

01;07;10;12

## **Эффективность генерации характеристического излучения при торможении низкоэнергетических электронных пучков**

© В.И. Беспалов, В.В. Рыжов, И.Ю. Турчановский

Томский политехнический университет  
Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

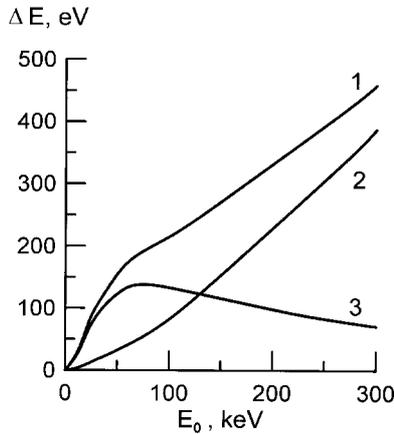
Поступило в Редакцию 4 августа 1997 г.

Методом Монте-Карло проведены расчеты генерации характеристического излучения при торможении низкоэнергетических электронов в конвертерах из материалов с низким атомным номером и показано, что по эффективности конверсии этот метод генерации характеристического излучения может конкурировать с  $Z$ -пинчами.

При торможении низкоэнергетических электронов в веществе заметная часть энергии пучка может излучаться в виде характеристического излучения, которое возникает как в результате фотопоглощения тормозного излучения, так и в результате ионизации внутренних оболочек атома электронным ударом. Так как сечение второго процесса возрастает с уменьшением атомного номера  $Z$ , то высокая эффективность генерации характеристического излучения может быть достигнута при торможении электронов в конвертерах из материалов с низким  $Z$ .

Для исследования оптимальных условий генерации характеристического излучения и выбора эффективных конвертеров нами использовалась программа, моделирующая процесс развития электронно-фотонного каскада в конвертере методом Монте-Карло. Для расчетов спектрального распределения излучения за конвертером был разработан вариант программы [1], в котором учитываются процессы генерации характеристического излучения в результате ионизации  $K$ -оболочки как квантами тормозного излучения, так и электронами. Сечение  $K$ -ионизации электронным ударом было взято из работы [2].

На рис. 1 приведены результаты расчетов выхода характеристического (кривая 1), тормозного излучения (кривая 2) и суммарного выхода



**Рис. 1.** Зависимость полного выхода энергии рентгеновского излучения (кривая 1) и его составляющих: тормозного (кривая 2) и характеристического (кривая 3) излучения из аргона от начальной энергии электронов. (Результаты расчетов нормированы на один упавший электрон.)

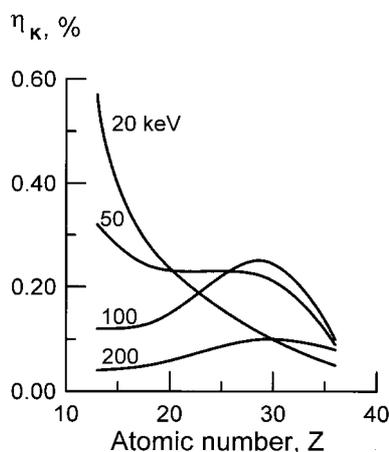
рентгеновского излучения (кривая 3) при торможении электронов с различной начальной энергией  $E_0$  в плоском слое аргона. Толщина слоя  $d$  подбиралась такой, чтобы выход характеристического излучения из конвертера был максимальным для данной энергии  $E_0$ . Из рис. 1 видно, что при торможении низкоэнергетических электронов ( $E_0 < 100$  keV) значительная доля энергии излучается в виде характеристического излучения. И лишь при  $E_0 > 120$  keV энергия тормозного излучения  $\Delta E_{Br}$ , излучаемая в сплошном спектре, становится равной энергии характеристического излучения  $\Delta E_K$ , излучаемой в линиях.

Анализ результатов расчетов показал, что энергия электронов  $E'$ , при которой  $\Delta E_K = \Delta E_{Br}$ , линейно зависит от атомного номера вещества  $Z$ :

$$E' = 236 - 5.6 \times Z \text{ (keV)}.$$

Из формулы следует, что для конвертеров с  $Z > 42$  выход тормозного излучения всегда выше выхода характеристического излучения.

Результаты расчетов максимальной эффективности генерации характеристического излучения относительно энергии электронов пучка  $\eta_K = \Delta E_K / E_0$  для конвертеров с  $13 \leq Z \leq 36$  (от Al до Kr)



**Рис. 2.** Зависимость эффективности генерации характеристического излучения от атомного номера вещества конвертера для разных начальных энергий электронов  $E_0$ , keV (цифры у кривых). (Результаты расчетов нормированы на один упавший электрон.)

приведены на рис. 2. Из рис. 2 следует, что максимальная эффективность достигается при торможении низкоэнергетических электронов в Al ( $\eta_k = 0.57$  при  $E_0 = 20$  keV). При этом тормозное излучение в спектре практически отсутствует.

Таким образом, при торможении низкоэнергетических электронных пучков с  $E_0 < E'$  основная доля энергии излучается в виде характеристического излучения (линейчатый спектр), что позволяет рассматривать этот способ генерации характеристического излучения как эффективный метод получения линейчатого рентгеновского излучения в килоэлектронвольтном диапазоне энергий.

## Список литературы

- [1] Korovin S.D., Ryzhov V.V., Turchanovsky I.Yu., Bepalov V.I. // Proc. 10 IEEE International Pulsed Power Conference. Albuquerque, New Mexico, USA, 10–13 July, 1995. V. 1. P. 75–79.
- [2] Kolbenstvedt H. // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. N 12. P. 4785–4787.