RANNOR [6] для генерации псевдослучайных чисел.

Программа начинается с чтения данных, содержащих информацию о параметрах электронного тракта и параметрах пучка в начале тракта, зануления массивов и вычисления величин, используемых в процессе счета.

Разыгрыш координат и углов происходит по нормальному закону. В качестве параметров распределений выбраны параметры пучка в начале тракта. Для уточнения последних предварительно рассчитывались координатные распределения частиц в некоторых точках тракта, где был измерен экспериментально профиль пучка как при наличии поля в магнитных элементах, так и без поля. Начальные параметры были заданы произвольно и менялись до тех пор, пока не получилось совпадение расчетного профиля пучка с реальным. В качестве фиксируемых параметров были выбраны местоположения горизонтальной и вертикальной горловин пучка в последней секции кольца ускорителя (они не совпадают) и величины средних координатных и угловых разбросов частиц в местах горловин.

Энергия пучка также разыгрывается по нормальному закону с матожиданием, равным средней энергии электронов и дисперсией $\Delta p/p = 5\%$. Проходя через рассеянное поле последнего кольцевого магнита, пучок приобретает дополнительный разброс, что приводит к сильной корреляции между энергией частицы и ее горизонтальной координатой непосредственно перед первым коллиматором. При проводке пучка через коллиматор C_1 происходит отбор частиц по энергиям и, соответственно, сужение энергетического распределения пучка. Расчет проведен при двух значениях зазора коллиматора C_1 : $3,3 \times 3,3$ мм и $1,2 \times 1,2$ мм. Величина зазора второго коллиматора (C_2) принималась равной 2×2 мм, либо вторичная коллимация отсутствовала. Координатные угловые и импульсные распределения электронов в конце тракта получены при всех перечисленных условиях коллимации пучка.

Проводка пучка через свободный промежуток производится в подпрограмме NLR, которая учитывает рассеяние частиц в остаточном воздухе. Давление воздуха внутри пучкопровода задается в основной программе. Углы многократного рассеяния разыгрываются по нормальному закону с матожиданием, равным начальному углу частицы, и с дисперсией, равной

$$Q_{x,y} = 21,2 \times \sqrt{z/T/2} / E,$$

где E - энергия частицы, z - длина промежутка, T - радиационная длина остаточного газа:

$$T = 760 \times T_a / P,$$

где P - давление газа в торрах, T_a - радиационная длина воздуха при атмосферном давлении.

Подпрограмма QUADRØ осуществляет формирование пучка в магнитной линзе. Координаты и углы рассчитываются матричным

методом по известным формулам [7]. В подпрограмме учитывается параллельный сдвиг и угловая неточность юстировки линзы относительно осевой траектории. Тип линзы задается в основной программе.

Подпрограмма MAGNET осуществляет проводку пучка через прямоугольный отклоняющий магнит. Подпрограмма учитывает нестабильность напряженности магнитного поля. Неоднородность поля учитывается введением эффективной длины магнита.

Запоминание событий происходит посредством подпрограммы NPMI, которая разбивает события на группы по тем или иным признакам.

Подпрограммы PICTURE и AREAPT осуществляют распечатку результатов в виде двухмерных гистограмм. PICTURE проводит заполнение массивов и выбор масштаба гистограмм, а AREAPT [6] - распечатку гистограмм.

Подпрограмма HIST организует распечатку результатов в виде одномерных гистограмм с вычислением средних значений и дисперсий и выбором масштабов гистограмм. В ходе работы она обращается к библиотечной подпрограмме WHIST [6].

Программа TRANSP заканчивает работу и выходит на печать после набора необходимой статистики. Отметим, что программа занимает небольшой объем оперативной памяти ЭМ, и расчет занимает сравнительно малое счетное время, несмотря на обширность выдаваемой информации.

Обсуждение результатов

Основным результатом расчета является получение оптимальных значений параметров электронного тракта, позволяющего формировать и транспортировать параллельный пучок электронов в малый

экспериментальный зал Ереванского физического института.

Важным результатом является также определение области изменения параметров, в пределах которой существенного ухудшения параметров пучка не наблюдается. Имеется в виду неточность юстировки магнитных элементов, уровень вакуума в пучкопроводе, нестабильность полей магнитов и т.д.

Транспортировка пучка осуществлена при величине зазора первого коллиматора $\pm 1,65$ мм, при этом вторичная коллимация отсутствовала. На рис.3-6 приведены двухмерные координатные гистограммы, полученные в четырех точках трассы.

Исследовалось влияние рассеяния частиц в остаточном газе внутри пучкопровода на конечные параметры пучка. Расчет показал, что проводка пучка по воздуху возможна на расстояние не более 20 метров, так как пучок "раздувается" и задевает стенки пучкопровода (диаметр трубы пучкопровода равен 10 см) (рис.7). Для обеспечения требуемых параметров пучка уровень вакуума в пучкопроводе должен быть не хуже $2 \cdot 10^{-1}$ торр.

Исследовался вопрос неточности юстировки магнитных элементов. Пространственное положение пучка чувствительно к несоосности элементов, однако угловые характеристики, как показали результаты расчета, практически не меняются при параллельном смещении линз относительно оси пучка на ± 5 мм и поворотах до $\pm 0,5^\circ$.

Нестабильность полей магнитов $\Delta H/H \approx 0,2\%$ приводит к незначительному ухудшению конечных угловых распределений (стабильность электропитающих устройств магнитов по паспорту $\approx 0,1\%$).

При получении окончательных распределений величины зазоров коллиматоров C_1 и C_2 были выбраны соответствующими условиями физического эксперимента: $C_1 = \pm 0,6$ мм и $C_2 = \pm 1$ мм. Для ис-

следования структуры сформированного пучка на входе во второй коллиматор, последний параллельно смещался относительно оси пучка на несколько миллиметров, и определялись угловые распределения прошедших частиц. Угловые характеристики остаются почти неизменными по всему сечению пучка.

На рис.8 и 10 приведены угловые распределения частиц пучка в малом экспериментальном зале при двух значениях коллимации, на рис.9 - координатные распределения при $C_1 = \pm 0,6$ мм и $C_2 = \pm 1$ мм. Уширение углового распределение на рис.8а связано с увеличением энергетического разброса пучка при увеличении зазора первого коллиматора. Средние величины угловой расходимости пучка (рис.10) в малом зале равны 0,05 мр в горизонтальной плоскости и 0,03 мр в вертикальной плоскости.

На рис.11 приведено энергетическое распределение частиц в малом зале.

В заключение автор выражает благодарность Р.О.Авакяну, А.М.Фролову, В.А.Маишееву и С.В.Тер-Антоняну за полезные обсуждения.

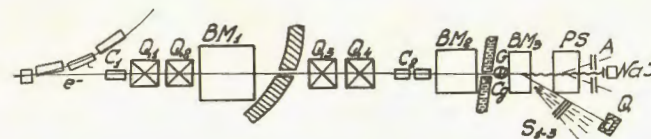


Рис. 1

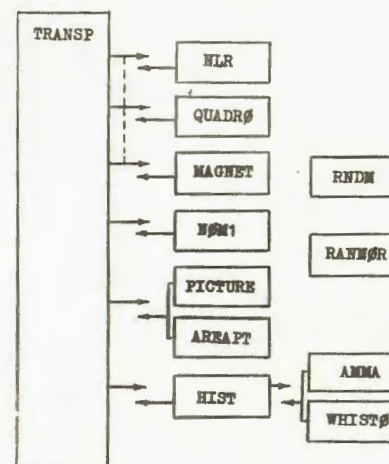


Рис. 2

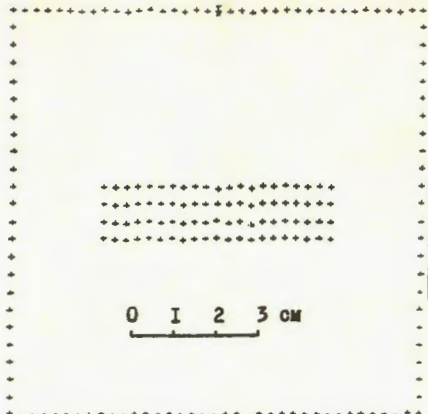


Рис. 3



Рис. 4

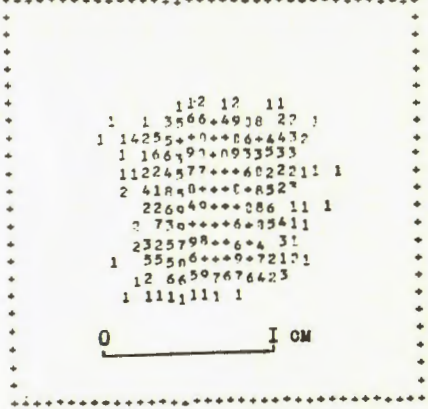


Рис. 5

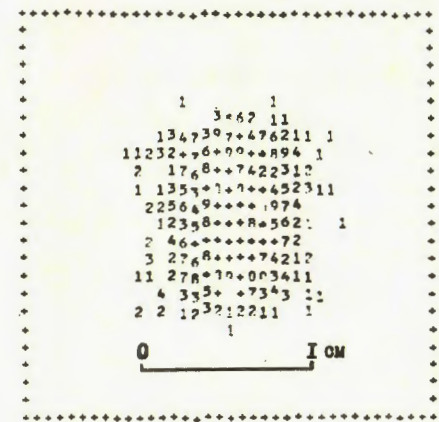


Рис. 6

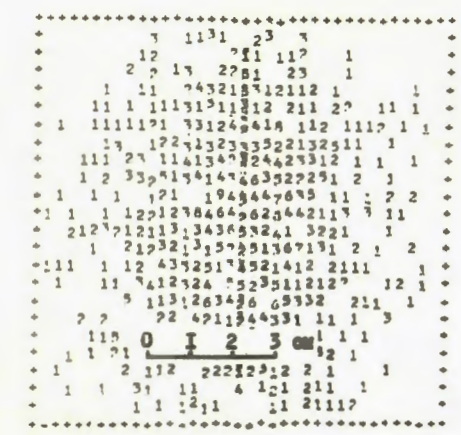


Рис. 7

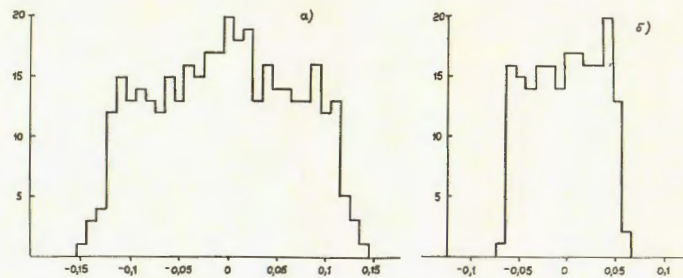


Рис. 8

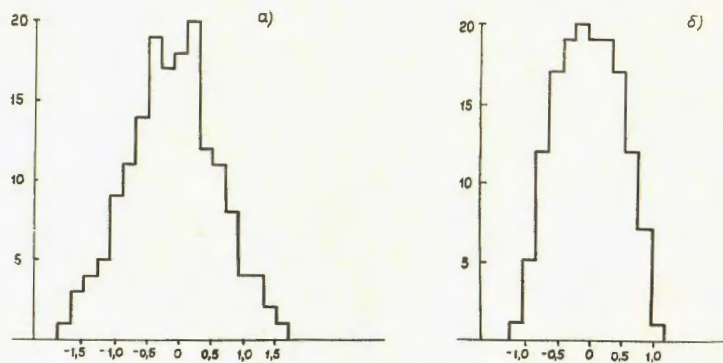


Рис. 9

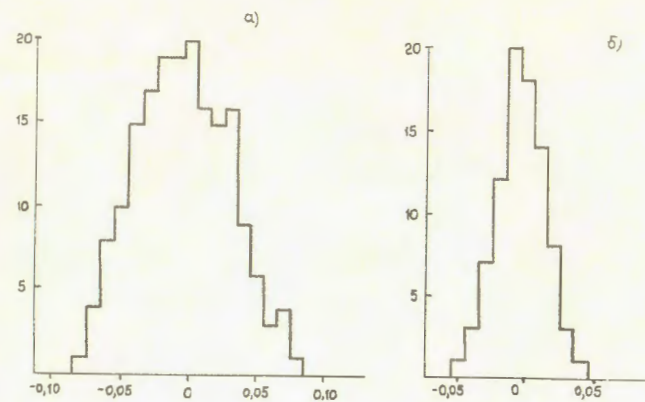


Рис. 10

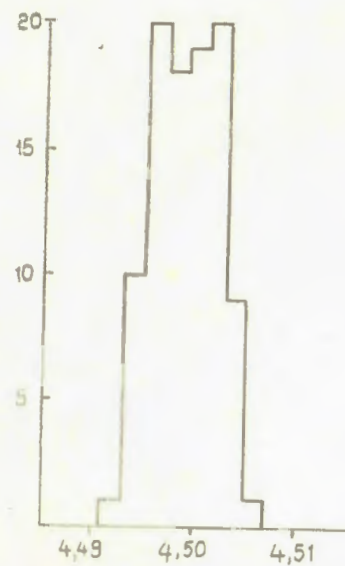


Рис. 11

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. I Схема электронного тракта.
- Рис. 2 Структура программы расчета TRANSP.
- Рис. 3-6 Расчетные профили пучка на входе в коллиматор C_1 , перед линзой Q_3 , на коллиматоре C_2 и в малом экспериментальном зале, соответственно. Величина зазора коллиматора C_1 равна $3,3 \times 3,3$ мм, вторичная коллимация отсутствовала.
- Рис. 7 Расчетный профиль пучка на линзе Q_4 при отсутствии вакуума в пучкопроводе.
- Рис. 8 Угловые распределения частиц в малом экспериментальном зале при величинах зазоров коллиматоров $C_1 = \pm 1,65$ мм и $C_2 = \infty$; а) в горизонтальной плоскости; б) в вертикальной плоскости. Углы даны в миллирадианах.
- Рис. 9 Координатные распределения частиц в малом экспериментальном зале: $C_1 = \pm 0,6$ мм и $C_2 = \pm 1$ мм. Координата приведена в миллиметрах.
- Рис. 10 Угловые распределения частиц в малом зале при коллимации $C_1 = \pm 0,6$ мм и $C_2 = \pm 1$ мм.
- Рис. 11 Энергетическое распределение частиц в малом зале: $C_1 = \pm 0,6$ мм; $C_2 = \pm 1$ мм. Энергия частиц приведена в гигаэлектронвольтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lindhard J., Danske Kgl. Vidensk Selsk. Mat-Fys. Medd, 1965, vol. 35, p. 1
2. Gardner J.W., Whiteside P. TRAMP, NIRL/M/21, 1961.
3. Багдасарян Д.С., Маишеев В.А. Расчет параметров пучков частиц методом Монте-Карло (программа "PIVODU"). Препринт ЕФИ-440(47), Ереван, 1980.
4. Brown K.L., Iselin Ch. Decay TURTLE A computer program for simulating charged particle beam transport systems, including decay calculations. CERN 74-2 (1974).
5. Абрахимов Н.К., Волченко В.А., Рябов Г.А. ЭВМ- программа для расчета пучков первичных и вторичных частиц методом Монте-Карло ("МЕЗОН"). Препринт ЛИЯФ, 205, 1975.
6. Библиотека программ на ФОРТРАНе ОИЯИ, Б1-11-7200, Дубна, 1973.
7. Штеффен К. Оптика пучков высоких энергий. М.: Мир, 1965.

Рукопись поступила 26 ноября 1984 г.

Յ.Տ.ԴԱՆԱԴՄԼՅԱՆ

ՐԱՏՇԵՒ Ի ՄՈԴԵԼԻՐՈՎԱՆԻԵ ԷԼԵԿՏՐՈՆՈՂՈ ՄՐԱԿՏԱ Տ ՄԱԼՈՅ ԱԴԼՈՎՈՅ
ՐԱՏՃՈԴԻՄՈՏՅՈՒ ՄՐՇԿԱ

ՐեդաԿտօր Լ.Ս.ՄուԿայան

ՏեԿնիԿեսԿի ՐեդաԿտօր Ա.Տ.ԱբրաՄյան

ՍօԴիՍանօ Վ թԵԿՅՈՒ 26/ԴՄ-85Գ.
ՕֆՏետնայ թԵԿՅՈՒ. ԱԿ.ԻճԴ.Լ.Դ,Օ
ՅաԿ. ՄԻՍ. № Դ76

ՎՓ-ՕՕ904 Փօրմատ 60x84/Դ6
ՄԻրաՅ 299 աԿՅ. Մ. Դ5 Կ.
ԻնԴեԿՏ 3624

ՕՏթԵԿԱՏԱՆՈ Վ ԵՐԵՎԱՆՏՈՂ ՓԻԿԻԿԵՏՈՂ ԻՆՏԻՏՄՏԵ
ԵՐԵՎԱՆ 36, ՄարԿարյան 2