

УДК 539.12.04

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ С ТВЕРДОЙ СРЕДОЙ С УЧЕТОМ ВТОРИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2019 г. Ф. Ф. Валиев\*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский государственный университет”, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: valiev07@list.ru

Поступила в редакцию 12.11.2018 г.

После доработки 08.04.2019 г.

Принята к публикации 27.05.2019 г.

Предложена методика расчета углового распределения изменения энергии оптического излучения, генерируемого электронами высокой энергии при их прохождении через твердое прозрачное вещество с учетом вклада вторичных электронов. Определены значения углов, при которых наблюдаются максимумы оптического излучения при прохождении электронов через слюду и стекло.

DOI: 10.1134/S0367676519090308

Исследования оптического излучения, образующегося при взаимодействии жесткого гамма-излучения с веществом, проводятся с прошлого века. В экспериментах Вавилова и Черенкова по прохождению гамма квантов через жидкости был обнаружен новый тип излучения [1]. Было показано, что оно связано с особенностями поля, формируемого зарядом, движущимся со скоростью, большей скорости света в жидкой среде. Характерной особенностью этого излучения является то, что его максимум в оптическом диапазоне расположен под углом Черенкова  $\Theta = \arccos(1/(\beta \cdot n))$ , где  $\beta$  — отношение скорости перемещения электрона ( $v$ ) к скорости света ( $c$ ),  $n$  — показатель преломления.

Позже была опубликована экспериментальная работа по изучению взаимодействия электронов с твердыми веществами [2]. Исследовали угловое распределение оптического излучения, формируемого в результате взаимодействия электронного пучка с энергией 1.9 МэВ с тонкими мишенями. Использовали ускоритель электронов и мишени толщиной несколько десятков микрон. В эксперименте были получены угловые распределения электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, подтвердившие выводы работы [1]. Результаты теоретического изучения формирования электромагнитных полей электронами, движущимися со скоростью, большей скорости света в среде, описаны в работе [3].

В настоящей работе рассмотрено влияние первичных и вторичных электронов на поля сверхсветовых источников в твердой среде. Для этого модифицирован метод, ранее использованный для расчета полей, создаваемых ионизирующими частицами в газовой и жидкой среде [4, 5] и учте-

ны показатели преломления твердых веществ. Рассмотрение задачи, как и в предыдущих работах, проводится в пространственно — временном представлении. Основное предположение, использованное в указанных работах, состояло в том, что распределение электромагнитных полей можно описать последовательно в два этапа [4].

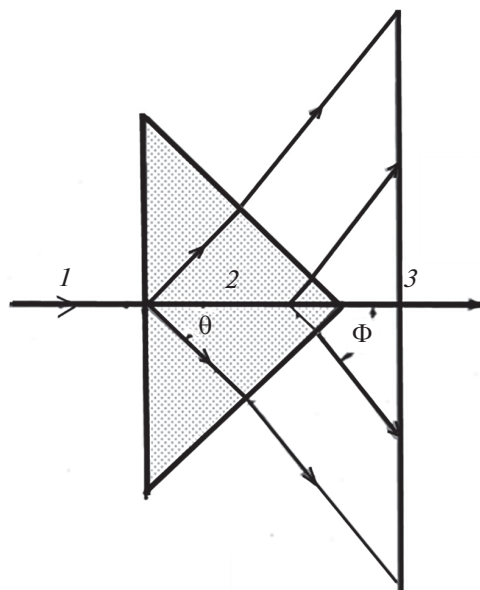


Рис. 1. Схема численного эксперимента. Обозначения: 1 — направление пучка электронов с энергией 1.9 МэВ; 2 — мишень — стеклянный конус высотой 0.084 мм; 3 — детектор электромагнитного излучения. Стрелки указывают направление максимума оптического излучения.  $\Theta$  — угол Черенкова;  $\Phi$  — угол выхода оптического излучения из мишени (с учетом преломления стекло—воздух).

**Таблица 1.** Экспериментальные и вычисленные значения углов  $\Phi$  для стекла и слюды

Среда	Вычисленные по формуле Тамма значения углов $\Phi$ [2], град	Экспериментально измеренные значения углов $\Phi$ [2], град	Вычисленные значения углов $\Phi$ , град
Стекло	46.5	45.25	46.5
Слюда	52.17	53.5	53.0

На первом этапе вычисляются векторы плотности тока с использованием формул квантовой электродинамики, на втором – по формулам классической электродинамики рассчитываются компоненты электромагнитного поля. Для выполнения первого этапа проведен модельный эксперимент с использованием пакета GEANT4 [6], основанный на формулах квантовой электродинамики для описания элементарных актов взаимодействия. Условия модельного эксперимента выбраны сходными с условиями эксперимента [2]. Схема численного эксперимента показана на рис. 1.

В модельном эксперименте электроны с энергией 1.9 МэВ проходят через стеклянный конус с высотой 0.084 мм. Получены данные о перемещении каждого электрона в фазовом пространстве. Результаты первого этапа расчетов представляют собой моменты времени, в которые происходят взаимодействия между электроном и атомами среды, а также положения, траектории и скорости электронов.

Результаты второго этапа расчетов представляют собой компоненты электромагнитных полей, генерируемых электронами. Эти компоненты вычисляются по формулам классической электродинамики с использованием значений длин траекторий, угловых распределений и скоростей электронов, полученных на первом этапе расчета. Основные формулы для расчета приведены в [7]. Расчеты на данном этапе проводили

основываясь на принципе суперпозиции и модели линейного тока.

Результаты расчетов изменения энергии электромагнитного поля ( $\Delta E$ ) в интервале углов  $\Theta = 45.8815^\circ - 45.8825^\circ$  показаны в относительных единицах на рис. 2.

Таким же способом были выполнены расчеты изменения энергии электромагнитного поля при прохождении электронов с энергией 1.9 МэВ через слюду. Высота стеклянного конуса и конуса из слюды составляла 0.084, 0.028 мм, соответственно. Сравнение наблюдаемых и вычисленных углов излучения для различных твердых веществ с учетом вторичных электронов представлено в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что полученные значения углов, при которых наблюдаются максимумы изменения энергии электромагнитного поля в оптическом диапазоне, формируемые при прохождении электронов с энергией 1.9 МэВ через тонкие слои стекла и слюды (столбец 4 в табл. 1), соответствуют результатам эксперимента [2] (столбец 3 в табл. 1).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

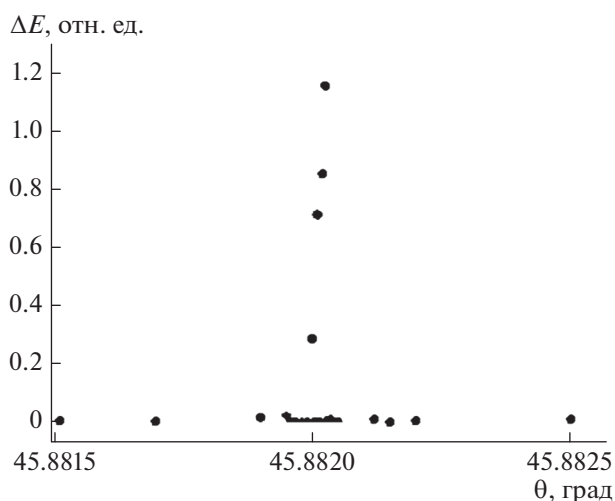
1. Предложен метод расчета в пространственно-временном представлении полей, создаваемых ионизирующими частицами в веществе в твердом состоянии.

2. Угловое распределение изменения энергии ( $\Delta E$ ), рассчитанное с использованием имитационного моделирования и пространственно-временного подхода к вычислению электромагнитных полей, согласуется с измеренным в эксперименте [2].

Работа выполнена с использованием оборудования Центра компьютерных ресурсов Санкт-Петербургского государственного университета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черенков П.А. // ДАН СССР. 1934. Т. 2. № 8. С. 451.
2. Collins G., Reiling V. // Phys. Rev. 1938. V. 54. P. 499.
3. Tamm I. // J. Phys. (USSR). 1939. V.1. P. 439.
4. Борисов В.В., Валиев Ф.Ф. // Вопр. атом. науки и техн. Сер. физ. 2002. № 1–2. С. 25.
5. Валиев Ф.Ф., Панин Р.Б. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. С. 1040; Valiev F.F., Panin R.B. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. P. 951.
6. <http://geant4.web.cern.ch/>.
7. Валиев Ф.Ф. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. С. 1025; Valiev F.F. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. P. 1001.



**Рис. 2.** Изменение энергии электромагнитного поля ( $\Delta E$ ) в интервале углов  $\Theta = 45.8815^\circ - 45.8825^\circ$ .