

ПРОТОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С ЭНЕРГИЕЙ, ПЛАВНО МЕНЯЮЩЕЙСЯ ОТ 10 ДО 100 Кэв, ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА ТЕНЕЙ

А. Г. ПОЛАНДОВ

В настоящей работе описан протонный электростатический ускоритель, предназначенный для исследования структуры кристаллов методом эффекта теней. Особенностью ускорителя является расположение сепарирующего магнита непосредственно под ионным источником. Ток пучка ускорителя 90—120 $\mu\text{ка}$. Энергия протонов меняется от 10 до 100 Кэв

Обнаруженные в последнее время эффект каналирования и эффект теней [1], связанные с рассеянием быстрых заряженных частиц на периодических структурах, получили широкое применение в различных областях физических исследований. Такие исследования проводятся с различными заряженными частицами в широком диапазоне энергии от десятков Кэв до нескольких Мэв. Значительный интерес вместе с тем представляют исследования кристаллов при энергиях частиц от нескольких Кэв до нескольких десятков Кэв. При этих энергиях частицы несут значительную информацию, в частности, о поверхностных свойствах кристаллов.

Изучение указанных выше эффектов в основном проводится на ускорителях, которые в зависимости от целей исследований, характера работ и диапазона энергий имеют различные габариты и снабжены специальным оборудованием. Как правило, эти ускорители имеют большие размеры, и довольно сложны в эксплуатации. Эти недостатки ограничивают применение ускорителей во многих лабораториях, не занимающихся специально ядерными исследованиями. Сконструированный и изготовленный в НИИЯФ МГУ ускоритель может служить прототипом малогабаритной установки, доступной неядерным лабораториям.

В настоящей работе рассматривается ускоритель с энергией, плавно меняющейся от 10 до 100 Кэв, изготовленный для проведения исследований, связанных с эффектом теней на монокристаллах (рис. 1).

Особенностью ускорителя является то, что разделяющий магнит расположен непосредственно под ионным источником. При исследовании поверхностей кристаллов „эффектом теней“ оказывается достаточно иметь пучок плотностью тока около $0,1 \text{ ма/см}^2$. Поэтому, хотя потери пучка в ионопроводе между полюсами магнита довольно значительны (порядка 50%) и фокусировка пучка на входе ускорителя оказывается несколько хуже, чем в осесимметричных фокусирующих системах (эти недостатки можно несколько уменьшить введением дополнительной

электростатической линзы между ионным источником и магнитом), такая система имеет ряд преимуществ:

а) Энергия протонов непосредственно под источником мала (2000 эв) и, следовательно, сепарирующий магнит имеет малые габариты; потребляемая мощность оказывается равной 30 вт.

б) При изменении в широких пределах ускоряющего напряжения не возникает необходимости в регулировании тока магнита, что упрощает эксплуатацию установки.

в) Габариты ускорителя значительно уменьшаются по сравнению со случаем обычного расположения сепарирующего магнита (длина ускорителя около 1,5 м).

г) Трубка ускорителя не перегружается побочными ионными пучками, а также нейтральными частицами, которые приводят к нежелательным вторичным явлениям.

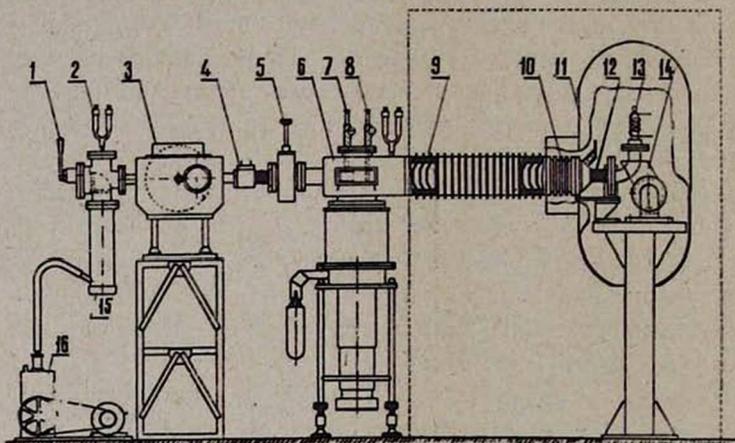


Рис. 1. Общий вид ускорителя: 1—кран, 2—ионизационный манометр, 3—экспериментальная камера, 4—окно, 5—шибер, 6, 7, 8—цилиндр Фарадея и кварцевый сцинтиллятор, 9—ускорительная трубка, 10—электростатическая линза, 11—высоковольтный корпус, 12—сильфон, 13—ионный источник, 14—сепарирующий магнит.

Схема ионного источника представлена на рис. 2. Разряд в колбе создается генератором, собранным на лампах ГИ-7Б (50 МГц). Колба изготовлена из пирекса. Катод источника имеет диаметр отверстия 1,5 мм и высоту 7 мм; он окружен фарфоровым колодцем и кварцевой пластинкой, изолирующей от плазмы. Для питания анода источника используется высоковольтный (2000 в) стабилизированный выпрямитель с коэффициентом стабилизации порядка 0,05%. Стабилизация напряжения анода необходима для улучшения сепарирования пучка, а также для стабильной фиксации его положения. Непосредственно под высокочастотным источником расположен секторный магнит. Влияние рассеянного магнитного поля на высокочастотный разряд уменьшается экранировкой с помощью пермаллоевых экранов, не по-

казанных на рис. 2. Секторный магнит изготовлен из железа—армко. Напряженность поля между полюсами магнита меняется от 1400 до 2000 эрстед. Зазор между полюсами магнита составляет 15 мм. Полюса магнита рассчитаны таким образом, чтобы удовлетворить условиям двойной фокусировки [2] с поворотом пучка на 90° . Радиус траектории ионов составляет 4,5 см. Источник отстоит от магнита на расстоянии 4,5 см. Питание магнита осуществляется стабилизированным напряжением с положительной и отрицательной обратной связью [3]. Ток равен 100 ма. Конструкция ионного источника предусматривает возможность параллельного перемещения ионного источ-

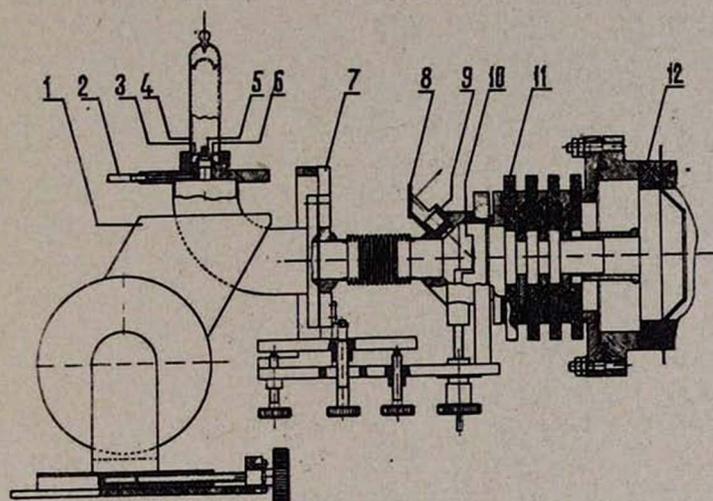


Рис. 2. Высокочастотный ионный источник: 1—магнит, 2—отверстие для напуска водорода, 3—кварцевый изолятор, 4—пирексовая колба, 5—фарфоровый колодец, 6—катод, 7—рамка вертикального перемещения, 8—зеркальце, 9—отверстие, 10—сцинтиллирующий экран, 11—электростатическая линза, 12—ускорительная трубка.

ника относительно полюсов магнита, а также изменения угла падения пучка в пределах 15° .

Фокусировка пучка протонов секторным магнитом перед входом в линзу осуществляется визуально через отверстие 8, снабженное зеркалом, дающим изображение сцинтиллирующего экрана 10 (рис. 2). Электростатическая линза склеена из шайб из свинцового стекла и электродов из нержавеющей стали. Два крайних электрода линзы имеют нулевой потенциал относительно корпуса высоковольтной части ускорителя. Средний электрод присоединен к делителю, на который подается анодное напряжение ионного источника. Трубка ускорителя собрана из фарфоровых колец с внутренним диаметром 190 мм и конусных электродов. Длина трубки 60 см. Желательно, чтобы при минимальной энергии ток делителя превышал ток пучка. В связи с этим в делителе напряжения были использованы сопротивления ВС-10 по

6,8 Мом, удовлетворяющие по мощности наибольшему току. Общее сопротивление делителя равно $23 \times 6,8$ Мом. В качестве высоковольтного источника используется установка В-140-5-2. Сглаживающий конденсатор имеет емкость 0,01 мкф.

Для питания аппаратуры ионного источника был изготовлен разделительный трансформатор с изоляцией первичной обмотки от вторичной на 100 кв. Потребляемая мощность равна 400 вт.

Фокусировка и юстировка пучка производится следующим образом. Как уже упоминалось, фокусировка секторным магнитом производится визуально с помощью сцинтиллирующего экрана 10 (рис. 2). На сцинтиллирующем экране имеется риска, совпадающая с оптической осью линзы. После фокусировки пучка и совмещения его с риской на экране сцинтиллирующий экран убирается с помощью штока и пучок пропускается через трубку ускорителя, в конце которого имеется выдвижной цилиндр Фарадея. Цилиндр Фарадея выставляется по оси трубки. Поворотом источника с фиксированным относительно его магнитом вокруг оси, перпендикулярной к оптической оси ускорителя и проходящей через экран перед линзой, добивались максимального тока в цилиндре Фарадея. При включении ускоряющего напряжения фоку-

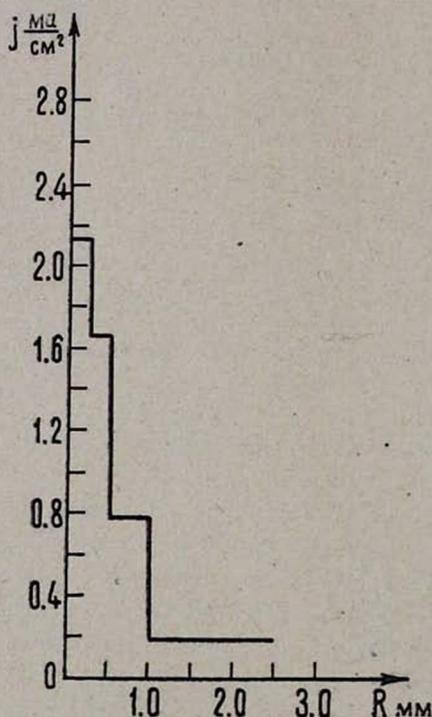


Рис. 3. Распределение плотности тока пучка.

сировка пучка на мишени осуществляется только регулировкой напряжения на линзе.

Полный ток пучка на выходе ускорителя равен 90—120 мка.

Пучок на входе в линзу имеет ромбовидную форму с несколько удлиненным „хвостом“, связанным с наличием в основном пучке час-

тиц с меньшей энергией, появляющихся за счет некогерентности исходного пучка, рассеяния на стенках ионопровода и рассеяния на атомах газа в трубке. Такой же „хвост“ сохраняется и на выходе ускорителя при малых энергиях ускорения (до 20 КэВ). При увеличении энергии ускоренных частиц сечение пучка приобретает круглую форму. Плотность пучка при энергии выше 50 КэВ равна 1 ма/см², при более низких энергиях она уменьшается и при 10 КэВ достигает 0,2 ма/см². Распределение плотности пучка по сечению (рис. 3) определялось следующим образом: пучок протонов при энергии 50 КэВ пропусклся поочередно через диафрагмы с диаметром 0,5; 1; 2; 5 мм. Соответствующий ток был равен 4,2; 14; 32; 50 мка при полном токе пучка 70 мка. Распределение плотности пучка определялось по формуле

$$i_i = \frac{4 (J_{i+1} - J_i)}{\pi (D_{i+1}^2 - D_i^2)},$$

где D_i — диаметр отверстия диафрагмы, а J_i — соответствующий ток.

Из положения двух максимумов H_1^+ и H_2^+ , показанных на рис. 4, видно, что компонента H_1^+ надежно отделяется от молекулярных ионов.

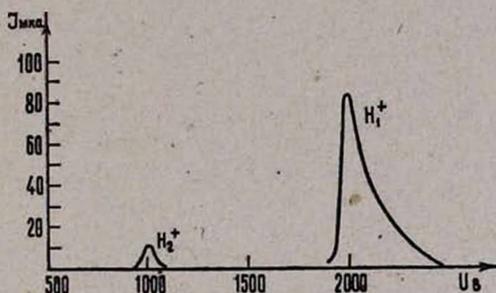
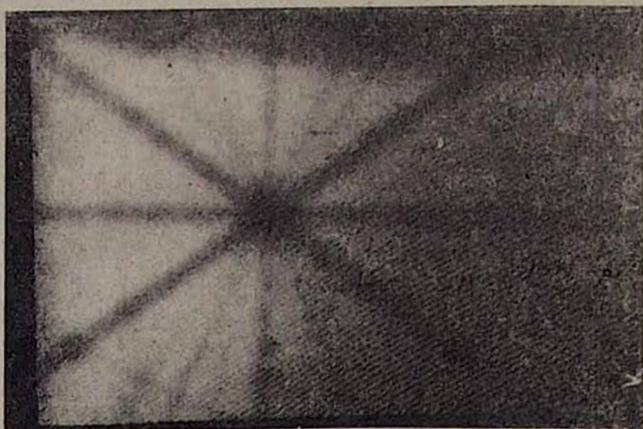


Рис. 4. Зависимость тока пучка от напряжения на аноде источника при постоянном поле магнита (H — конст.).

Суммарный энергетический разброс в ускоренном пучке составляет 20%. Основной вклад в энергетический разброс был за счет пульсации выпрямленного высокого напряжения. Разумеется, коэффициент пульсации может быть легко уменьшен, однако для того круга протонографических задач, для которых создан ускоритель, такая степень монохроматичности пучка является приемлемой.

На рис. 5 показаны примеры протонограмм, полученных на описанном ускорителе при энергиях 90, 54 и 20 КэВ на мишени монокристалла кремния. Ось 110 кристалла была направлена перпендикулярно к плоскости фотопластинки (использовались фотопластинки типа МК) и составляла 135° с направлением падающего пучка протонов. Расстояние от мишени до фотопластинки составляло 90 мм. Диаметр диафрагмы перед кристаллом 1 мм. Довольно высокая контрастность полученных изображений дает основание надеяться на возможность про-



а

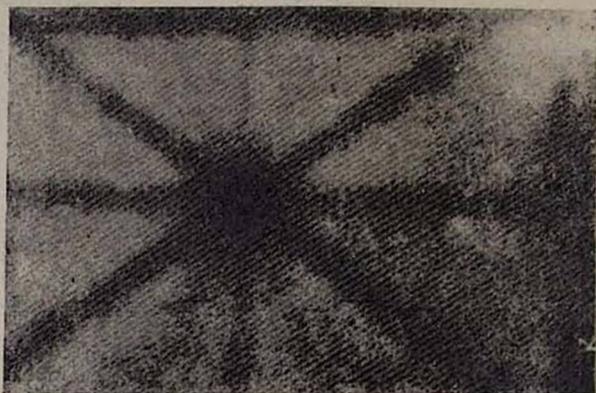


Рис. 5. Протонограммы кремния при энергиях 90, 45, 20 Кэв.

ведения ряда количественных исследований с протонограммами. Такие измерения в настоящее время проводятся.

В заключение считаю приятным долгом выразить благодарность научному руководителю А. Ф. Тулинову за ценные советы при конструировании ускорителя и обсуждение результатов.

Научно-исследовательский институт
ядерной физики МГУ

Поступила 4.XII.1969

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Тулинов, УФН, 87, 585 (1965).
2. W. Gross, Rev. Sci. Inst., 22, 717 (1951).
3. А. А. Санин, Электронные приборы в ядерной физике.

ՇՈՒՔԵՐԻ ԷՖԵԿՏԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՄԱՆ ՀԱՄԱՐ 10—100 ԿԷՎ ՍԱՀՈՒՆ ՓՈՓՈԽՎՈՂ ԷՆԵՐԳԻԱՅՈՎ
ՕԺՏՎԱԾ ՊՐՈՏՈՆԱՅԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻԶ

Ա. Գ. ՊՈՂԱՆԴՈՎ

Աշխատանքում նկարագրված է պրոտոնային էլեկտրաստատիկ արագացուցիչ, որը նախատեսված է շուրքերի էֆեկտի մեթոդով բյուրեղների կառուցվածքի ուսումնասիրման համար: Արագացուցիչի առանձնահատկությունն է սեպարացնող մագնիսի տեղավորումը անմիջականորեն իոնային աղբյուրի տակ: Արագացուցիչի փնջի հոսանքը հավասար է 90—120 մկա: Պրոտոնների էներգիան սահման փոփոխվում է 10—100 կէվ:

A PROTON ACCELERATOR FOR THE ENERGY
SMOOTHLY CHANGING FROM 10 TO 100 KeV TO
INVESTIGATE CRYSTALLINE STRUCTURE BY THE
SHADOW EFFECT METHOD

A. G. POLANDOV

A proton electrostatic accelerator to investigate crystalline structure by the shadow effect method is described. The specific feature of the accelerator is a separating magnet placed immediately under the ion source. The accelerator beam current is 90—120 μ ea. The proton energy changes from 10 to 100 KeV.