

УДК 539.12.04

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, ФОРМИРУЕМОГО ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ С ГАЗОВОЙ СРЕДОЙ С УЧЕТОМ ВТОРИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2020 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 02.03.2020 г.

После доработки 15.04.2020 г.

Принята к публикации 27.04.2020 г.

Рассчитаны угловые распределения изменений энергии электромагнитного поля в оптическом диапазоне, формируемого при взаимодействии высокоэнергетичных электронов с газовой средой. Величины рассчитанных угловых распределений согласуются с экспериментально наблюдаемыми.

DOI: 10.31857/S0367676520080323

При взаимодействии высокоэнергетичных электронов со средой формируются поля, зависящие от скорости перемещения источников электромагнитного излучения, которыми являются как первичные высокоэнергетичные электроны, так и вторичные. Учет влияния вторичных электронов на формируемые поля в рамках модели линейного тока [1] ранее проводился при рассмотрении задач прохождения ионизирующих частиц в жидкой и твердой средах [2, 3]. В этих работах рассмотрены угловые распределения изменений энергии электромагнитного поля, формируемого при взаимодействии жесткого гамма-излучения с жидкой и высокоэнергетичных электронов с твердой средой в оптическом диапазоне с учетом влияния вторичных электронов.

В [4] проведено экспериментальное исследование углового распределения оптического излучения при взаимодействии электронов с энергией 350 МэВ с газовыми мишенями. Использовались ускоритель электронов, газовые мишени и фотографическая система съема информации.

В данной работе рассмотрены электромагнитные поля, формируемые в газовой среде в результате прохождения электронов.

Задачей работы является расчет угловых распределений изменений энергии электромагнитного поля, формируемого в условиях близких к экспериментальным [4] в рамках полуклассического подхода [1].

Для выполнения этой задачи проведены расчеты угловых распределений магнитных компо-

нент электромагнитного поля с учетом вторичных процессов.

Источники электромагнитного поля — электроны, движущиеся со скоростями как меньше, так и больше скорости света в среде. В работе применена техника расчета, предложенная в [2] и использованная для расчета полей, создаваемых при ионизации частицами веществ в твердом и газообразном состояниях [2, 3]. Описание перемещений первичного и вторичных электронов, возникших в результате ионизации среды, получены с использованием пакета имитационного моделирования GEANT4 [5].

Рассмотрение задачи, как и в предыдущих работах [1, 2], проводилось в пространственно-временном представлении с использованием полуклассического подхода. Основное предположение состоит в том, что распределение электромагнитных полей можно описать последовательно в два этапа. На первом этапе вычисляются координаты и скорости электронов, освобождающихся в результате взаимодействия излучения с веществом с использованием формул квантовой электродинамики, на втором рассчитываются компоненты электромагнитного поля по формулам классической электродинамики с использованием принципа суперпозиции.

Для выполнения первого этапа проведен модельный эксперимент с использованием пакета GEANT4. Условия модельного эксперимента выбраны сходными с условиями реального экспери-

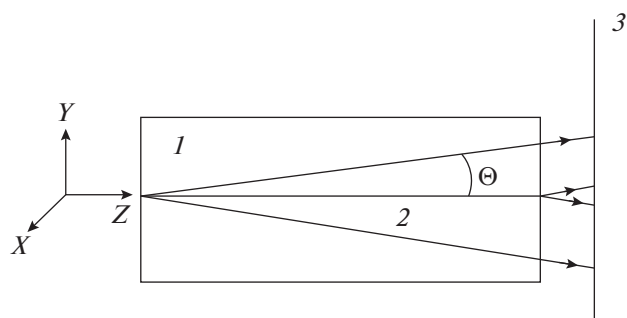


Рис. 1. Схема численного эксперимента: 1 – газовая мишень – цилиндр, заполненный газом длиной 1 м; 2 – направление пучка электронов с энергией 350 МэВ по оси Z; 3 – детектор электромагнитного излучения в оптическом диапазоне. Стрелки указывают направление максимума оптического излучения.

мента [4]. Схема численного эксперимента показана на рис. 1.

В модельном эксперименте электроны с энергией 350 МэВ проходят через газовую среду, находящуюся в цилиндре длиной 1 м в направлении координаты Z. В результате имитационного моделирования взаимодействия электронов с газовой средой получаем информацию о перемещении каждого электрона в фазовом пространстве.

Результаты первого этапа расчетов представляют собой положения и скорости электронов в моменты времени, в которые происходят взаимодействия между электроном и атомами среды.

Результаты второго этапа расчетов представляют компоненты электромагнитных полей, генерируемых электронами. Эти компоненты вычисляются по формулам классической электродинами-

ки с использованием значений длин траекторий, угловых распределений и скоростей электронов, полученных на первом этапе расчета. Основные формулы приведены в [3]. На этом этапе использовались принцип суперпозиции и модель линейного тока.

Углы, в которых максимально изменение энергии для ксенона, криптона и аргона, вычисленные по формуле Тамма $\Theta_T = \arccos(1/(\beta\gamma))$, экспериментальные ($\Theta_{\text{эксп}}$) [5] и вычисленные нами с учетом (Θ_1) и без учета влияния (Θ_2) вторичных электронов, представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что рассчитанные нами углы, под которыми наблюдаются максимумы изменений энергии электромагнитного поля в оптическом диапазоне, формируемые при прохождении электронов с энергией 350 МэВ через газы (аргон, ксенон, криптон), согласуются с результатами эксперимента [2] (столбец 3 табл. 1). Наблюдаются малые отклонения от значений, рассчитанных по формуле Тамма. Вычисленные без учета влияния вторичных электронов углы Θ (настоящая работа столбец 5 табл. 1) совпадают с результатами, полученными по формуле Тамма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе проведено численное моделирование эксперимента [4] и рассчитаны изменения энергии в зависимости от угла наблюдения с использованием модели линейного тока в рамках полуклассического подхода в пространственно-временном представлении.

2. Угловое распределение изменения энергии, рассчитанное с использованием имитационного моделирования и пространственно-временного

Таблица 1. Экспериментальные и вычисленные значения углов для аргона, ксенона и криптона, град. Θ_T – вычисленные по формуле Тамма; $\Theta_{\text{эксп}}$ – экспериментальные [5]; Θ_1 – вычисленные в настоящей работе, с учетом вторичных электронов; Θ_2 – вычисленные в настоящей работе, без учета вторичных электронов

Среда	Θ_T	$\Theta_{\text{эксп}}$	Θ_1	Θ_2
Ar	1.284	1.23 ^{+0.26} –0.14	1.26 (0.06)	1.284 (0.006)
Kr	1.594	1.53 ^{+0.02} –0.01	1.53 (0.14)	1.596 (0.006)
Xe	2.015	1.75 ^{+0.27} –0.16	1.98 (0.15)	2.012 (0.006)

подхода к вычислению электромагнитных полей, с учетом влияния вторичных электронов согласуется с результатами измерений.

Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра “Вычислительный центр СПбГУ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *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.
3. *Валиев Ф.Ф.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. С. 1261; *Valiev F.F.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. P. 1149.
4. *Ружичка Я.* Теоретические и экспериментальные исследования эффекта Вавилова-Черенкова. Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 1993. С. 212.
5. <http://geant4.web.cern.ch/>.