

в 94 раза. Из уравнения $P(a)=94$ находим: $a \simeq 0.07$ см⁻¹. Отсюда $g \simeq 3.5 \cdot 10^{-3}$ см/Мвт.

Полученные значения g примерно на порядок меньше найденного в [1]. Это, по-видимому, можно объяснить нестационарностью процесса ВРМБ в наших экспериментах. В [6] показано, что из-за нестационарности средний (по длине области взаимодействия стоксовой волны с накачкой) инкремент падает в $Q = \left(1 + \frac{25}{T} \tau\right)^2 \left(\frac{100}{T} \tau\right)$ раз, где T — длительность импульса накачки, τ — время жизни фононов в нелинейной среде. В сжатом до 38 атм ксеноне при длине волны возбуждающего ВРМБ излучения 1.06 мкм величина τ составляет примерно 30 пс. Поэтому при $T = 40$ пс коэффициент $Q \simeq 5.2$, а при $T = 20$ пс он равен 10. Таким образом, обнаруженное значительное уменьшение g в пределах нескольких сантиметров вблизи границы области взаимодействия накачки со стоксовой волной согласуется с предсказанным теорией уменьшением инкремента, усредненного вдоль всей области взаимодействия.

Авторы благодарны Н. А. Свенцицкой за поддержку данной работы, Ю. Н. Денисюку и В. В. Рагульскому за ценные советы, А. В. Горланову, Н. И. Гришмановой, А. А. Лещеву и В. Д. Соловьеву за помощь в работе.

Литература

- [1] В. В. Рагульский. Тр. ФИАН, 85, 3, 1976.
- [2] Н. Ф. Пилипецкий, В. И. Поповичев, В. В. Рагульский. ДАН СССР, 248, 1097, 1979.
- [3] Н. Г. Басов, И. Г. Зубарев, А. В. Котов, С. И. Михайлов, М. Г. Смирнов. Квант. электрон., 6, 394, 1979.
- [4] J. Walder, C. L. Tang. Phys. Rev. Lett., 19, 623, 1967.
- [5] В. Г. Сидорович. ЖТФ, 46, 2168, 1976.
- [6] E. E. Hagelocker, R. W. Minck, W. G. Rado. Phys. Rev., 154, 226, 1967.

Поступило в Редакцию 10 февраля 1981 г.

УДК 535.34 : 539.143.44 : 541.183

ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ОБРАЗЦА ПОД УГЛОМ К НАПРАВЛЕНИЮ ВНЕШНЕГО ПОЛЯ НА ШИРИНУ ЛИНИИ СИГНАЛА ПОГЛОЩЕНИЯ ЯМР

А. Е. Лукьянов, А. Н. Булыгин,
Б. П. Николаев и Л. Н. Петров

При изучении методами ядерного магнитного резонанса (ЯМР) объектов, неоднородных по своей природе (порошки, сорбенты, суспензии и т. п.), исследователи сталкиваются с нежелательным уширением линии резонанса из-за неоднородности магнитного поля внутри образца. Одним из способов сужения линии является быстрое вращение образца под магическим углом ($54^\circ 44'$) к направлению внешнего поля. Вращение именно под этим углом наилучшим образом усредняет члены гамильтониана, описывающие взаимодействие ядерных спинов с неоднородностями внешнего поля [1].

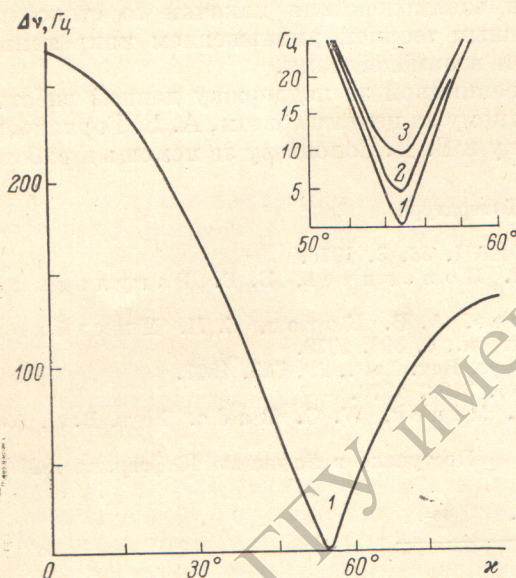
Первоначально этот метод применялся, чтобы сузить линию, уширенную из-за несовершенства магнитной системы самого спектрометра. Например, в работе [2] проводится расчет спектра сигнала поглощения гомогенного образца, вращающегося во внешнем поле постоянного градиента. Приближенные расчеты [3] предсказывают, что неоднородное уширение должно сниматься и для гетерогенных образцов.

Сужение линии при вращении образца под магическим углом наблюдается на опыте, однако не ясно, полностью ли вращение снимает неоднородное уширение. Неверный ответ на этот вопрос ведет к неправильным выводам о молекулярной подвижности исследуемого объекта. Ширина линии зависит от частоты вращения. Незнание закономерностей этой зависимости приводит к неоправданному увеличению частоты вращения при конструировании ЯМР спектрометров.

В настоящей работе сообщается о результатах аналитического расчета спектра сигнала поглощения ЯМР от вращающегося под углом к полю гетерогенного образца.

В качестве расчетной модели гетерогенной среды рассматривалась дисперсия одинаковых сфероидальных частиц с объемной долей σ , равномерно распределенная в жидкости.

Сфероиды случайным образом ориентированы в пространстве. Предполагается, что их форма близка к сферической. Объемная магнитная восприимчивость вещества дисперсии χ_1 , жидкости — χ_2 . Цилиндрическая ампула, содержащая такую неоднородную среду, вращается с угловой частотой Ω вокруг своей оси под углом α



Ширина линии сигнала поглощения ЯМР вращающегося неоднородного образца в зависимости от угла между осью вращения и направлением внешнего поля при $\nu_0 = 60$ МГц, $\sigma = 0.5$, $\Delta\chi = 10^{-6}$. 1 — $\lambda = 1.0$, 2 — $\lambda = 1.1$, 3 — $\lambda = 1.2$.

к направлению внешнего однородного магнитного поля H_0 . Предполагается, что выполняется условие полного усреднения гамильтониана диполь-дипольных взаимодействий, и спектр поглощения наблюдается на частоте резонанса ядер исследуемой жидкости.

Из решения уравнения Блоха, примененного к достаточно малому элементу объема жидкости, в котором магнитное поле можно считать практически однородным, нетрудно получить выражение для функции формы спектра [4]. Усреднение этой функции по всевозможным положениям и ориентациям сфероидов, выполненное методами статистической физики, приводит к выражению, описывающему спектр сигнала поглощения в рамках рассматриваемой модели. При расчете в выражении для индуцированного сфероидом магнитного поля были оставлены только дипольный и квадрупольный члены.

Спектр представляет собой семейство линий одинаковой формы и разной интенсивности. Линии-спутники симметрично расположены относительно центральной и отстоят от нее на расстояниях, кратных частоте вращения Ω . Форма линии чувствительна к величине произведения

$$\frac{4}{3} \pi |\Delta\chi| \sigma \nu_0 T_2, \quad (1)$$

где T_2 — время спин-спиновой релаксации, ν_0 — резонансная частота, $\Delta\chi = \chi_2 - \chi_1$.

Если это произведение велико (среда сильно неоднородна), то форма линии приближается к гауссовой с шириной на половине высоты, определяемой выражением

$$\Delta\nu = 8.82\nu_0\sigma |\Delta\chi| \left[\frac{(3\cos^2\alpha - 1)^2}{4} + \frac{(\lambda^2 - 1)^2}{700} (45\cos^4\alpha - 10\cos^2\alpha + 13) \left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)^{4/3} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где λ — коэффициент несферичности, равный отношению осей сфероида, $|\lambda - 1| \ll 1$.

График зависимости (2) от угла вращения приведен на рисунке. Ширина линии при магическом угле вращения оказывается равной

$$\Delta\nu_{\text{mag}} = 2.55\nu_0\sigma^4 |\Delta\chi(\lambda - 1)| \quad (3)$$

и не может быть уменьшена за счет увеличения частоты вращения.

Таким образом, при магическом угле вращения и несферических частицах ($\lambda \neq 1$) ширина линии обязательно больше ширины чистой жидкости, что обусловлено неисчезающими при магическом угле вращения вкладками квадрупольных магнитных моментов включений. Для реальных неоднородных систем с несферической формой частиц существуют вклады в индуцированное магнитное поле от высших магнитных моментов включений. Следовательно, вращение такого образца под магическим углом к внешнему полю не может полностью снять неоднородное уширение ни при каких частотах вращения.

Литература

- [1] У. Хеберлен, М. Мериног. ЯМР высокого разрешения в твердых телах. «Мир», М., 1980.
- [2] G. A. Williams, H. S. Gutowsky. Phys. Rev., 104, 278, 1956.
- [3] D. Doskocilova, B. Schneider. Adv. Colloid Interface Sci., 9, 63, 1978.
- [4] А. Абрагам. Ядерный магнетизм. ИЛ, М., 1963.

Поступило в Редакцию 9 января 1981 г.

УДК 548.0:535

КООПЕРАТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

В. В. Овсянкин и А. А. Федоров

В основе традиционного анализа нелинейной восприимчивости лежит концепция о том, что материальная среда может быть представлена в виде суммы независимых одноэлектронных (одночастичных) подсистем [1]. В то же время хорошо известно, что одноэлектронные состояния многочастичных систем возникают в теориях, вынужденно игнорирующих тонкие корреляции в движении элементарных составляющих среды. Неучтенное в одноэлектронном (одночастичном) приближении корреляционное взаимодействие носит название конфигурационного — в атомах с эквивалентными электронами [2] и кооперативного — в конденсированных средах с оптическими центрами малого радиуса [3]. В линейной спектроскопии корреляционное взаимодействие известно как причина появления двухэлектронных и автоионизационных переходов в атомах с эквивалентными электронами [2], кооперативных переходов в конденсированных средах [4], радиационных столкновений в газах [5] и т. д. В нелинейной оптике наиболее известным проявлением корреляционного взаимодействия является некогерентное нелинейное преобразование излучения в процессах кооперативной сенсibilизации и кооперативной люминесценции [6]. В этой заметке на примере генерации второй гармоники в кристаллах SrYb_2F_8 будет показано, что корреляционное взаимодействие приводит к ангармонизму, эффективному в процессах когерентного нелинейного преобразования излучения.