Письма в ЖЭТФ, том 109, вып. 9, с. 584 – 588 © 2019 г. 10 мая

Излучение Вавилова–Черенкова в видимой и УФ областях спектра при прохождении электронов с энергией 6 МэВ через кварцевую пластинку

Е. Х. Бакшт[+1)], *А. В. Вуколов*[*], *М. В. Ерофеев*[+*], *Г. А. Науменко*[*], *А. П. Потылицын*[*], *В. Ф. Тарасенко*[+*], *А. Г. Бураченко*[+], *М. В. Шевелев*[*]

[+]*Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, 634055 Томск, Россия*

[*]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия*

Поступила в редакцию 15 марта 2019 г.
После переработки 15 марта 2019 г.
Принята к публикации 1 апреля 2019 г.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований спектров излучения Вавилова–Черенкова и импульсной катодолюминесценции в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях при прохождении через пластинки из кварца GE-014 и КУ1 пучка электронов с энергией 6 МэВ. Спектр излучения Вавилова–Черенкова зарегистрирован в ультрафиолетовой и видимой области и показано его изменение при вариации угла между плоскостью пластинки и направлением пучка электронов. Приведены данные об условиях регистрации спектров излучения Вавилова–Черенкова при возбуждении плоскопараллельных пластинок из кварца, сапфира и алмаза. Показано, что полное внутреннее отражение в кристаллах с высоким коэффициентом преломления накладывает определенные условия на геометрию вывода излучения Вавилова–Черенкова в вакуум при энергиях электронов более 500 кэВ.

DOI: 10.1134/S0370274X19090029

Введение. Исследованиям, направленным на получение управляемого термоядерного синтеза, уделялось и уделяется очень большое внимание. Создаются крупномасштабные установки, в которых формируют высокотемпературную плазму и стараются увеличить время ее удержания. Одной из разновидностей таких установок являются установки типа ТОКАМАК [1]. Однако в последние годы возросли сложности с нагревом плазмы в таких установках из-за повреждения стенок рабочей камеры ТОКАМАКов убегающими электронами (УЭ), а также с влиянием УЭ на нагрев плазмы [1–4]. Для диагностики УЭ разрабатываются различные методы и датчики, в том числе датчики, регистрирующие электроны с высокой энергией по интенсивности и длительности импульсов излучения, возникающего в веществе под действием пучка [1–7]. В установках типа ТОКАМАК генерируются УЭ с энергиями от десятков кэВ до десятков МэВ, см., например, [5, 6]. Известно, что в кристаллах при таких энергиях возникает как излучение Вавилова–Черенкова (ИВЧ), так и импульсная катодолюминесценция (ИКЛ) [5–10].

При генерации ИВЧ заряженная частица, проходящая через диэлектрик со скоростью v, превышающей скорость света в среде c/n (n – показатель преломления), испускает кванты света с волновыми векторами, образующими с вектором скорости частицы угол [11]:

$$\theta_{\rm ch} = 1/\beta n, \quad \beta = v/c. \qquad (1)$$

В разработанных для установок типа ТОКАМАК датчиках часто используют радиаторы из алмаза [5–7], которые покрывают металлическими пленками, а излучение от радиатора по световоду передается к ФЭУ. Электрические сигналы с ФЭУ регистрируются синхронно с током, протекающим через нагреваемую плазму, а также с сигналами от других датчиков, например, от детекторов рентгеновского излучения. Однако в большинстве известных работ по созданию и применению датчиков ИВЧ на основе алмаза, см., например, [5, 6], отсутствуют данные о спектрах регистрируемого излучения в ультрафиолетовой (УФ), видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях спектра. Только в недавней работе [7] был приведен спектр излучения кристаллов алмаза, максимум которого был сдвинут в длинноволновую область спектра. Однако, как следует из работ [8–10], такой спектр отличается от спектра

1)e-mail: BEH@loi.hcei.tsc.ru

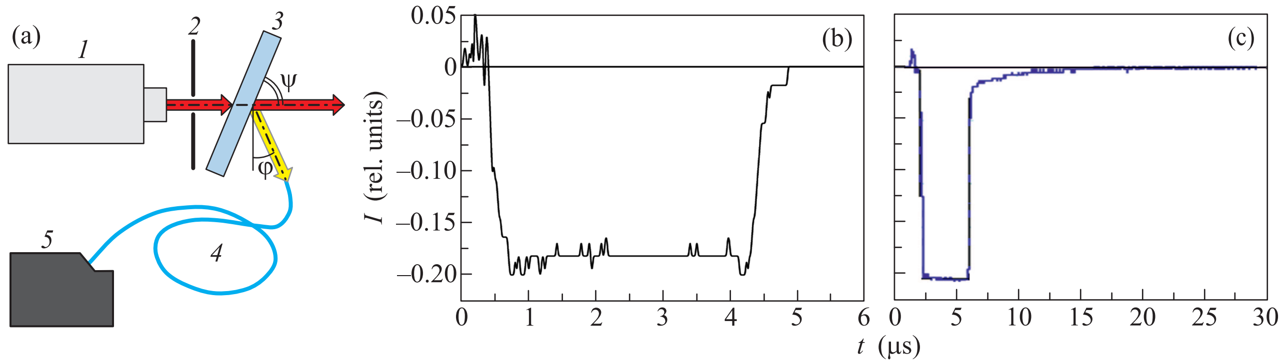

Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема экспериментальной установки (a), а также осциллограмм тока пучка (b), зарегистрированного с помощью коллектора, и излучения кварцевой пластинки в видимой области спектра (чип MicroSC-60035) под воздействием тока пучка (c)

ИВЧ. Как известно из теории [11], интенсивность ИВЧ увеличивается с уменьшением длины волны. При этом с ростом кинетической энергии электронов существенно увеличивается интенсивность ИВЧ. Соответственно, выделить ИВЧ на фоне импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) наиболее легко по спектру регистрируемого излучения. Кроме того, отличительными признаками ИВЧ являются длительность импульса, так как она совпадает с длительностью импульса тока пучка, а также угол распространения [11–13].

“Собственная” угловая ширина конуса ИВЧ определяется соотношением

$$\frac{\Delta\theta_0}{\theta_{\text{ch}}} \sim \frac{\lambda}{\text{T}},$$

где λ – длинна волны ИВЧ, T – толщина мишени. Очевидно, что электронный пучок будет рассеиваться в материале мишени, что с неизбежностью будет приводить к “уширению” конуса излучения. Другой причиной уширения является начальная расходимость электронного пучка.

Для сравнительно низких энергий электронов ($E_{\text{e}} \leq 50$ кэВ, $\beta < 0.44$) процесс многократного рассеяния приводит к тому, что фотоны ИВЧ испускаются в широком интервале углов даже в тонких радиаторах. По мере увеличения энергии электронов многократное рассеяние уменьшается и угловое распределение ИВЧ становится более направленным. Так, например, для энергии электронов $E_{\text{e}} = 1$ МэВ угол многократного рассеяния $\langle\theta_{\text{ms}}\rangle$ в кварцевой пластине толщиной 50 мкм не превышает 25°, тогда как угол ИВЧ $\theta_{\text{ch}} = 47°$. При дальнейшем росте энергии электронов, чтобы вывести ИВЧ из пластины, необходимо выбирать подходящую геометрию. Только при наклоне пластины на угол ψ относительно вектора скорости электронного пучка часть конуса ИВЧ будет выходить в вакуум под углом φ, как показано на рис. 1a:

$$\varphi = \psi + \arcsin[n\cos(\theta_{\text{ch}} + \psi)]. \tag{2}$$

В геометрии, показанной на рис. 1a для не расходящегося электронного пучка, вывод ИВЧ из кварцевой мишени в вакуум (или в воздух) возможен только для углов наклона $\psi < 86°$. Так, например, для угла наклона $\psi = 70°$ максимальный выход ИВЧ соответствует углу вывода $\varphi = 29°$ (см. формулу (2)). Если выбрать угол наклона $\psi = 43°$, что соответствует углу $\theta_{\text{ch}} = 47°$, то ИВЧ будет выходить из кварцевой пластины без преломления, т.е. под углом $\varphi = \frac{\pi}{2} - \theta_{\text{ch}} = 43°$.

Цель данной работы – исследовать спектры излучения облучаемого электронным пучком кварца в УФ, видимой и ближней ИК области спектра при энергии электронов 6 МэВ и экспериментально зарегистрировать влияние угла наклона кварцевой пластинки на интенсивность излучения. Для сравнения с расчетными и экспериментальными спектрами, полученными в данной работе, спектр излучения из работы [7] будет приведен ниже.

Экспериментальная установка и методики измерений. Исследования проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1a.

Эксперимент проводился на выведенном электронном пучке микротрона ТПУ (Томского политехнического университета) [14]. Средний ток при энергии электронов 6 МэВ и длительности импульса 4 мкс составлял 25 мА. При этом пучок состоял из 10^4 сгустков с длительностью каждого около 10 пс и подавался на образцы с частотой 3 Гц. Расходимость пучка после вывода из камеры соответствовала $\theta_{\text{e}} \sim 6°$. Форма импульса тока пучка, измеренная с помощью коллектора, показана на рис. 1b,

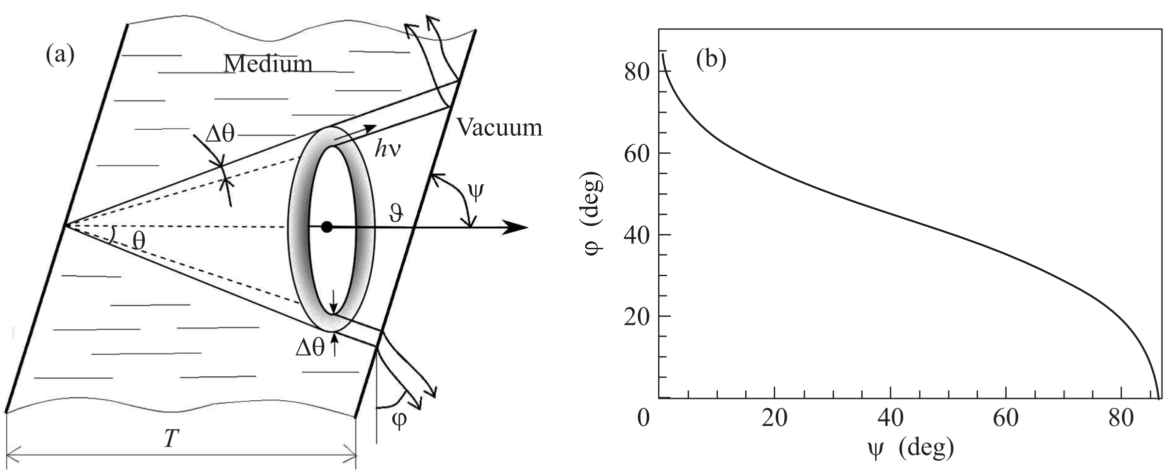

Рис. 2. Угловое распределение ИВЧ в среде и в вакууме (a) и зависимость угла φ от наклона пластины (b)

а излучение кварцевой пластинки под воздействием тока пучка – на рис. 1с. Длительность отдельных электронных сгустков и соответствующих импульсов ИВЧ была меньше временного разрешения используемой в данных экспериментах аппаратуры. Измерения с пикосекундным временным разрешением планируется провести в будущем.

В среде угловое распределение ИВЧ обладает азимутальной симметрией (см. рис. 2а) и в пренебрежении "собственной" шириной $\Delta\theta_0$ может быть оценено как:

$$\Delta\theta_t \approx \sqrt{\theta_{\rm ms}^2 + \theta_{\rm e}^2}, \tag{3}$$

где $\theta_{\rm ms}$ – среднеквадратичный угол многократного рассеяния на длине T/2, $\theta_{\rm e}$ – начальная расходимость пучка. В приближении $\Delta\theta_t \to 0$ соотношение (2) дает однозначную связь между углом вывода ИВЧ в вакуум и наклоном мишени ψ (см. рис. 2b), причем для любого ψ выводится только часть конуса ИВЧ. Из-за уширения конуса $\Delta\theta_t$ (3) "жесткая" связь между углами ψ и φ нарушается, однако, если под углом φ подразумевается угол, соответствующий максимуму выхода ИВЧ, то график на рис. 2b иллюстрирует эту связь.

ИВЧ в кварце имеет наименьший угол $\theta_{\rm ch}$, что облегчает его вывод из плоскопараллельной пластинки. Поэтому в данной работе основное внимание было уделено исследованию ИВЧ в кварце. Образцы алмаза, которыми мы располагали, имели малые размеры, а образцы из сапфира при энергии электронов пучка 6 МэВ темнели под действием электронного пучка и рентгеновского излучения. Кроме того, как мы уже отмечали, ранее спектры ИВЧ в алмазе и сапфире нами были зарегистрированы при энергии электронов до 200 кэВ [8–10].

Для экспериментов использовались плоскопараллельные пластинки из кварца марки GE-014 толщиной 2.18 мм и КУ1 толщиной 8, 8.4 и 10 мм. Выбор данных сортов кварца был обусловлен малой интенсивностью ИКЛ в них и малым поглощением в области длин волн 200–800 нм. Основные эксперименты были проведены с пластинкой из кварца марки GE-014, которая имела наименьшую толщину. Для указанной толщины угол многократного рассеяния $\theta_{\rm ms} \approx 23°$. Спектры излучения регистрировались спектрометром Ocean Optics HR2000+, который был удален от траектории пучка электронов и защищался от их попадания, а также от рентгеновского излучения. Отметим, что рентгеновское излучение имело наибольшую интенсивность у ускорителя и рядом с облучаемой пластинкой и траекторией пучка электронов. Световое излучение от образцов к спектрометру подавалось с помощью световода длиной 2 м, который также защищался от рентгеновского излучения и прямого попадания пучка электронов.

Результаты и их обсуждение. Спектры излучения пластинки из кварца GE-014 при различных углах между поверхностью плоскопараллельной пластинки и направлением потока электронов приведены на рис. 3.

Положение световода, передающего излучение от кварцевой пластинки к спектрометру при изменении угла ψ, не менялось. Этот угол между осью световода и нормалью к направлению пучка электронов в пучке составлял $\varphi = 27°$. Из рисунка 3 видно, что распределение энергии излучения в спектре изменяется в зависимости от угла между плоскостью плоскопараллельной пластинки из кварца и направлением потока электронов в пучке. При угле $\psi \approx 70°$ в УФ области наблюдается наибольшая спектральная

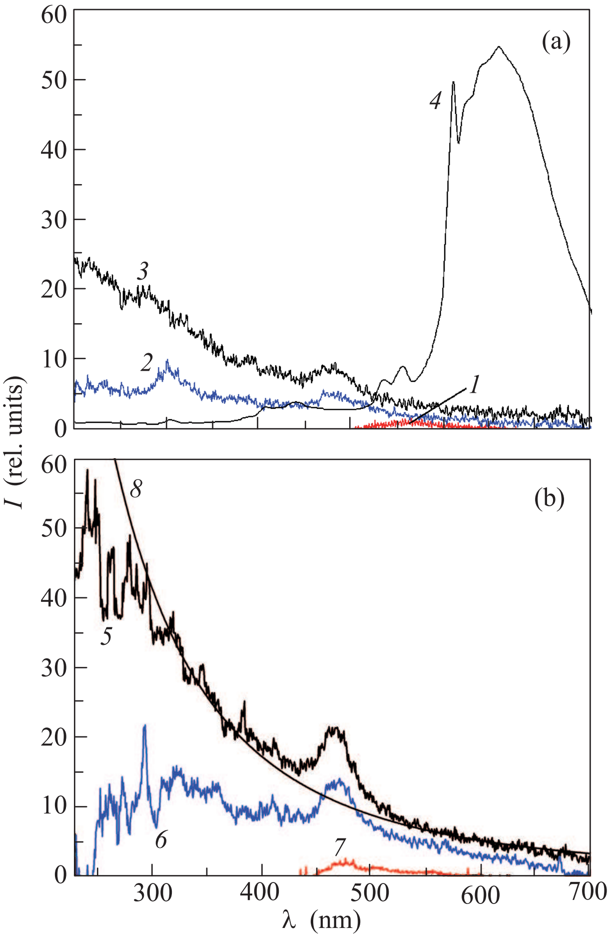

Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектры излучения пластинки из кварца GE-014 при различных углах ψ между поверхностью плоскопараллельной пластинки из кварца и направлением потока электронов (*1* – $\psi = 12°$, *2* – 46°, *3* – 54°, *5* – 70°, *6* – 78°, *7* – 86°), а также спектр излучения из работы [7] (*4*) и расчетный спектр ИВЧ для энергии электронов 6 МэВ (*8*). Спектры *5* и *8* нормированы по интенсивности на длине волны 350 нм

плотность энергии излучения, регистрируемая спектрометром. Подобный спектр ИВЧ следует из расчетов по стандартной формуле из [11] с учетом дисперсии показателя преломления, кривая *8* на рис. 3b. Соответствие ИВЧ регистрируемому в УФ области излучению подтверждает изменение его спектра от угла между пластинкой и потоком электронов. При угле поворота кварцевой пластинки $\psi \approx 70°$ относительно направления электронного пучка обеспечивалась наибольшая эффективность вывода ИВЧ, что хорошо согласуется с оценкой по формуле (2), из которой следует $\varphi = 29°$. При углах, существенно больших и меньших оптимального, см. спектры *1* и *7* на рис. 3, ИВЧ не регистрировалось. Излучение в области длин волн 450–600 нм (спектры *1* и *7*) можно отнести к ИКЛ. Данное предположение подтверждает импульс излучения в видимой области спектра, приведенный на рис. 1c. Данный импульс был зарегистрирован с помощью чипа MicroSC-60035. Видно, что основная часть импульса излучения повторяет форму тока пучка. Однако после прекращения ускорения излучение не прекращается, а продолжается еще около 5 мкс.

Полоса в области 450–600 нм, по-видимому, обусловлена свечением световода под действием рентгеновского излучения. Подобная полоса наблюдалась нами не только при облучении пластинок из кварца, но и при облучении пластинок из искусственного алмаза IIa типа и сапфира.

На рисунке 3a также приведен спектр излучения, который приведен в работе [7] для алмаза. Так как интенсивность излучения при энергии электронов 2.1 МэВ уменьшается при длинах волн короче 600 нм, то это излучение нельзя относить к ИВЧ. Возможно, в работе [7] использовались кристаллы алмаза с большим поглощением в УФ и видимой областях спектра или основная часть ИВЧ поглощалась световодом.

На рисунке 3b приведен расчетный спектр ИВЧ, нормированный по интенсивности в области ≈ 350 нм к спектру, полученному при угле между пластинкой из кварца и пучком электронов $\psi = 70°$. Интенсивность излучения на обоих спектрах в области короче 450 нм возрастает с уменьшением длины волны. Этот факт, как и зависимость интенсивности излучения от угла между плоскостью пластинки из кварца и направлением пучка электронов, рис. 4, однозначно доказывает регистрацию в данной работе спектров

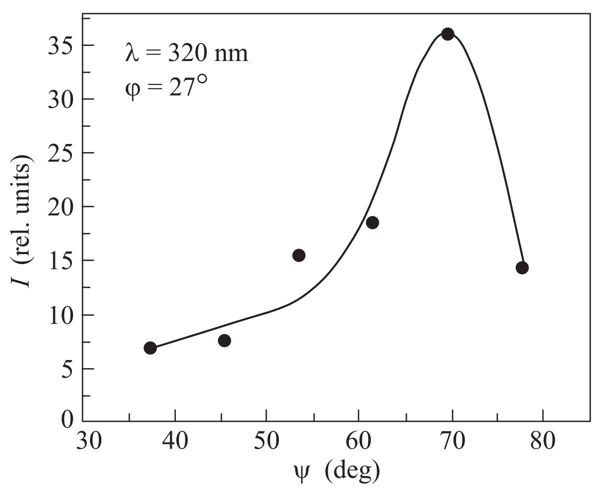

Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения на длине волны 320 нм от угла между плоскостью пластинки из кварца и направлением потока электронов

ИВЧ. Следует отметить, что изменение угла наклона на 25° (от $\psi = 70°$ до $\psi = 45°$) приводит к уменьшению интенсивности в 5 раз, но не до нуля, что объясняется шириной конуса ИВЧ $\Delta\theta_t = 26°$.

Данная зависимость была получена с пластинкой из кварца GE-014. Отметим,что при воздействии пучком электронов на пластинки из кварца КУ1 под подходящим углом также было зарегистрировано ИВЧ.

Выводы. Таким образом, в данной работе впервые был зарегистрирован спектр излучения Вавилова–Черенкова в УФ и видимой областях при возбуждении пластинок из кварца GE-014 и КУ1 пучком электронов с энергией ≈6 МэВ. Показано, что изменение угла между поверхностью плоскопараллельных пластинок и направлением пучка электронов существенно влияет как на интенсивность ИВЧ, так и на спектр излучения. При больших и малых углах наклона пластинки в видимой области спектра регистрируется ИКЛ, а интенсивность ИВЧ становится низкой.

Мы экспериментально доказали, что характеристика зарегистрированного излучения (зависимость от угла вывода, увеличение интенсивности с уменьшением длины волны, безынерционность) однозначно характеризуют это излучение как ИВЧ. Результаты, представленные в данной работе, могут быть использованы при создании средств диагностики пучков релятивистских электронов (в том числе на установках управляемого термоядерного синтеза), а также для диагностики пучков релятивистских ионов, например, на планируемом ускорителе NICA [15].

Работа сотрудниками Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук РАН выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект # 18-19-00184), а сотрудниками Томского политехнического университета – в рамках гранта Миннауки РФ # 3.1903.02017.

1. P. V. Savrukhin and E. A. Shestakov, Nucl. Fusion **55**(4), 043016 (2015).
2. B. Pourshahab, M. R. Abdi, A. Sadighzadeh, and C. Rasouli, Phys. Plasmas **23**(7), 072501 (2016).
3. R. J. Zhou, L. Q. Hu, Y. Zhang, G. Q. Zhong, S. Y. Lin, and The EAST Team, Nucl. Fusion **57**(11), 114002 (2017).
4. M. Rubel, S. Brezinsek, J. W. Coenen, A. Huber, A. Kirschner, A. Kreter, P. Petersson, V. Philipps, A. Pospieszczyk, B. Schweer, G. Sergienko, T. Tanabe, Y. Ueda, and P. Wienhold, Matter Radiat. Extremes **2**(3), 87 (2017).
5. L. Jakubowski, M. J. Sadowski, J. Zebrowski, M. Rabinski, K. Malinowski, R. Mirowski, Ph. Lotte, J. Gunn, J.-Y. Pascal, G. Colledani, V. Basiuk, M. Goniche, and M. Lipa, Rev. Sci. Instrum. **81**, 013504 (2010).
6. M. J. Sadowski, Nukleonika **56**(2), 85 (2011).
7. F. Bagnato, A. Romano, P. Buratti, A. Doria, L. Gabellieri, E. Giovenale, A. Grosso, L. Jakubowski, D. Pacella, V. Piergotti, M. Rabinski, G. Rocchi, A. Sibio, B. Tilia, and J. Zebrowski, Plasma Phys. Control. Fusion **60**(11), 115010 (2018).
8. D. A. Sorokin, A. G. Burachenko, D. V. Beloplotov, V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht, E. I. Lipatov, and M. I. Lomaev, J. Appl. Phys. **122**(15), 154902 (2017).
9. А. Г. Бураченко, В. Ф. Тарасенко, Д. В. Белоплотов, Е. Х. Бакшт, Изв. ВУЗов. Физика **60**(9), 66 (2017).
10. V. F. Tarasenko, M. I. Lomaev, E. Kh. Baksht, D. V. Beloplotov, A. G. Burachenko, D. A. Sorokin, and E. I. Lipatov, Matter Radiat. Extremes **4**(3), 037401 (2019).
11. В. П. Зрелов, *Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий*, Атомиздат, М. (1968), т. 1, 274 с.
12. А. П. Потылицын, С. Ю. Гоголев, Письма в ЭЧАЯ **16**(2), 147 (2019).
13. A. V. Vukolov, A. I. Novokshonov, A. P. Potylitsyn, and S. R. Uglov, J. Phys. Conf. Ser. **732**(1), 012011 (2016).
14. Г. А. Науменко, А. П. Потылицын, П. В. Каратаев, М. А. Шипуля, В. В. Блеко, Письма в ЖЭТФ **106**(2), 115 (2017).
15. G. Trubnikov, N. Agapov, V. Alexandrov et al. (Collaboration), *European Particle Accelerator Conference 11th, Proceedings of EPAC'08, 23-27 June*, 2581 (2008).