

О влиянии поля модуляции и частотного сдвига спинового взаимодействия на формирование сигналов поглощения и дисперсии ядерного магнитного резонанса при их регистрации в слабых полях

Р.В. Давыдов^{1,2,3}, А.А. Гольдберг¹, Д.С. Проводин¹, В.В. Давыдов^{1,4}, В.И. Дудкин³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова, г. Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены проблемы, возникающие при экспресс-контроле состояния конденсированной среды методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в слабом поле. Обоснованы преимущества использования модуляционной методики для регистрации сигнала ЯМР в слабом поле по сравнению с другими методами в малогабаритных ЯМР-измерителях. Отмечены сложности, возникающие при получении дополнительной информации об исследуемой среде с использованием зарегистрированных сигналов ЯМР и определены направления их решения. Рассмотрена задача формирования новых коэффициентов в уравнениях Блоха, учитывающих модуляцию постоянного магнитного поля B_0 и спин-спиновое взаимодействие в сдвиге резонансной частоты и в формировании намагниченности M . С использованием преобразований Вагнесса введены сигналы поглощения $\nu(t)$ и дисперсии $u(t)$ и осуществлен переход во вращающуюся систему координат и сформировано уравнение Блоха для компонент $u(t)$, $\nu(t)$ и M_z' с новыми коэффициентами. Представлено математическое соотношение для описания формы регистрируемого сигнала ЯМР, который на выходе автодинного детектора состоит из сигналов $\nu(t)$ и $u(t)$ в различной пропорции между ними в зависимости от условий его регистрации. Для различных параметров магнитных полей выполнен расчет значений $u(t)$, $\nu(t)$ и M_z' . Проведено сравнение различных вариантов этих расчетов, которое позволило обоснованно исключить одного из новых коэффициентов для уравнений Блоха вклад поля модуляции, изменяющийся во времени. Разработано решение системы уравнений Блоха с новыми коэффициентами и получены соотношения для $\nu(t)$, $u(t)$ и M_z' , в которых эти сигналы выражены только через параметры магнитных полей и времена продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации исследуемой среды. Выполнен расчет форм линий с использованием параметров, регистрируемых сигналов ЯМР с использованием модуляционной методики, и проведено их сравнение с экспериментальными данными. Полученные результаты подтвердили обоснованность выбранного подхода к описанию новых коэффициентов и к решению системы уравнений Блоха, в которую они вошли, относительно $u(t)$, $\nu(t)$ и M_z' . Все это позволяет, в отличие от решений уравнений Блоха, которые были ранее, продолжить вывод аналитических соотношений для сигналов дисперсии $u(t)$ и поглощения $\nu(t)$ независимо друг от друга и определять для них критические точки, а также характер изменения самих зависимостей, что ранее сделать было невозможно.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, уравнения Блоха, конденсированная среда, магнитное поле, зависящие от времени коэффициенты в уравнениях Блоха, сигнал ЯМР, модуляционная методика, взаимодействие спинов, время продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации.

Введение

В современном мире повышенное внимание уделяется развитию методов экспресс-контроля конденсированных сред для обеспечения решения большого числа задач в различных областях науки, промышленности, медицине, экологии и сельском хозяйстве [1–4]. Наибольшее предпочтение среди них получили бесконтактные методы, в которых проводимые измерения не изменяют физическую структуру и химический состав исследуемой среды [1, 3–7]. Среди этих методов многие ученые и инженеры предпочтение отдают измерениям, основанным на явлении рефракции и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [4, 7–12].

Малогабаритные ЯМР-релаксометры, в отличие от данного типа рефрактометров, позволяют, кроме определения по измеренным значениям времен продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации состояния среды (соответствует стандартному или нет), регистрировать сигнал ЯМР, в котором заложена дополнительная информация об исследуемой среде [1, 2, 4, 7, 13–15]. Данный сигнал ЯМР (в форме затухающих непериодических колебаний «виглей») при экспресс-контроле можно получить только в случае использования для его регистрации модуляционной методики [1, 4, 11–13, 15–17]. Принцип регистрации сигнала ЯМР с использованием данной методики основан на быстром прохождении резонансных условий в магнитном поле B_0 в контуре регистрации автодинно-