

УДК 539.124+539.124.6:548.55

Об особенностях взаимодействия электронов и позитронов высоких энергий с монокристаллами

Г.А.Бочек, В.И.Витко, И.А.Гришаев, Г.Д.Коваленко, В.И.Кулибаба,
 В.А.Мороховский, Б.И.Шраменко (ХФТИ АН УССР)

Вопросу взаимодействия электронов высоких энергий с периодической структурой кристалла посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ [1-7]. В этих работах взаимодействие электронов с кристаллом рассматривалось в рамках борновского приближения; показано согласие теории с экспериментом. Однако Феретти [8] указывал на неприемлемость борновских приближений для описания процессов взаимодействия частиц с кристаллами при высоких энергиях.

В работах [9, 10] было экспериментально обнаружено различие в сечениях тормозного излучения электронов и позитронов. С целью изучения зависимости сечения тормозного излучения от знака заряда частицы Ахиезер А.И., Фомин П.И. и Шульга Н.Ф. получили сечение тормозного излучения во втором борновском приближении по потенциалу цепочки атомов [11] и показали, что когерентный эффект увеличивает вклад второго и высших борновских приближений. Согласно результатам этой и последующих работ [12-14] борновское приближение не применимо в той области, где формулы, полученные в этом приближении, описывают эксперимент на электронах.

В свете этих фактов представляло интерес более глубокое исследование взаимодействия электронов и позитронов высокой энергии с кристаллом.

Нами проведено экспериментальное исследование влияния знака заряда легких частиц на процессы тормозного излучения и упругого рассеяния, проявление эффекта каналирования в процессе аннигиляции позитронов. Исследования проводились на линейном ускорителе электронов ЛУЭ-2 ГэВ Харьковского физико-технического института АН УССР.

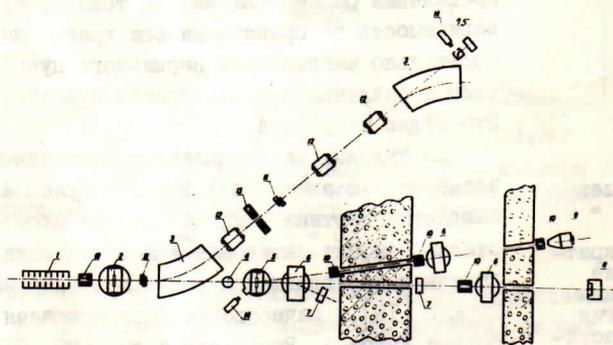


Рис. 1. Схема расположения экспериментального оборудования

ионизационной камерой 7 или квантометром 8. Коллиматоры 10 и очищающие магниты 6, установленные под определенным углом к направлению первичного пучка частиц, служили элементами формирования пучка аннигиляционного излучения, спектры которого измерялись γ -спектрометром 9.

На рис. 2 представлены зависимости полного потока энергии тормозного излучения позитронов и электронов с энергией 1 ГэВ на кристалле кремния толщиной 185 мкм от угла между направлением пучка и осью кристалла [110] в плоскости (001) [15]. Видно, что интенсивность тормозного излучения

Схема размещения экспериментального оборудования изображена на рис. 1. Пучок электронов (позитронов) с энергией 1 ГэВ, энергетическим разбросом $\frac{\Delta E}{E} = 1,5\%$ и расходимостью $2 \cdot 10^{-4}$ рад направлялся на монокристалл кремния, установленный в гониометре 2 или 5. Рассеянные электроны (позитроны), в зависимости от вида эксперимента, регистрировались твердотельными детекторами 4 или ионизационной камерой 15 после энергетического анализа магнитом 3. Поток энергии тормозного излучения измерялся ионизационной камерой 7 или квантометром 8.

позитронов минимальна, а интенсивность тормозного излучения электронов максимальна, когда направление кристаллографической оси $[110]$ совпадает с направлением пучка частиц ($\Phi = 0$).

Такое различие интенсивностей тормозного излучения электронов и позитронов, движущихся вдоль кристаллографической оси кристалла, обусловлено различными распределениями прицельных параметров для частиц разного знака заряда (в отличие от электронов позитроны каналюруют), в результате чего радиационные потери электронов больше, чем радиационные потери позитронов.

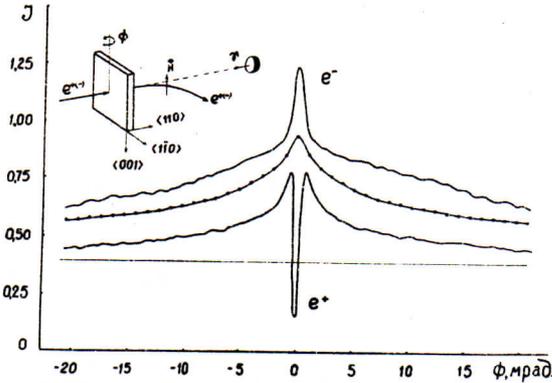


Рис. 2. Ориентационные зависимости потока энергии тормозного излучения позитронов и электронов на кристалле кремния: — эксперимент; - - - расчет по формулам, полученным в борновском приближении; прямая — изотропная часть потока энергии, обусловленная тепловыми колебаниями атомов

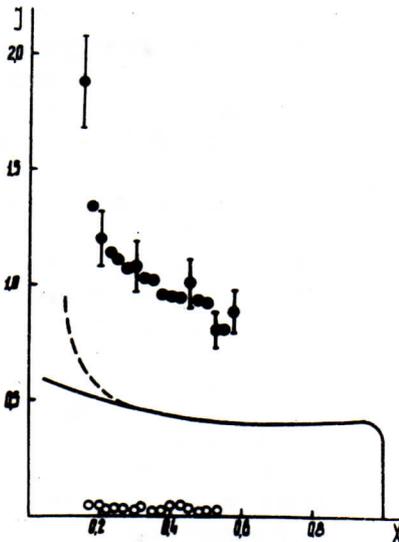


Рис. 3. Спектры тормозного излучения электронов и позитронов на кристалле кремния ($\Phi = 0$): ● — электроны, ○ — позитроны, — — расчет в борновском приближении; - - - учет многократного рассеяния для электронов; — · — отношение интенсивности тормозного излучения с кристалла к интенсивности с аморфной мишени; X — энергия γ — квантов в единицах начальной энергии частицы ($X = E_0 - E/E_0$)

Угловые распределения электронов и позитронов, рассеянных на кристалле, имеют кольцеобразную форму с максимумом интенсивности в направлении первичного пучка и минимумом в направлении оси кристалла. В отличие от электронов, значительная часть пучка позитронов, каналюруя параллельно плоскостям (001) , проходит через кристалл, не рассеиваясь, и образует локальный максимум плотности в направлении первичного пучка. Когда пучок позитронов направлен вдоль оси кристалла $[110]$ ($\Phi = 0$), то через кристалл, не рассеиваясь, проходит около 98 % всех позитронов, в отличие от электронов, которые в тех же условиях рассеиваются эффективнее, чем на разориентированном кристалле.

Интересно выяснить влияние каналювания на спектральные распределения тормозного излучения электронов и позитронов. Нами измерены спектры тормозного излучения электронов и позитронов на кристалле кремния толщиной 240 мкм, когда выполняются условия осевого каналювания ($\Phi = 0$). В этом опыте, как и ранее [16], спектры γ — квантов измерялись по вторичным электронам [17] (позитронам) и нормировались на величину интенсивности тормозного излучения с аморфной мишени алюминия.

Результаты измерений показаны на рис. 3. Подавление интенсивности тормозного излучения позитронов по сравнению с электронами связано с эффектом каналювания, при этом имеет место равномерное уменьшение интенсивности по всему спектру; резкий подъем интенсивности тормозного излучения в области малых энергий (для электронов) объясняется влиянием многократного рассеяния, которое увеличивает вклад когерентных процессов.

Из рис. 2 и 3 видно, что выполненные в борновском приближении расчеты ориентационной зависимости полного потока энергии и спектральных распределений тормозного излучения не согласуются с экспериментальными данными.

Исследование упругого рассеяния электронов [18] и позитронов на кристалле кремния толщиной 185 мкм показало, что угловые распределения рассеянных частиц тоже проявляют зависимость от ориентации оси кристалла относительно направления первичного пучка частиц и различны для электронов и позитронов. Это видно из рис. 4.

В угловых распределениях рассеянных электронов с энергией 1 ГэВ (см. рис. 4) наблюдается картина тени от цепочки атомов кристалла (эффект затенения или блокировки), аналогичная наблюдавшейся ранее при энергии 20 МэВ [19] и качественно согласующаяся с работами Кудрина, Воробьева и др. [20, 21], относящимися к энергии 20 МэВ.

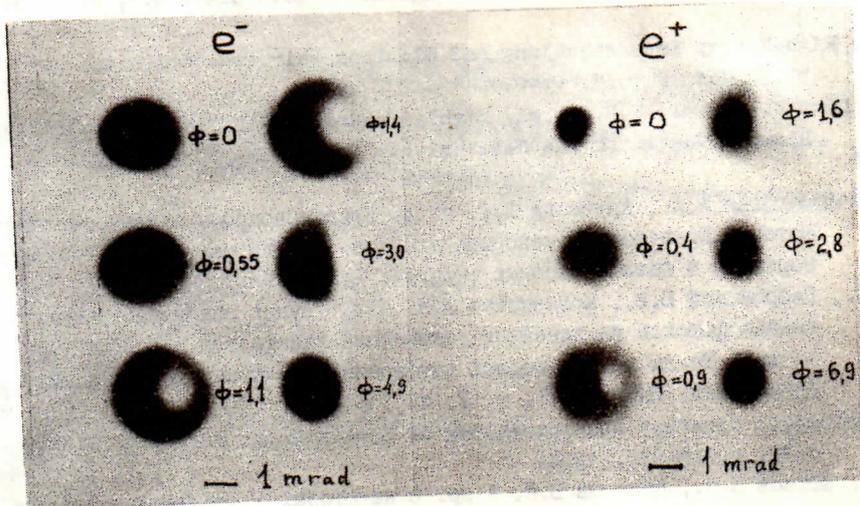


Рис. 4. Угловые распределения электронов и позитронов с энергией 1 ГэВ, рассеянных на кристалле кремния, Φ - угол между направлением пучка и осью $[110]$, мрад

Мы предположили [22], что значительное уменьшение интенсивности тормозного излучения и отсутствие уширения углового распределения для каналирующих позитронов увеличивает отношение величин интенсивностей аннигиляционного и тормозного излучения позитронов в кристалле. Исследование процесса аннигиляции позитронов на лету в монокристалле кремния толщиной 300 мкм проведено нами для случаев, когда позитроны движутся в кристалле в режиме каналирования ($\Phi = 0$), и когда режим каналирования отсутствует ($\Phi = 3 \cdot 10^{-2}$ рад). Спектры γ -квантов измерялись под углом $\Theta = 2 \cdot 10^{-2}$ с помощью черенковского спектрометра полного поглощения с энергетическим разрешением 13% при энергии 1 ГэВ по методике работы [23] (см. рис. 1).

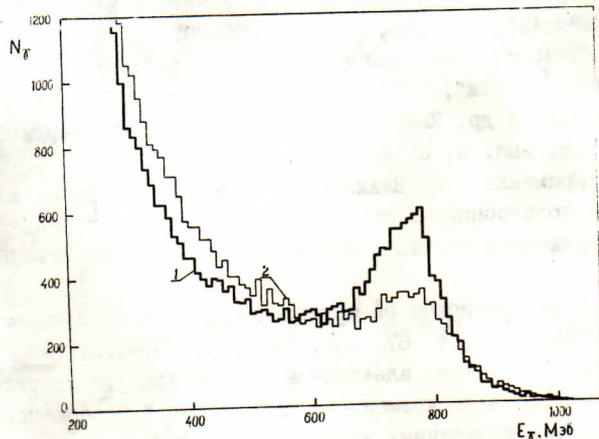


Рис. 5. Спектры аннигиляционных γ -квантов для двух ориентаций оси $[111]$ монокристалла кремния относительно направления позитронного пучка:
гистограмма 1: $\Phi = 0$;
гистограмма 2: $\Phi = 3 \cdot 10^{-2}$ рад

дической структурой кристалла не находят теоретического объяснения в рамках борновских приближений, что указывает на необходимость развития теории, которая позволила бы количественно описать наблюдаемые явления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тер-Микаелян М.Л. Интерференционное излучение сверхбыстрых электронов. - "ЖЭТФ", 1953, т. 25, вып. 2, с. 296-306. Тер-Микаелян М.Л. Рассеяние быстрых электронов в кристалле. - "ЖЭТФ", 1953, т. 25, вып. 2, с. 289-295.
2. Uberall H. High-Energy Interference Effect of Bremsstrahlung and Pair Production in Crystals. - "Phys. Rev.", v.103, p.1055-1063, 1956.

Измеренные спектры представлены на рис. 5. Гистограммы 1 и 2 соответствуют углам $\Phi = 0$ и $\Phi = 3 \cdot 10^{-2}$ рад. Измерения выполнялись так, чтобы число зарегистрированных γ -квантов для гистограмм 1 и 2 было одинаковым (площади под гистограммами равны).

Для каналирующих позитронов интенсивность тормозного излучения $J_{\text{торм}}$ падает в 4,4 раза, а интенсивность аннигиляционного излучения $J_{\text{анниг}}$ в 1,6 раза. При этом отношение $J_{\text{анниг}}/J_{\text{торм}}$, которое является показателем качества пучка монохроматических γ -квантов, увеличивается в 2,7 раза [24].

Приведенные экспериментальные результаты различия взаимодействия электронов и позитронов высокой энергии с перио-

3. Barbiellini C., Bologna G., Murtas C.P. Crystal method for Measuring the linear Polarisation of Photons in the Multi-GeV Region. -"Nuovo Cimento.", v.28, p.435-440, 1963.
4. Diambri G. High-Energy Bremsstrahlung and Electron Pair Production in Thin Crystals. - "Rev. Mod. Phys.", v.40, p.611-620, 1968.
5. Bologna G., Lutz C., Schuls M.D. et al. Highly-Polarized Coherent Bremsstrahlung from a Diamond Target in the GeV-Region.-"Nuovo Cimento", v.42, p.844-855, 1966.
6. Авакян Р.О., Армагания А.А., Арутюнян Л.Г. и др. Квазимонохроматический поляризованный пучок фотонов Ереванского ускорителя.-В кн.: Труды международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий. Дубна, Изд. ОИЯИ, 1971, т. 2, с. 746-752.
7. Горбенко В.Г., Жебровский Ю.В., Колесников Л.Я. и др. Пучок квазимонохроматических поляризованных фотонов на линейном ускорителе электронов 2 ГэВ ФТИ АН УССР. -В кн.: Труды международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий. Дубна, Изд. ОИЯИ, 1971, т. 2, с. 738-745.
8. Feretti E. Multipole Coherent Bremsstrahlung of Electrons in Crystals. -"Nuovo Cimento", v.7B, p.225-239, 1972.
9. Гришаев И.А., Фимов В.П., Касилов В.И. и др. О некоторых особенностях взаимодействия электронов и позитронов высоких энергий с кристаллами.-"УФЖ", 1971, т. 16, вып. 9, с. 1548-1551.
10. Walker B.L., Berman V.L., Der E.C. et al. Channeling and Coherent Bremsstrahlung effects for relativistic Positrons and Electrons. -"Phys. Rev. Lett.", v.25, p.5-9, 1970.
11. Ахиезер А.И., Фомин П.И., Шульга Н.Ф. Когерентное тормозное излучение электронов и позитронов ультрарелятивистской энергии в кристаллах.-"Письма в ЖЭТФ", 1970, т. 13, вып.7, с. 713-715.
12. Ахиезер А.И., Болдышев В.Ф., Шульга Н.Ф. К теории упругого рассеяния быстрых частиц в квазиклассическом приближении."Теоретическая и математическая физика", 1975, т. 23, вып. 1, с. 11-15.
13. Ахиезер А.И., Болдышев В.Ф., Шульга Н.Ф. Тормозное излучение быстрых электронов на цепочке атомов кристалла.-"ДАН СССР", 1976, т. 226, № 2, с. 295-297.
14. Ахиезер А.И., Болдышев В.Ф., Шульга Н.Ф. К теории излучения ультрарелятивистского электрона в классической электродинамике.-"УФЖ", 1976, т. 21, вып. 1, с. 10-17.
15. Мороховский В.Л., Коваленко Г.Д., Гришаев И.А. и др. Каналирование позитронов с энергией 1 ГэВ. -"Письма в ЖЭТФ", 1972, т. 16, вып. 3, с. 162-164.
16. Бочек Г.Л., Гришаев И.А., Коваленко Г.Д., Щраменко Б.И. Влияние эффекта каналирования на спектр тормозного излучения позитронов.-В кн.: Труды VI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. М., Изд. МГУ, 1975, с. 256-262.
17. Бочек Г.Л., Гришаев И.А., Калашников Н.П. и др. Когерентное тормозное излучение электронов и позитронов в кристалле.-"ЖЭТФ", 1974, т. 67, вып. 2(8), с. 808-815.
18. Гришаев И.А., Мороховский В.Л., Щраменко Б.И. Рассеяние электронов и позитронов с энергией 1 ГэВ цепочками атомов в монокристалле кремния.-В кн.: Труды V Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. М., Изд. МГУ, 1974, с. 282-285.
19. Kumm H., Bell F., Sismann E. et al. Rosette motion and string scattering of 20 MeV electrons in MgO single crystals. -"Radiation Effects", v.12, p.53-61, 1972.
20. Kudrin V.V. and Vorobiev S.A. Small-angle scattering of swift electrons and positrons in a crystal. -"Radiation Effects", v.25, p.119-125, 1975.
21. Воробьев С.А., Цехановский И.А., Плотников С.В. Угловые распределения электронов за тонким монокристаллом кремния.-В кн.: Труды VI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. М., Изд. МГУ, 1975, с. 240-244.
22. Гришаев И.А., Коваленко Г.Д., Кулибаба В.И. и др. Об использовании монокристаллов в качестве аннигиляционной мишени.-В кн.: Труды VI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. М., Изд. МГУ, 1974, с. 277-281.
23. Щраменко Б.И., Бочек Г.Л., Витько В.И. и др. Пучок монохроматических аннигиляционных γ -квантов на линейном ускорителе с энергией 2 ГэВ.-"Атомная энергия", 1976, т. 40, с. 345-346.
24. Бочек Г.Л., Витько В.И., Гришаев И.А. и др. Монохроматические γ -кванты высокой энергии от аннигиляции позитронов в монокристалле кремния.-"Письма в ЖЭТФ", 1976, т. 24, вып. 2, с. 103-106.