

АКУСТИЧЕСКИЙ ПИК ПРОТОНОВ В ПЛАСТИНЕ
ТВЕРДОГО ТЕЛА

И. А. Боршковский, В. Д. Воловик, В. Т. Лазурик—Эльцуффин

(Харьков)

Исследуется низкочастотная составляющая акустического импульса, возникающего в тонкой пластине твердого тела при взаимодействии с плотным протонным пучком.

Получено хорошее согласие эксперимента и теории в области максимума акустического сигнала.

В [1] показано, что возбуждение акустического импульса в твердом теле пучком заряженных частиц может быть описано в рамках термоупругой теории [2]. Проведенные в [1] исследования относятся к случаю тонкой мишени (пластины), в которой потери энергии частиц пучка незначительны. Представляет интерес изучение случая, когда пробег частиц пучка в веществе мишени порядка ее толщины. Подобное экспериментальное исследование для алюминиевой мишени и протонного пучка было проведено в [3]. В зависимости амплитуды акустического сигнала от средней энергии протонов в пучке наблюдался максимум (акустический пик). Поскольку протоны пучка имели существенный разброс по энергии, трактовка полученных данных оказалась неоднозначной. Данная работа посвящена более детальному теоретическому и экспериментальному исследованию указанной зависимости.

Пусть на пластину твердого тела толщиной h нормально падает импульсный цилиндрический пучок протонов радиуса R с равномерным распределением частиц в пучке. Повышение температуры, обусловленное передачей энергии от короткого импульсного пучка частиц веществу мишени, можно представить в виде

$$(1) \quad T(r, z) = \begin{cases} 0, & r > R, \\ T(z), & r \leq R; \end{cases}$$

$$T(z) = \frac{N}{\pi R^2 \rho C} \left(\frac{\partial E}{\partial z} \right)_i,$$

где N — число частиц в пучке; ρ , C — плотность и теплоемкость вещества пластины; $(dE/dz)_i$ — ионизационные потери протонов на глубине z в пластине (ось z совпадает с осью пучка; r — расстояние до оси z).

В общем случае расчет формы звукового импульса представляет большие математические трудности. Ограничимся исследованием его низкочастотных составляющих U_ω при

$$\omega \ll S/X,$$

для определения которых достаточно знать максимальные смещения $x_1(x_2)$ передней (задней) поверхности пластины (S — скорость звука в веществе пластины; X — характерный размер зоны нагрева).

Рассмотрим случай широких пучков

$$R \gg h,$$

когда влияние границы зоны нагрева ($r=R$) на ее расширение мало. В этом случае

$$(2) \quad x_1 + x_2 = \alpha \int_0^h T(z') dz' = \frac{\alpha E_t}{\pi R^2 \rho C},$$

где α — коэффициент линейного расширения; E_t — полная энергия, поглощенная веществом пластины. Из условия равновесия сил на границе цилиндра для x_1 получим

$$(3) \quad x_1 = \frac{\alpha}{h} \int_0^h \int_0^h T(z') dz' dx.$$

Вычитая (3) из (2), для x_2 имеем

$$(4) \quad x_2 = \alpha \int_0^h dx \left(T(x) - \frac{1}{h} \int_0^x T(z') dz' \right).$$

Оценки величин смещений x_1 и x_2 можно произвести, воспользовавшись приближенной формулой пониженных потерь тяжелых заряженных частиц в нерелятивистской области энергий [4]:

$$(5) \quad -(dE/dx)_i = \beta/2E,$$

где β — множитель, зависящий от физических свойств вещества пластины и не зависящий от энергии частицы E . Подставляя выражения (1), (5) в (3), (4) и проводя интегрирование, для смещений x_1 и x_2 получим

$$(6) \quad x_1 = D \frac{\alpha E_t}{\pi R^2 \rho C}; \quad x_2 = (1 - D) \frac{\alpha E_t}{\pi R^2 \rho C};$$

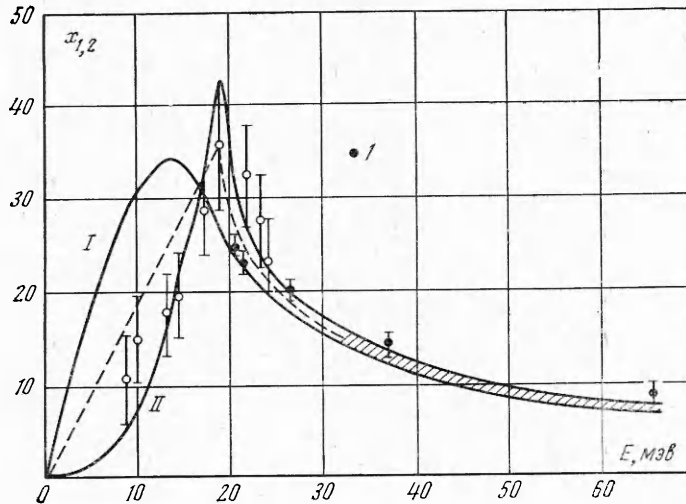
$$D = \begin{cases} 1 - \frac{2}{3} \frac{l}{R}, & E < E_h, \\ \left\{ 1 - \frac{2}{3} \frac{l}{h} \left[1 - \left(1 - \frac{h}{l} \right)^{3/2} \right] \right\} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{h}{l}} \right)^{-1}, & E > E_h, \end{cases}$$

где $l = E^2/\beta$, l — длина пробега протона с энергией E в веществе пластины; E_h — энергия, при которой пробег протона равен толщине пластины h ($E_h = \sqrt{\beta h}$). Интегрируя выражение (5), можно получить для зависимости полной поглощенной энергии E_t от E соотношение

$$(7) \quad E_t = \begin{cases} NE, & E < E_h, \\ (1 - \sqrt{1 - h/l})NE, & E > E_h. \end{cases}$$

Для изучения низкочастотного акустического сигнала (детектируемая частота $\omega \approx 66$ кГц), возникающего в тонкой алюминиевой пластине ($50 \times 10 \times 0,2$ см³), использовалась методика, описанная в [3]. Протонный пучок от инжектора протонного синхротрона ИТЭФ (длительность $t \approx \approx 20,0$ мкс) с начальной энергией $E \approx 24,6$ МэВ коллимировался (диаметр

$d \approx 0,75$ см) и попал в центр пластины. Изменение энергии протонного пучка достигалось прохождением его через кассету замедляющих медных фольг, расположенных перед коллиматором. Ток пучка измерялся индукционным датчиком, расположенным за коллиматором.



На фигуре представлены зависимости смещений x_1 (кривая I) и x_2 (кривая II) от энергии протонов E для алюминиевой пластины толщиной $h=0,2$ см. Для численного расчета смещений x_1 и x_2 (сплошные кривые) использовались выражения (6), (7). Наблюдавшийся максимум на кривой II соответствует энергии E_h , для которой длина пробега протона в веществе пластины равна толщине последней (в данном случае $E_h \approx 19$ МэВ). Штриховая кривая соответствует полусумме смещений передней и задней поверхностей и, согласно (2), пропорциональна поглощенной энергии. Экспериментальные точки I взяты из [3].

В области $E \geq 20$ МэВ экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими. Представленные кривые I и II соответствуют смещениям поверхности пластины в зоне взаимодействия с пучком. Измерение сигнала на существенном расстоянии от места попадания пучка дает величину, отличную от расчетной, так как возбуждаемые симметричные и антисимметричные лэмбовские колебания распространяются в пластине с различными скоростями. Нельзя указать точную зависимость U_0 от E , но экспериментальные точки должны находиться в области, ограниченной кривыми I и II.

Авторы благодарны И. М. Капчинскому, В. А. Баталину, Я. Л. Клейнбоку, А. А. Коломийцу, Р. П. Куйбиде за помощь при проведении эксперимента, И. А. Ахиезеру и А. И. Калиниченко за дискуссии.

Поступила 6V 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Воловик В. Д., Лазурик-Эльцуфин В. Т. Акустический эффект пучков заряженных частиц в металлах. — «Физика твердого тела», 1973, т. 15, вып. 8, с. 2305—2307.
2. Новацкий В. Вопросы термоупругости, гл. 8. М., Изд-во АН СССР, 1962.
3. Боршковский П. А., Воловик В. Д. Исследование возбуждения акустических волн в металлах электронами и протонами. — «Изв. вузов. Физика», 1973, № 10, с. 72—76.
4. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1. М., ИЛ, 1955.