

"ТОЧЕЧНОЕ" ВОЗБУЖДЕНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ГИПЕРЗВУКА В МИЛЛИМЕТРОВОМ РАДИОДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

В.С.Галушко, Е.М.Ганапольский

Достигнута высокая эффективность возбуждения, трансляции и приема гиперзвука на частоте 37 Гц . Впервые осуществлена на этой частоте трансляция гиперзвука через металлическую пленку.

К настоящему времени гиперзвуковыми исследованиями охвачен значительный диапазон частот, до 10 Гц . Дальнейшее увеличение частоты когерентного гиперзвука, освоение частот, относящихся к миллиметровому и субмиллиметровому радиодиапазонам (ММ и СММ гиперзвук), представляет большой интерес. Длина волны СММ гиперзвука на частоте 1 Гц уже близка к предельной для акустической ветви колебаний кристаллической решетки и в то же время затухание его мало при температуре жидкого гелия [1]. Эти обстоятельства создают заманчивые возможности для применения ММ и СММ гиперзвука в спектроскопических целях, поскольку большая гиперзвуковая прозрачность твердого тела и специфические правила отбора разрешенных переходов между энергетическими уровнями позволяют изучать динамические процессы и состояния, зачастую недоступные для электромагнитных методов. Ранее "резонаторным" методом [2] и с помощью замедленной поверхностной электромагнитной волны [3] было осуществлено возбуждение ММ гиперзвука в пьезокристалле кварца. Однако в этих экспериментах достигнутое значение коэффициента двойного преобразования η электромагнитного поля в гиперзвук и обратно сравнительно невелико: $\eta \approx 10^{-8} \dots 10^{-10}$. Для активного применения ММ гиперзвука в твердотельных исследованиях необходимо иметь возможность и принимать его с существенно большей эффективностью, а также транслировать из одного твердого тела в другое.

При возбуждении гиперзвука образец пьезокристалла, ограниченный двумя параллельными плоскостями, ориентированными перпендикулярно пьезоэлектрической оси, помещают во внешнее электромагнитное поле СВЧ. Это поле возбуждает у одной из граничных плоскостей (плоскости возбуждения) упругие деформации, служащие источником объемного гиперзвука, который распространяется к другой граничной плоскости (плоскости приемника) и преобразуется там в электромагнитное поле. Легко показать, что выражение для коэффициента двойного преобразования имеет вид: $\eta = \kappa^2 k_e^2 k_s^{-2} Q^2 \chi(\phi)$; где κ — коэффициент электро-механической связи, k_s и k_e — характерные волновые числа гиперзвука и электромагнитного поля вдоль нормали к граничной поверхности, Q — фактор кратности взаимодействия электромагнитного поля с пьезокристаллом (при возбуждении гиперзвука с помощью объемного резонатора $k_e = 1/h$; h — высота "емкостного" зазора, Q — добротность резонатора [4]), $\chi(\phi)$ — множитель, характеризующий синфазность упругих колебаний в плоскости приемника при обратном преобразовании, ϕ — угол отклонения от параллельности плоскости приемника и фазового фронта гиперзвуковой волны. $\chi(\phi)$ можно аппроксимировать функцией $(k_s d_r \phi)^{-2} \sin^2(k_s d_r \phi)$, (d_r — размер области приемника в плоскости фазового фронта гиперзвуковой волны). Для эффективного возбуждения гиперзвука необходимо реализовать $k_e/k_s \approx 1$; иными словами, сконцентрировать электромагнитное поле в области, размер которой вдоль нормали к плоскости возбуждения порядка длины волны ММ гиперзвука (10^{-6} см). Необходимо также обеспечить условия синфазности при преобразовании ММ гиперзвука в электромагнитное поле, т.е. $\chi(\phi) \approx 1$; отсюда требование к допустимому углу: $\phi_m \leq (k_s d_r)^{-1}$.

В работе найдено решение этой задачи путем использования "точечного" возбуждения и приема ММ гиперзвука в виде тонкого луча-иглолки

на основе текстурированных пьезоэлектрических пленок с металлическим подслоем. Применение такого способа основано на следующем. С увеличением частоты при фиксированном d_r , уменьшается допустимый угол ϕ_m . При использовании указанных выше методов возбуждения он становится настолько малым, что его реализация является одной из главных трудностей в освоении ММ гиперзвука. Уменьшением размеров сечения гиперзвукового луча и, соответственно, d_r можно значительно увеличить ϕ_m . Ограничение снизу на d_r связано с дифракционной расходимостью луча, роль которой мала пока $d_r > 2\sqrt{\lambda_s L}$ (λ_s — длина волны гиперзвука, L — длина акустического пути). Для возбуждения тонкого

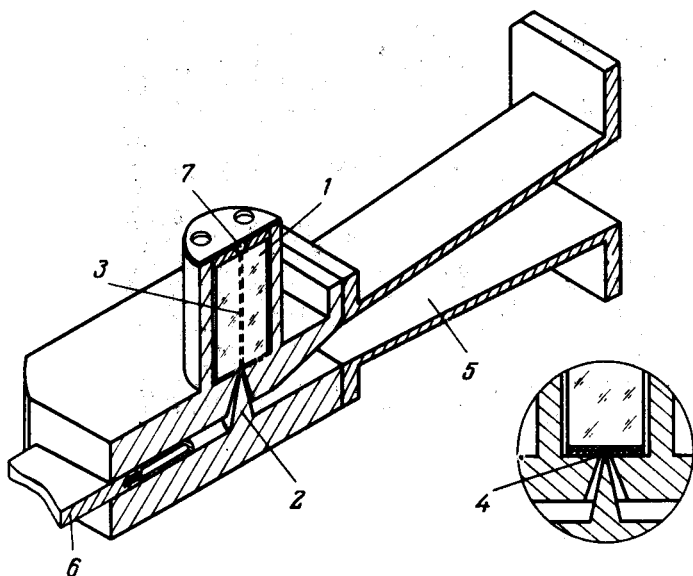


Рис. 1. Устройство для возбуждения ММ гиперзвука: 1 — кристалл рубина, 2 — игла, 3 — гиперзвуковой луч, 4 — пьезо-электрическая пленка с металлическим подслоем, 5 — волноводный переход, 6 — волноводный поршень, 7 — детали крепления кристалла

луча можно использовать полуволновые текстурированные пленки из пьезоэлектрических материалов, вакуумным испарением наносимые на поверхность образца. Предварительно на эту поверхность наносится металлический подслой, толщиной $p < \lambda_s$, необходимый для концентрации электрического поля СВЧ в пьезоэлектрической пленке. Поскольку размеры сечения луча малы, мала и область пьезоэлектрической пленки, к которой необходимо приложить электрическое поле СВЧ (отсюда "точечное" возбуждение). Существенно, что эта область пленки, выполняющая роль антенны, обладает импедансом порядка волнового сопротивления линии передачи и поэтому может быть с ней согласована в широкой полосе частот.

На основе рассмотренных выше соображений реализованы возбуждение, трансляция и прием продольного гиперзвука на частоте 37 Гц в кристалле рубина при низких температурах ($4,2 \dots 77 \text{ К}$). Образец кристалла имел форму стержня круглого сечения диаметром $2,6 \text{ мм}$ и длиной 13 мм . Геометрическая ось стержня была ориентирована вдоль кристаллографической оси симметрии 3-го порядка. Торцы стержня выполнены оптически плоскими и параллельными (неровности менее $0,1 \text{ мкм}$, отклонение от параллельности менее $1''$), а на один из них вакуумным испарением была нанесена текстурированная пленка ZnO с подслоем Al .

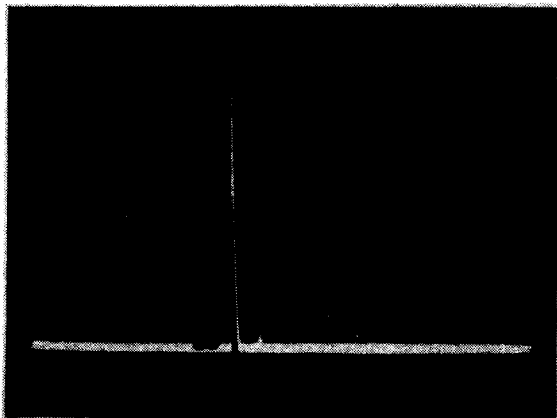


Рис.2. Гиперзвуковые эхо-сигналы в рубине на частоте 37 Гц . Зондирующий импульс с помощью селекции подавлен. $T = 4,2 \text{ К}$

Толщина пленки и подслоя $0,3 \text{ мкм}$ и $0,12 \text{ мкм}$ соответственно. Методика приготовления пленок описана ранее [5]. "Точечное" возбуждение гиперзвука в рубине осуществлялось с помощью устройства, показанного на рис. 1. Основным его элементом является расположенная в волноводе металлическая игла, между торцом которой и подслоем осуществляется концентрация электрического поля СВЧ в пленке ZnO . Волновод выполнен в металлическом диске в виде прямоугольной щели с изменяющейся высотой сечения. Игла расположена в суженной части волновода, а торец ее, диаметром $0,07 \text{ мм}$, имеет плоскую поверхность, которая находится заподлицо с плоской поверхностью диска и вместе с ней выполнена с оптической точностью. Поскольку ось текстуры пленки направлена вдоль нормали к торцу, в пленке возбуждается продольная гиперзвуковая волна, которая пройдя через металлический подслои, распространялась в рубиновом стержне. Отразившись от противоположного торца стержня, эта волна поступала на ту же пленку и трансфор-

мировалась в сигнал электрического поля СВЧ, который регистрировался приемником (рис. 2). Величина η на частоте 37 ГГц с учетом суммарных потерь на трансляцию и распространение гиперзвука в подслое и рубине оказалась не менее 10^{-5} ; полоса пропускания преобразователя около 1 ГГц .

Следует отметить, что в описанном эксперименте впервые удалось осуществить трансляцию гиперзвука столь высокой частоты через тонкую пленку алюминия. Это открывает определенные возможности для исследований с помощью ММ гиперзвука металлов, особенно, сверхпроводящих в условиях, когда квант упругих колебаний гиперзвука порядка ширины энергетической щели сверхпроводника при нуле температуры.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
30 июля 1977 г.

Литература

- [1] K.F.Renk, J.Peçkenzell, J. de Phys., **33**, 103, 1974.
- [2] J.O.Hukor, E.H.Jacobsen, Science, **153**, 1113, 1966.
- [3] Е.М.Гананольский, Р.В.Кисилев, А.Н.Чернец, ДАН СССР, **191**, 1015, 1970.
- [4] Н.Е.Вömmel, K.Dransfeld, Phys. Rev., **117**, 1245, 1960.
- [5] М.И.Бабенко, Е.М.Гананольский, Н.Л.Кенигсберг, А.Я.Невелев, В.Е.Попов, А.Н.Чернец, Изв. АН СССР, серия физ., **35**, 916, 1971.