

А. Н. Григорьев¹, З. В. Билык¹,
Ю. В. Литвинов², А. В. Сакун¹,
В. В. Марущенко¹, О. Ю. Чернявский¹

¹Гвардейский ордена Красной Звезды факультет военной подготовки имени Верховного Совета Украины Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

²Харьковский национальный педагогический университет имени Г. С. Сковороды, г. Харьков, Украина

Эффект увеличения комптоновского рассеяния гамма-квантов при прохождении их вдоль металлической поверхности

Экспериментально исследовано изменение энергии источника γ -излучения ^{137}Cs при прохождении γ -излучения вдоль поверхности металла. Обнаружено уменьшение энергии γ -излучения источника ^{137}Cs при ориентации пучка γ -квантов параллельно металлической поверхности в диапазоне углов $0-1,66^\circ$ относительно прямой, проходящей через детектор — металлическую поверхность — источник γ -квантов. Уменьшение энергии γ -излучения наблюдали по уменьшению количества зарегистрированных γ -квантов в пике полного поглощения до уровня комптоновской долины и увеличению комптоновского эффекта. Количество зарегистрированных гамма-квантов в пике полного поглощения уменьшается в указанном диапазоне углов в 3,5 раза.

Ключевые слова: γ -квант, поверхность металла, комптон-эффект.

О. М. Григор'єв, З. В. Білик, Ю. В. Литвинов, О. В. Сакун,
В. В. Марущенко, О. Ю. Чернявський

Эффект збільшення комптонівського розсіювання гамма-квантів під час проходження їх вздовж металевої поверхні

Експериментально досліджено зміння енергії джерела γ -випромінювання ^{137}Cs під час проходження γ -випромінювання вздовж поверхні металу. Виявлено зменшення енергії γ -випромінювання джерела ^{137}Cs в разі орієнтації пучка γ -квантів паралельно металевій поверхні в діапазоні кутів $0-1,66^\circ$ відносно прямої, що проходить крізь детектор — поверхню металу — джерело γ -квантів. Зменшення енергії γ -випромінювання спостерігали по зменшенню кількості γ -квантів, що зареєстровані, в піку повного поглинання до рівня комптонівської долини та збільшенню комптон-ефекту. Кількість зареєстрованих гамма-квантів у піку повного поглинання у вказаному діапазоні кутів зменшується в 3,5 рази.

Ключові слова: γ -квант, поверхня металу, комптон-ефект.

© А. Н. Григорьев, З. В. Билык, Ю. В. Литвинов, А. В. Сакун,
В. В. Марущенко, О. Ю. Чернявский, 2014

С участием авторов статьи [1] разработан метод, который обеспечивает прецизионное определение направления на источник γ -излучения в плоскости в диапазоне углов 2π радиан с ошибкой $0,044^\circ$ [2] при использовании металлической поверхности поглотителя. Эксперимент показал уменьшение пика полного поглощения до уровня долины между краем комптоновского рассеяния и пиком полного поглощения при прохождении γ -излучения вблизи металлической поверхности.

При анализе литературы авторы не нашли описания подобного эффекта. Можно было бы отнести данное явление к уменьшению интенсивности пучка γ -квантов из-за его отражения, но диапазон углов, при которых оно наблюдается, значительно шире. Авторы работ [3–6] показали, что полное внешнее отражение происходит при углах падения γ -излучения к поверхности не более $0^\circ-0,015^\circ$ для энергии $122 \text{ кэВ } ^{57}\text{Co}$ [4], $0^\circ-0,0095^\circ$ для энергии $122-300 \text{ кэВ}$ [5], $0^\circ-0,0086^\circ$ для энергии $300-800 \text{ кэВ}$ [6], а для энергии $0,8-5 \text{ МэВ}$ этот угол не должен превышать тысячных долей градуса [3]. Таким образом, диапазон углов, при которых наблюдается полное внешнее отражение, уменьшается до тысячных долей градуса при увеличении энергии γ -квантов. Кроме того, отражающая поверхность должна быть идеально гладкой, ее шероховатость достигает 500 \AA [5]. В проведенном же эксперименте уменьшение энергии γ -квантов наблюдается в диапазоне углов не менее чем $0-1,1^\circ$. Об отсутствии отражения γ -излучения свидетельствует и отсутствие уменьшения интенсивности пучка γ -квантов. Интенсивность пучка γ -квантов изменяется пропорционально изменению толщины поглотителя (см. рис. 6). Внешняя поверхность поглотителя изготовлена из медной катаной фольги без дополнительной обработки.

Цель статьи — исследовать взаимодействие γ -квантов с веществом на границе раздела металл — воздух и использовать уменьшение пика полного поглощения для повышения точности определения направления на точечный источник γ -излучения.

Для проведения эксперимента по исследованию эффекта увеличения комптоновского рассеяния γ -квантов при прохождении их вдоль металлической поверхности использован асимметрический поглотитель [1], расположенный на угловом устройстве (рис. 1). Внутренняя сторона геометрической формы асимметрического поглотителя (рис. 2) является цилиндром с диаметром 70 мм , а наружная задается

формулой $h = c + \frac{b\alpha}{360}$, где c — заданная константа, которая

определяет минимальную толщину поглотителя (в данном случае $c = 3 \text{ мм}$); b — заданная константа, которая определяет максимальную толщину поглотителя (в данном случае $b = 50 \text{ мм}$); α — угол в диапазоне от 0° до 360° .

Поглотитель выполнен из полосы меди высотой 40 мм , толщиной $0,1 \text{ мм}$ и заполнен свинцовыми шариками диаметром $3,75 \text{ мм}$. В центре поглотителя размещен спектрометрический телурид-кадмиевый детектор размером $4 \times 4 \times 2 \text{ мм}$ [7]. Торцевая поверхность детектора перпендикулярна направлению пучка γ -квантов и вектору силы тяжести. Плоская поверхность детектора находится на продолжении условной линии, проведенной в плоскости максимальной толщины асимметрического поглотителя (рис. 2).

В эксперименте использовался источник γ -излучения ^{137}Cs , изготовленный в 1986 году, активностью $A = 2,064 \cdot 10^9 \text{ Бк}$ ко проведения времени эксперимента. Диаметр активной части источника 6 мм , высота — 10 мм . Содержание изотопа



Рис. 1. Установка для проведения эксперимента по изучению эффекта увеличения комптоновского рассеяния γ -квантов при прохождении их вдоль металлической поверхности

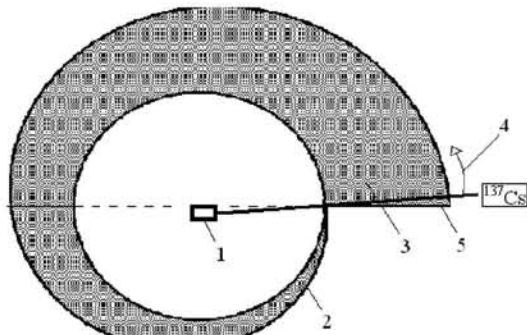


Рис. 2. Расположение детектора в асимметрическом поглотителе:

- 1 — телурид-кадмиевый детектор; 2 — медный каркас;
- 3 — свинцовые шарики; 4 — стрелка, указывающая направление поворота асимметрического поглотителя от первоначального положения; 5 — металлическая поверхность поглотителя

^{134}Cs в источнике на дату изготовления — 1,6 %. Расстояние до источника ^{137}Cs — 50 см. Исходя из размеров радиоактивного источника, детектора и расстояния между ними следует, что источник точечный. Асимметрический поглотитель облучался γ -излучением равномерно, что подтверждено измерением мощности экспозиционной дозы на расстоянии 25 см от него во все стороны. Дискриминация энергии устанавливалась на уровне 100 кэВ. Полуширина пика полного поглощения составляла 15 %. За каждое измерение набирали не менее 10 000 импульсов, что соответствовало статистической ошибке не более 1 %.

Асимметрический поглотитель поворачивался с шагом $0,138^\circ$ микровинтом от начального положения, которое показано на рис. 2 сплошной линией, от источника ^{137}Cs на детектор. Показания угла перемещения фиксировали индикатором часового типа, диапазон измерения углов которого в условиях эксперимента составляет 5° .

В начале измерений γ -излучение направляли через максимальную толщину поглотителя. На анализаторе импульсов фиксировались пик полного поглощения и часть спектра комптоновского рассеяния (рис. 3).

Далее, вращая асимметрический поглотитель в сторону уменьшения его толщины, наблюдали уменьшение площади

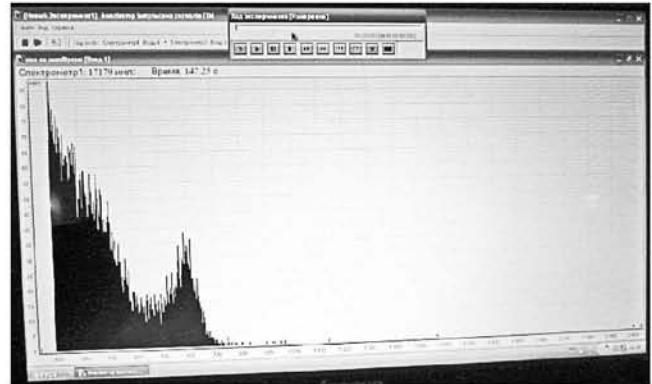


Рис. 3. Пик полного поглощения при прохождении γ -квантов через максимальную толщину поглотителя

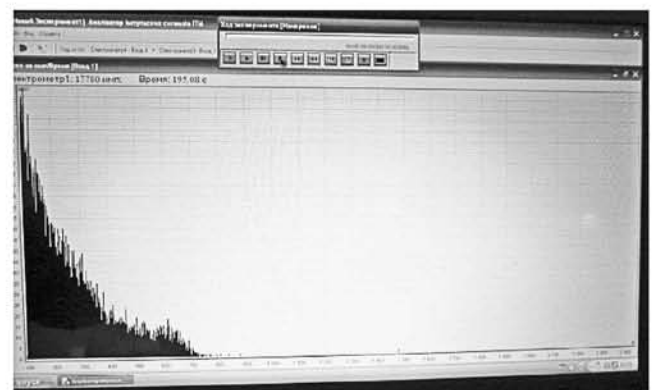


Рис. 4. Уменьшение пика полного поглощения до уровня долины между краем комптоновского рассеяния и пиком полного поглощения, а также возрастание комптоновского рассеяния до области энергии 100 кэВ при прохождении γ -квантов вдоль медной поверхности

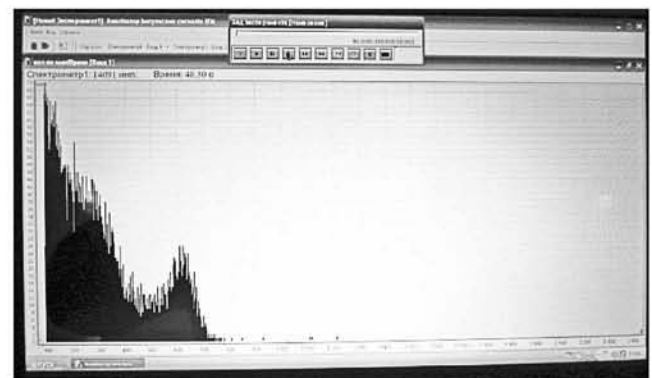


Рис. 5. Пик полного поглощения при прохождении γ -квантов через минимальную толщину поглотителя

пика полного поглощения до уровня долины между краем комптоновского рассеяния и пиком полного поглощения, а также возрастание комптоновского рассеяния до области энергии 100 кэВ (рис. 4). При этом γ -излучение проходило частично через поглотитель и почти параллельно медной поверхности максимальной толщины асимметрического поглотителя.

При дальнейшем перемещении асимметрического поглотителя в сторону уменьшения его толщины наблюдали

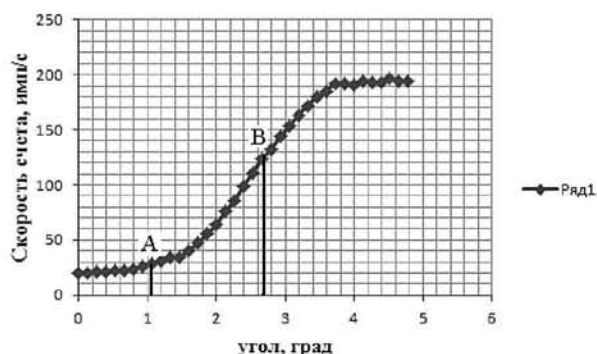


Рис. 6. Зависимость скорости счета от угла на источник γ -излучения (A – B — интервал углов, при которых существенно уменьшается пик полного поглощения)

«восстановление» пика полного поглощения до величины, характерной для пика полного поглощения при прохождении через максимальную толщину поглотителя (рис. 5).

После проведения серии экспериментов определили средний диапазон углов A – B , равный 0° – $1,66^\circ$ (угол A — $1,07^\circ$, угол B — $2,73^\circ$), в пределах которого было обнаружено уменьшение энергии γ -квантов (рис. 6). Количество зарегистрированных γ -квантов в пике полного поглощения на рис. 3 уменьшается относительно рис. 2 в 3,5 раза.

Таким образом, при ориентации пучка γ -квантов на границе максимальной и минимальной толщины поглотителя (см. рис. 6) [2] в интервале углов A – B , когда пучок проходит почти параллельно металлической поверхности, существенно уменьшается пик полного поглощения и при этом увеличивается эффект комптоновского рассеяния. Возможной причиной уменьшения пика полного поглощения является эффект выхода тепловых электронов из металла и увеличение комптоновского рассеяния на слабосвязанных электронах вблизи поверхности металла. Пространственное облако индуцированного заряда сплюснуто параллельно поверхности металла [8].

Отметим, что при изучении зависимости скорости счета от угла [1] в диапазоне углов 1 – 359° наблюдали спектр, подобный изображенному на рис. 3, для любых углов данного диапазона.

Выводы

При прохождении пучка γ -излучения вблизи поверхности металла наблюдается повышение комптоновского рассеяния, что соответствует уменьшению энергии γ -излучения в пределах диапазона углов 0° – $1,66^\circ$. В указанном диапазоне углов количество зарегистрированных γ -квантов в пике полного поглощения уменьшается в 3,5 раза. Данный эффект может позволить снижать энергию γ -излучения и увеличивать точность определения направления на точечные источники γ -излучения.

Список использованной литературы

1. Прецизійний метод визначення напрямку на точкове гамма-джерело / О. М. Григор'єв, З. В. Білик, О. В. Сакун, В. В. Марущенко // Військово-технічний збірник. — Львів, 2012. — № 7. — С. 25–28.
2. Вимірювання напрямку на джерело гамма-випромінювання в просторі з використанням асиметричного поглиначу / З. В. Білик,

О. М. Григор'єв, Ю. В. Литвинов, В. В. Марущенко, О. В. Сакун, О. Ю. Чернявський // Современные методы и средства НК и ТД: 21 международная конференция, тезисы докл. — Гурзуф: Укр. информ. центр «Наука. Техника. Технология», 2013. — С. 179–181.

3. An experimental setup for studying specular reflection of hard γ quanta / A. T. Muminov, T. M. Muminov, R. R. Muratov, K. M. Norboev, U. S. Salikhbaev, A. N. Safarov, V. V. Skvortsov, R. D. Suleymanov // Instruments and Experimental Techniques. — Moscow, 2013. — Vol. 56, № 6. — P. 628–633.

4. Моделирование эксперимента по полному внешнему отражению тормозного излучения электронов / Ф. К. Алиев, Г. Р. Алимов, А. Т. Муминов, Б. С. Османов, В. В. Скворцов // Журнал технической физики. — С.-Пб, 2005. — Т. 75, вып. 8. — С. 90–94.

5. Экспериментальное исследование рассеяния гамма-квантов тормозного излучения электронов ($E_e = 11,8$ МэВ) на сверхмалые углы / Г. Р. Алимов, М. А. Кумахов, А. Т. Муминов, Т. М. Муминов, К. М. Норбоев, Б. С. Османов, У. С. Салихбаев, А. Н. Сафаров, В. В. Скворцов, Р. Д. Сулейманов // Журнал технической физики. — С.-Пб, 2007. — Т. 77, вып. 9. — С. 123–126.

6. Experimental detection of specular reflection of gamma quanta / A. T. Muminov, T. M. Muminov, K. M. Norboev, B. S. Osmanov, U. S. Salikhbaev, A. N. Safarov, V. V. Skvortsov, R. D. Suleymanov // Technical Physics. — St. Petersburg, 2011. — Vol. 56, № 9. — P. 1345–1352.

7. Полупроводниковые детекторы на базе CdTe и CdZnTe для спектрометрии электромагнитных излучений при комнатной температуре / А. Н. Григорьев, И. Е. Полянский, А. Г. Кареев, Т. А. Жадан // Вестник ХГУ. — Харьков, 2002. — № 544. — С. 153–155.

8. Zinoviev A. N. Induced charge in ion–metal surface collisions / A. N. Zinoviev // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 2013. — Vol. 315. — P. 45–50.

References

1. Hryhor'yev O. M., Bilyk Z. V., Sakun O. V., Marushchenko V. V. Precision determination of the direction of point gamma source // Vys'kovo-tekhnichnyy zbirnyk. — 2012. — № 7. — S. 25–28. (Ukr)
2. Bilyk Z. V., Hryhor'yev O. M., Lytvynov Yu. V., Marushchenko V. V., Sakun O. V., Chernyavskyy O. Yu. Measuring the direction of the source of gamma rays in space using asymmetric absorber // Modern methods and means NDT: 21 International Conference, Proc. — Gursuf: Ukr. ynform. tsentr «Наука. Tekhnika. Tekhnolohyya», 2013. — S. 179–181. (Ukr)
3. Muminov A. T., Muminov T. M., Muratov R. R., Norboev K. M., Salikhbaev U. S., Safarov A. N., Skvortsov V. V., Suleymanov R. D. An experimental setup for studying specular reflection of hard γ quanta // Instruments and Experimental Techniques. — 2013. — Vol. 56, № 6. — P. 628–633. (Eng)
4. Aliev F. K., Alimov G. R., Muminov A. T., Osmanov B. S., Skvortsov V. V. Simulation experiment on total external reflection electron bremsstrahlung // Zhurnal tehnichej fiziki. — 2005. — T. 75, vyp. 8. — S. 90–94. (Rus)
5. Alimov G. R., Kumahov M. A., Muminov A. T., Muminov T. M., Norboev K. M., Osmanov B. S., Salihbaev U. S., Safarov A. N., Skvortsov V. V., Sulejmanov R. D. Experimental study of scattering of gamma-ray bremsstrahlung of electrons ($E_e = 11.8$ MeV) for ultrasmall angles // Zhurnal tehnichej fiziki. — 2007. — T. 77, vyp. 9. — S. 123–126. (Rus)
6. Muminov A. T., Muminov T. M., Norboev K. M., Osmanov B. S., Salikhbaev U. S., Safarov A. N., Skvortsov V. V., Suleymanov R. D. Experimental detection of specular reflection of gamma quanta // Technical Physics. — 2011. — Vol. 56, № 9. — P. 1345–1352. (Eng)
7. Grigor'ev A. N., Poljanskij I. E., Kareev A. G., Zhadan T. A. Semiconductor detectors based on CdTe and CdZnTe for spectrometry of electromagnetic radiation at room temperature // Vestnik HGU. — 2002. — № 544. — S. 153–155. (Rus)
8. Zinoviev A. N. Induced charge in ion–metal surface collisions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 2013. — Vol. 315. — P. 45–50. (Eng)

Получено 06.06.2014.