

- [1] Z i e g l e r J.F., B i e r s a c k J.P., L i t t m a r k U. The stopping and range of ions in solids. New York, Pergamon Press, 1985. P. 321.
- [2] Б у р е н к о в А.Ф. et al. // Phys. Stat. sol. (a). 1989. V. 115. P. 427-435.
- [3] L a F e r l a A. et. al. // Mat. Sci. and Eng. 1989. V. B2. P. 69-73.
- [4] Б у р е н к о в А.Ф., К о м а р о в Ф.Ф., К у м а х о в М.А., Т е м к и н М.М. Пространственные распределения энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
- [5] Б у р е н к о в А.Ф., К о м а р о в Ф.Ф., Ф е д о т о в С.А. Тез. докл. XX Всес. сов. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, М.: МГУ, 1990. 120 с.
- [6] В e t z H.-D. // Rev. Mod. Phys. 1972. V. 44. P. 465-539.
- [7] Б о р Н. Прохождение атомных частиц через вещество. М.: ИЛ, 1950. 149 с.
- [8] З а й к о в В.П., К р а л ь к и н а Е.А., Н и к о л а е в В.С. Формирование равновесного зарядового распределения в пучках быстрых многозарядных ионов при прохождении их через газовые и твердые мишени. М., Деп. ВИНТИ, № 600-В87, 1987. 75 с.

Поступило в Редакцию
11 декабря 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 5

12 марта 1991 г.

08; 09

© 1991

РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ОТРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ БЕГУЩЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ
В ДВУХСЛОЙНОЙ СРЕДЕ

В.А. А с с м а н, Ф.В. Б у н к и н,
Е.А. В и н о г р а д о в, В.И. Г о л о в а н о в,
Г.А. Л я х о в, Н.В. С у я з о в,
К.Ф. Ш и п и л о в

Задача регистрации локальных возмущений той или иной природы через границу раздела сред с существенно различными свойствами имеет приложения от микро- (движения дефектов кристалли-

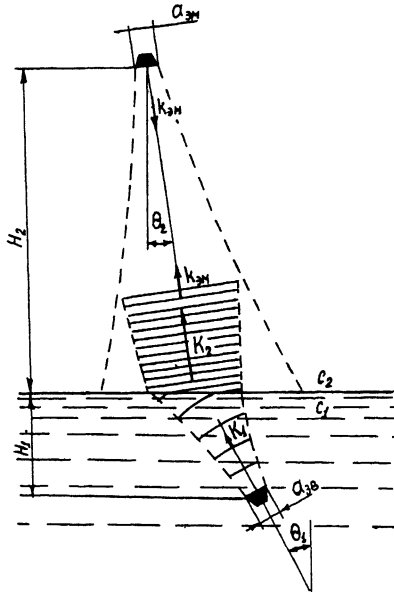


Рис. 1. Геометрия эксперимента: a_{3B} и a_{2M} – апертуры ультразвукового источника и приемно-передающей СВЧ-системы.

ческой решетки, например) до геофизических (сдвиги слоев океанского дна, подводные извержения вулканов). Решающую роль здесь играет выбор физического механизма, наиболее эффективно передающего возмущение через границу; для распространенной комбинации „плотная проводящая среда (металлы, жидкие электролиты) – разреженный диэлектрический газ (воздушная атмосфера в средних условиях)” оптимальными носителями представляются, соответственно, звук и электромагнитное излучение. Оценке подлежит также эффективность преобразования энергии между модами разной природы при переходе границы; эта оценка определяет выбор схемы регистрации.

В исследованной нами лабораторной модели акустический сигнал от источника в воде регистрировался в воздухе с помощью электромагнитного пучка. Считывание сигнала непосредственно с колеблющейся поверхности жидкости (см., например, [1]), наталкивается на понятные трудности в натуральных экспериментах, связанные в указанных примерах с нерегулярной шероховатостью кристаллического среза, волнением морской поверхности. Альтернативу со-

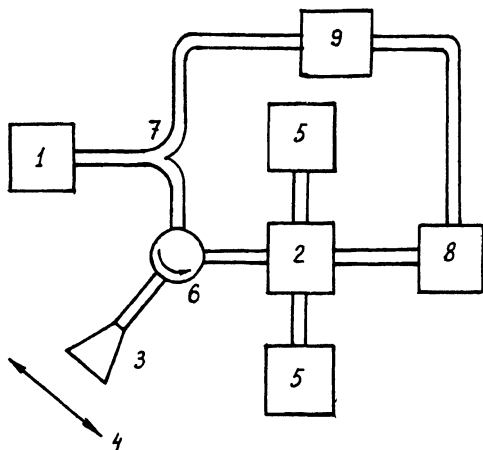


Рис. 2. Балансная СВЧ схема регистрации: 1 - генератор, 2 - двойной Т-мост, 3 - рупор, 4 - диэлектрическая линза, 5 - детекторы, 6 - циркулятор, 7 - делитель, 8 - фазовращатель, 9 - волноводная скрутка.

ставляет механизм регистрации, основанный на резонансном отражении электромагнитной волны на протяженной бегущей звуковой решетке в воздухе. Малость коэффициента передачи звука в воздух $T_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ по давлению компенсирует здесь когерентное накопление отраженного сигнала по высоте наведенной решетки, реализующееся на длине $\sim \delta_2^{-1}$ при фазовом согласовании акустической и электромагнитной волн:

$$|\lambda_{эм} - 2c_2 f_{зв}^{-1}| \ll \lambda_{эм}^2 \cdot \max \{ \delta_2 (4\pi)^{-1}, (4H_2)^{-1} \}, \quad (1)$$

где $\lambda_{эм}$ - длина электромагнитной волны, $f_{зв}$ - частота звуковой волны, c_2 и δ_2 - скорость и коэффициент затухания звука в воздухе. Расчет по схеме рис. 1 (детали расчета, и учет волнения поверхности раздела приведены в [2]) отношения μ мощности радиоволны, принимаемой антенной на смещенной частоте $f_{эм} + f_{зв}$ к мощности, излучаемой на частоте $f_{эм}$, дает

$$\mu \approx \left[\frac{\epsilon(\epsilon-1) S_{эм} S_{зв} P T_0 \cos \theta_1}{2\lambda_{эм}^3 \delta_2 H_2 (H_2 + H_1 c_1 c_2^{-1}) P_a} \right]^2. \quad (2)$$

Здесь ϵ - диэлектрическая проницаемость воздуха, P - амплитуда давления на апертуре источника, P_a - атмосферное давление, $S = \frac{\pi}{4} a^2$ - площади апертур.

В эксперименте (детали см. в [2]) использован акустический генератор с $f_{3B} \approx 87$ кГц и СВЧ комплекс с $\lambda_{ЭМ} \approx 8$ мм в соответствии с (1). Для акустической мощности ≈ 80 Вт и близким к оптимальным значениям $H_2 = 2,5$ м, $S_{3B} \approx S_{ЭМ} \approx 250$ см² расчет дает $\mu \approx -90$ дБ. При этом коэффициент модуляции m - отношение принимаемых мощностей на смещенной и несмещенной (зеркальное отражение) частотах - составляет ≈ -80 дБ (в наклонной геометрии, при $\theta_1 = 50^\circ$, $\theta_2 = 10^\circ$ величина m возрастает до -40 дБ). Именно эта величина характеризует требуемую частотную селективность приемной системы. Расчет смещенной компоненты отражения от поверхности (это тоже полезный сигнал) показывает, что вклад резонансного механизма преобладает над ней как раз при $f_{3B} \approx 80-100$ кГц ($\lambda_{ЭМ} \approx 8$ мм).

В качестве генератора ВЧ сигналов использован ГЧ-141 ($\lambda_{ЭМ} = 5,6-8$ мм, мощность ~ 30 мВт) с набором элементов, канализирующих излучение. Рупор с сечением 4 см² формировал электромагнитный пучок с помощью диэлектрической линзы (из тефлона, $F = 15$ см, $a_{ЭМ} = 9$ см или полистирола, $F = 60$ см, $a_{ЭМ} = 25$ см). Приемником - смесителем электромагнитного излучения служил кристаллический диод (Д404), который включен в плечо двойного Т-моста, являющегося комбинацией Е- и Н-тройников [3]. Выделение сигнала на смещенной частоте обеспечивал нановольтметр типа 237 в комплексе *UNIPAN* с селективностью на октаву (ступенями) 0-25-40 дБ.

Трехспойный ультразвуковой преобразователь ($a_{3B} = 7$ см) диапазона 80-90 кГц на пьезокерамике ЦТС-19 располагался в акустически заглушенной кювете 80x50x40 см³ с водой на глубине ≈ 4 см. Он создавал поле давления до 30-50 Па прямо над поверхностью воды. При использовании в целях уменьшения расходимости УЗ и СВЧ излучения тонкостенной металлической трубы диаметром 15 см и длиной 1,5 м был обнаружен резонансный сигнал (в 2-3 раза выше уровня шума), соответствующий рассеянию на УЗ пучке.

Для устранения влияния кавитации и детального исследования эффекта рассеяние на ультразвуке, генерируемом под водой, моделировалось с помощью излучателя, размещенного в воздухе (а соответствующие колебания границы раздела адекватно моделируются колебаниями поверхности излучателя). При этом использовался сконструированный мозаичный УЗ излучатель с большой апертурой $a_{3B} = 19$ см (и малой расходимостью пучка), создающий поле давления ≈ 6 Па вблизи себя и $\approx 1,5$ Па на расстоянии 2,5 м (у СВЧ линзы). Кроме того, для снижения уровня шумов в схему регистрации были внесены дополнительный детектор 5 (балансная схема смесителя), циркулятор 6, делитель излучения пополам 7, фазовращатель 8 и волноводная скрутка 9 (рис. 2). Была также введена модуляция УЗ волны частотой 3 Гц (от генератора ГЗ-118), регистрируемая синхронным детектором типа 232 В на выходе нановольтметра.

Результрирующая чувствительность разработанной методики была достаточной для регистрации колебаний поверхности излучателя с амплитудой $\approx 10 \text{ \AA}$ (при времени накопления сигнала $\tau = 10 \text{ с}$)

Эффект рассеяния СВЧ излучения на ультразвуковой волне зарегистрирован при $f_{3\theta} = 86.9 \text{ кГц}$ и $f_{ЭМ} = 37.47 \text{ ГГц}$. Критерий регистрации – резонансный характер эффекта и зависимость от длины взаимодействия. Частота СВЧ излучения изменялась с шагом 10 МГц , и ширина резонанса составила $\Delta f_{ЭМ} \approx 0.05 \text{ ГГц}$, то есть $\Delta f_{ЭМ} f_{ЭМ}^{-1} \sim 10^{-3}$, что согласуется с оценкой (1). При перекрытии (тонким диэлектрическим экраном) ультразвукового пучка около излучателя (объемного взаимодействия нет) показания детектора уменьшались примерно вдвое; при перекрытии около СВЧ линзы (длина взаимодействия сохранялась) показания не менялись. Следовательно, резонансный эффект для $\lambda_{ЭМ} = 8 \text{ мм}$ имеет (в согласии с расчетом) на расстоянии $2.5 \text{ м} \approx \delta_2^{-1}$ величину того же порядка, что и нерезонансный эффект от колебаний поверхности излучателя, при этом он существенно выше уровня шума ($\tau = 10 \text{ с}$).

Таким образом, использование объемного резонансного взаимодействия повышает эффективность дистанционной регистрации акустических колебаний с помощью СВЧ излучения. Связанный с резонансным эффектом выигрыш растет вместе с длиной зондирующей радиоволны, что позволяет перейти к постановке эксперимента с соответствующим увеличением масштабов (в натуральных условиях).

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Е с и п о в И.Б., Н а у г о л ь н ы х К.А. В сб.: Методы гидрофизических исследований. Горький, ИПФ АН СССР, 1984. С. 229-245.
- [2] А с с м а н В.А., Б у н к и н Ф.В., В и н о г р а - д о в Е.А., Г о л о в а н о в В.И., Л я х о в Г.А., С у я з о в Н.В., Ш и п и л о в К.Ф. Препринт Института общей физики АН СССР, 1990.
- [3] Х а р в е й А. Техника сверхвысоких частот. М.: Советское радио, 1965.

Институт общей физики АН СССР,
Москва

Поступило в Редакцию
12 ноября 1990 г.