

## ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНИЯ

К. Ю. Амосов, М. Ю. Андреяшкин, И. Е. Внуков, С. А. Воробьев, В. Н. Забаев,  
 Б. Н. Калинин, Г. А. Науменко, А. П. Потылицын, В. П. Сарычев, Л. Е. Ялова

На томском синхротроне проводятся систематические исследования  $\gamma$ -излучения при каналировании (ИК) электронов средних энергий  $E_0=300-900$  МэВ в монокристаллах. В литературе [1] отмечалась перспективность такого механизма генерации рентгеновских и  $\gamma$ -квантов для использования в различных областях науки и практики. Чтобы выбрать оптимальный радиатор, необходимо изучить различные кристаллы. В рассматриваемой области энергий довольно подробно исследованы радиационные потери и спектральные характери-

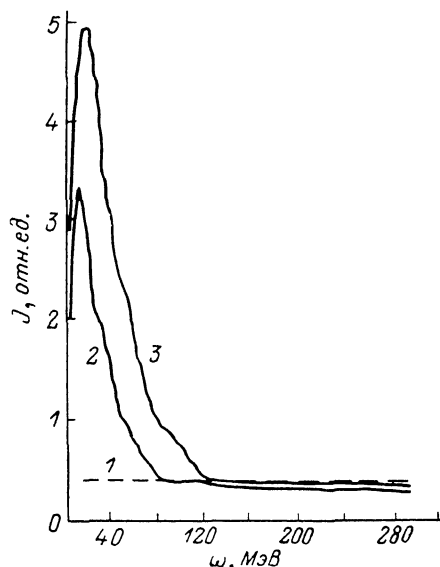
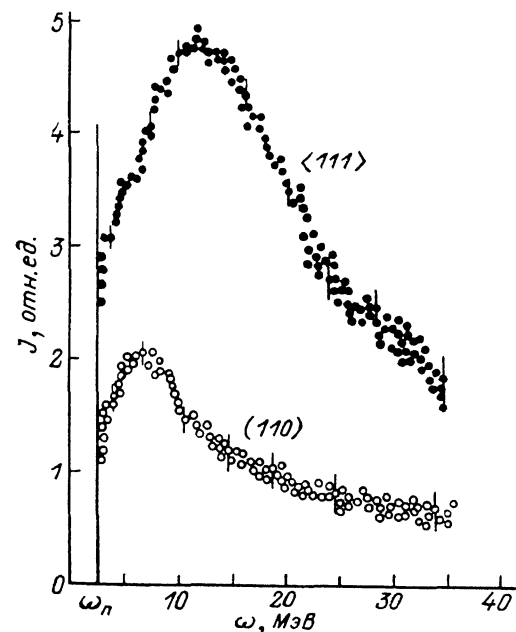


Рис. 1. Спектры интенсивности  $\gamma$ -излучения электронов в монокристалле германия толщиной 0.17 мм.

Рис. 2. Влияние температуры на форму спектров интенсивности  $\gamma$ -излучения электронов при осевом  $\langle 100 \rangle$  каналировании в монокристалле германия толщиной 0.75 мм.

1 — хаотическая ориентация, 2 —  $T=290$ , 3 — 90 К.

стики ИК электронов в алмазе и кремнии. Значительно беднее информация об использовании другого доступного материала — монокристалла германия. Так, отсутствуют экспериментальные данные о влиянии охлаждения германиевого радиатора на характеристики ИК.

В данной работе приводятся результаты измерений, выполненных на монокристаллических мишенях Ge 0.17 и 0.75 мм при энергиях ускоренных электронов  $E_0=900$  МэВ. Вторую мишень в ходе эксперимента можно было охлаждать до температуры кипения азота. Методики ориентации и охлаждения мишеней, измерения ускоренного тока, нормировки результатов и параметры ускорителя приведены в работах [2, 3]. Измерения спектров проводились с помощью NaJ(Tl) спектрометра полного поглощения с размером кристалла  $\varnothing 200 \times 200$ . Энергетическое разрешение спектрометра на  $\gamma$ -линиях  $Co^{60}$  составляло 9%, рабочий диапазон энергий 1.5—300 МэВ. При проведении спектральных измерений ускоренный ток синхротрона снижался до величины примерно  $10^3$  частица/сброс с длительностью импульса сброса, равной  $20 \cdot 10^{-3}$  с. Полные радиационные потери электронов определялись с помощью гаусс-квантометра при номинальном токе ускорителя  $10^{10}$  частица/импульс. Регистрация эксперименталь-

Т а б л и ц а 1

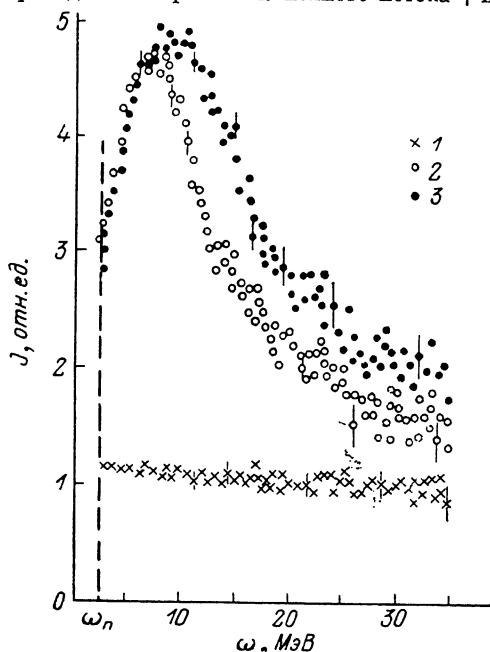
Мишень, мм	Ориентация	T, К	Q, МэВ
0.17	Разориентация	290	1.20
0.17	<111>	290	1.50
0.75	Разориентация	290	1.80
0.75	<100>	290	2.30
0.75	<100>	90	2.70

ной информации осуществлялась с помощью аппаратуры КАМАК, включенной в состав автоматизированного измерительного комплекса ИВК-2.

В табл. 1 представлены значения полных радиационных потерь одного электрона в угол коллимации  $\Theta_k=0.6$  мрад для различных условий. Относительная погрешность измерений  $\Delta Q/Q$  около 7%. Из таблицы следует, что увеличение толщины кристалла более чем в 4 раза приводит к возрастанию полного потока  $\gamma$ -излучения в 1.5 раза. Это объясняется тем, что

в более толстой мишени конус излучения расширяется в результате усиления многократного кулоновского рассеяния. Охлаждение кристалла приводит к возрастанию полных потерь при осевой ориентации примерно на 17%. Для сравнения укажем, что на кремниевой мишени этот эффект представляется слабее [4].

На рис. 1—4 приведены результаты измерения спектров интенсивностей  $\gamma$ -излучения



× 1  
○ 2  
● 3

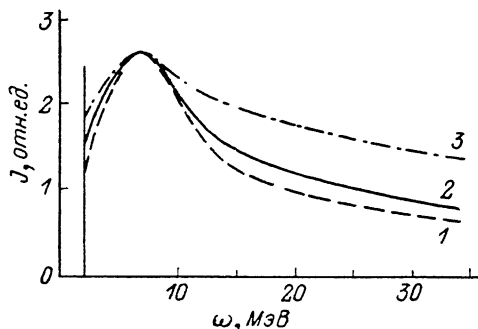


Рис. 3. Влияние температуры на форму спектров интенсивности при плоскостном (110) каналировании.

1 — хаотическая ориентация; 2 —  $T=290$ , 3 — 90 К.

Рис. 4. Влияние коллимации  $\gamma$ -излучения на форму спектров интенсивности при плоскостном (110) каналировании в монокристалле германия толщиной 0.17 мм.

$\Theta_k$ , мрад: 1 — 0.2, 2 — 0.6, 3 —  $\infty$ ;  $\omega_n \approx 2$  МэВ.

электронов для различных экспериментальных ситуаций. Статистические ошибки для всех рисунков составляют 1—3% в максимумах и 10—20% при энергии  $\omega=290$  МэВ. Спектры на рис. 1—3 нормированы на единицу ускоренного тока синхротрона. Рис. 1 иллюстрирует измерения на тонком кристалле Ge при комнатной температуре для осевой <111> и плоскостной (110) ориентаций. Экспериментальные точки расставлены с шагом  $\Delta\omega=0.3$  МэВ. На рис. 2 (монокристалл Ge, 0.75 мм) представлены в виде кривых, полученных в результате усреднения и сглаживания экспериментальных точек, осевые спектры для двух температур  $T=290$  и 90 К, а также тормозной спектр от разориентированной мишени. Охлаждение кристалла приводит к росту интенсивности в пике и к заметному смещению его вершины  $\omega_0$  вправо:  $\omega_0=12.5$  и 16 МэВ при 290 и 90 К соответственно. Заметим, что последний эффект проявляется ярче, чем на кристалле Si.

Влияние понижения температуры мишени на форму спектра интенсивности при плоскостном (110) каналировании электронов показано на рис. 3. Здесь также наблюдается расширение и «ужесточение» пика.

На рис. 4 приведены при нормировке на максимальную интенсивность плоскостные спектры для кристалла Ge (0.17 мм), измеренные при различных коллимациях  $\gamma$ -излучения. Представленные плавные кривые, полученные в результате усреднения и сглаживания первичных экспериментальных спектров, позволяют судить о влиянии коллимации на форму спектра интенсивностей  $\gamma$ -излучения. Введение коллимации обостряет пик каналированного излучения, усиливает его выделение над тормозным фоном. Это свидетельствует о том, что надбарьерные частицы излучают в более широкий конус, чем собственно каналированные (подбарьерные) частицы. В табл. 2 приведены оценки нескольких характеристик спектров излучения электронов для угла коллимации  $\gamma$ -излучения  $\theta_{\kappa} = 0.6$  мрад ( $\omega_0$  — положение максимума,  $\omega_{гр}$  — верхняя граница каналированного пика,  $\eta$  — превышение интенсивности в максимуме над уровнем интенсивности излучения в разориентированном кристалле).

Т а б л и ц а 2

Толщина мишени, мм	Ориентация	T, К	$\omega_0$ , МэВ	$\omega_{гр}$ , МэВ	$\eta$
0.17	$\langle 111 \rangle$	290	12.5	85	10.3
0.17	$\langle 110 \rangle$	290	7.0	70	4.4
0.75	$\langle 100 \rangle$	290	12.5	85	8.1
0.75	$\langle 100 \rangle$	90	16.0	110	11.9
0.75	$\langle 110 \rangle$	290	7.0	75	3.8
0.75	$\langle 110 \rangle$	90	8.0	75	3.8

В заключение можно отметить следующее.

1. При охлаждении монокристалла Ge до азотных температур наблюдается заметное «ужесточение» спектра каналированного излучения и возрастание выхода фотонов с энергией  $\omega < \omega_{гр}$  на 25 % для плоскостной и на 70 % для осевой ориентаций.

2. В условиях жесткой коллимации  $\theta_{\kappa} < \theta_{\text{мн}}$  (для  $t=0.17$  мм  $\theta_{\text{мн}}=1.4$  мрад, а для  $t=0.75$  мм  $\theta_{\text{мн}}=2.9$  мрад) спектр излучения при каналировании деформируется незначительно при увеличении толщины мишени. Это подтверждает вывод работы [4] о малом вкладе надбарьерных электронов в излучение в направлении прямо-вперед по сравнению с подбарьерными.

3. Влияние охлаждения тем значительней, чем ниже дебаевская температура кристалла. В связи с этим следует указать, что охлаждение некоторых кристаллов с достаточно низкой температурой Дебая, например вольфрама, сопровождается увеличением критического угла каналирования. Это может привести к тому, что естественная мозаичность кристалла, неустраиваемая при современных технологиях, может быть «перекрыта» увеличением критического угла, следовательно, такой кристалл может использоваться в качестве радиатора каналированного излучения.

### Список литературы

- [1] Кумахов М. А. Излучение каналированных частиц в кристаллах. М.: Энергоатомиздат, 1986. 160 с.
- [2] Адицев Ю. П., Воробьев С. А., Забаев В. Н. и др. // ЯФ. 1982. Т. 35. № 1. С. 108—116.
- [3] Алейник А. Н., Внуков И. Е., Забаев В. Н. и др. // Деп. в ВИНТИ. М., 1985. № 213-85.
- [4] Потылицын А. П., Калинин Б. Н., Курков А. А. и др. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 8. С. 1634—1637.

Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом институте  
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию  
12 августа 1988 г.