

ФОРМИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО СЛОЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ЯМР-ИНТРАСКОПИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

А.А.Самойленко, Д.Ю.Артемов, Л.А.Сибельдина

Предложен новый метод ЯМР-интраскопии твердых тел, основанный на формировании чувствительного слоя в сильноградиентном магнитном поле торцевой области сверхпроводящего соленоида. Для оценки пространственного разрешения проведен эксперимент с одномерным фантомом. Достигнуто разрешение лучше 200 мкм.

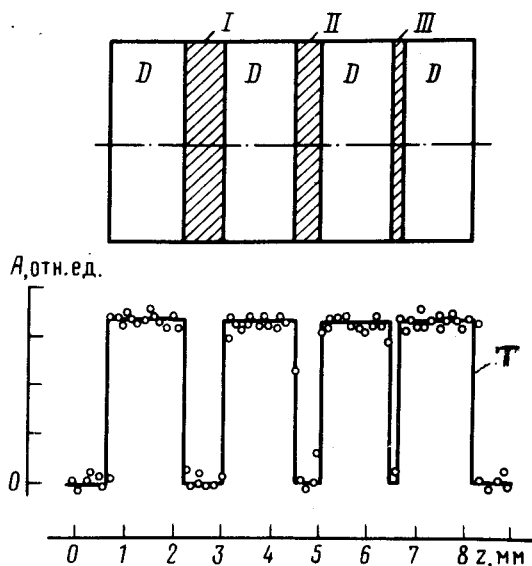
1. В области интраскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) до настоящего времени не найдено решение задачи получения удовлетворительных изображений твердых тел. Принципиальная трудность обусловлена универсальной для всех методов интраскопии, основанных на использовании градиентов магнитного поля G , зависимостью достигаемого простран-

ственного разрешения δz вдоль направления z от ширины линии ЯМР $\Delta\nu$ и величины G_z ¹:

$$\delta z \approx \Delta\nu / \gamma G_z, \quad (1)$$

где γ — гиромагнитное отношение резонирующих ядер. Поскольку твердые тела обладают характерными значениями $\Delta\nu \sim 50$ кГц, при создаваемых с помощью традиционных градиентных систем максимальных значениях $G_z \leq 0,1$ Т/м оказывается невозможным получить приемлемое разрешение ².

2. Ряд подходов, предложенных для преодоления указанной трудности ³⁻⁶, предусматривает искусственное сужение спектральных линий исследуемых объектов. Это с одной стороны позволяет исследовать относительно узкий круг образцов, допускающих возможность значительного сужения линий, а с другой — предполагает использование мощных однородных радиочастотных полей, формирование которых в случае реальных макроскопических объектов представляет значительную проблему.



D — плексигласовый диск; I, II, III — стеклянные прокладки; T — теоретический профиль фантома

3. Мы предлагаем новое решение задачи повышения пространственного разрешения δz в рамках метода селективной интраскопии ², путем формирования в твердом теле тонкого чувствительного слоя. Как следует из (1), достичь уменьшения δz возможно увеличивая значение градиента магнитного поля G_z . Удобным источником таких сильноградиентных полей могут служить осесимметричные магнитные системы, в частности, соленоиды с большим отношением длины L к радиусу R . Во-первых, градиент z -компоненты вектора магнитной индукции вблизи оси такого соленоида достигает максимума в области торца обмотки и составляет

$$G_z^{max} \approx B_0 / 2R, \quad (2)$$

где B_0 – поле в центре соленоида. Во-вторых, поляризирующее магнитное поле в указанной области имеет значение $B \approx B_0 / 2$, что при достаточно сильных полях B_0 обеспечивает как необходимые величины градиента G_z так и высокую чувствительность ЯМР-эксперимента.

4. Сверхпроводящие магниты, используемые в ЯМР-спектроскопии и рассмотренные выше соленоиды имеют сходную конфигурацию поля. Поэтому, для эксперимента по формированию чувствительного слоя была использована торцевая область магнита импульсного ЯМР-спектрометра СХР-200 ("Брукер") $B_0 = 4,7$ Т с диаметром теплового отверстия 79 мм. Оценка величины максимального градиента поля в указанной области приводит к значению $\gamma G_z \approx 1$ МГц/мм, что позволяет ожидать $\delta z \ll 100$ мкм; при этом соответствующая частота резонанса ядер ^1H составляет примерно 100 МГц.

5. Возбуждение сигналов ЯМР ^1H проводилось на частоте 90 МГц импульсной последовательностью "солид – эхо", $90_x^\circ - \tau - 90_y^\circ$. Длительности 90° -импульсов выбирались равными 10 мкс, что удовлетворяет условиям селективного возбуждения². При этом формировался чувствительный слой с δz порядка 0,1 мм. Одномерный фантом состоял из четырех плексигласовых дисков диаметром $d = 5$ мм и толщиной 1,5 мм, разделенных стеклянными прокладками I, II, III с толщинами 1 мм, 0,6 мм и 0,2 мм, соответственно.

6. Сканирование спиновой плотности чувствительным слоем производилось путем вертикального перемещения фантома. На рисунке приведена зависимость интенсивности сигнала спинового эха от смещения фантома вдоль оси z магнита. Полученная зависимость верно отражает геометрию образца и является доказательством возможности получения пространственного разрешения не менее 200 мкм. Следует отметить, что выполнение условия $d \ll 2R$ обеспечивает практически плоскую форму чувствительного слоя в пределах образца.

7. Применение предложенного метода открывает возможности для получения высококачественных интраскопических изображений твердых тел. Контрастирование по временам релаксации может быть достигнуто варьированием задержек между импульсами, либо применением многоимпульсных последовательностей типа "спин-локинг"⁷.

Литература

1. Ацаркин В.А и др. Успехи физ. наук, 1981, 135, 285.
2. Сороко Л.М. Интроскопия на основе ядерного магнитного резонанса. М.: Наука, 1986.
3. Mansfield P. et al. J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1973, 6, L422.
4. Suits B.H., White D. Sol. St. Comm., 1984, 50, 291.
5. Garroway A.N., Baum J., Munowitz M.G., Pines A. J. Magn. Reson., 1984, 60, 337.
6. De Luca F. J. Magn. Reson., 1986, 69, 496.
7. Иванов Ю.Н., Провоторов Ю.Н., Фельдман Э.Б. ЖЭТФ, 1978, 75, 1837.