

Письма в ЖЭТФ, том 13, стр. 404 – 407

20 апреля 1971 г.

АКУСТИЧЕСКИЙ ЯДЕРНЫЙ СОЛИД-ЭФФЕКТ ВО ФТОРИДЕ ЛИТИЯ

Г. Л. Антокольский, Л. Н. Ферштам, В. А. Шумилов

Возможность осуществления акустического "солид-эффекта" или "динамической ядерной поляризации" высказывалась еще в работе Абрагама и Проктора [1], которые в 1958 году впервые наблюдали динамическую поляризацию ядер Li^6 в кристалле LiF , подвергаемом воздействию переменным магнитным полем с частотой, равной разности или сумме частот прецессии ядер F^{19} и Li^6 во внешнем магнитном поле. Позже эта возможность применительно к тем же изотопам Li^6 обсуждалась в книге Кесселя [2]; однако экспериментально акустический солид-эффект еще не наблюдался. В настоящей работе мы получили его в кристаллах LiF на изотопах Li^7 , менее выгодных с точки зрения ожидаемой величины эффекта, но обладающих большей естественной распространенностью и поэтому более удобных для исследований импульсным методом.

Как известно [3], динамическая поляризация осуществляется за счет модуляции внутреннего спин-спинового взаимодействия, в данном случае, дипольного магнитного взаимодействия ядер Li^7 и F^{19} . Исходя из результатов общих теоретических работ [4 – 7], основанных на исследованиях Провоторова [4], для этого случая можно получить выражение, определяющее изменение стационарной поляризации p ядер Li^7

под действием ультразвукового возмущения разностной или суммарной частоты, вызывающего одновременную переориентацию спинов ядер Li^7 и F^{19}

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\gamma A_{\text{Li}} \omega_F / \omega_{\text{Li}} + A_F + T_3(\Delta^\pm)^2 / \Omega^2 + 1/W^\pm}{A_{\text{Li}} + A_F + T_3(\Delta^\pm)^2 / \Omega^2 + 1/W^\pm}. \quad (1)$$

Здесь $A \equiv T_1 / (I(I+1)) C$, где I , T_1 и C – соответственно спин ядра, время спин-решеточной релаксации и концентрация ядер данного сорта (отмеченного соответствующим индексом) в рассматриваемой двухспиновой системе, T_3 – время релаксации "диполь-дипольного резервуара", т. е. время установления его теплового равновесия с решеткой, $\omega_F = \gamma_F H_0$ и $\omega_{\text{Li}} = \gamma_{\text{Li}} H_0$ – частоты ларморовской прецессии ядер F^{19} и Li^7 с гиromагнитными отношениями γ_F и γ_{Li} во внешнем магнитном поле H_0 , $\Delta^\pm = \omega - \omega^\pm$ – расстройка текущей частоты ультразвука ω относительно суммарной или разностной частот прецессии $\omega^\pm = \omega_F \pm \omega_{\text{Li}}$. Ω – величина, характеризующая "теплоемкость" диполь-дипольного резервуара, определяемая локальными полями, создаваемыми ядрами друг на друге; наконец, W^+ и W^- – вероятности переходов, сопровождающихся переориентацией спинов Li^7 и F^{19} в одинаковом направлении под действием поля суммарной частоты ω^+ и в противоположных направлениях под действием поля разностной частоты ω^- . Таким образом, все верхние знаки в формуле (1) относятся к суммарной частоте, а нижние – к разностной частоте. При этом, как видно из формулы (1), возмущение суммарной частоты уменьшает поляризацию ядер Li^7 , т. е. разность заселенностей их зеемановских уровней, а возмущение разностной частоты приводит к возрастанию поляризации, т. е. к увеличению стационарной разности заселенностей, что и составляет понятие "динамической поляризации". Последняя, таким образом, должна проявляться в соответствующем изменении амплитуды, наблюдаемого сигнала ядерной прецессии.

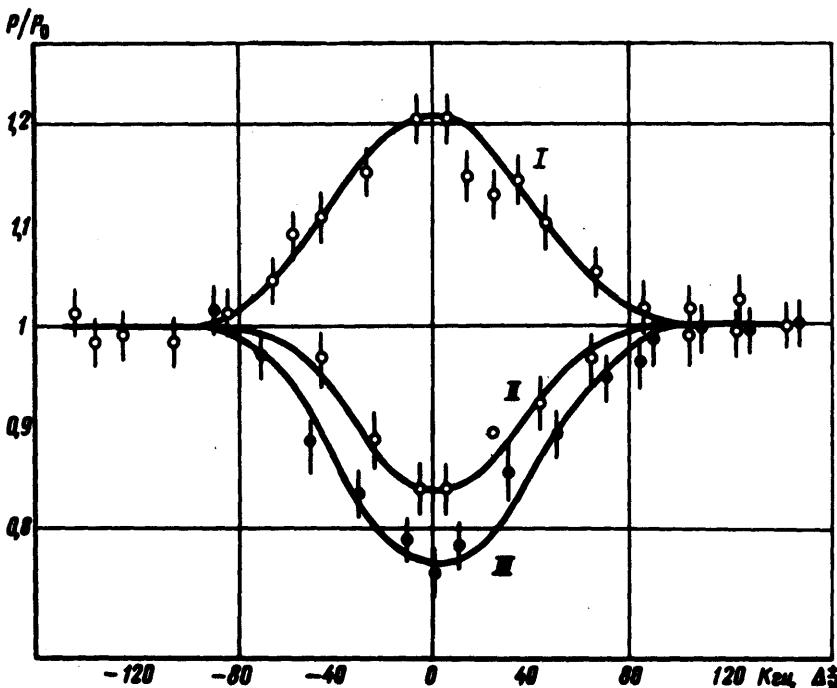
Эксперименты производились нами на импульсной установке, описанной ранее в работе [8]. Исследуемые образцы кристаллов LiF имели форму цилиндров диаметром 10 мм , длиной $\sim 50 \text{ мм}$, вырезанных вдоль оси [100], которая ориентировалась перпендикулярно внешнему полю H_0 так, что другая кубическая ось располагалась параллельно H_0 . Для удобства наблюдения сигналов прецессии ядер, обладающих очень большим временем спин-решеточной релаксации, на передающую катушку датчика подавались короткие импульсы напряжения с длительностью, много меньше 90-градусных, что позволяло регистрировать серию медленно спадающих сигналов прецессии, следующих с интервалом $\sim 0,5 \text{ сек}$.

Время релаксации ядер F^{19} , измеренное путем сравнения амплитуд сигналов прецессии в соседних сериях [9], при указанной ориентации кристаллографических осей составляло $T_{1\text{F}} = 180 \text{ сек}$. Для ядер Li^7 при этих условиях было получено значение $T_{1\text{Li}} = 500 \text{ сек}$. При таком различии времен релаксации формула (1) дает предельное усиление поляризации ядер Li^7 ($\Delta^- = 0$, $W^- \rightarrow \infty$) до значения 1,5; на суммарной же частоте эта формула допускает полное выравнивание населенностей уровней Li^7 с их последующей инверсией.

Ультразвуковые колебания возбуждались в образцах с помощью прикрепленных к их плоским торцам кварцевых пластинок X-среза. Противоположные торцы образцов скалывались для образования диффузного поля. Кристаллы предварительно прогревались ультразвуком до температуры около 70°C , и дальнейшие исследования акустического эффекта производились при этой стабилизированной температуре. При возбуждении продольного ультразвука на разностной частоте ($\omega^-/2\pi = 5,14 \text{ МГц}$) на соответствующую пьезопластинку подавалось электрическое напряжение до 1200 в , а на суммарной частоте ($\omega^+/2\pi = 12,4 \text{ МГц}$) — до 350 в . При этих условиях эксперимента оценка вероятностей W^\pm по формуле [2]

$$W = (\gamma_L \gamma_F \hbar e_0)^2 / r^6 \delta , \quad (2)$$

где r — постоянная решетки, e_0 — амплитуда деформации и δ — полусирина резонансных кривых, с учетом характеристик кристалла LiF дает значения $W^\pm \sim 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$, которым согласно выражению (1) соответствует изменение поляризации ядер Li^7 на $\sim \pm 30\%$.



Акустический солид-эффект в кристалле LiF. По оси ординат отложено изменение стационарной поляризации ядер Li^7 P относительно равновесного значения P_0 , по оси абсцисс — расстройка циклической частоты ультразвука. $\Delta^\pm = \Delta^\pm / 2\pi$ относительно разностной (кривая I) и суммарной (кривые I и II) частот прецессий ядер F^{19} и Li^7

На рисунке приведены экспериментальные кривые зависимости относительных амплитуд сигналов прецессии, пропорциональных стационарной поляризации ядер Li^7 , от частоты ультразвука, изменяемой около

расчетных значений ω^+ и ω^- в пределах, значительно меньших частотной полосы излучения пьезопластиинок. Кривая I относится к разностной частоте, а кривые II и III, полученные при напряжении на кварце соответственно 250 и 350 в – к суммарной частоте. Поскольку ошибка измерений амплитуд сигналов прецессии в наших экспериментах не превышала 5%, то можно констатировать, что эти кривые отчетливо иллюстрируют эффект изменения поляризации ядер Li^7 под действием ультразвука суммарной и разностной частоты. При этом величина эффекта и форма кривых хорошо согласуются с расчетными; что же касается их ширины ($\delta^\pm \approx 80 \text{ к} \cdot \text{г}$), то она определяется как зависимостью вероятностей W^\pm от Δ , так и множителем T_3/Ω^2 при $(\Delta^\pm)^2$ в формуле (1). Величину этого множителя, вообще говоря, можно оценить из сравнения экспериментальных кривых II и III, полученных при разной плотности акустической энергии в кристалле, учитывая, что вероятности W^\pm для этих кривых при фиксированной Δ должны относиться друг к другу как квадраты деформаций, пропорциональных напряжению на пьезонеобразователе. Однако, более точно это можно сделать путем насыщения запрещенных переходов радиочастотным полем, когда достигается предельное изменение стационарной поляризации. Результаты таких экспериментов будут нами опубликованы позже.

Ленинградский
государственный университет
им. А.А.Жданова

Поступила в редакцию
4 марта 1971 г.

Литература

- [1] A.Abragam, W.G.Proctor. Compt. Rend., 246, 1258, 1958.
- [2] А.Р.Кессель. Ядерный акустический резонанс. М., Изд. Наука, 1969.
- [3] К.Джеффрис. Динамическая ориентация ядер. М., Изд. Мир, 1965.
- [4] Б.М.Провоторов . ЖЭТФ, 41, 1582, 1961.
- [5] М.А.Кожушнер, Б.М.Провоторов. ФТТ, 6, 1472, 1964.
- [6] A. Abragam, M.Borghini. Progr. in Low Temp. Physics (ed. by J.Gorter), Vol. IV, Amsterdam, 1964.
- [7] Г.Р.Хуцишвили. УФН, 87, 211, 1965.
- [8] В.А.Шутилов, Г.Л.Антокольский. Ядерный магнитный резонанс, 2, 134, 1968.
- [9] В.А.Шутилов, Г.Л.Антокольский. ФТТ, 9, 231, 1967.