

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНВЕРТЕРОВ

Г.Л. Бочек, А.С. Деев, Н.И. Маслов

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина

E-mail: deev@kipt.kharkov.ua

В GEANT 4 рассчитывались спектрально-угловые характеристики тормозного излучения электронов для аморфных мишеней. Рассчитаны угловые распределения выхода излучения из Si, W различных толщин при энергии электронов $E_e = 30 \dots 1200$ МэВ. Угловая ширина $\theta_{1/2}$ на полувысоте распределений $N_\gamma(\theta)$ пропорционально уменьшалась с ростом E_e и увеличивалась с ростом атомного заряда и толщины мишени.

1. ВВЕДЕНИЕ

Оценка спектрально-угловых характеристик тормозного излучения необходима для предсказания интенсивности излучения под малыми углами, а также значений фонового излучения под большими углами. Программный код GEANT 4 позволяет провести такие расчеты для случая аморфной мишени.

Взаимодействие электронов и гамма-квантов со средой реализовано в GEANT 4.9.2 с учетом основных физических процессов [1,2]. В приближении ElectromagneticLowEnergy для гамма-квантов учтены: комптоновское (неупругое) рассеяние, рэлеевское (упругое) рассеяние, фотоэффект, образование электрон-позитронных пар. Для электронов реализованы: ионизация, многократное рассеяние и тормозное излучение. В коде GEANT 4 табулированы результаты обработки спектров тормозного излучения для электронов с энергиями в диапазоне $E_e = 1$ кэВ...10 ГэВ для атомных зарядов $Z = 6, 13, 29, 47, 74, 92$.

Целью настоящей работы было выяснение возможностей данного программного кода для описания энергетических и угловых характеристик тормозного излучения. Изучены зависимости интенсивности излучения электронов от атомного заряда атомов мишени, ее толщины, энергии электронов.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

В рамках программного кода GEANT 4 рассчитывались спектрально-угловые характеристики тормозного излучения электронов, выходящего из аморфных мишеней с различным зарядом. Расчетные спектры излучения имели характерную зависимость выхода гамма-квантов $N(E_\gamma) \sim 1/E_\gamma$ и преобразовывались в интенсивность излучения $N_\gamma \times E_\gamma / \Delta E_\gamma / N_e$. Интенсивность излучения существенно зависит от всех главных параметров эксперимента: энергии электронов E_e , атомного заряда атомов мишени, толщины мишени, геометрии эксперимента, телесного угла регистрации квантов и др.

Зависимости выхода тормозного излучения от угла строили двумя способами. В первом случае суммировались гамма-кванты N_γ в диапазоне энергий ΔE_γ в зависимости от сферического угла θ . Угол θ автоматически брался в диапазоне $0 \dots 2\pi$. В итоге получалась зависимость числа квантов $N_\gamma(\theta)$, попадающих в телесный угол $2\pi \times (1 - \cos(\theta))$. Число квантов плавно нарастало при увеличении θ от 0 до 1,57 рад. Максимальным значением считали $N_\gamma(1,57)$, что соответствует полному числу излученных квантов, попадающих в переднюю полусферу. Полушириной углового распределения считали угол $\theta_{1/2}$, при котором число зарегистрированных квантов $N_\gamma(1,57)/2$.

Во втором случае зависимость $N_\gamma(\theta)$ преобразовывалась в интенсивность излучения и нормировалась на телесный угол. Такая величина плавно спадала с ростом угла θ . Полушириной углового распределения считали угол $\theta_{1/2}$, при котором нормированное значение интенсивности составляло половину от максимального. Полуширины для двух подходов дают близкие значения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные величины интенсивностей излучения $N_\gamma \times E_\gamma / \Delta E_\gamma / N_e$ превышали экспериментальные данные [3, 4] на 10...25 % для различных толщин Be, Si при различных телесных углах регистрации излучения. Расхождение увеличивается с ростом толщины кристалла и атомного заряда. Так, для мишени из W расчет отличался от эксперимента на 30...50 %. В эксперименте θ составляло 0,2...0,4 мрад.

Рассчитаны угловые распределения выхода излучения для мишени из Si толщиной 1 мм при энергии электронов $E_e = 30, 300$ и 1200 МэВ.

На Рис.1 представлены угловые распределения интенсивности излучения, нормированного на телесный угол для $E_e = 300$ и 1200 МэВ. Зависимости от угла заметно шире при более низких энергиях электронов.

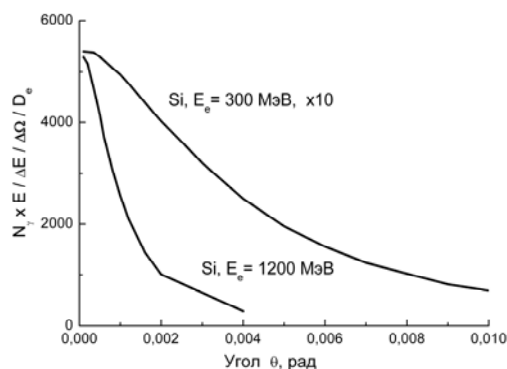


Рис.1. Угловые зависимости нормированных интенсивностей излучения из Si, $t=1$ мм:
 $E_e=300$ МэВ, $E_\gamma=5 \dots 100$ МэВ, $N_e=10^8$ и $E_e=1200$ МэВ,
 $E_\gamma=30 \dots 50$ МэВ, $N_e=10^7$

Угловые ширины $\theta_{1/2}$ на полувысоте распределений составили для 30 МэВ – 0,036 рад, 300 МэВ – 0,0038 рад, 1200 МэВ – 0,00096 рад. При равной толщине Si, 1 мм имеем пропорциональное уменьшение $\theta_{1/2}$ с увеличением E_e .

Оценочная величина $m_e c^2 / E_\gamma$ дает соответственно 0,017, 0,0017 и 0,00042 рад. Расчетные данные приблизительно в 2 раза выше оценочных.

На Рис.2 представлены расчетные угловые зависимости излучения для мишеней Li, Si и W толщиной $t=1$ мм. Для удобства сравнения расчетные данные нормировались на максимум интенсивности.

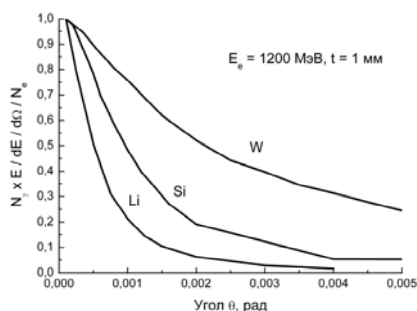


Рис.2. Угловые зависимости нормированных интенсивностей излучения из Li, Si, W с толщиной $t=1$ мм: $E_e = 1200$ МэВ, $E_\gamma = 5 \dots 100$ МэВ, $N_e = 10^8$

Величина $\theta_{1/2}$ существенно возрастает с ростом заряда атомов мишени. Отметим, что для Pt толщиной 1 мм при $E_e = 30$ МэВ величина полуширины становится очень большой: $\theta_{1/2} = 0,2$ рад для $E_\gamma > 1$ МэВ.

На Рис.3 представлены расчетные зависимости выхода гамма-квантов от толщины кремния для энергий электронов 30, 300 и 1200 МэВ.

Зависимости имеют выход на максимум при толщине Si около 10 мм. При дальнейшем увеличении толщины выход квантов начинает уменьшаться. Для $E_e = 1200$ МэВ, $E_\gamma = 30 \dots 50$ МэВ, $N_e = 10^7$, $\theta = 0,35$ мрад падение выхода при $t = 65$ мм составляет 10 %.

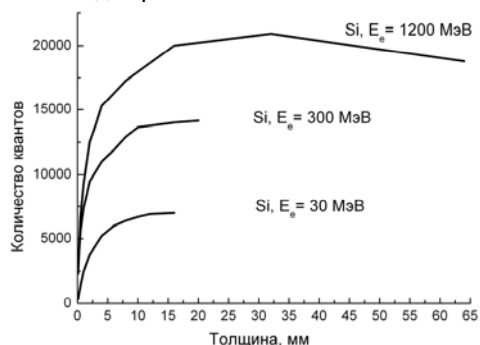


Рис.3. Выход гамма-квантов излучения в зависимости от толщины Si (мм): $E_e = 30$ МэВ, $E_\gamma = 1 \dots 30$ МэВ, $N_e = 10^5$, $\theta = 0,05$ рад, $E_e = 300$ МэВ, $E_\gamma = 5 \dots 100$ МэВ, $N_e = 2 \cdot 10^7$, $\theta = 0,35$ мрад и $E_e = 1200$ МэВ, $E_\gamma = 30 \dots 50$ МэВ, $N_e = 10^7$, $\theta = 0,35$ мрад

Интенсивности излучения, нормированные на телесный угол, отличаются в области малых углов примерно на порядок для энергий 300 и 1200 МэВ. Это удовлетворительно согласуется с нашими экспериментами по измерению преобразования энергии электронов в гамма-излучение [3, 4].

На Рис.4 представлены расчетные зависимости выхода гамма-квантов с $E_\gamma > 1$ МэВ от толщины W для $E_e = 300$ МэВ.

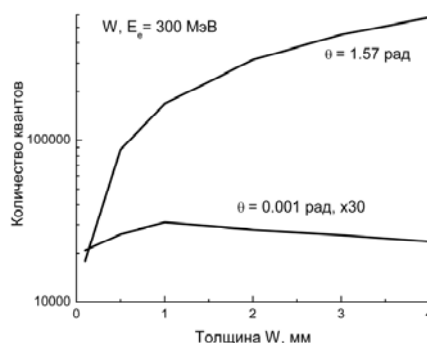


Рис.4. Выход гамма-квантов излучения с $E_\gamma > 1$ МэВ в зависимости от толщины W (мм) для углов регистрации $\theta = 0,001$ и $1,57$ рад. $E_e = 300$ МэВ

Полное излучение в переднюю полушферу нарастает до толщин 4 мм, тогда как количество квантов, попадающих в угол $\theta = 0,001$ рад, начинает уменьшаться уже при толщине в 1 мм. Таким образом, излучение спадает, прежде всего, для малых углов коллимации детектора.

На Рис.5 представлены угловые ширины $\theta_{1/2}$ на полувысоте распределений $N_\gamma(\theta)$ в зависимости от толщины W (мм) при различных энергиях электронов. Суммировались кванты с $E_\gamma > 1$ МэВ.

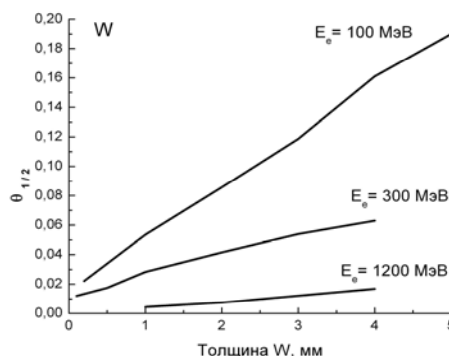


Рис.5. Угловые ширины $\theta_{1/2}$ (рад) на полувысоте распределений $N_\gamma(\theta)$ в зависимости от толщины W (мм) при различных энергиях электронов: $E_e = 100$ МэВ (вверху); 300, 1200 МэВ (внизу)

Имеет место обратная пропорциональность полуширины углового распределения излучения $\theta_{1/2} \sim 1/E_e$ при одинаковых толщинах W. Наблюдается заметное увеличение величины расчетных угловых ширин $\theta_{1/2}$ с ростом толщины W.

В GEANT 4 имеется возможность математически отключать различные физические процессы при моделировании взаимодействия частиц с атомами вещества. При отключении процесса многократного рассеяния электронов наблюдается существенное уменьшение угловой полуширины распределения излучения. Так для $\theta_{1/2}$ в W получены следующие результаты: $\theta_{1/2} = 0,002$ рад при $E_e = 1200$ МэВ, $t = 4$ мм ($\theta_{1/2}$ уменьшается в 8,4 раз по отношению к $\theta_{1/2}$, рассчитанной при учете всех процессов). Величина $\theta_{1/2} = 0,011$ рад при $E_e = 100$ МэВ, $t = 2$ мм ($\theta_{1/2}$ уменьшилась в 7,8 раз).

Таким образом, расчеты в GEANT 4 подтверждают, что увеличение угловых полуширин $\theta_{1/2}$ на полувысоте распределений $N_\gamma(\theta)$ с увеличением заряда атомов мишени либо ее толщины обусловлено, в первую очередь, многократным рассеянием электронов. Суммарное излучение в переднюю полушферу от многократного рассеяния не зависит.

На Рис.6 представлены зависимости полного излучения электронов в переднюю полусферу для различных энергий электронов в Si и W. Учитывались все гамма-кванты с $E_\gamma > 1$ МэВ.

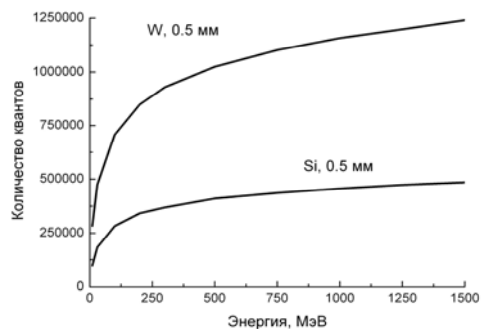


Рис.6. Выход гамма-квантов излучения с $E_\gamma > 1$ МэВ из Si ($N_e = 10^7$) и W ($N_e = 10^6$), толщиной 0,5 мм в зависимости от энергии электронов, $\theta = 1,57$ рад

Суммарное излучение отличается для всех энергий (10...1500 МэВ) примерно в 26 раз, что близко к соотношению радиационных длин $R_{Si}/R_W = 9,366/0,3504$ см = 26,73.

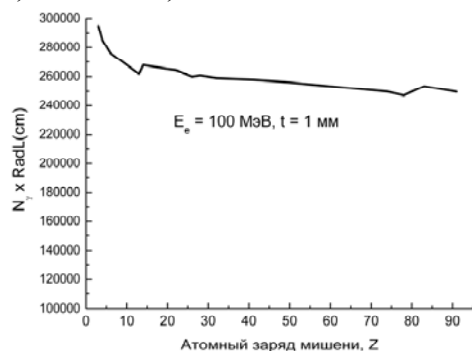


Рис.7. Полное излучение электронов с $E_e = 100$ МэВ, $\theta = 1,57$ рад, $N_e = 10^6$ для различных мишеней (Li, Be, C...Pt, Bi, Pa) толщиной 1 мм. Нормировка на радиационную длину (см)

Проведен расчет выхода излучения с $E_\gamma > 1$ МэВ для $E_e = 100$ МэВ, угол регистрации $\theta = 1,57$ рад, $N_e = 10^6$ для мишеней с различными атомными зарядами (Li, Be, C...Pt, Bi, Pa) толщиной 1 мм. Для удобства сравнения проведено умножение числа излученных квантов на радиационную длину в сантиметрах. Зависимость от заряда атомов мишени приобретает монотонный вид (Рис.7). Это подтверждает известный факт, что отношение излучений из мишеней фиксированной толщины ($t = 1$ мм) обратно пропорционально радиационным длинам.

ENERGY AND ANGULAR CHARACTERISTICS OF ELECTRON BREMSSTRAHLUNG FOR DIFFERENT CONVERTER

G.L. Bochek, O.S. Deiev, N.I. Maslov

The spectral-angular characteristics of the electrons bremsstrahlung from amorphous targets were calculated in GEANT 4. The angular distributions of the radiation yield from Si, W with different thickness for electron energy $E_e = 30...1200$ MeV were calculated. The angular width $\theta_{1/2}$ at half maximum distributions $N_\gamma(\theta)$ was proportional decrease with increase E_e and increase with increase Z and target thickness.

ЕНЕРГЕТИЧНІ І КУТОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ ДЛЯ РІЗНИХ КОНВЕРТОРІВ

Г.Л. Бочек, О.С. Дєєв, М.І. Маслов

У GEANT 4 розраховувалися спектрально-кутові характеристики гальмівного випромінювання електронів для аморфних мішеней. Розраховані кутові розподілення виходу випромінювання з Si, W різної товщини при енергії електронів $E_e = 30...1200$ MeV. Кутлова ширина $\theta_{1/2}$ на піввисоті розподілів $N_\gamma(\theta)$ пропорційно зменшувалася із зростанням E_e і збільшувалася з ростом атомного заряду і товщини мішені.

Расчеты энергетических и угловых характеристик тормозного излучения позволяют сделать вывод о корректности использования программного кода GEANT 4.9.2 для моделирования излучения электронов из аморфных мишеней. Результаты моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментом.

ВЫВОДЫ

Результаты расчетов интенсивности излучения близки к экспериментально измеренным в [3, 4] и позволяют сделать вывод о возможности использования программного кода GEANT 4.9.2 для моделирования излучения электронов из аморфных мишеней.

Имеет место обратная пропорциональность полуширины углового распределения $\theta_{1/2}$ на полувысоте распределений $N_\gamma(\theta)$ от E_e при одинаковых толщинах Si и W. Наблюдается заметное увеличение величины расчетных угловых полуширин $\theta_{1/2}$ с ростом толщины Si и W. Увеличение угловых полуширин $\theta_{1/2}$ с увеличением заряда атомов мишени или ее толщины обусловлено, в первую очередь, многократным рассеянием электронов. Суммарное излучение в переднюю полусферу от многократного рассеяния не зависит.

Построены зависимости полного излучения электронов в переднюю полусферу для различных энергий электронов в Si и W. Излучение отличается для всех энергий (10...1500 МэВ) примерно в 26 раз, что близко к соотношению радиационных длин $R_{Si}/R_W = 9,366/0,3504$ см = 26,73.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Electron and Positron Incident. <http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/Users Guides/PhysicsReferenceManual/BackupVersions/V9.3/fo/PhysicsReferenceManual.pdf>
2. S.M. Seltzer and M.J. Berger. Bremsstrahlung spectra from electron interactions with screened atomic nuclei and orbital electrons // *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B*. 12. 1985, v.12, p.95-134.
3. D.I. Adeishvili, A.P. Antipenko, S.V. Blazhevich, et al. Apparatus for measurement of spectral and angular distributions of gamma quanta at exit from LUE-2000 linear accelerator // *Inst. and Exp. Techn.* 1991, v.34, №2, p.1, 294.
4. G.L. Bochek, V.I. Kulibaba, N.I. Maslov, et al. Gamma radiation characteristics of 1.2 GeV electrons in thick silicon single crystals // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*. 2001, v.173, p.121-125.

Статья поступила в редакцию 04.10.2011 г.