ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Смоленский, Р. В. Писарев, Н. Н. Крайник, И. Г. Синий, Вестн. АН СССР, № 8, 62 (1969).
2. Г. А. Смоленский, Р. В. Писарев, И. Г. Синий, УФН 99, 151 (1969).
3. G. A. Smolensky, R. V. Pisarev, I. G. Siny, N. N. Kolpakova, J. de phys. 32, 1048 (1971).
4. Г. А. Смоленский, В. В. Леманов, Вестн. АН СССР 12, 15 (1970).

У. Х. Копвиллем, В. Н. Осипов, Б. П. Смоляков, Р. З. Шарипов. Аналоги электронного спинового эха в сегнетоэлектриках и стеклах.

Открытие Е. К. Завойским электронного парамагнитного резонанса [1] привело к бурному развитию резонансных методов исследования конденсированных сред. Среди этих методов изучения вещества особое место занимает ядерное спиновое эхо, обнаруженное Э. Ханом [2] при помощи методики ядерной спиновой индукции, теоретически и экспериментально разработанной Ф. Блохом [3]. Перспективность применения техники спинового эха на электронных системах была теоретически обоснована в работах [4, 5] и экспериментально подтверждена в работах [6, 7]. Возможность применения звука для возбуждения спинового эха была исследована в работах [8, 9]. Далее было теоретически доказано утверждение, что все обнаруженные резонансы в веществе могут быть более детально изучены путем наблюдения соответствующих им сигналов типа спинового эха [10]. Был также указан способ выбора соответствующих внешних когерентных полей для возбуждения этих сигналов. Сигналы типа спинового эха действительно были обнаружены в ферромагнетиках [11, 12], на уровнях Ландау [13, 14] и в оптических системах [15, 16].

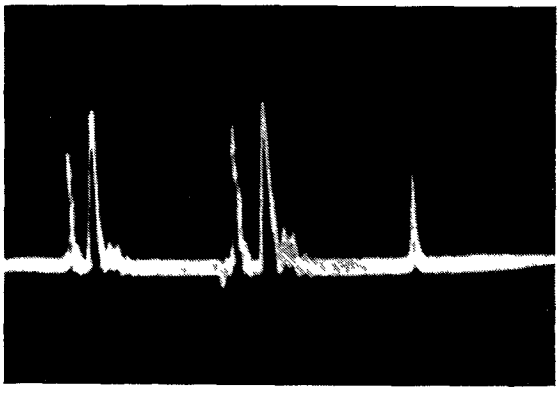

Рис. 1. Осциллограмма сигнала эха в монокристалле KH_2PO_4 при 4,2 °К.

После каждого возбуждающего импульса (узкие пики) наблюдается последовательность отраженных от стенок доменов гиперзвуковых импульсов. После второго гиперзвукового сигнала через интервал $\tau \sim 10^{-6}$ *сек* следует сигнал эха. По вертикальной оси отложена амплитуда сигналов.

В работе [17] сообщалось о наблюдении сигнала типа спинового эха на флуксоидах в сверхпроводниках второго рода. Теоретическое исследование показало [18], что обнаружение флуксоидного эха позволяет надеяться на обнаружение сигналов типа спинового эха и на других системах, которые обладают квазинепрерывным спектром и в которых отсутствуют резонансы при изменении статических магнитных, электрических и упругих полей, например на колебаниях доменов и их границ в упорядоченных состояниях вещества (ферро- и антиферромагнетики, ферро- и антиферроэлектрики, ферроупругие системы [19]), на вихревых нитях в сверхтекучем гелии, на дислокациях в кристаллах и трубках канализованного светового и звукового излучения (филаментах) [20]. Все перечисленные выше системы обладают определенными частотами собственных колебаний и могут давать сигналы типа спинового эха. Теория показывает, что эти сигналы будут обладать рядом отличительных свойств, присущих циклотронному эху [14]. Исследование ферроэлектрических монокристаллов при температуре 4,2 °К с использованием аппаратуры электронного спинового эха [21] привело к обнаружению на частоте 10^{10} *сек*$^{-1}$ при длительности возбуждающих импульсов $3 \cdot 10^{-8}$ *сек* электрических аналогов сигналов типа ферромагнитного эха и стимулированного ферромагнитного эха [12].

На рис. 1 приведена осциллограмма сигналов эха в KH_2PO_4. Времена продольной, обратимой и необратимой поперечной релаксации соответственно оказались порядка $T_1 \sim 10^{-5}$ *сек*, $T_2^* \sim 10^{-8}$ *сек* и $T_2 \sim 1{,}6 \cdot 10^{-6}$ *сек*. Аналогичные сигналы были обнаружены в монокристаллах KD_2PO_4, CsD_2AsO_4, CsH_2AsO_4, RbH_2PO_4 и RbH_2AsO_4, но сигналы отсутствовали в $LiNbO_3$ и сегнетовой соли.

Основные свойства сигналов: 1) При размельчении образца до порошка исчезают сигналы от возбужденных в образцах гиперзвуковых импульсов, но сохраняются сигналы эха. 2) Интенсивность сигналов на порядок выше, чем у сигналов электрон-

ного спинового эха от радикалов. 3) В пределах (8,9 — 9,6)·10^9 *сек*$^{-1}$ интенсивность сигналов не изменяется. 4) Возбуждение эха обусловлено электрической составляющей переменного электромагнитного поля. 5) В пределах 0—1,2·10^4 *гс* сигналы не зависят от статического магнитного поля. 6) В пределах 0—10 *кв/см* нет зависимости от статического электрического поля. 7) Имеется зависимость интенсивности эха от угла между осями кристалла и вектором переменного электрического поля. 8) Эхо появляется только в упорядоченной фазе ферроэлектрика. 9) При повышении температуры $T > 4{,}2$ °К время T_1 быстро укорачивается и сигналы эха исчезают. 10) Механизм фазовой памяти обусловлен разбросом внутренних электрических полей. Можно предполагать, что эхо обусловлено коллективными колебаниями электрических диполей (дипольные плазмоны) [22] или вызвано электрическими спиновыми волнами, частота которых представляет собой сложную комбинацию частот туннелирования, обмена, мультиполь-мультипольных взаимодействий и упругих колебаний атомных групп в ферроэлектриках [23]. По-видимому, обнаруженное новое физическое явление может быть использовано для идентификации упорядоченного состояния ферроэлектриков и изучения их свойств, а также в приборах квантовой электроники.

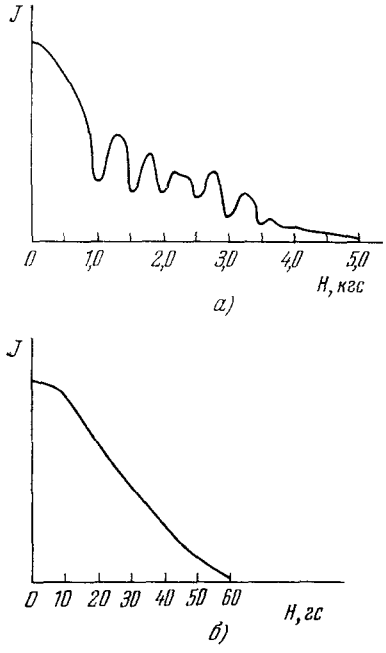

Рис. 2. Зависимость амплитуды электронного спинового эха в стеклах от напряженности статического магнитного поля H при температуре 4,2 °К:

а) в кварцевом стекле без введенных примесей; б) в стекле с примесями (CeO_2 + TiO_2).

Техника электронного спинового эха оказалась также весьма перспективной для исследования стекол, в которых обычные сигналы электронного парамагнитного резонанса [24] очень широки и практически не позволяют раздельно измерять параметры T_1, T_2 и T_2^*. На рис. 2 приведена зависимость интенсивности электронного спинового эха J при 4,2 °К в кварцевом стекле (без специального введения примесей) (*а*) и в стекле с примесями (CeO_2 и TiO_2) (*б*) в зависимости от статического магнитного поля H. Интересно, что сигналы наблюдаются при $H = 0$ и в пределах одного гигагерца не зависят от частоты. Времена $T_2 \sim 10^{-6}$ *сек*, $T_2^* \sim 10^{-9}$ *сек* и $T_1 \lesssim 10^{-3}$ *сек*; сигналы наблюдались при $\mathbf{H} \perp \mathbf{H}_1$ и $\mathbf{H} \parallel \mathbf{H}_1$ ($\mathbf{H}_1$ — вектор переменного поля). По-видимому, это есть первое сообщение о наблюдении электронного аналога ядерного квадрупольного эха, открытого в 1951 г. [25]. Сигналы электронного спинового эха также были обнаружены при 4,2 °К на ионах Fe^{3+} (I-центр) в синтетическом монокристалле золотисто-коричневого кварца ($T_2 \sim 5 \cdot 10^{-6}$ *сек*) на всех пяти переходах [26].

Методика типа спинового эха позволяет по времени разделить акты возбуждения и наблюдения сигналов, измеряет динамические характеристики систем в интервале (10^6—10^{15}) *сек*$^{-1}$ и поэтому является многообещающим способом исследования веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. К. Завойский, Докторская диссертация (ФИАН, 1944 г.).
2. E. Hahn, Phys. Rev. **80**, 580 (1950).
3. F. Bloch, Phys. Rev. **70**, 460 (1946).
4. Н. Г. Колоскова, У. Х. Копвиллем, ФТТ **2**, 1368 (1960).
5. У. Х. Копвиллем, ФТТ **3**, 754 (1961).
6. J. R. Klauder, P. W. Anderson, Phys. Rev. **125**, 912 (1962).
7. W. B. Mims, Phys. Rev. **141**, 499 (1966).
8. Н. Г. Колоскова, У. Х. Копвиллем, ФММ **10**, 818 (1960).
9. А. В. Алексеев, У. Х. Копвиллем, В. Р. Нагибаров, М. И. Пирожков, ЖЭТФ **55**, 1852 (1968).
10. У. Х. Копвиллем, ЖЭТФ **42**, 1333 (1962).
11. D. E. Kaplan, Phys. Rev. Lett. **14**, 514 (1965).
12. У. Х. Копвиллем, ФТТ **9**, 1038 (1967).
13. R. M. Hill, D. E. Kaplan, Phys. Rev. Lett. **14**, 1062 (1965).
14. Я. Я. Асадуллин, У. Х. Копвиллем, ФТТ **9**, 2737 (1967).
15. У. Х. Копвиллем, В. Р. Нагибаров, ФММ **15**, 313 (1963).

16. N. A. Kurnit, I. D. Abella, S. R. Hartmann, Phys. Rev. Lett. **13**, 567 (1964).
17. I. B. Goldberg, E. Ehrenfreund, M. Weger, Phys. Rev. Lett. **20**, 539 (1968).
18. У. Х. Копвиллем, ФТТ **11**, 129 (1969).
19. K. Aizu, Phys. Rev. **B2**, 754 (1970).
20. C. A. Sacchi, C. H. Townes, Phys. Rev. **174**, 439 (1968).
21. А. Г. Семенов, В. Е. Хмелинский, ПТЭ, № 5, 197 (1967).
22. R. Lobo, S. Rodriguez, J. E. Robinson, Phys. Rev. **161**, 513 (1967).
23. W. Cochran, Adv. Phys. **18**, 72, 157 (1969).
24. Т. С. Альтшулер, ФТТ **9**, 2070 (1967).
25. H. I. Dehmelt, H. Kruger, Zs. Phys. **129**, 401 (1951).
26. L. M. Matarrese, J. S. Wells, R. L. Petuson, J. Chem. Phys. **50**, 2350 (1969).