

Поступило в Редакцию  
8 декабря 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 10

26 мая 1988 г.

## ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 4.5 ГэВ В ТОЛСТОМ МОНОКРИСТАЛЛЕ АЛМАЗА

Р.О. А в а к я н, А.Э. А в е т и с я н,  
Р.А. А с а т р я н, Г.А. В а р т а п е т я н,  
К.Р. Д а л п а к я н, С.С. Д а н а г у л я н,  
О.С. К и з о г я н, Э.М. М а т е в о с я н,  
С.П. Т а р о я н, Г.М. Э л б а к я н

Теоретическое предсказание [1] о возможности интенсивного излучения заряженных частиц, пролетающих вблизи кристаллографических осей и плоскостей (излучение при каналировании), стимулировано обширные исследовательские работы по этой проблеме как в теоретическом аспекте, так и в экспериментальном.

Такой интерес к новому виду излучения при каналировании частиц прежде всего обусловлен его уникальными характеристиками, такими, как высокая спектрально-угловая плотность излучения, большая степень поляризации фотонного пучка, квазимонохроматичность и т.д.

При создании высокоинтенсивных и узконаправленных пучков фотонов для прикладных задач важное место занимают исследования излучения в толстых кристаллах. Уже первые результаты в этом направлении [2-4] показали интересные особенности в процессе излучения электронов при увеличении толщины кристаллического радиатора. Был обнаружен заметный рост спектрально-угловой плотности излучения при толщинах, значения которых в 20 и более раз превышают расчетные длины деканалирования. С другой стороны очевидно, что с увеличением толщины на спектрально-угловые характеристики излучения существенно могут влиять процессы многократного рассеяния частиц и их радиационные потери. Теоретические исследования влияния многократного рассеяния и радиационных потерь на динамику и характеристики излучения каналированных электронов показали существование оптимальной толщины кристалла  $L_0$ , при которой энергетический выход излучения в заданный телесный угол является максимальным [5], а также привели к новому пониманию явления, связанного с объемным захватом и существованием аномально большой доли частиц, пробег которых в режиме каналирования значительно превышает расчетную длину деканалирования [6].

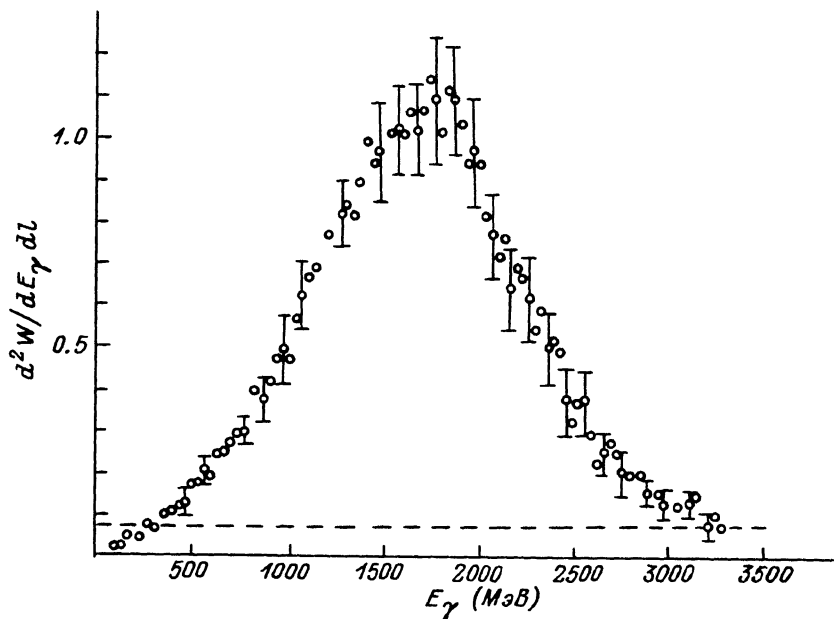


Рис. 1. Энергетический спектр излучения электронов в условиях осевого каналирования.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования спектрально-угловых характеристик излучения электронов с энергией 4,5 ГэВ в монокристалле алмаза толщиной 10 мм в условиях осевого и плоскостного каналирования.

Эксперимент проведен на выведенном пучке электронов Ереванского синхротрона [7]. Сформированный электронный пучок с угловой расходимостью  $\pm 5 \cdot 10^{-5}$  рад и энергией частиц  $(4.50 \pm 0.02)$  ГэВ попадал в вакуумную камеру гониометрической установки, где расположен кристаллический радиатор из алмаза. Точность ориентации мишени была равна  $4.4 \cdot 10^{-5}$  рад. Размеры поперечного сечения пучка на мишени были равны  $(2 \times 2)$  мм<sup>2</sup>. Непосредственно перед мишенью была расположена многопроволочная пропорциональная камера (МПК) с шагом намотки проволочек 1 мм, с помощью которой регистрировались координаты взаимодействия электронов с радиатором. Для измерения спектрально-угловых и интегральных характеристик излучения электронов были использованы спектрометр полного поглощения (СПП) на основе кристалла  $NaJ(Tl)$  и МПК. Размеры входного окна спектрометра составляли  $(13 \times 13)$  см<sup>2</sup>, длина кристалла — 11,7 радиационных длин.

Мониторирование числа электронов производилось с помощью телескопа из сцинтилляционных счетчиков, который регистрировал отклоненные магнитом СП-57 вторичные электроны. Полный диапазон энергии вторичных электронов, охватываемый телескопом, был равен  $(2,5-4,5)$  ГэВ.

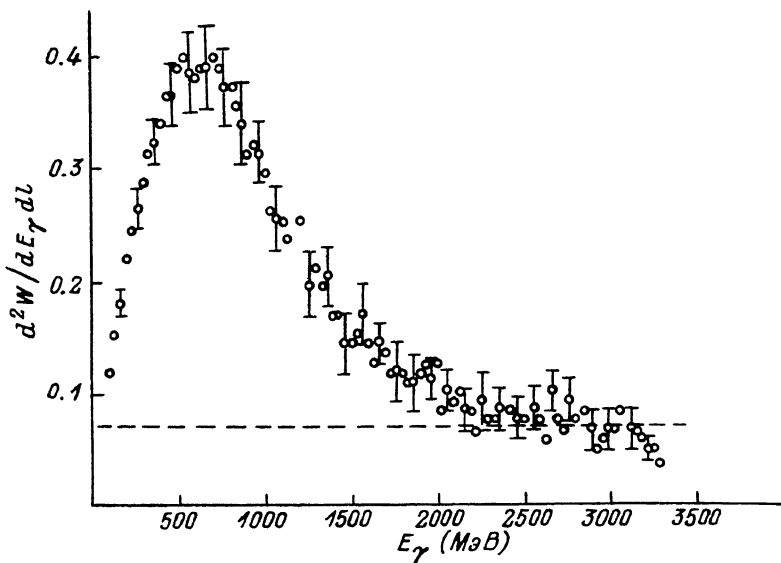


Рис. 2. Энергетический спектр излучения электронов в условиях плоскостного каналирования.

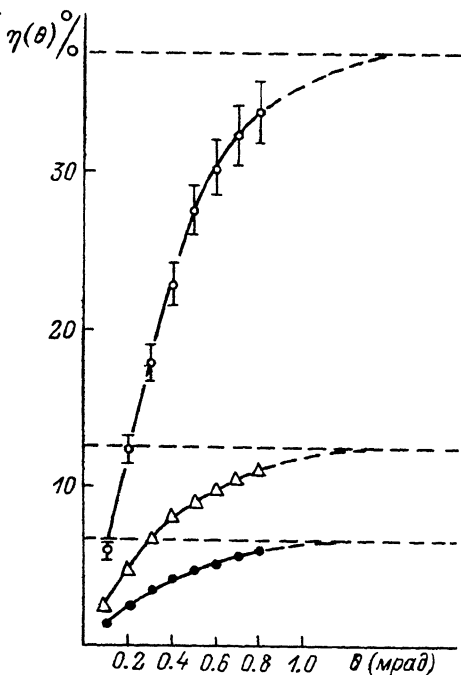
Угловые распределения излученных фотонов измерялись с помощью МПК со встроенным медным конвертором толщиной 1 мм, в котором около 4% из полного числа фотонов конвертировались в электрон-позитронные пары, которые регистрировались второй и третьей пропорциональными камерами и СПП. Максимальная погрешность измерения углов вылета фотонов составляла  $\pm 0.1$  мрад.

Информация с экспериментальной установки, включающая в себя координаты взаимодействия электронов с мишенью и рождения электрон-позитронной пары, а также энергию фотона, через автоматизированную систему съема и накопления информации в стандарте КАМАК, управляемой ЭВМ „Э-60“, передавалось на ЭВМ ЕС-1022 для накопления и предварительной обработки.

В эксперименте измерены спектральные распределения и интегральные выходы излучения электронов в заданный телесный угол в условиях осевого (ось  $\langle 111 \rangle$ ) и плоскостного (плоскость (110)) каналирования. На рис. 1 и 2 представлены энергетические спектры излучения электронов в условиях осевого и плоскостного каналирования. По оси ординат отложена интенсивность излучения  $d^2W/dE_\gamma dl$ , приведенная на единицу длину (см) и на один электрон. Пунктирной линией обозначен уровень интенсивности для дезориентированного кристалла.

В измеренных спектрах наблюдаются пики, интенсивность которых значительно превышает интенсивность излучения в аморфной среде. Здесь так же, как и в наших предыдущих измерениях с меньшими толщинами радиаторов [3], ширины пиков излучения в режиме плоскост-

Рис. 3. Зависимость интегрального выхода излучения от угла вылета фотонов. Горизонтальная пунктирная кривая показывает уровень выхода излучения по всем углам вылета фотонов.



ного каналирования меньше, чем в случае осевого каналирования. С увеличением толщины кристалла наблюдается уширение пиков, падение интенсивности в пике и смещение пиковой энергии в стороны жестких энергий. Трансформация спектров как при осевом, так и при плоскостном каналировании с увеличением толщины, по-видимому, связана с многократным рассеянием электронов в кристалле, выхода электронов из режима каналирования и спецификой спектрометра  $N\alpha J(TL)$ , регистрирующего два или несколько одновременно испущенных фотонов как один фотон суммарной энергии.

Наиболее интересными являются данные об интегральных потерях энергии электронов в заданный телесный угол

$$\eta(\theta) = (1/E_0) \int_0^{E_0} (dW(\theta)/dE_f) dE_f = \Delta E/E_0,$$

где  $\Delta E$  — полная излученная энергия,  $E_0$  — начальная энергия электронов,  $dW(\theta)/dE_f$  — интенсивность излучения в телесный угол с плоскими углами, равными  $\pm \theta$ . На рис. 3 приведены кривые угловых зависимостей полного сброса энергии электрона  $\eta$  (в процентах) для дезориентированной мишени (черные кружочки), в условиях плоскостного каналирования (треугольнички) и в условиях осевого каналирования (светлые кружочки). Экспериментальные ошибки, приведенные на рисунке, являются статистическими.

Из рис. 3 можно сделать следующие заключения.

1. В условиях каналирования в плоскости (110) кристалла алмаза интегральный выход излучения растет практически линейно в зависимости от толщины (см. работу [4]).

2. Наблюдаемая высокая угловая плотность интегрального выхода излучения в условиях осевого каналирования указывает на перспективность использования ориентации кристалла  $\langle 111 \rangle$  для получения интенсивных и узконаправленных пучков фотонов.

3. Основная доля излучения испускается в меньшем угле конуса, чем это следует из расчета среднеквадратичного угла многократного рассеяния электронов в аморфном теле.

Важной характеристикой фотонного пучка является величина яркости излучения  $\Delta E/\Delta \Omega$  - полная излученная энергия в единичный телесный угол, которая достигает своего максимального значения на длине  $L_0$  [5]. В осевом случае измеренная яркость излучения  $\Delta E/\Delta \Omega = (0.53 \pm 0.04) \cdot 10^9$  МэВ/ср, что примерно вдвое меньше, чем в работе [5]. Возможно, это несогласие связано со специфическими особенностями характера многократного рассеяния электронов, пролетающих вблизи кристаллографических осей, которые не учтены в теоретической работе.

Из наших данных следует, что вопрос определения оптимальной толщины  $L_0$  как при плоскостном, так и при осевом каналировании электронов для энергии 4,5 ГэВ остается открытым. Необходимы дальнейшие исследования зависимости излучения от толщины в условиях каналирования частиц в различных монокристаллах.

### Л и т е р а т у р а

- [1] К и т а к о в М.А. - Phys. Lett., 1976, 59A, р. 17.
- [2] Б у л г а к о в Н.К., В о д о п њ я н о в А.С., Г о л о в а т ю к В.Н. и др. - Препринт ОИЯИ-1-83-640, Дубна, 1983 г.
- [3] А в а к я н Р.О., А в а к я н Э.О., А в е т и с я н А.Э. и др. - Препринт ЕФИ 704(19)-84, Ереван, 1984.
- [4] А в а к я н Р.О., А в е т и с я н А.Э., А р м а г а н я н А.А. и др. - Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, в. 22, с. 1393.
- [5] Б а й е р В.Н., К а т к о в В.Н., С т р а х о в е н к о В.М. - Препринт ИЯФ 84-11, Новосибирск, 1984.
- [6] Т е л е г и н В.И., Х о к о н о в М.Х. - ЖЭТФ, 1982, т. 83, с. 260.
- [7] А в а к я н Р.О., А в е т и с я н А.Э., А г а р о н я н А.В. и др. - Препринт ЕФИ-776(3)-85, Ереван, 1985.

Ереванский физический институт

Поступило в Редакцию  
5 января 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 10

26 мая 1988 г.

### ВКЛАД АТОМНОГО ФАКТОРА В АНИЗОТРОПИЮ ВЫХОДА УПРУГО ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛЬФРАМА

М.В. Г о м о ю н о в а, И.И. П р о н и н

В последние годы в связи с продолжающимся интенсивным развитием методов электронной спектроскопии поверхности твердого тела большое внимание уделяется изучению механизма упругого отражения электронов средней энергии от твердого тела. Было обнаружено, что в угловых распределениях электронов, упруго отраженных от поликристаллов, проявляются „аномалии“, связанные с дифференциаль-