Письма в ЖЭТФ, том 94, вып. 4, с. 280 – 283 © 2011 г. 25 августа

# Обнаружение дифракционного излучения в диэлектрической мишени в условиях генерации излучения Вавилова–Черенкова

*Г. А. Науменко*[1], *А. П. Потылицын, М. В. Шевелев, Ю. А. Попов*

*Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия*

Поступила в редакцию 20 июня 2011 г.

Экспериментально исследован эффект одновременной генерации излучения Вавилова–Черенкова и дифракционного излучения в диэлектрической мишени при прохождении электронов вблизи мишени. Показано, что дифракционное излучение возникает на передней грани диэлектрической мишени, распространяется внутри мишени и преломляется на задней грани подобно пучку реальных фотонов.

Излучение Вавилова–Черенкова (ИВЧ) в традиционном представлении возникает при движении частицы в среде, если скорость частицы больше фазовой скорости распространения электромагнитной волны в этой среде. Однако для электронов высокой энергии, когда значение лоренц-фактора электрона $\gamma \gg 1$, характерный поперечный размер поля электрона $\gamma\lambda$ может принимать макроскопические значения (здесь $\lambda = 2\pi c/\omega$ – длина волны, соответствующая гармонике $\omega$ в фурье-представлении поля электрона, $c$ – скорость света). При этом ИВЧ может возникать и при прохождении электрона вблизи мишени [1–3]. По аналогии с переходным излучением при взаимодействии поля электрона с границей диэлектрической мишени следует ожидать возникновения дифракционного излучения (ДИ), распространяющегося внутри мишени в конусе углов, определяемых скоростью частицы и показателем преломления вдоль направления движения электрона.

Модель генерации ИВЧ и ДИ при пролете электрона вблизи мишени, обладающей произвольной проводимостью и спектральной дисперсией, была детально рассмотрена в работах [4, 5]. Преимуществом генерации излучения с использованием такой схемы является отсутствие ионизационных потерь энергии электронов в материале мишени.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования излучения Вавилова–Черенкова и дифракционного излучения в миллиметровом диапазоне, одновременно генерируемых в тефлоновой мишени. Эксперимент проводился на выведенном электронном пучке микротрона ФТИ ТПУ со следующими параметрами: энергия электронов 6.1 МэВ, длительность макроимпульса 4 мкс, частота макроимпульсов 1–8 Гц, характерная длина электронного сгустка в гауссовом приближении $\sigma_z = 2.4$ мм, число электронов в электронном сгустке $N_e = 10^8$, число сгустков в макроимпульсе $10^4$, поперечное сечение выведенного пучка $4 \times 2\,\text{мм}^2$, угловая расходимость выведенного пучка 0.08 рад. В этих условиях в области длин волн $\lambda > 9$ мм излучение электронного сгустка имеет когерентный характер [6]. Из-за когерентности процесса интенсивность излучения возрастает в $N_e$ раз. Это делает возможным проведение измерений существующими детекторами.

Схема эксперимента представлена на рис. 1a. Для устранения эффекта предволновой зоны [7] измерения углового распределения излучения проводились с использованием параболического телескопа с детектором DP-21M, разработанным в НИИ полупроводниковых приборов г. Томска. Детектор выполнен на базе широкополосной антенны с беспороговым диодом. Он обеспечивает регистрацию излучения при комнатной температуре с чувствительностью $\approx 0.3$ мВ/Ватт. Предволновая (ближняя) зона $L_p$ определяется длиной формирования излучения $\gamma^2\lambda$. Для условий эксперимента она составляла $L_p \simeq 1.4$ м. Телескоп, включающий в себя параболическое зеркало с фокусным расстоянием 145 мм, располагался на расстоянии 0.5 м от мишени. Как было показано в работе [7], при использовании подобной схемы детектирования спектрально-угловые характеристики измеренного излучения совпадают с характеристиками излучения в дальней зоне. Для подавления фона ВЧ системы ускорителя на входе детектора был установлен запредельный волновод с критической длиной волны $\lambda = 25.5$ мм. Угловое разрешение телескопа определяется отношением апертуры запредельного волновода к фокусному расстоянию параболического зеркала. В эксперименте оно составляло 2.6°.

В эксперименте использовалась тефлоновая мишень, выполненная в форме прямоугольной призмы, в основании которой лежит равнобедренный прямо-

[1]e-mail: naumenko@tpu.ru

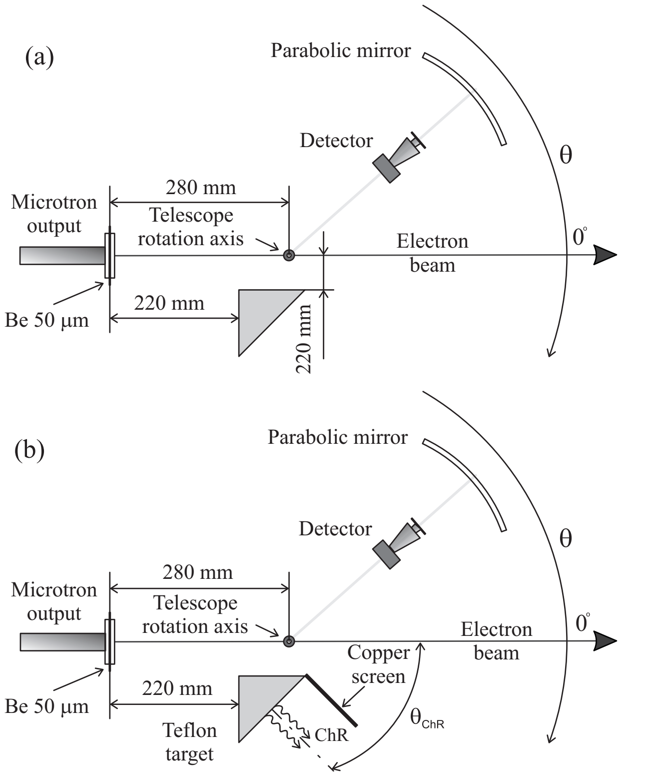


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. (a) – Измерение углового распределения ДИ вперед и ИВЧ. (b) – Измерение углового распределения ИВЧ в случае, когда излучение от выходной поверхности мишени перекрыто медным экраном

угольный треугольник. Высота призмы 74 мм, сторона 175 мм. Мишень размещали на расстоянии 220 мм от выходного окна электронного тракта. Расстояние от мишени до оси пучка электронов (импакт-параметр) было равно 20 мм. Коэффициент преломления для тефлоновой мишени измерялся по методике [8] и в диапазоне длин волн от 10 до 20 мм был равен $n = 1.41 \pm 0.1$.

Измерения зависимости интенсивности когерентного излучения от угла наблюдения $\theta$ проводились с шагом 1°. На рис. 2 черными кружками представлена измеренная зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения, нормированная на ток электронного пучка. Угол $\theta = 0°$ соответствует направлению движения электронного пучка. Значения в каждой точке усреднялись по 20 макроимпульсам.

На рис. 2 пик под углом $\theta = 44°$ соответствует пику ИВЧ, направление которого определяется соотношением

$$\cos\theta_{\mathrm{ChR}} = \frac{1}{n\beta}, \qquad (1)$$

где $\beta$ – скорость частицы в единицах скорости света.

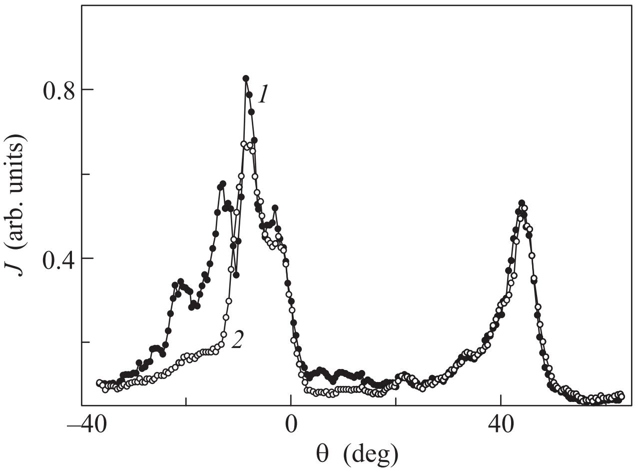


Рис. 2. Измеренные зависимости интенсивности излучения от угла наблюдения для разных геометрий эксперимента: *1* – по схеме рис.1a, *2* – по схеме рис.1b

Согласно [1] ИВЧ в верхнее полупространство (см. рис. 1) через горизонтальную поверхность призмы должно отсутствовать. Однако в эксперименте мы наблюдаем выход когерентного излучения в верхнее полупространство (для отрицательных углов $\theta$).

Для выяснения природы излучения в диапазоне углов $\theta$ от $-25°$ до $0°$ непосредственно за тефлоновой мишенью был установлен экран, как это показано на рис. 1b. Измеренное в этой геометрии угловое распределение интенсивности излучения представлено на рис. 2 полыми кружками. Из полученных результатов следует, что разность между этими распределениями представляет собой излучение, распространяющееся от задней грани тефлоновой мишени. Мы полагаем, что это излучение является дифракционным. Оно генерируется на входной поверхности мишени, распространяется в направлении движения электронов и преломляется при выходе из мишени. Излучение в диапазоне углов $\theta$ от $-10°$ до $0°$, которое не зависит от наличия экрана, обусловлено дифракцией поля электронов в материале мишени, а также обратным переходным излучением от зеркала телескопа.

Для подтверждения этого предположения нами были проведены аналогичные измерения с использованием источника монохроматического электромагнитного излучения с длиной волны 10 мм. На рис. 3a показана схема эксперимента. Источник излучения на основе диода Ганна расположен в фокусе параболического зеркала для формирования квазипараллельного пучка излучения, которое направляется на мишень под прямым углом к передней грани мишени. Остальная часть схемы совпадает со схемой измере-

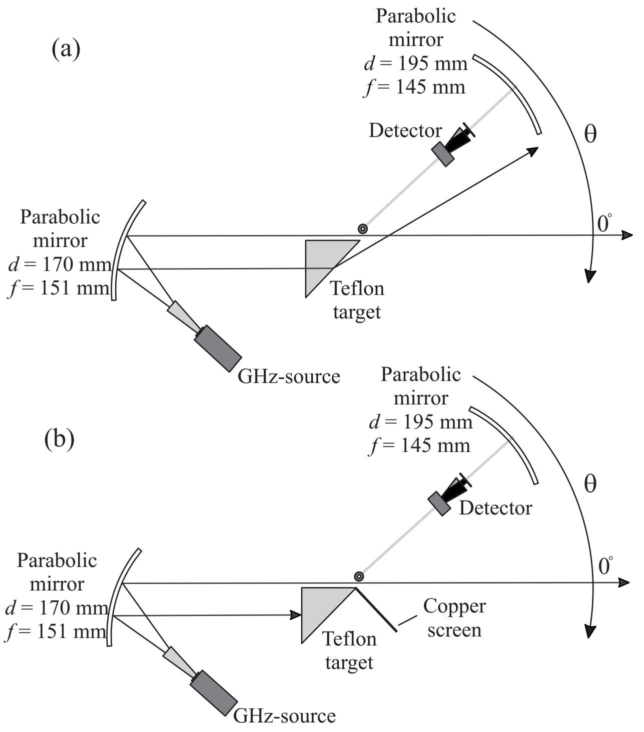


Рис. 3. Экспериментальная установка

ния на электронном пучке. Все параболические зеркала выполнены из меди. Их размеры и фокусные расстояния приведены на рис. 3.

Угловое распределение интенсивности излучения в отсутствие мишени показано на рис. 4. Ширина

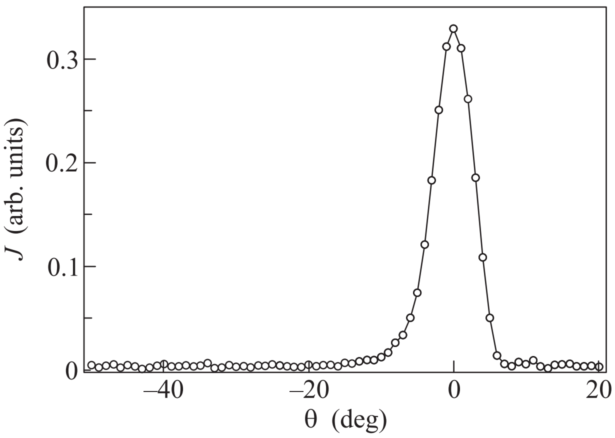


Рис. 4. Измеренное угловое распределение параллельного монохроматического излучения в отсутствие тефлоновой мишени

углового распределения обусловлена расходимостью пучка, связанной с конечным размером рупора излучателя, помещенного в фокус параболического зеркала. На рис. 5 приведены угловые распределения интенсивности излучения при взаимодействии пучка с тефлоновой мишенью. Сравнивая угловые зависимости для разных схем эксперимента (см. рис. 3a и b), можно убедиться, что часть пучка проходит над мишенью без взаимодействия (пик вблизи $\theta = 0°$), тогда как другая его часть преломляется на выходной грани тефлоновой мишени и выходит под углом $\theta = -22°$. Кривые, полученные в этом эксперименте, хорошо согласуются с результатами, полученными в эксперименте на электронном пучке.

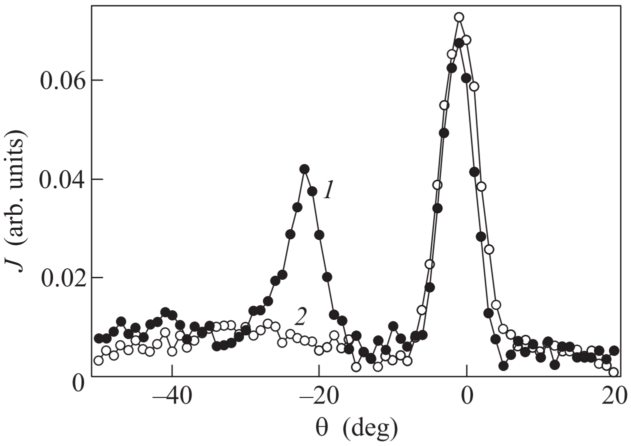


Рис. 5. Измеренные зависимости интенсивности излучения от угла наблюдения для разных геометрий эксперимента: *1* – по схеме рис.3a, *2* – по схеме рис.3b

Проведенные измерения подтверждают вывод о том, что в результате взаимодействия электромагнитного поля частицы с диэлектрической мишенью, кроме ИВЧ, генерируется ДИ от передней грани мишени. Качественно это соответствует описанию данного процесса с точки зрения представления поля электронов как поля псевдофотонов [9], которые распространяются в материале мишени со скоростью $c/n$ и преломляются на задней грани мишени.

В работах [10, 11] предлагается использовать диэлектрический полый цилиндр, по оси которого пропускается сгруппированный электронный пучок, для регистрации когерентного ИВЧ и последующего получения информации о длине электронного сгустка. В статье [12] автор рассматривает механизм генерации когерентного ИВЧ при прохождении пучка частиц вблизи периодической мишени. Представляется, что во всех указанных схемах необходимо учитывать вклад дифракционного излучения, которое возникает при прохождении электронного пучка как вблизи диэлектрика, так и вблизи периодической структуры из материала с высокой проводимостью.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг." (ГК # П790 от 24 мая 2010 г. и ГК # 02.740.11.0245).

---

1. Б. М. Болотовский, УФН **75**, 2 (1961).
2. T. Takahashi, M. Oyamada, Kondo et al., Phys. Rev. E **62**, 8606 (2000).
3. A. P. Potylitsyn, Yu. A. Popov, L. G. Sukhikh et al., J. of Phys. Conf. Series **236**, 012025 (2010).
4. Д. В. Карловец, А. П. Потылицын, Письма в ЖЭТФ **90**, 386 (2009)
5. Д. В. Карловец, ЖЭТФ **140**, 36 (2011).
6. А. Н. Алейник, А. С. Арышев, Б. Н. Калинин и др., Письма в ЖЭТФ **76**, 397 (2002).
7. Б. Н. Калинин, Г. А. Науменко, А. П. Потылицын и др., Письма в ЖЭТФ **84**, 136 (2006).
8. М. В. Шевелев, Г. А. Науменко, А. П. Потылицын и др., Изв. вузов, Физика **52**, 11/2 (2009).
9. J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3 ed. (J. Willey&Sons, N-Y, 1998).
10. J. Z. Zheng, C. X. Yu, Z. J. Zheng et al., Phys. of Plasmas **12**, 093105 (2005).
11. K. Kan, J. Yang, A. Ogata et al., TUPD 30, Proceedings of DIPAC 2011, Hamburg, Germany.
12. A. Opanasenko, arXiv.physics / 0209100, 2002.