Углублению представлений о влиянии упругих пластинок на формирование создаваемого поршнем поля способствует также анализ частотной зависимости величины X', представленной на фиг. 2, *б*. Как видно из этой фигуры, величина X' стремится к нулю при $f \to 0$, что подтверждает высказанное выше утверждение об отсутствии влияния пластин на излучение поршня на частотах существенно ниже f_1. С увеличением частоты величина X' растет до значения порядка 0,5, после чего начинает падать и пересекает ось абсцисс при значениях частоты, соответствующей первой собственной частоте пластинок в воде f_1^*. Здесь хорошо видно, как в зависимости от l/λ_1 изменяется значение f_1^*.

Следует отметить еще одну особенность, присущую величине X': на частотах $0<f<f_1^*$ величина X' носит упругий характер; непосредственно после резонанса на частотах $f>f_1^*$ величина X' имеет характер массы.

Проведенный выше анализ был дан для случая, когда пластинки выполнены из титанового сплава, а величина $l=2b$. Следует сказать, что характер частотных зависимостей величин R' и X' для пластинок из других материалов и при других значениях $l/2b$ качественно аналогичен приведенному на фиг. 2. Количественную же оценку можно получить из обобщенных результатов, приведенных на фиг. 3. Как следует из этих данных, диапазон частот, в котором эффективность излучения поршня мала, существенным образом зависит как от свойств материала пластинок, так и от размеров волновода и пластинок. При этом увеличение произведения $E\rho_1$, а также длины пластинок и ширины волновода приводит к уменьшению величины Δ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *А. Д. Лапин.* Способ создания звукоизоляции для звука низкой частоты, распространяющегося в волноводе. Акуст. ж., 1970, *16*, 2, 281–285.

Поступила
12 августа 1975 г.

УДК 539.12

КВАНТОВЫЙ ДЕТЕКТОР АКУСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

В. А. Голенищев-Кутузов, С. А. Мигачев, Н. А. Шамуков

С помощью известных методов [1–2] возможно измерять относительные деформации, производимые волнами деформации в твердых телах, с амплитудой не менее 10^{-7}. Для повышения чувствительности наиболее целесообразно использовать ранее предложенный метод акустического насыщения линий ядерного магнитного резонанса, но в условиях динамической поляризации ядер.

Как известно, интенсивность сигнала ядерного магнитного резонанса A_0 при малом ненасыщенном уровне акустического поля в образце прямо пропорциональна равновесной разности заселенностей спиновых уровней n_0. Увеличение акустической мощности приводит к уменьшению разности заселенностей до n. Отношение заселенностей и пропорциональную ему интенсивность сигнала ядерного магнитного резонанса A можно связать с вероятностью переходов под действием акустического поля:

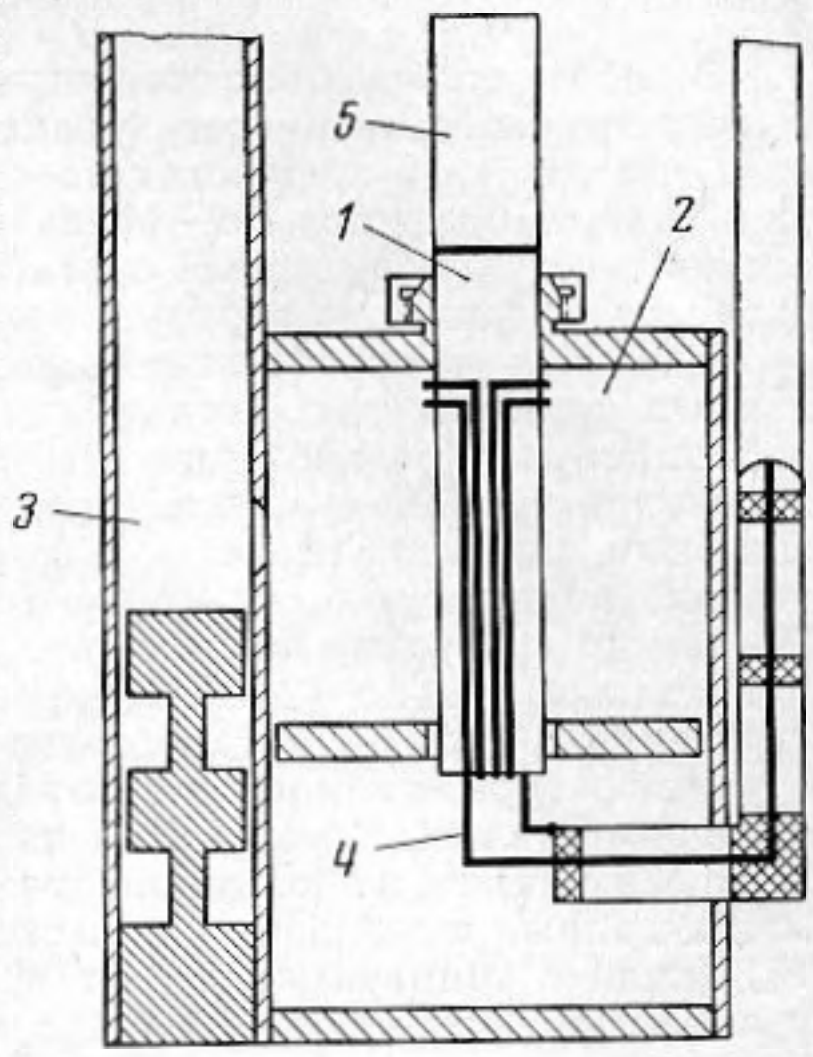
$$A/A_0=n/n_0=(1+W_aT_1)^{-1},$$

где $W_a=B(I)G_{ij}^2\varepsilon_j^2$; коэффициент $B(I)$ зависит от магнитных и электрических характеристик ядра и может быть легко рассчитан в каждом конкретном случае [3]. Значения спин-решеточной релаксации T_1 и коэффициента спин-фононной связи G_{ij} вычисляются из независимых экспериментов по ядерному магнитному резонансу. Таким образом, значение ε_j экспериментально определяется по отношению A/A_0 при известных параметрах $B(I)$, T_1, G_{ij}. Предел чувствительности этого метода определяется минимально измеряемой разностью интенсивностей насыщенного и ненасыщенного сигналов ядерного магнитного резонанса, которая при этом не должна быть меньше уровня шумов спектрометра $A_ш$ или $A-A_0/A_0$. Для ранее исследованных ядер $\varepsilon_j(\min)$ составляет 10^{-6} при $T=4{,}2°$ К в диапазоне частот 1–20 *Мгц* [4].

Для повышения чувствительности этого метода мы предложили использовать эффект динамической поляризации атомных ядер, с помощью которого можно в больших пределах изменять заселенности спиновых уровней [5]. Ограничимся рассмотрением одной из разновидностей динамической поляризации, так называемым солид-эффектом, который возникает при наличии в образце двух систем спинов, взаимодействующих между собой, например в случае диамагнетика с парамагнитной примесью. Если системы электронных и ядерных спинов имеют резонансные частоты ω_l и ω_s, то приложенное к образцу поле с частотой $\omega=\omega_l\pm\omega_s$ приводит к одновременной переориентации ядерного и электронного спинов. В идеальных условиях разность

заселенностей ядерных уровней возрастает в $P=\omega_l/\omega_e$ раз. Во столько же раз должна увеличиться и чувствительность квантового детектора вследствие увеличения отношения $(A-A_0)/A_ш$, что справедливо при условии сохранения уровня шумов прибора до и во время поляризации. Как показывают расчеты [6] и наши данные, уровень шумов, порождаемых полем накачки, значительно ниже уровня шумов спектрометра ядерного магнитного резонанса.

Рабочее вещество для квантового детектора должно обладать сильной спин-фононной связью, достаточно интенсивным сигналом ядерного магнитного резонанса и малым основным затуханием звука. Одним из подходящих объектов для создания квантовых детекторов является рубин ($Al_2O_3:Cr^{3+}$). В этом случае возможно перекрытие ядерных спиновых переходов Al^{27} в диапазоне 1–20 *Мгц* вследствие изменения ориентации кристалла во внешнем магнитном поле (H_0) и интенсивности H_0 от 1 до 10 *кгс*. Ранее уже было достигнуто увеличение n/n_0 для Al^{27} в 500 раз при электромагнитной накачке электронных переходов Cr^{3+} при 1,8° К [6], что подтверждает перспективность использования рубина.



Конструкция измерительной ячейки: *1* – рабочее тело (рубин), *2* – резонатор накачки типа H_{013}, *3* – волновод, *4* – контур спектрометра ядерного магнитного резонанса, *5* – пьезопреобразователь

В проведенных нами экспериментах динамическая поляризация ядер Al^{27} в рубине с концентрацией $Cr^{3+}\sim0{,}01\%$ создавалась микроволновым насыщающим полем при $\lambda\sim8{,}2$ *мм* на различных спиновых переходах ионов Cr^{3+}. Изменение разности заселенностей спиновых уровней Al^{27} измерялось по интенсивности сигнала ядерного магнитного резонанса. Конструкция измерительной ячейки, создающая взаимную ортогональность $\mathbf{H}_0$, $\mathbf{H}_м$ и радиочастотного поля ядерного магнитного резонанса, представлена на фигуре. При мощности электромагнитной накачки ~5 *Мвт* и $T\sim4{,}2°$ К удалось получить увеличение разности заселенностей ядер на два порядка по сравнению с равновесной. Отношение сигнал – шум для интенсивности сигнала ядерного магнитного резонанса также возросло на два порядка. Затем в образце с помощью пьезопреобразователя создались акустические колебания на переходах ядерных спинов Al^{27}. При $(A-A_0)/A_ш\sim5$ нам удалось измерять амплитуды относительных деформаций $\lesssim7\cdot10^{-9}$ при частоте 10 *Мгц*. Поскольку $P\sim\hbar\omega/kT$, то представляется целесообразным понижение температуры и повышение частоты накачки. При $T\sim10^{-1}-10^{-2}$ °К и $\omega\sim10^{11}-10^{12}$ *гц* этот метод может быть использован для создания сверхчувствительных датчиков акустических деформаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *C. A. Alers, P. A. Fleury.* Strain Amplitude of Mc/sec ultrasonic wavds in solids. J. Acoust. Soc. America, 1964, *36*, 5, 1297–1304.
2. *И. Г. Михайлов, В. А. Шутилов.* Об абсолютных измерениях ультразвуковых полей в твердых телах. Акуст. ж., 1964, *10*, 1, 98–103.
3. *Д. Болеф.* Взаимодействие акустических волн с ядерными спинами. Физическая акустика. Под ред. У. Мэзона, *4А*, М., «Мир», 1969.
4. *В. А. Голенищев-Кутузов.* Акустический ЯМР в кристаллах. Автореф. докт. дис., МГУ, 1972.
5. *К. Джеффрис.* Динамическая ориентация ядер. М., «Мир», 1965.
6. *H. H. Niebuhr, E. E. Hundt, E. Brun.* Dynamical nuclear polarisation in ruby. Helv. Phys. Acta, 1970, *43*, 7, 777–783.

Физико-технический институт
Казанский филиал
Академии наук СССР

Поступила
16 февраля 1976 г.