

НЕЛИНЕЙНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ПРОДОЛЬНЫЕ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ДЕТЕКТИРОВАНИИ

Процесс распространения звука в твердом теле нельзя считать линейным при больших амплитудах звукового давления, так как закон Гука верен только для бесконечно малых деформаций и напряжений. Это приводит к возможности взаимодействия звуковых пучков, в результате чего спектральный состав первоначальной волны изменяется и возникают волны комбинационных частот. Такое явление наблюдается не для всех направлений поляризации исходных и вторичных волн, например, поперечная звуковая волна в изотропном твердом теле не может порождать поперечные колебания удвоенной частоты. В настоящей работе рассматриваются только те случаи, когда нелинейные взаимодействия приводят к образованию волн комбинационных частот.

Рассмотрим случай, когда источник звука излучает высокочастотные колебания, модулированные по амплитуде звуковой частотой Ω . Тогда первичная акустическая волна содержит три исходных компонента: ω , $\omega + \Omega$ и $\omega - \Omega$. При прохождении такой волны в нелинейной твердой среде может появиться сигнал низкой частоты, амплитуда которого квадратично зависит от амплитуды смещения в первоначальной волне. Выделение огибающей ввиду малости эффекта затруднительно, однако в резонансных акустических системах с высокой добротностью, настроенных на частоту Ω , амплитуда колебаний частоты Ω может достигать значительной величины. Так, если амплитудно-модулированная волна распространяется в стержне, закрепленном посередине, то при

совпадении частоты модуляции с собственной частотой стержня $\Omega = \frac{\pi c_0}{l}$ (c_0 —

скорость продольной волны в стержне, а l — его длина) последний начинает интенсивно колебаться. Таким образом, детектирование сигнала осуществляется акустическим методом за счет взаимодействия упругих волн в толще стержня.

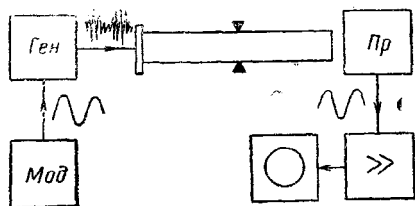


Рис.

Блок-схема установки представлена на рис. 1. Напряжение $U \sim 500$ в подавалось на кварцевый преобразователь U среза, который создавал поперечную высокочастотную амплитудно-модулированную волну в стержне длиной 15–30 см, закрепленном посередине. В качестве материала стержня обычно использовался алюминий или сплав МА-8, имеющий при относительно небольшом коэффициенте поглощения звука в меггерцевой области частот достаточную нелинейность, что приводит к появлению продольных колебаний разностной частоты Ω , которые принимались с помощью бескон-

тактного низкочастотного магнитного приемника, установленного вблизи одного из концов стержня.

Эксперимент этот позволяет наблюдать трансформацию поперечных волн высокой частоты, распространяющихся в одном направлении, в продольные колебания низкой частоты (взаимодействие $T+T \rightarrow L$). Теоретически подобный эффект был рассмотрен в работе [1], где, в частности, исследовалась генерация сложной продольной волны удвоенной частоты при распространении поперечной волны в изотропном сплошном твердом теле. Принципиально этот случай ничем не отличается от рассматриваемого, так как обусловлен тем же нелинейным механизмом взаимодействия волн. Из результатов [1] следует, что когда фазовые скорости первой и второй гармоники совпадают (основная волна тоже является продольной), то амплитуда 2-й гармоники в недиссипативной среде линейно нарастает по мере увеличения расстояния от излучателя. Это нашло свое экспериментальное подтверждение в работе [2]. Если же фазовые скорости первичной (T) и вторичной (L) волн не совпадают, то нарастания не происходит, а амплитуда 2-й гармоники изменяется с расстоянием по синусоидальному закону, оставаясь малой, причем частота этих пространственных пульсаций зависит от соотношения продольных и поперечных волн и имеет порядок длины волны.

Резонансный метод, используемый в настоящей работе, позволяет выделить разностную частоту в случае несовпадения фазовых скоростей первичной или вторичной

волн. Более того, расчеты показали, что наблюдения резонанса по низкой частоте в стержне со свободными концами возможно только тогда, когда скорости распространения волн частоты ω и Ω различны. Именно поэтому становится возможным резонансное акустическое детектирование на продольных волнах, которое наблюдалось в [3], поскольку высокочастотная волна ω распространяется в стержне как в безграничной среде ($\lambda_\omega \ll d$, где d — поперечные размеры стержня) со скоростью продольных волн в неограниченной среде c_e , а для низкочастотных колебаний стержень можно считать бесконечно тонким, и скорость упругих продольных волн в нем равна $c_0 \neq c_e$. При распространении в изотропном твердом стержне амплитудно-модулированных колебаний из уравнений, приведенных в [1], следует, что в результате взаимодействия частот ω , $\omega + \Omega$ и $\omega - \Omega$ возникает продольная волна разностной частоты Ω , амплитуда которой на свободном конце стержня равна

$$u_\Omega|_l = \frac{\eta u_0^2 m \omega^2 \left(\cos \frac{\Omega l}{c_0} - \cos \frac{\Omega l}{c} \right)}{8 \rho c^3 \Omega \left(1 - \frac{c_0^2}{c^2} \right)} \frac{1}{\sin \frac{\Omega l}{c_0} \cos \frac{\omega l}{c}} \times \\ \times \left(\frac{1}{\cos \frac{\omega + \Omega l}{c}} - \frac{1}{\cos \frac{\omega - \Omega l}{c}} \right).$$

Здесь η — нелинейный коэффициент, равный $\eta = \lambda + 2\mu + \frac{A}{2} + B$ для поперечных и $\beta = 3\lambda + 6\mu + 2A + 6B + 2C$ для продольных волн; A , B , C — упругие постоянные 3-го порядка, λ , μ — постоянные Ламе, u_0 — амплитуда первичной волны, m — коэффициент модуляции, c — скорость продольных колебаний стержня, c_l для исходных продольных волн и $c = c_t$ для исходных поперечных волн. Амплитуда смещения для низкой частоты рассчитана в отсутствие затухания. Выражение (1) имеет резонансный вид как по низкой, так и по высокой частоте. Последнее объясняется тем, что амплитуда высокой частоты увеличивается, когда на длине стержня укладывается целое число полуволн несущей или боковой частоты. Резонансная зависимость от частоты несущей для продольных волн наблюдалась экспериментально*. Сравнение величины эффекта на продольных и поперечных волнах дает возможность определить соотношение между нелинейными параметрами β и η . Для алюминия оно равно 6.

Эффект детектирования на поперечных волнах носит более сложный характер, чем на продольных. Дело в том, что в излучении кварца y -среза всегда присутствует продольная волна (в исследуемом случае она составляла $< 5\%$ от продольной). Однако за счет взаимодействия продольного и сдвигового компонентов, а также различных дефектов и неоднородностей материала стержня могут образовываться низкочастотные методы изгибных и сдвиговых колебаний. Эти моды также обнаруживаются резонансным методом; при плановом изменении частоты огибающей можно было наблюдать ряд резонансов на различных частотах, которые соответствовали собственным изгибным и сдвиговым колебаниям стержня. Однако амплитуда их была значительно меньше, чем амплитуда продольного резонанса, обусловленного взаимодействием поперечных волн. Для излучателя же x -среза наблюдался только один резонанс, соответствующий продольным колебаниям стержня.

Описанный метод дает возможность исследовать взаимодействия различных видов упругих волн в твердых телах, что особенно интересно для изучения кристаллов. Однако расчеты в этом случае значительно усложняются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдберг З. А. «Акуст. журн.», 6, № 3, 377, 1960.
2. Гедройц А. А., Красильников В. А. ЖЭТФ, 43, № 5, 1952, 1962.

Поступила в редакцию
4. 5 1966 г.

Кафедра
радиоволн

* При изменении несущей частоты низкочастотный выходной сигнал имеет ряд максимумов, отстоящих друг от друга на величину $-\Delta\omega = \frac{\Omega c_l}{c_0}$.