

- [2] *Владимиров Ф. Л., Моричев И. Е., Плетнева Н. И.* // *Опт.-мех. пром-сть.* 1985. № 5. С. 1—3.
- [3] *Владимиров Ф. Л., Моричев И. Е., Плетнева Н. И.* и др. // *Опт.-мех. пром-сть.* 1985. № 6. С. 6—7.

Поступило в Редакцию  
25 января 1990 г.  
В окончательной редакции  
30 ноября 1990 г.

## ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИШЕНЯХ ИМПУЛЬСНЫМИ ПРОТОННЫМИ ПУЧКАМИ

*М. Д. Бавижев, В. Л. Бурликов, С. А. Воробьев, В. Н. Забаев,  
А. В. Каргапольцев, В. И. Симанчук*

В ранее проведенных исследованиях, посвященных изучению процессов взаимодействия пучков тяжелых заряженных частиц с веществом конденсированных сред, было показано, что основными каналами трансформации энергии вплоть до энергии частиц  $< 1000$  МэВ являются ионизационные потери и упругие столкновения частиц с ядрами вещества мишени [1].

В зоне взаимодействия с веществом мишени энергия, передаваемая частицами пучка, приводит к образованию области повышенной температуры и формированию поля термоупругих динамических напряжений, разгрузка которых идет путем излучения из зоны возбуждения акустических волн. При регистрации упругих волн, генерируемых импульсными пучками заряженных частиц, наибольшее распространение получили различные типы акустических преобразователей, например пьезоэлектрические преобразователи.

Экспериментальные исследования по генерации акустических колебаний тяжелыми заряженными частицами (протоны, ионы) в основном проведены для жидких сред. Так, в рамках проекта «Дюмаид» исследовались акустические эффекты протонных пучков при их прохождении в водных мишенях [2].

В то же время мал объем исследований, посвященных изучению акустических эффектов протонных пучков, взаимодействующих с твердотельными мишенями. Кроме того, они в основном посвящены теоретическому анализу различных механизмов генерации акустических колебаний [3]. Количество же публикаций, связанных с исследованиями пространственно-временной структуры генерируемых акустических импульсов, с изучением влияния параметров пучка (длительности импульса тока, энергии частиц, геометрии пучка и т. д.), теплофизических и упругих характеристик среды на форму и амплитуду акустических импульсов, крайне ограничено. Значение всех этих величин необходимо для разработки методик диагностики параметров пучков заряженных частиц.

Для изучения особенностей формирования акустического излучения, возникающего при взаимодействии импульсного пучка протонов с твердотельными мишенями, и его пространственно-временной структуры нами были проведены экспериментальные исследования на линейном ускорителе протонов И-100 Института физики высоких энергий (г. Протвино). Исследования проводились в широком диапазоне энергий, длительности импульса и плотности тока пучка заряженных частиц. Параметры использовавшегося ускорителя протонов были следующие: энергия частиц 37,8, 72, 100 МэВ; плотность потока частиц в импульсе  $1 \cdot 10^{10}$ — $1,5 \cdot 10^{11}$  част./см<sup>2</sup>; длительность импульса тока 0,3—60 мкс.

Экспериментальная установка, использовавшаяся при проведении исследований, конструкция широкополосного детектора акустического излучения

(ДАИ), способ его крепления и акустического согласования с мишенью достаточно подробно описан в работе [4].

В данном случае ДАИ крепился на торцевой задней грани цилиндрической мишени. Акустический контакт достигался с помощью масляной пленки, применение которой исключало прохождение в объем ДАИ импульса поперечных

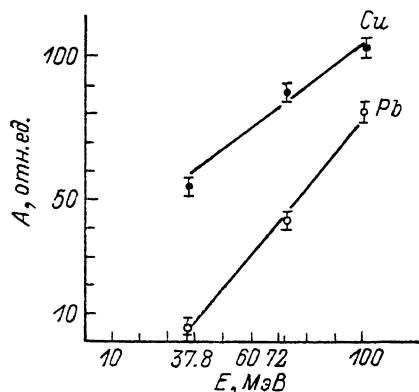


Рис. 1.

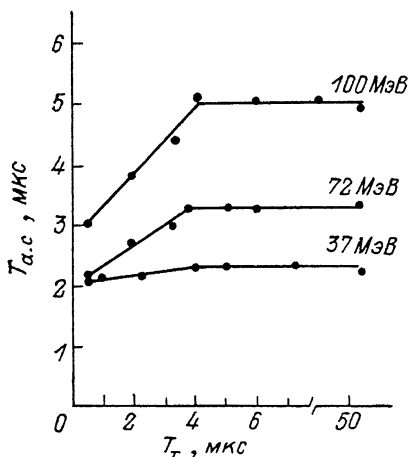


Рис. 2.

акустических волн, возбуждение которых наряду с продольными также эффективно идет при взаимодействии пучка заряженных частиц с твердотельной мишенью [5]. Для регистрации акустических колебаний, генерируемых импульсным протонным пучком в твердотельной мишени, использовался предварительный

неинвертирующий усилитель, собранный на базе двух операционных усилителей 544 УД1 и 544 УД2, с коэффициентом усиления 10 [6].

При проведении экспериментальных исследований использовались мишени из меди, алюминия, латуни, графита, свинца, выполненные в виде цилиндра диаметром 200 мм и толщиной 30 и 50 мм. Данные размеры мишени, а именно малая величина отношения толщины к диаметру, обеспечивали реализацию полубесконечной геометрии регистрации и исключали влияние краевых эффектов, связанных с переломлением волн на результаты измерений.

Получена линейная зависимость амплитуды генерируемого акустического сигнала от числа частиц в токовом импульсе ускорителя, что подтверждается экспериментами, проведенными на пучке ускоренных электронов Харьковским государственным университетом [7], и является основой для измерения числа протонов в импульсе тока ускорителя.

Рис. 1 иллюстрирует влияние энергии заряженных частиц на амплитуду генерируемых акустических сигналов. Видно, что зависимость акустического сигнала от энергии протонов близка к линейной, что подтверждает доминирующий вклад ионизационных потерь в процессе формирования ультразвука в мишени.

Для определения влияния длительности импульса тока протонного пучка на пространственно-временную структуру генерируемых акустических сигналов были проведены эксперименты на медной и латуновой мишени. Длительность импульса тока варьировалась в интервале 0.3—50 мкс. Проведенный анализ (рис. 2, 3) экспериментальных результатов подтвердил наличие устойчивых корреляционных связей между длительностью импульса тока ускорителя и

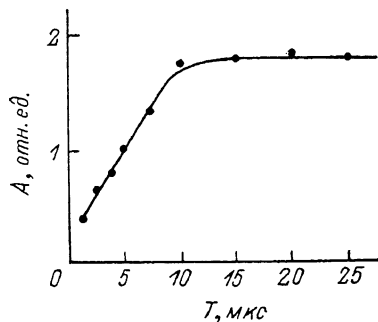


Рис. 3.

Материал	Энергия протонов, МэВ					
	37.8		72		100	
	Пробег частиц в веществе, мм					
	табличное значение	эксперимент	табличное значение	эксперимент	табличное значение	эксперимент
Медь	2	1.7	7	6	14	13
Свинец	2.7	2.5	8.2	9	18	17
Графит	6.5	6	20.4	21	38	37
Алюминий	6.48	5	19	18	36	35

пространственно-временными характеристиками генерируемых акустических сигналов.

Кроме того, нами установлено, что временная задержка акустического сигнала относительно момента сброса частиц на мишень зависит от энергии протонов [8]. На рис. 4 представлена типичная осциллограмма акустического сигнала,

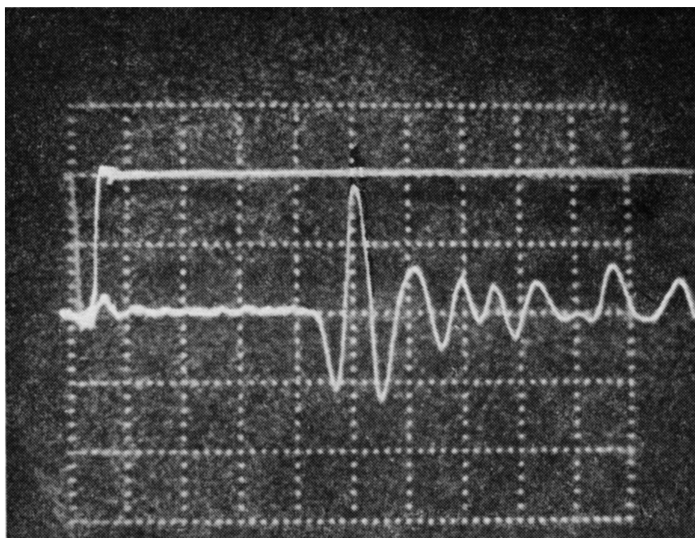


Рис. 4.

пучком протонов. Исходя из того, что тяжелые заряженные частицы основную часть своей энергии теряют в конце пробега и фактически источник акустического излучения локализован в сечении, совпадающем с максимальной глубиной проникновения частиц в вещество мишени, было получено соотношение, связывающее пробег частиц и временные характеристики генерируемых акустических сигналов, а именно

$$R_{\max} = H - \Delta T V_{\text{прод}}, \quad (1)$$

$R_{\max}$  — пробег частиц в веществе мишени,  $\Delta T$  — временная задержка акустического сигнала относительно импульса тока ускорителя,  $V_{\text{прод}}$  — скорость продольной звуковой волны в материале мишени,  $H$  — толщина мишени.

В таблице приведены данные по пробегу протонов различных энергий в некоторых материалах, взятые из работы [9], и расчетно-экспериментальные данные, полученные с помощью формулы (1).

Из таблицы видно удовлетворительное совпадение полученных нами длин пробега протонов в различных материалах и данных, приведенных в литературе [9].

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают, что генерация звука в твердых телах пучками тяжелых заряженных частиц имеет ряд особенностей по сравнению с генерацией в жидкостных мишенях. Кроме того, существуют устойчивые корреляционные связи между параметрами пучка заряженных частиц и пространственно-временными характеристиками генерируемого акустического излучения. Наличие данных связей позволяет проводить эффективную диагностику импульсных протонных пучков, в частности определять с достаточно высокой степенью точности глубину проникновения частиц в вещество мишени, а по ней энергию протонов.

### Список литературы

- [1] Стародубцев С. В., Ромашов А. М. Прохождение заряженных частиц через вещество. Ташкент, 1962. 228 с.
- [2] Sulak L., Armstrong T., Baranger H. // Nucl. Instr. and Meth. 1979. Vol. 161. P. 203—217.
- [3] Боршковский И. А., Воловик В. Д. // Изв. вузов. Физика. 1973. № 10. С. 72—76.
- [4] Бавижев М. Д., Бурликов В. Л., Воробьев С. А. и др. // Деп. в ВИНТИ. М., 1989. № 5907-B89.
- [5] Каргапольцев А. В., Симанчук В. И. // Тез. докл. III Всесоюз. науч.-техн. конф. «Использование современных физических методов в неразрушающем контроле». Хабаровск, 1987. С. 237—238.
- [6] Бурликов В. Л., Жуков В. К., Забаев В. Н. и др. // ПТЭ. 1989. № 5. С. 67—70.
- [7] Боршковский И. А., Воловик В. Д. и др. // ЖЭТФ. 1972. Т. 63. Вып. 4 (10). С. 1337—1341.
- [8] Бавижев М. Д., Бурликов В. Л., Воробьев С. А. // Деп. в ВИНТИ. М., 1989. № 7095-B89.
- [9] Atkinson J.-H. Jr., Beverly H.-W. High-energy Particle Data. California, 1957. Vol. II. P. 92.

Научно-исследовательский институт  
ядерной физики  
при Томском политехническом институте  
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию  
25 января 1990 г.  
В окончательной редакции  
7 мая 1990 г.

05

Журнал технической физики, т. 61, в. 8, 1991

© 1991 г.

## СЕЛЕКТИВНОЕ ПОВЫШЕНИЕ КОНТРАСТА ЗА СЧЕТ КАНАЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

А. Н. Ефимов, В. Ю. Флоринский

Комплексный характер информации, получаемой с помощью растрового электронного микроскопа, связан с большим разнообразием физических явлений, возникающих при взаимодействии высокоэнергетичных электронов с твердым телом. Известно, что поглощение падающих частиц существенно зависит от взаимной ориентации первичного пучка и кристаллографических плоскостей объекта. В связи с этим большой интерес представляет каналирование электронов [1], заключающееся в их аномальном поглощении монокристаллическим образцом, которое возникает при изменении угла падения вблизи брэгговского. Интерпретация данного явления осуществлена в динамической теории дифракции, где волновую функцию, связанную с частицами, определяют как суперпозицию двух типов блоховских волн [2]. Сканирование поверхности образца электронным лучом приводит к появлению так называемой картины каналирования, состоящей из полос и линий, накладывающейся на обычное изображение поверхности. Она позволяет судить о кристаллографических характеристиках исследуемого объекта, при этом локальность анализа может достигать 0.01 мкм. Контраст за счет каналирования электронов обычно не превышает 5 %, поэтому для формирования качественного изображения необходимо применять специальные методы обработки сигнала, повышающие контраст, такие