УДК 537.97

## ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 20 МэВ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОНОКРИСТАЛЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНИХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

А.Р. МКРТЧЯН $^{1,2}$ , А.Г. МКРТЧЯН $^{1*}$ , Л.Ш. ГРИГОРЯН $^{1}$ , А.А. СААРЯН $^{1}$ , А.А. АСЛАНЯН $^{1}$ , Э.М. АРУТЮНЯН $^{1}$ , С.П. ТАРОЯН $^{3}$ , В.Ц. НИКОГОСЯН $^{3}$ , В.Р. КОЧАРЯН $^{1}$ , Г.А. АЙВАЗЯН $^{1}$ , В.В. НАЛБАНДЯН $^{1}$ , Т.Г. ДОВЛАТЯН $^{1}$ , А.Е. МОВСИСЯН $^{1}$ , Э.А. МКРТЧЯН $^{1}$ , О.Р. МУРАДЯН $^{1}$ , С.А. МИРАКЯН $^{1}$ , А.А. АСЛАНЯН $^{1}$ 

<sup>1</sup>Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван <sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия

<sup>3</sup>Национальная научная лаборатория им. А.И.Алиханяна, Ереван \*e-mail: amkrtchyan@sci.am

(Поступила в редакцию 13 марта 2013 г.)

Экспериментально исследованы излучение, возникающее взаимодействии электронов с пьезоэлектрическими монокристаллами, и воздействие акустических полей на частотно-временные параметры характерных энергетических выходов. Эксперименты проводились на выведенном пучке электронов с энергией 20 МэВ линейного ускорителя ЛУЭ-50 Национальной научной лаборатории им. А.И.Алиханяна. Получены энергетические распределения характерных выходов излучения электронов в монокристалле кварца. Зарегистрированы увеличение интенсивности и сдвиг энергетических выходов под воздействием гиперзвуковых колебаний.

В настоящее время одной из актуальных научно-технических проблем является разработка и создание альтернативных монохроматичных источников излучения рентгеновского диапазона частот с управляемыми частотно-времен-ными характеристиками. В начале 60-ых годов XX века было предсказано новое физическое явление - спонтанное электромагнитное излучение, возникающее в кристаллах при каналирования заряженных частиц [1]. Последующие теоретические работы [2-10] увеличили интерес к этому явлению, что, в свою очередь, привлекло внимание многих исследовательских групп ведущих мировых ядерных центров. Впервые группой армянских исследователей на внутреннем пучке Ереванского синхротрона АРУС [11,12] было экспериментально наблюдено излучение каналированных (ИК) электронов с энергией 4.7 ГэВ в монокристалле алмаза толщиной 100 мкм. В последующих работах [13-21] было зарегистрировано ИК электронов с энергиями 4.5 ГэВ, 855 МэВ и 180 МэВ в пьезоэлектрических монокристаллах и была обоснована возможность усиления

интенсивности и управления частотно-временными параметрами ИК с помощью внешних электромагнитных полей СВЧ диапазона.

Настоящая работа посвящена исследованию явления ИК электронов с энергией 20 МэВ в монокристалле кварца при отсутствии и наличии внешних электромагнитных полей СВЧ диапазона. Она является продолжением цикла работ по выявлению и объяснению явления ИК в периодических структурах, а также увеличения интенсивности и управления пространственно-временными параметрами характерных энергетических выходов ИК.

Экспериментальные исследования проводились по классической схеме регистрации излучения электронов, возникающего при их взаимодействии с периодическими структурами и распространяющегося вперед по направлению движения заряженной частицы. Схематическая картина экспериментальной установки приведена на рис.1. Экспериментальные исследования проводились на линейном ускорителе ЛУЭ-50 Национальной научной лаборатории им. А.И. Алиханяна. На выводе ускорителя был сформирован пучок электронов с энергией электронов 20 МэВ  $\Box$  20 кэВ, вертикальным расхождением  $5 \times 10^{-4}$  рад, горизонтальным расхождением  $1 \times 10^{□3}$  рад и диаметром 0.2 □ 0.005 см. С целью возбуждения электромагнитных полей СВЧ диапазона разной частоты были разработаны специальные резонаторы-держатели исследуемых образцов, универсальный дистанционно управляемый высокоэффективный широкополосный усилитель СВЧ частоты и гониометрическое устройство с пятью степенями свободы, обеспечивающее необходимую точность для проведения экспериментальных исследований.

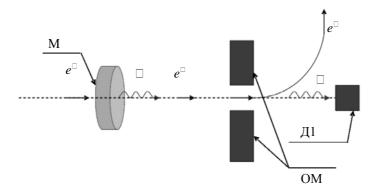


Рис.1. Схема экспериментальной установки. М – мишень-радиатор, OM – отклоняющий магнит, Д1 – пропорциональный счетчик.

Сформированный пучок электронов, пройдя сквозь выходное каптоновое вакуумное окно толщиной 60 мкм падал на мишень-радиатор, размещенный в резонаторе-держателе, расположенном на расстоянии 15 см от выходного окна. Провзаимодействовав с мишенью и пролетев расстояние 40 см в атмосфере воздуха, пучок электронов попадал в вакуумную среду, затем отклоняющим магнитом перенаправлялся на систему регистрации с целью определения выходных параметров электронного пучка. Возникающее в исследуемых образцах излучение рентгеновского

диапазона регистрировалось пропорциональным счетчиком PA-700 с газовым наполнением Kr-CO<sub>2</sub>. Счетчик с входным бериллиевым окном и диаметром 2 см располагался в защитном свинцовом контейнере с коллиматором (диаметр 0.17 см и длина 20 см) на расстоянии 100 см от мишени и был откалиброван с помощью стандартных источников гамма квантов:  ${}^{57}$ Fe,  ${}^{60}$ Co,  ${}^{137}$ Cs,  ${}^{241}$ Am.

В экспериментах мишенями-радиаторами служили круглые пластины диаметром 2 см из пьезоэлектрического монокристалла кварца разной толщины и кристаллографических срезов, прошедшие специальную обработку и покрытые с двух сторон электрическими контактами из серебра толщиной  $10^{\square 6}$  см. С целью проверки добротности кристаллов-радиаторов предварительно было проверено явление полной переброски рентгеновского излучения [22,23].

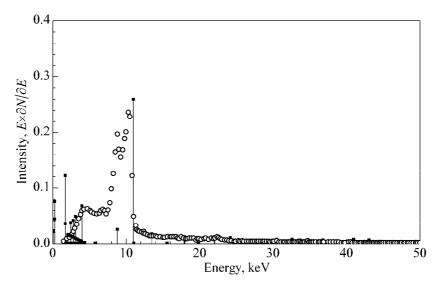


Рис.2. Энергетическое распределение излучения электронов с энергией 20 МэВ в монокристалле кварца толщиной 1 мм при обеспечении условия каналирования вдоль плоскости ( $10\overline{11}$ ). • – результаты численных расчетов, о – экспериментальные данные.

На всех образцах-радиаторах было наблюдено явление ИК при наличии и отсутствии внешних акустических полей. На рис.2 приведен энергетический спектр, зарегистрированный для образца кварца X-среза толщиной 1 мм при обеспечении условия каналирования электронов вдоль плоскости (1011). На рисунке четко выделяются характерные энергетические выходы ИК при энергиях 4.5 кэВ, 8.9 кэВ и 10.2 кэВ, а также присутствует характерный максимум при энергиях 22.5 кэВ, который по предварительной оценке соответствует когерентному тормозному излучению. Местоположение характерных максимумов неплохо согласуется с результатами теоретических расчетов [21]. Аналогичные спектры с характерными пиками ИК были получены при каналирования электронов вдоль плоскостей (2023), (1012), (4041).

С целью выявления возможности усиления интенсивности и управления частотно-временными параметрами характерных энергетических выходов ИК, были

зарегистрированы соответствующие спектры излучения при наличии внешнего электромагнитного поля разной мощности с частотой  $1.024~\Gamma\Gamma$ ц. На рис.3 приведены характерные энергетические распределения плоскостного ИК для кристаллографической плоскости ( $10\overline{1}1$ ) монокристалла кварца X-среза толщиной 1 мм при наличии внешнего электромагнитного поля разной мощности – 0, 5 и 10 Вт. Аналогичные распределения были получены для всех исследованных образцов. Из приведенных экспериментальных данных видно, что (а) воздействие гиперзвуковых колебаний приводит к изменению интенсивности характерных энергетических выходов ИК излучения и (б) с увеличением мощности гиперзвуковых колебаний наблюдается сдвиг энергетических выходов.

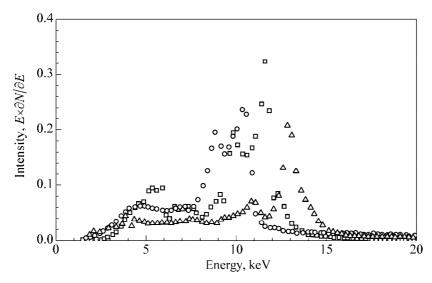


Рис.3. Энергетическое распределение плоскостного ИК электронов с энергией 20 МэВ в монокристалле кварца при наличии и отсутствии гиперзвуковых колебаний:  $\circ - 0$  Вт,  $\square - 5$  Вт и  $\Delta - 10$  Вт.

Как и в случае ИК, выявленные в регистрированных спектрах энергетические выходы, соответствующие когерентному тормозному излучению (КТИ), свидетельствуют о возможности контроля спектрально-угловыми характеристиками излучения путем подбора параметров гиперзвуковых колебаний. На рис.4 приведены спектральные распределения интенсивности КТИ при наличии и отсутствии гиперзвуковых возбуждений. Спектральное распределение некогерентного тормозного излучения определяется стандартной формулой Бете-Гайтлера и соответствующий вклад вычтен. Как видно из рис.4, при увеличении амплитуды гиперзвуковых колебаний высота пика в спектральном распределении сначала возрастает, а затем уменьшается. Теоретические исследования воздействия акустических волн на поперечное сечение КТИ в кристаллах были проведены в работах [24,25]. Эти исследования показывают, что в зависимости от параметров акустической волны и от угла падения пучка наличие гиперзвуковых волн может привести как к увеличению, так и к уменьшению поперечного сечения тормозного излучения. Эти предсказания качественно подтверждаются результатами экспериментов.

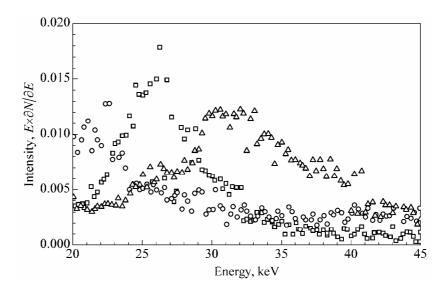


Рис.4. Энергетическое распределение КТИ электронов с энергией 20 МэВ в монокристалле кварца при наличии и отсутствии гиперзвуковых колебаний: о -0 Вт, -5 Вт и  $\Delta-10$  Вт.

Таким образом, теоретические предсказания и результаты теоретических расчетов по выбору пьезоэлектрического монокристалла и рабочих кристаллографических семейств плоскостей и осей для регистрации максимального усиления интенсивности и изменения частотно-временных распределений характерных энергетических выходов ИК и КТИ подтверждаются полученными экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках намеченных научно-технических исследований международной российско-армянской лаборатории «Рентгеновская оптика» Института прикладных проблем физики НАН РА и Национального исследовательского Томского политехнического университета РФ при финансовой поддержке ГКН МОН РА и ФЦП РФ проекта №11.519.11.2030.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. J.Lindhard et al. Mat.-Fys., 34, N14, 45 (1965).
- 2. В.В.Белошицкий, М.А.Кумахов. ДАН СССР, 212, 846 (1973).
- 3. B.S.Gammall. Rev. Mod. Phys., 45, N1, 129 (1974).
- 4. M.Kitagawa, Y.H.Ohtsuki. Phys. Rev., 88, 3117 (1973).
- 5. F.F.Kamarov, M.A.Kumakhov. Radiat. Eff. Defect Sol., 22, 1 (1974).
- 6. M.A.Kumakhov, L.R.Wedell. Phys. Stat. Sol., 6, 119 (1976).
- 7. **A.Carnera, G.Bella Mea, et al.** Phys. Rev. B, **16**, 995 (1978).
- 8. **М.А.Кумахов, Г.Ширмер.** Атомные столкновения в кристаллах. М., Атомиздат, 1980
- 9. A.Carnera, A.V.Brigo, P.Mazzoldi. Radiat. Eff. Defect Sol., 49, 29 (1980).

- 10. **М.А.Кумахов.** Излучение каналированных частиц в кристаллах. М., Энергоатомиздат, 1986.
- 11. **А.О.Аганянц, И.А.Вартанов, Г.А.Вартапетян и др.** Письма в ЖЭТФ, **29**, 1340 (1979).
- 12. Р.О.Авакян, А.О.Аганьянц, Н.Э.Акопов и др. Ядерная физика, 35, 387 (1982).
- 13. А.Р.Мкртчян и др. Письма в ЖЭТФ, 48, 577 (1988).
- 14. **R.O.Avakian et al.** Nucl. Instrum. Methods B, **48**, 266 (1990).
- 15. **А.Р.Мкртчян и др.** Письма в ЖТФ, **16**, 4 (1990).
- 16. **А.Р.Мкртчян, А.Г.Мкртчян, А.А.Асланян, В.К.Мирзоян, В.У.Тоноян, М.М. Мирзоян, Г.Бакэ, В.Лаут, Г.Кубе, В.Вагнер.** Информационные технологии и управление, **1**, 36 (2006).
- 17. L.Sh.Grigoryan, A.R.Mkrtchyan, A.H.Mkrtchyan, H.F.Khachatryan, W.Wagner, M.A.Piestrup. Radiat. Eff. Defect Sol., 153, 289 (2001).
- 18. L.Sh.Grigoryan, A.R. Mkrtchyan, A.H.Mkrtchyan, H.F. Khachatryan, W.Wagner, M.A.Piestrup. Radiat. Eff. Defect Sol., 153, 307 (2001).
- 19. L.Sh.Grigoryan, A.H.Mkrtchyan, H.F.Khachatryan, W.Wagner, A.A.Saharian, K.S.Baghdasaryan. NIM B, 212, 51 (2003).
- 20. L.Sh.Grigoryan, A.H.Mkrtchyan, H.F.Khachatryan, V.U.Tonoyan, W.Wagner. NIM B, 201, 25 (2003).
- 21. W.Wagner, B.Azadegan, H.Buetting, L.Sh.Grigoryan, A.R.Mkrtchyan, J.Pawelke. Nuovo Cimento, 34, 133 (2011).
- 22. А.Р.Мкртчян, М.А.Навасардян, В.К.Мирзоян. Письма в ЖТФ, 8, 677 (1982).
- 23. А.Р.Мкртчян, М.А.Навасардян и др. Письма в ЖТФ, 9, 1181 (1983).
- A.A.Saharian, A.R.Mkrtchyan, V.V.Parazian, L.Sh.Grigoryan. Mod. Phys. Lett. A, 19, 99 (2004).
- 25. A.R.Mkrtchyan, A.A.Saharian, V.V.Parazian. Mod. Phys. Lett. B, 23, 2573 (2009).

RADIATION FROM 20 MeV ELECTRONS IN PIEZOELECTRIC SINGLE CRYSTALS IN THE PRESENCE OF EXTERNAL ACOUSTIC FIELDS

A.R. MKRTCHYAN, A.H. MKRTCHYAN, L.Sh. GRIGORYAN, A.A. SAHARIAN, H.A. ASLANYAN, E.M. HARUTUNYAN, S.P. TAROYAN, V.C. NIKOGOSYAN, V.R. KOCHARYAN, G.A. AIVAZYAN, V.V. NALBANDYAN, T.G. DOVLATYAN, A.E. MOVSISYAN, E.A. MKRTCHYAN, H.R. MURADYAN, S.A. MIRAKYAN, A.H. ASLANYAN

The radiation from electrons interacting with piezoelectric crystals and the influence of acoustic fields on the frequency-temporal parameters of characteristic energy yields has been investigated. The experiments were carried out on 20 MeV electron beam of the linear accelerator LEA-50 of the National Scientific Laboratory after A.I. Alikhanian. The energy distributions of specific yields of the electron radiation in quartz single crystal were obtained. The amplification of intensity and the shift of energy yields under the influence of hypersonic vibrations were observed.