

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ  
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՄԿՐՏՉՅԱՆ ԷԴԳԱՐ ԱՐԾՐՈՒՆՈՒ

ՌԵԼՅԱՏԻՎԻՍՏԻԿ ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐԻ ԿՈՇԵՐԵՆՏ ԱՐԳԵԼԱԿԱՅԻՆ  
ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՐՏԱՔԻՆ  
ԱԿՈՒՍՏԻԿ ԱԶԴԱԿՆԵՐԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա.04.06-«Ակուստիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական  
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման  
ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2013

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ  
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МКՐՏՉՅԱՆ ԷԴԳԱՐ ԱՐԾՐՈՒՆՈՎԻՉ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВНЕШНИХ АКУСТИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯХ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.06 – “Акустика”

ЕРЕВАН -2013

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկայի կիրառական պրոբլեմների ինստիտուտում

Գիտական ղեկավար՝

ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆ.

Ա.Ռ. Մկրտչյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆ.

Կ.Գ. Թրունի

ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր,

Կ.Ա. Իսպիրյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

«Կուրչատովի ինստիտուտ» ազգային  
գիտահետազոտական կենտրոն  
Ինֆորմացիոն տեխնոլոգիաների ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2013թ. հունիսի 18-ին, ժ.15:00  
ին:

Երևանի պետական համալսարանի ֆիզիկայի 049 մասնագիտական խորհրդի  
նիստում:

Հասցեն՝ 375014, Երևան, Հր. Ներսիսյանի փ., 25:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2013թ. մայիսի 17 -ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝

ֆիզ.-մաթ.գիտ.թեկնածու, դոցենտ



Վ.Պ. Քալանթարյան

---

Тема диссертации утверждена в Институте Прикладных Проблем Физики НАН РА

Научный руководитель:

Академик НАН РА, доктор физ.-мат. наук, проф.

А. Р. Мкртчян

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, проф.

К.Г. Труни

доктор физ.-мат. наук

К.А. Испирян

Ведущая организация:

Национальный исследовательский центр  
“Курчатовский институт”  
Институт информационных технологий

Защита диссертации состоится 18-го июня 2013г. в 15:00 часов на заседании  
Специализированного совета по физике 049 Ереванского государственного университета  
по адресу: 375014, Ереван, ул. Гр. Нерсисяна, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 17-го мая 2013г.

Учёный секретарь специализированного совета:

кандидат физико-математических наук, доцент



В.П. Калантарян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Создание более чувствительных и универсальных методов для исследования в различных областях науки и техники, как например, определение реальных структур совершенных кристаллов, томография биологических объектов, элементы электроники и т.д., является актуальной задачей. Для решения этой задачи одним из необходимых факторов является создание монохроматических, без гармоник, источников гамма-квантов с управляемыми в пространстве и во времени параметрами, как например угловое расхождение и интенсивность. Одним из таких методов является дифрактометрия излучения порядка ангстремных длин волн, сформированных при наличии внешних возмущении.

В последние годы в научной литературе появилось много работ в этом направлении. В особенности, надо отметить теоретические и экспериментальные работы, проведенные в области управления пучками рентгеновского диапазона энергии под воздействием внешних полей. Показано, что внешние акустические поля в конкретном образце резко изменяют сечение процесса рассеяния и таким образом могут стать рычагом управления параметрами дифрагированного рентгеновского излучения в пространстве и во времени. В свою очередь это явление открывает новые возможности для формирования пучков с заданными параметрами, тем самым, широкого применения рентгеновской дифрактометрии в науке и технике.

Отметим также, что очень часто для получения интенсивных монохроматических и узконаправленных пучков рентгеновского диапазона энергии используют синхротронное излучение. Однако упомянутые источники излучения имеют ряд недостатков. Отметим некоторые из них: потребляемая большая мощность с целью получения источников с большой светосилой, резкое падение интенсивности в коротковолновом диапазоне длин волн, дискретность энергетических выходов и т.д.

В вышеупомянутых областях исследования другой немаловажной и актуальной проблемой является выявление и описание процесса воздействия внешних полей (акустические поля, температурный градиент и т.д.) в частности на сечение рассеяния гамма-квантов в конденсированных средах. Решение которой может привести к возможности создания элементов гамма-оптики и управлению параметрами пучков (изменение электронной плотности, т.е. изменение коэффициента поглощения гамма-квантов, фокусировка и т.д.).

Из вышесказанного следует, что получение монохроматических и узконаправленных интенсивных источников излучения в рентгеновском диапазоне длин волн остается весьма актуальной проблемой.

В последнее время, с развитием теории и накоплением экспериментальных данных в области взаимодействия релятивистских заряженных частиц с конденсированной средой, был предложен ряд альтернативных источников гамма-квантов с большой энергетической плотностью, малой угловой и энергетической расходимостью в диапазоне ангстремных длин волн, которые в отдельных случаях лишены вышеуказанных недостатков. Среди этих излучений можно выделить излучение аксиально или планарно каналированных заряженных частиц, рентгеновское переходное излучение и параметрическое рентгеновское излучение, когерентное тормозное излучение. Наряду исследований и описаний процессов формирования этих излучений особое место занимают коротковолновые диапазоны длин волн при наличии внешних акустических возбуждений. Это является важной проблемой современных исследований.

Поэтому особо важное место могут занять исследования формирования когерентного тормозного излучения на акустической сверхрешетке, благодаря которым появится возможность создать в аморфных образцах периодический слой с периодически изменяющимся коэффициентом диэлектрической проницаемости. Управляя периодичностью возникших слоев с заданной диэлектрической проницаемости, можно получить стопку сверхрешеток, следовательно, резко увеличить интенсивность, изменить спектральные распределения и управлять параметрами результирующих энергетических выходов, чем и диктуется необходимость проведения таких исследований.

### **Цель диссертационной работы.**

- Экспериментальное исследование процесса когерентного тормозного излучения релятивистских электронов с энергией 20 МэВ в монокристаллах и в отсутствие акустического поля и при наличии внешних акустических полей в зависимости от их амплитуды;
- Экспериментальное исследование поведения интенсивности когерентного тормозного излучения в зависимости от амплитуды внешних акустических полей;
- Экспериментальное исследование частотно-углового распределения когерентного тормозного излучения в зависимости от частоты внешнего акустического поля;

- Теоретическое исследование явления когерентного тормозного излучения при наличии внешних акустических полей и сравнение с экспериментальными результатами;
- Экспериментальное исследование возможности управления параметрами коротковолнового излучения.

### **Научная новизна.**

- Экспериментально наблюдается явление когерентного тормозного излучения релятивистских электронов с энергией 20 МэВ в монокристаллических пластинках кварца X-среза;
- Наблюдено явление усиления интенсивности когерентного тормозного излучения под влиянием внешнего акустического возбуждения;
- Наблюдены: частотно-угловые перераспределения когерентного тормозного излучения в зависимости от частоты внешнего акустического возбуждения;
- новые полосы и пики, а также подавления отдельных пиков;
- явления изменения интенсивности компонентов спектрального распределения когерентного тормозного излучения.

### **Практическая значимость.**

Для проведения экспериментов были

- разработаны не имеющие аналоги гониометры с прецизионными параметрами и с дистанционным управлением;
- разработаны и созданы сверхдобротные резонаторы электромагнитного излучения гиперчастоты;
- разработан высокостабильный генератор электромагнитного поля гиперчастоты с дискретным варьированием рабочей частоты и амплитуды.

Научные результаты в области усиления интенсивности и спектрального распределения и разработанная аппаратура могут найти широкое применение в науке и технике.

### **На защиту выносятся следующие основные положения:**

Результаты исследований по

- когерентному тормозному излучению на монокристаллических пластинках кварца;
- когерентному тормозному излучению на акустических сверхрешетках;
- усилению и управлению интенсивности отдельных компонентов в зависимости от амплитуды акустического поля;
- спектральному распределению тормозного излучения в зависимости от частоты внешнего акустического поля;
- перераспределению спектрального распределения когерентного тормозного излучения в зависимости от частоты амплитуды внешнего акустического поля;
- Разработана теория когерентного тормозного излучения при наличии внешних акустических воздействий;
- Разработана и создана аппаратура для проведения экспериментальных исследований.

#### **Апробация работы.**

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной конференции "International Conference on Electrons, Positrons, Neutrons and X-Rays Scattering Under External Influences", Yerevan–Meghri 18–22 October 2011, Armenia, на международной конференции "Transition Radiation of Relativistic Electrons on Acoustic Superlattice in Amorphous Media" Channeling 2012, September 23 - September 28, Erice, Italy. Результаты работы многократно докладывались на общих и лабораторных семинарах Института Прикладных Проблем Физики НАН РА.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 работ.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, изложенных на 102 страницах, включая 26 рисунка, списка литературы из 161 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследования, научная новизна и практическая значимость области формирования источников когерентного тормозного излучения при внешних акустических воздействиях, а также основные защищаемые положения работы.

**В первой главе** проведен подробный анализ литературных данных по когерентному тормозному излучению релятивистских электронов при воздействии внешних акустических полей. В частности, приведены результаты анализа экспериментальных и теоретических исследований. Показано, что интенсивность когерентного тормозного излучения релятивистических электронов может многократно увеличиваться, когда по образцу кварца возбуждается акустическое поле.

**Во второй главе** описана методика эксперимента. Описана конструкция отдельных узлов экспериментальной установки (кристаллодержатели, система возбуждения акустических колебаний и технология изготовления образцов для исследования). В исследуемом образце акустические колебания возбуждались с помощью специально созданного для этой цели сверхдобротного резонатора-держателя с СВЧ генератором электромагнитного излучения. Разработанная аппаратура может найти широкое применение в науке и технике, как например для создания монохроматических источников излучения объемных гиперзвуковых акустических колебаний, для исследования переходного, каналированного излучения релятивистских электронов, возбуждения поверхностных акустических СВЧ и гиперзвуковой частоты для химии задержки и т.д.

**В третьей главе** изложены результаты, существующие в научной литературе, исследования о возможности излучения рентгеновского диапазона когерентного тормозного излучения релятивистских электронов и показано актуальное управление их параметров в пространстве и во времени под воздействием внешних акустических возбуждений и в дальнейшем теоретические исследования когерентного тормозного излучения релятивистских электронов, движущихся в монокристалле, возбужденным деформацией, генерируемой гиперзвуковыми колебаниями общего профиля:  $\vec{u}_n^{(j)} = \vec{u}_0 f(\vec{k}_s \vec{r}_{ne}^{(j)})$ . Здесь  $\vec{u}_n^{(j)}$  смещение  $j$ -ого атома, вызванное гиперзвуком,  $\vec{k}_s$  - волновой вектор деформации,  $f(x)$  - произвольная периодическая функция с периодом  $2\pi$  и  $\max f(x) = 1$ . В аргументе этой функции  $\vec{r}_{ne}^{(j)}$  радиус-вектор равновесного положения  $j$ -ого атома при отсутствии деформации можно

представить в виде  $\vec{r}_{ne}^{(j)} = \vec{R}_n + \vec{\rho}^{(j)}$ , где  $\vec{R}_n$  определяет положения атомов в одной из примитивных ячеек, а  $\vec{\rho}^{(j)}$  соответствуют равновесному положению других атомов внутри  $n$ -й элементарной ячейки по отношению к  $\vec{R}_n$ . Временной зависимостью поля деформации можно пренебречь, поскольку для рассматриваемых нами энергий частиц, характерное время изменения поля деформации, определяемое гиперзвуковыми частотами, намного больше времени прохождения частицы через кристалл. Дифференциальное сечение тормозного излучения распадается на две части. Первая из них соответствует сечению излучения в аморфной среде, умноженному на фактор содержащий тепловой множитель Дебая – Валлера. Вторая часть определяет сечение когерентного излучения, обусловленное регулярным распределением атомов в кристаллах. Когерентная часть поперечного сечения, отнесенная к одному атому, определяется формулой

$$\frac{d\sigma_c}{d\omega} = \frac{e^2 N}{N_0 E_1^2 \Delta_{m,\vec{g}}} \sum G_m(\vec{g}, \omega, E_1),$$

где  $E_1$  - энергия электрона до излучения,  $\omega$  - частота излученного фотона,  $\Delta$  - объем элементарной ячейки,

$$G_m(\vec{g}, \omega, E_1) = \frac{g_{m\perp}^2}{g_{m\parallel}^2} \left[ 1 + \frac{\omega^2}{2E_1 E_2} - 2 \frac{\delta}{g_{m\parallel}} \left( 1 - \frac{\delta}{g_{m\parallel}} \right) \right] |F_m(\vec{g}_m \vec{u}_0)|^2 |S(\vec{g}_m, \vec{g})|^2,$$

и суммирование проводится при условии  $g_{m\parallel} \geq \delta$ ,  $\delta$  - минимальный переданный импульс, связанный с зоной формирования тормозного излучения соотношением  $\delta = 1/l_c$ . В приведенном выражении,  $e$  - заряд электрона,  $N$  - число ячеек в кристалле,  $N_0$  - число атомов,  $g_{m\parallel}$  и  $g_{m\perp}$  параллельное и перпендикулярное составляющие вектора  $\vec{g}_m = \vec{g} - m\vec{k}_s$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , по отношению к направлению движения первичного электрона, функция  $F_m(x)$  определяется выражением  $F_m(x) = (1/2) \int_{-\pi}^{+\pi} e^{ixf(t) - imt} dt$ . Величина  $S(\vec{g}_m, \vec{g})$  определяется структурой элементарной ячейки и задается формулой  $S(\vec{g}_m, \vec{g}) = \sum_j u_{\vec{g}_m}^{(j)} e^{-g_m^2 \vec{u}_i^{(j)2} / 2} e^{i\vec{g}\vec{\rho}^{(j)}}$ , где  $u_{\vec{q}}^{(j)}$  - Фурье-образ потенциала  $j$ -го атома,  $\vec{u}_i^{(j)2}$  - обусловленное тепловыми колебаниями среднеквадратичное отклонение  $j$ -го атома.

Приведенная формула для сечения когерентного тормозного излучения отличается от соответствующего выражения для тормозного излучения в недеформированных кристаллах заменой  $\vec{g} \rightarrow \vec{g}_m$  и наличием дополнительного суммирования по  $m$  с весом  $|F_m(\vec{g}_m \vec{u}_0)|^2$ . Это соответствует

наличию дополнительной одномерной сверхрешетки с периодом  $\lambda_s = 2\pi/k_s$  и с вектором обратной решетки  $m\vec{k}_s$ . При наличии поля деформации число возможностей удовлетворяющих условию  $g_{m\parallel} \geq \delta$  суммирования растёт благодаря наличию слагаемого  $m\vec{k}_s$  в выражении для  $g_{m\parallel}$ . Это приводит к появлению дополнительных пиков в спектральном распределении излученных фотонов. Поскольку основной вклад в когерентную часть поперечного сечения дают слагаемые с  $g_{m\parallel} \sim \delta$ , то воздействие поля деформации может быть заметным при условии  $|mk_s| \gtrsim \delta$ . С учетом того, что основной вклад в сумму по  $m$  дают слагаемые с  $|m| \lesssim \lambda_s/a$ , где  $a$  порядка постоянной решетки, получим условие  $u_0/\lambda_s \gtrsim a/(4\pi^2 l_c)$ . При высоких энергиях  $a/l_c \ll 1$  и это условие может быть совместимым с условием  $u_0/\lambda_s \ll 1$ . При движении частицы в неориентированном кристалле сечение тормозного излучения мало отличается от соответствующей величины в аморфной среде. Ситуация существенно меняется при влете частицы в кристалл под малым углом к одной из кристаллических осей или плоскостей и при этом  $l_c \gg a$ , где  $a$  порядка постоянной решетки. Когерентные эффекты приводят к значительному увеличению интенсивности излучения в кристалле по сравнению с интенсивностью излучения в аморфной среде и к значительным скачкам интенсивности излучения при определенных частотах излученных фотонов. При наличии внешнего возбуждения число таких скачков увеличивается.

Подробно рассмотрен случай кристалла с ортогональной решеткой, полагая, что электрон входит в кристалл под малым углом  $\theta$  к одной из кристаллографической осей (ось  $z$ ). С точки зрения воздействия акустической волны на сечение излучения наиболее благоприятным является случай поперечной акустической волны с направлением распространения вдоль оси  $z$ . Когда частица движется далеко от кристаллографических плоскостей, т.е. углы  $\alpha$  и  $\pi/2 - \alpha$  не малы, где  $\alpha$  - угол между проекцией вектора импульса начального электрона на плоскость  $(x, y)$ , и осью  $y$ , то выражение под знаком суммы в формуле для дифференциального сечения когерентного тормозного излучения является гладкой функцией от компонент  $g_x$  и  $g_y$  вектора обратной решетки, и суммирование по этим переменным можно заменить интегрированием. В этом случае взаимодействие излучающей частицы с различными цепочками атомов по оси является независимым. Соответствующее сечение по порядку величины

превосходит сечение определяемого по формуле Бете-Гайтлера на фактор, равный числу атомов на длине когерентности.

При движении частицы под малым углом относительно кристаллографической оси и вблизи кристаллографической плоскости  $(y, z)$ , (угол  $\alpha$  мал) нужно различать два случая. При условии  $\delta \sim 2\pi\theta/a_2$ , где  $a_i$ ,  $i=1,2,3$ , постоянные решетки, для продольной компоненты имеем  $g_{m\parallel} \approx -mk_{s\parallel} + g_y\theta \geq \delta$ , и суммирование по  $g_x$  можно заменить интегрированием. Выражение для когерентной части поперечного сечения примет вид

$$\frac{d\sigma_c}{d\omega} \approx \frac{e^2 N}{2\pi N_0 E_1^2 a_2 a_3} \sum_{m, g_y} \int dg_x G_m(\vec{g}, \omega, E_1).$$

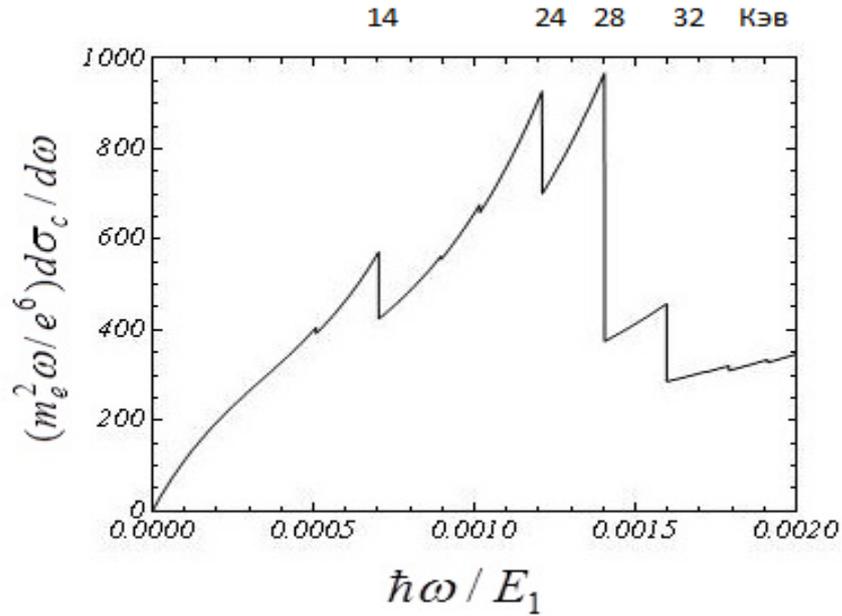
Втором случай соответствует значениям энергии электрона для которых  $\delta \sim 2\pi\theta\alpha/a_1$ . Теперь основной вклад в сумму дают слагаемые с  $g_y = 0$  и формула для поперечного сечения запишется в виде

$$\frac{d\sigma_c}{d\omega} \approx \frac{e^2 N}{N_0 E_1^2 \Delta} \sum_{m, g_x} G_m(\vec{g}, \omega, E_1),$$

где теперь  $g_{m\parallel} \approx -mk_{s\parallel} + g_x\psi$ ,  $\psi = \alpha\theta$ , и, как и выше, суммирование проводится при условии  $g_{m\parallel} \geq \delta$ .

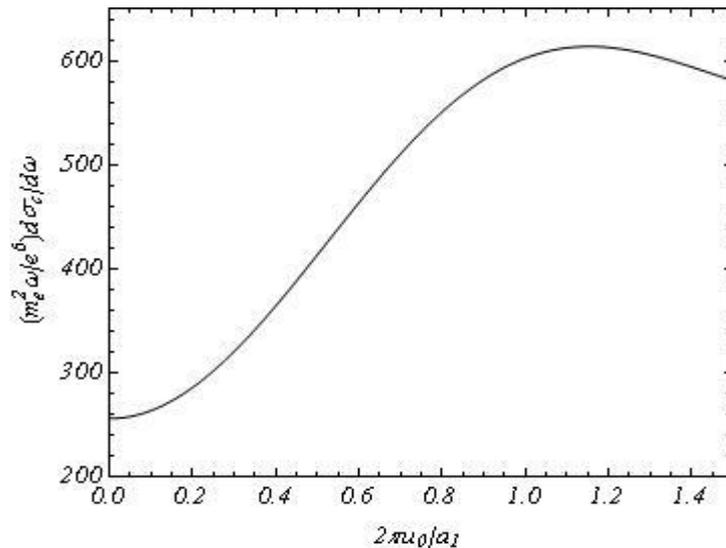
Приводятся результаты численных расчетов когерентной части поперечного сечения тормозного излучения электронов с энергией 20 MeV в монокристалле SiO<sub>2</sub>. Результаты этих расчетов показывают, что подбором угла входа электронов в кристалл и параметров внешнего воздействия можно добиться увеличения числа тормозных фотонов. Для Фурье-образов атомных потенциалов была выбрана параметризация Мольера. Расчеты проведены для синусоидальной поперечной акустической волны S-типа с функцией смещения  $f(z) = \sin(z + \varphi_0)$ . Для этой волны вектор амплитуды смещения направлен вдоль X-направления монокристалла кварца,  $\vec{u}_0 = (u_0, 0, 0)$ , а скорость равна  $4.687 \cdot 10^5$  см/сек. Вектор определяющий направление распространения гиперзвука лежит в плоскости YZ и составляет угол 0.295 радиан с осью Z. Соответствующая функция  $F_m(x)$  определяется формулой  $F_m(x) = e^{im\varphi_0} J_m(x)$ , где функция Бесселя первого рода. Численные расчеты показывают, что в зависимости от значений параметров  $\theta, \alpha, u_0, k_s$ , внешнее возбуждение приводит как к увеличению так и к уменьшению поперечного сечения тормозного излучения.

На рисунке приведена зависимость величины от отношения  $\omega/E_1$ , при  $E_1 = 20$  MeV,  $2\pi u_0/a_1 = 0.5$  и  $\psi = 0.002$ . Предполагается, что поле деформации генерировано поперечной акустической волной S-типа с частотой  $\nu_s = 5$  ГГц.



Когерентная часть поперечного сечения тормозного излучения электронов с энергией 20 MeV в зависимости от  $\hbar\omega/E_1$  для значений параметров  $\psi = 0.002$  и  $2\pi u_0/a_1 = 0.5$ . Поле деформации генерировано акустической волной S-типа с частотой  $\nu_s = 5$  Гц (параметры волны приведены в тексте)

Ниже на рисунке представлена зависимость величины  $(m_e^2 \omega / e^6) d\sigma_c / d\omega$  от амплитуды поля деформации,  $2\pi u_0/a_1$ , для энергии тормозного фотона, соответствующей  $\omega/E_1 = 0.0015$  ( $\omega = 30$  keV). Значения остальных параметров те же, что и для предыдущего рисунка.

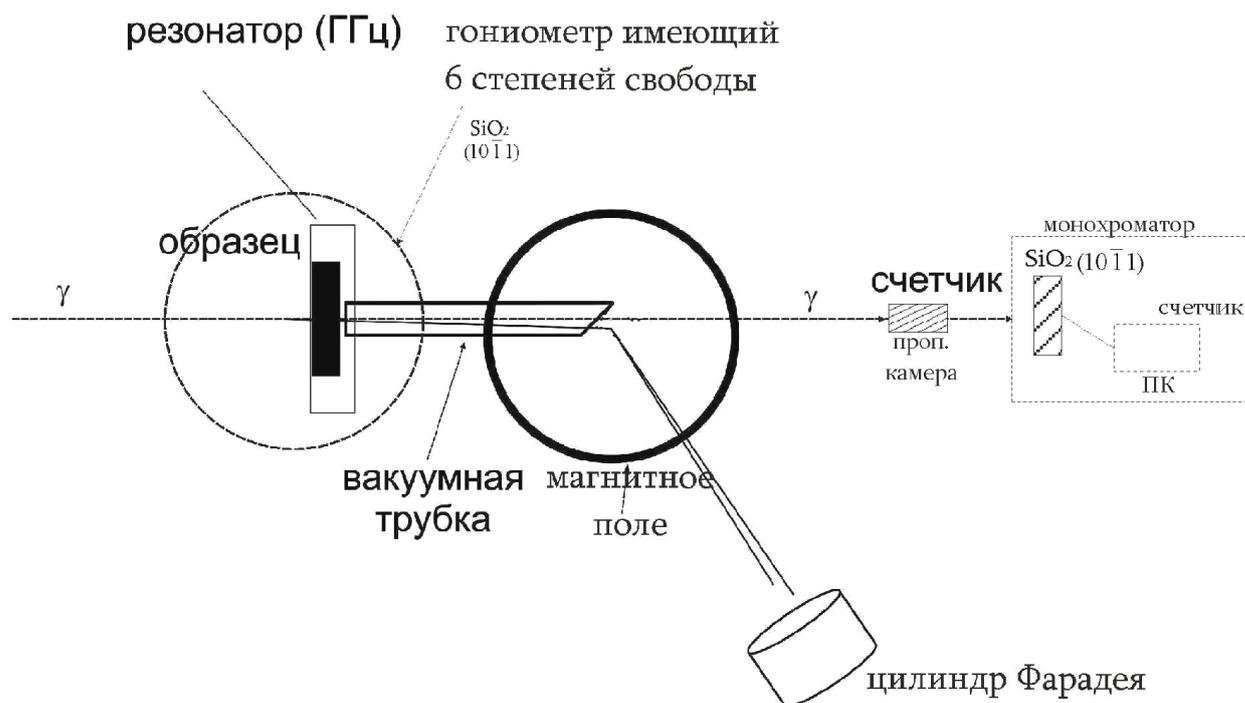


Когерентная часть поперечного сечения тормозного излучения электронов с энергией 20 MeV в зависимости от  $2\pi u_0/a_1$  для энергии фотона, соответствующей  $\hbar\omega/E_1 = 0.0015$ . Значения остальных параметров те же, что и в случае предыдущего рисунка

Приведенные результаты показывают, что влияние поля деформации может служить дополнительным механизмом управления частотно-угловыми характеристиками излученных фотонов и интенсивностями их компонентов.

**В четвертой главе** изложены основные результаты экспериментального исследования когерентного тормозного излучения под воздействием внешних акустических полей. В первом параграфе четвертой главы представлена блок-схема эксперимента для проведения экспериментальных исследований по когерентному тормозному излучению. Для возбуждения в образце акустических колебаний и обеспечения при этом условия стоячей волны с целью создания условия максимального воздействия был разработан генератор электромагнитных колебаний гигагерцовой частоты. Пластины радиаторов-монокристаллов помещались в резонаторе. При работе с разными радиаторами-кристаллами для создания условия стоячей волны генератор обеспечивал возможность варьирования рабочей частоты. Под влиянием электромагнитного поля в пьезоэлектрических кристаллах возбуждалось продольное акустическое поле. Одновременно электронная схема позволяла синхронизировать возбуждение электромагнитного поля с электронным пучком синхротрона, чтобы уменьшить нагрев образца под влиянием гиперзвуковых колебаний.

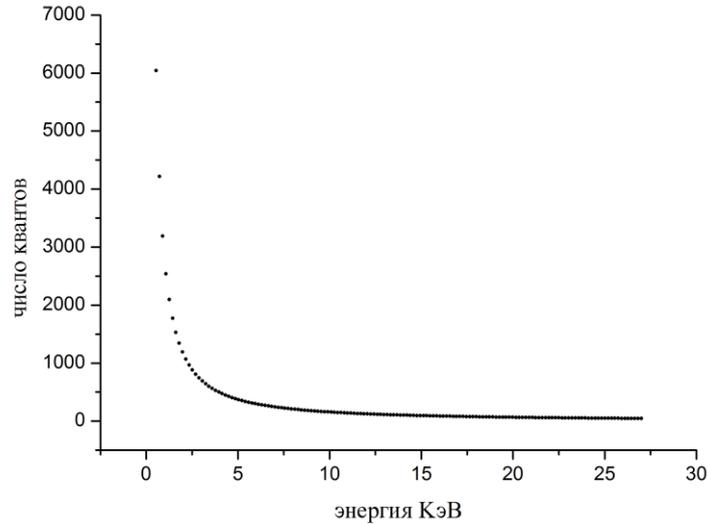
Гониометрическое устройство было расположено так, чтобы пучок электронов проходил по центру исследуемого образца, укрепленного на гониометрической установке с пятью степенями свободы. Программа для управления движениями гониометра по степеням свободы обеспечивает как одновременное, так и раздельное движение по степеням свободы дистанционно.



Экспериментальная блок-схема для исследования когерентного тормозного излучения

В экспериментах для спектрального анализа когерентного тормозного излучения использовались кристаллы-анализаторы, специально подготовленные из кварца X-среза. Для сравнительного анализа по параметрам спектра излучения во всех экспериментах поддерживались одинаковые статистики накопления фотонов, числа электронов и допустимая ошибка оценивалась для каждого значения по энергии излучения и она сохранялась во время всего эксперимента постоянно.

Во втором параграфе четвертой главы изложены результаты экспериментальных исследований по некогерентному тормозному излучению релятивистских электронов в монокристаллическом образце кварца X-среза. Ниже на рисунке приведена измеряемая в эксперименте интенсивность тормозного излучения и рассчитанная с помощью формулы Бете-Гайтлера для энергии электронов 20 МэВ с разными значениями амплитуды акустического колебания. Как видно из ниже приведенного рисунка, профиль распределения интенсивности излучения имеет хорошее совпадение с экспериментом, рассчитанным с помощью формулы Бете-Гайтлера, и не зависит от угла ориентации образца и мощности акустического колебания.



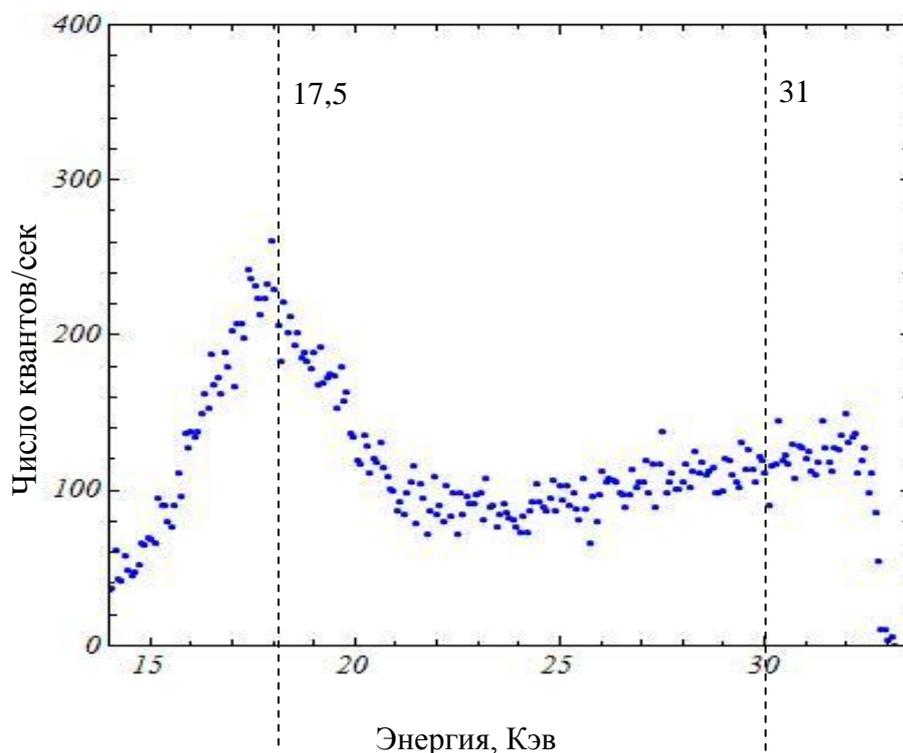
Число квантов некогерентного тормозного излучения по энергии измерения, рассчитанное с помощью формулы Бете-Гайтлера при амплитуде (мощности) 0, 5, 10 и 15 Ватт

В третьем параграфе этой главы изложены результаты экспериментального исследования когерентного тормозного излучения электронно с энергией 20 МеВ в монокристаллическом образце кварца X-среза. Ниже представлено характерное спектральное распределение когерентного тормозного излучения электронов при отсутствии в образце акустических возбуждений при угле между направлениями движения электронов с кристаллографической плоскостью  $\approx 2^\circ$ , а на следующих рисунках приведено спектральное распределение тормозного излучения при наличии в образце акустического поля с мощностью 10 Ватт и 15 Ватт соответственно. В этих спектральных распределениях вклад некогерентного тормозного излучения вычтен с помощью формулы Бете-Гайтлера и практически равен нулю.

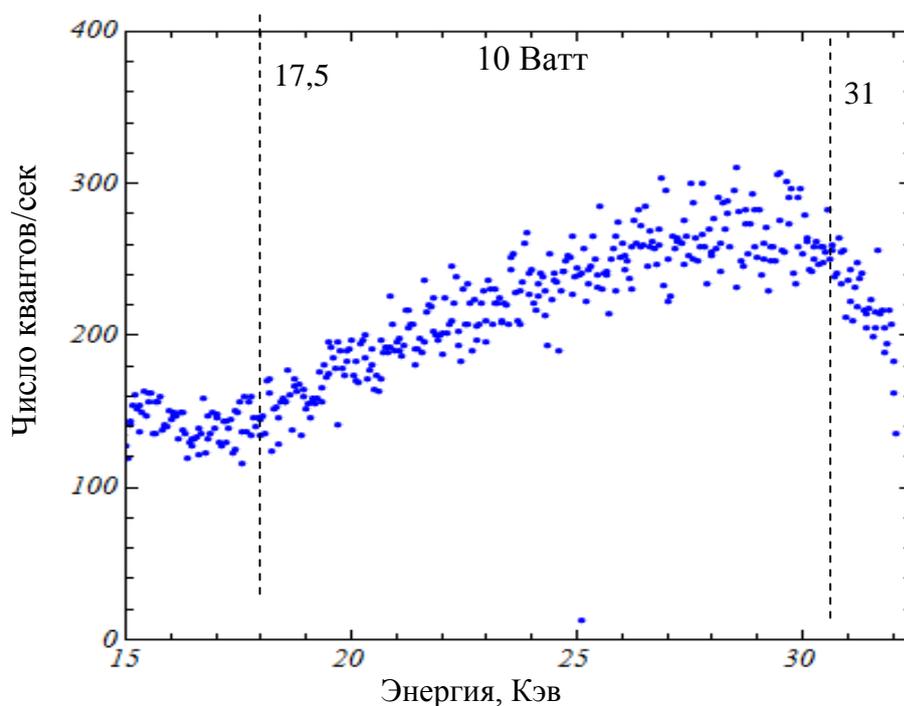
В вышеприведенном спектре без акустического возбуждения видно, что в спектральном распределении когерентного тормозного излучения появляются пики в области энергии излучения  $\approx 17,5$  КэВ и 31 КэВ. Поведение когерентного тормозного излучения при увеличении амплитуды акустических колебаний при 10 Ватт: первоначально имеет место увеличение интенсивности излучения, а дальнейшее увеличение амплитуды акустических колебаний 15 Ватт приводит к обратному эффекту, т.е. к уменьшению интенсивности излучения.

В дальнейшем были приведены аналогичные эксперименты по спектральному распределению интенсивности когерентного тормозного излучения без и при наличии в образце акустических возбуждений при изменении на  $\approx 1^\circ$ , т.е. угол между направлением распространения пучка относительно кристаллической плоскости составляет  $3^\circ$ . Поведение излучения по интенсивности в зависимости от мощности возбуждения наблюдается то же самое, что и в первом случае: сперва интенсивность

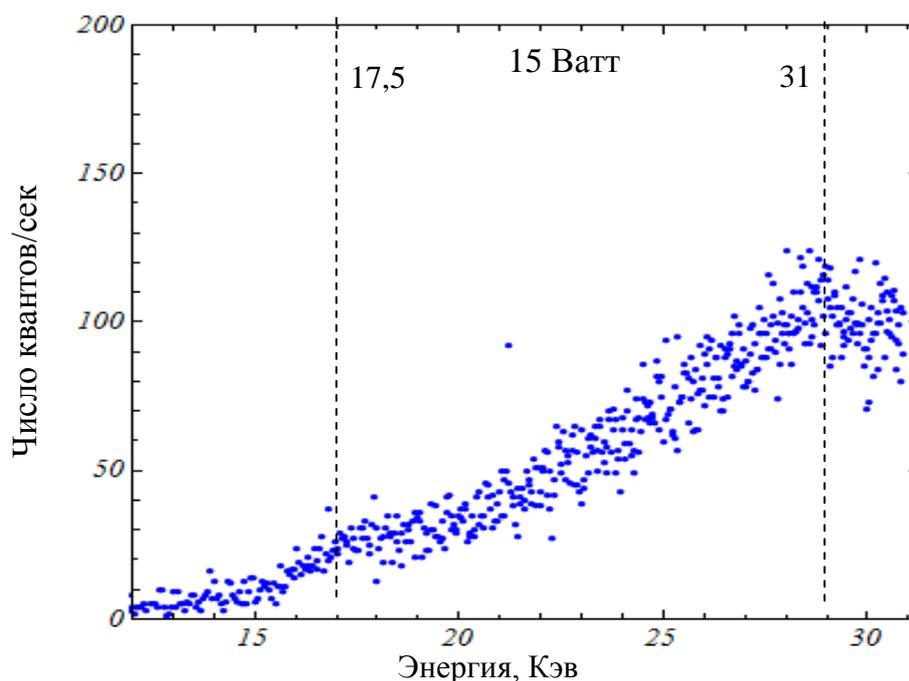
увеличивается, потом медленно уменьшается с увеличением мощности акустических колебаний.



Спектральное распределение интенсивности тормозного излучения электронов с энергией 20 МэВ в монокристалле кварца при отсутствии акустических возбуждений



Спектр когерентного тормозного излучения при наличии акустических колебаний для мощности возбуждения 10 Ватт, когда угол между направлением распространения пучка составляет  $\approx 2^\circ$  относительно кристаллической плоскости



Спектр когерентного тормозного излучения при наличии акустических колебаний для мощности возбуждения 15 Ватт, когда угол между направлением распространения пучка составляет  $\approx 2^\circ$  относительно кристаллической плоскости

Поведение спектрального распределения в зависимости от рабочего параметра акустики наблюдается то же, что и в первых двух случаях и качественно согласуется с теоретическими предсказаниями.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

- В спектральном распределении наблюдается пик излучения в диапазоне энергии 0-1 КэВ, поведение которого хорошо совпадает с некогерентным тормозным излучением и описывается по закону Бете-Гайтлера. Форма распределения не зависит от ориентации образца к направлению распространения сформированного излучения и от направления рассеивающего электронного пучка.
- Впервые наблюдается когерентное тормозное излучение релятивистских электронов на монокристаллической пластинке кварца X-среза в диапазоне коротковолнового рентгеновского излучения.
- Экспериментально исследована интенсивность когерентного тормозного излучения в зависимости от амплитуды акустического поля. Вначале по мере увеличения амплитуды интенсивность линии увеличивается, а начиная с некоторого значения – уменьшается.

- В спектральном распределении наблюдаются новые полосы и пики, а отдельные пики подавляются в зависимости от рабочих параметров акустики.
- На основе когерентного тормозного излучения при внешних акустических полях предложен метод получения монохроматического излучения коротковолнового диапазона рентгеновского излучения с управляемыми рабочими параметрами в пространстве и во времени.
- Построена теория для интенсивности компонент спектрального составляющего и спектрального распределения излучения в зависимости от параметров акустического поля. В спектральном распределении наблюдаются новые полосы и пики, а отдельные пики подавляются. Эти результаты качественно согласуются с экспериментальными результатами.

## **Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:**

1. А.Р. Мкртчян, А.Г. Мкртчян, Л.Ш. Григорян, А.А. Саарян, А.А. Асланян, Э.М. Арутюнян, С.П. Тароян, В.Ц. Никогосян, Л.А. Геворкян, В.Р.Кочарян, Г.А. Айвазян, В.В. Налбандян, Т.Г. Довлатян, А.Е. Мовсисян, Э.А. Мкртчян, О.Р. Мурадян, С.А. Миракян, А.А. Асланян. Излучение электронов с энергией 20 МэВ в пьезоэлектрических монокристаллах при наличии внешних акустических полей. // Изв. НАН Армения физика, 2013, т. 48, N 4, сс. 236-241.
2. А.Р. Мкртчян, А.Г. Мкртчян, А.С. Багдасарян, А.К. Атанесян, В.В. Налбандян, Т.Г. Довлатян, В.Н. Агабекян, О.Р. Мурадян, Э.А. Мкртчян, С.А. Миракян, А.А. Асланян. Ускорение ионов в жидкой среде при наличии внешнего акустического поля. // Intern. Conf. on “Electron, positron, neutron and X-ray scattering under external influences”, Yerevan-Meghri, Armenia, 2011, Book of Proceedings, p. 61.
3. А.Н. Мкртчян, А.С. Багдасарян, А.С. Айвазян, Т.Г. Довлатян, В.В. Налбандян, Н.Р. Мурадян, А.Н. Асланян, Е.А. Мкртчян, С.А. Миракян. Detectors of Ionizing Radiation on the Basis of Porous Layers Doped with Aluminum Oxides. // Proceedings of International Conference on Electrons, Positrons, Neutrons and X-Rays Scattering Under External Influences. Yerevan-Meghri, 26-30 October 2009, Armenia, ISBN 978-99941-2-486-2, p. 159-161, 2010.
4. Э.А. Мкртчян. Воздействие акустических волн на когерентное тормозное излучение электронов с энергией 20 МэВ. // Изв. НАН Армения физика, 2013, т. 48, N 4, сс. 247-250.
5. А.Р. Мкртчян, Э.А. Мкртчян. Воздействие акустических колебаний на когерентное тормозное излучение электронов. // Изв. НАН Армения физика, 2013, т. 48, N 4, сс. 242-246.
6. А.Р. Мкртчян, Е.А. Мкртчян. Coherent bremsstrahlung from 20 mev electrons in presence of hypersonic waves. // Armenian Journal of Physics, v. 6 (2013), Issue 1, pp. 66-71.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Եզրակացությունում ձևակերպված են ատենախոսական աշխատանքի հիմնական արդյունքները և եզրակացությունները.

1. Սպեկտրալ բաշխվածությունում դիտված է 0-1 էՎ էներգետիկ տիրույթում ճառագայթման սլացքի մեծացում, որի վարքը լավ համընկնում է ոչ կոհերենտ արգելակային ճառագայթման հետ և լավ նկարագրվում է Բետե-Գայտլերի օրենքով: Բաշխման ձևը կախված չէ ձևավորվող ճառագայթման տարածման և ցրվող էլեկտրոնային փնջի ուղղությունների նկատմամբ նմուշի ունեցած դիրքից:
2. Առաջին անգամ դիտվել է X-կտրվածքով կվարցի միաբյուրեղի թիթեղում կարճալիք ռենտգենյան ճառագայթման տիրույթում կոհերենտ արգելակային ճառագայթում:
3. Փորձով հետազոտվել է կոհերենտ արգելակային ճառագայթման ինտենսիվության կախվածությունը ակուստիկ դաշտի ամպլիտուդից: Սկզբում ամպլիտուդի մեծացման ընթացքում մեծանում է նաև ինտենսիվությունը: Այնուհետև սկսած ինչ-որ արժեքից ամպլիտուդի մեծացումը բերում է ինտենսիվության փոքրացմանը:
4. Սպեկտրալ բաշխվածությունում դիտվում են նոր շերտեր և սլացքի մեծացումներ ու առանձին դեպքերում դրանք ճնշվում են՝ կախված ակուստիկ դաշտի բնութագրերից:
5. Կոհերենտ արգելակային ճառագայթման հիման վրա առաջարկվել է կարճալիք ռենտգենյան ճառագայթման մոնոքրոմատիկ աղբյուր ստեղծելու տարբերակ ու

տարածության և ժամանակի մեջ ակուստիկ ալիքներով նրանց բնութագրիչները կառավարելու հնարավորություն:

6. Կառուցվել է համապատասխան տեսություն սպեկտրալ ճառագայթման բաշխման և նրանում եղած կոմպոնենտների ինտենսիվության կախվածության կապը ակուստիկ դաշտի բնութագրիչներից: Սպեկտրալ բաշխվածությունում ի հայտ են եկել նոր շերտեր ու սլացքի մաքսիմումներ, իսկ առանձին շերտեր ու մաքսիմումներ ճնշվել են: Վերը նշված արդյունքները որակապես համընկնում են փորձից ստացված արդյունքների հետ:

## ANNOTATION

1. The thesis is devoted to the investigation of bremsstrahlung from electrons with the energy 20 MeV in a crystal with complex base in the presence of deformation field with an arbitrary profile. The latter can be induced, for example, by the acoustic wave. The presence of the deformation can serve as an additional mechanism for the control of angular-frequency characteristics of the radiated photon. In comparison with undistorted crystal, the coherent part of the cross-section contains an additional summation over the inverse lattice vector of the one-dimensional superlattice induced by the deformation field.
2. The role of the coherent effects in the cross-section of bremsstrahlung is essential when the electron enters into the crystal at small angles with respect to crystallographic axis. In this case the main contribution to the coherent part of the cross-section comes from the crystallographic planes perpendicular to the chosen axis. The numerical calculations of the cross-section were carried out for a quartz single crystal with the Moliere parameterization of the screened atomic potentials and for the deformation field, induced by transverse acoustic wave of the S-type with gigahertz frequency. The calculations show that, with dependence of the values for the problem parameters, the presence of the deformation can either decrease or increase the cross-section of bremsstrahlung.
3. Radiation peak is observed in the spectral distribution in the energy range 0-1 KeV, the behavior of which coincides with the incoherent bremsstrahlung and is described by the Bethe-Heitler law. The form of the distribution does not depend on the orientation of the sample with respect to the direction of the propagation of the formed radiation and on the direction of the incident electron beam.
4. For the first time, the coherent bremsstrahlung is observed from relativistic electrons on a quartz single crystal plate of X-cut for short wavelengths of X-

ray radiation. The intensity of coherent bremsstrahlung is experimentally investigated in dependence of the amplitude for an acoustic field. With the initial increase of the amplitude the intensity of the radiation line increases and then, started from some value, it decreases.

5. In dependence of the working parameters, new bands and peaks are observed in the spectral distribution and separate peaks are suppressed. On the base of coherent bremsstrahlung in presence of external acoustic fields, a method is proposed for the generation of monochromatic radiation in the range of short wavelengths of X-ray radiation with controllable working parameters in the space and time.
6. Theory is constructed for the intensity of spectral components and for the spectral distribution in dependence of the acoustic field parameters. New bands and peaks appear in the spectral distribution and some peaks are suppressed. These results qualitatively agree with the experimental results.