

УДК 67.06

© Е. И. Демихов, В. В. Лысенко, Е. А. Костров, Т. Е. Демихов,
А. С. Рыбаков, А. В. Багдинов, Ю. А. Тысячных, М. М. Константинов,
Г. М. Пистрак, Б. А. Шумм, В. Тарасов

ПЕРВЫЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫЙ ТОМОГРАФ С ПОЛЕМ 1.5 ТЕСЛА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Сообщается о создании первого в России сверхпроводящего магнитно-резонансного томографа (МРТ) с индукцией магнитного поля 1.5 Тл. Основной частью прибора является сверхпроводящий магнит с индукцией магнитного поля 1.5 Тл и "теплым отверстием" 90 см, который был разработан и построен в кооперации между ФИАН и компанией НПО РТИ (Москва). Однородность магнитного поля 2 ppm в сфере 40 см; временная стабильность 0.01 ppm/ч, что соответствует стандартным параметрам МРТ такого уровня. Разработано программное обеспечение, которое позволяет получение томограмм высокого качества с пространственным разрешением 0.4 мм всех органов человеческого организма. Создан пакет технической документации, готовый к началу производства.

Кл. сл.: сверхпроводящие магниты, высокие магнитные поля, МРТ, криогеника

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является создание уникального магнитно-резонансного томографа (МРТ) российского производства с индукцией магнитного поля 1.5 Тл. Магнитно-резонансная томография представляет собой наиболее точный метод медицинской диагностики, позволяющий получать объемную информацию о патологиях человеческого организма. Рынок МРТ в России не насыщен. Обнародованный план Минпромторга РФ по импортозамещению МРТ показывает, что к 2018 г. импорт МРТ в Россию будет сокращен с 95 до 47.5 %. Интересные цифры показывает статистика текущего количества введенного в эксплуатацию МРТ на плотность населения в мире (штук МРТ на 1 млн жителей):

- США — 35;
- Германия — 27;
- Япония — 46;
- Россия:
 - ЦФО, включая Москву — 3.2;
 - Южный ФО — 1.4.

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА СОЗДАНИЯ МРТ

Проект по созданию отечественного МРТ был открыт в ФИАНе в 2011 г. К настоящему моменту созданы базовые технологии производства МРТ на основе новых отечественных разработок [1–4],

способных конкурировать с зарубежными аналогами; создана опытная производственная линия; созданы две модели МРТ: полноразмерный МРТ (рис. 1) и компактный ортопедический (рис. 2). Рассмотрены модельные объекты на основе органических соединений [5–8] для изучения воздействия МРТ на организм человека. Текущий этап развития проекта — готовность начать работы по организации производства и продаж.



Рис. 1. Полноразмерный МРТ 1.5 Тл Fullscan



Рис. 2. Компактный ортопедический МРТ 1.5 Тл MR Scanex

Технологическая цель и новизна работ состоит в создании МРТ без использования жидкого гелия с индукцией магнитного поля 1.5 Тл, что позволит снизить стоимость системы на 25 %. Создание данной системы позволит перейти к массовой МРТ-диагностике и к "палатному" МРТ. Работы

по МРТ были начаты, исходя из предыдущего опыта научного приборостроения для физики и техники низких температур.

МРТ включает в себя следующие подсистемы: магнит, градиентно-корректирующий модуль, блок градиентных усилителей, передающую РЧ-катушку, комплект приемных РЧ-катушек, РЧ-передатчик, восьмиканальный цифровой спектрометр, стол пациента, компьютер консоли оператора с установленным специализированным программным обеспечением. Структурная схема взаимодействия систем МРТ показана на рис. 3.

Базовым элементом МРТ является сверхпроводящий магнит, создающий сильное постоянное магнитное поле в области сканирования. Существенными характеристиками этого поля являются чрезвычайно высокие однородность в пространстве и стабильность во времени. Организация производства МРТ-магнитов потребовала разработки ряда специальных технологий, таких как синтез высокооднородного магнитного поля с помощью многокатушечных систем; активное экранирование; получение сверхнизкоомных соединений сверхпроводящих проводов с сопротивлением ниже 10^{-14} Ом; "пассивное шиммирование" — корректирование неоднородности магнитного поля с помощью ферромагнитных элементов.



Рис. 3. Структурная схема МРТ

Рабочее значение индукции магнитного поля сверхпроводящего магнита для всего тела составляет 1.5 Тл. Магнит имеет горизонтальное сквозное отверстие для помещения пациента диаметром 90 см и длиной 170 см. Пассивное шиммирование магнита позволило получить однородность поля порядка 2 ppm в рабочей области сферы диаметром 40 см. Стабильность магнитного поля в рабочем короткозамкнутом режиме "замороженного поля" составляет 0.01 ppm/ч. Магнит является активно-экранированным, расстояние от изоцентра магнитной системы до поверхности с индукцией 0.5 мТл составляет 4.4 м в продольном направлении и 2.6 м в радиальном. Представленные характеристики являются типичными для современных МРТ.

Сверхпроводящие обмотки магнита размещены при температуре 4.2 К в гелиевом криостате. Магнит оснащен двухступенчатым криорефрижератором, который реконденсирует пары жидкого гелия, что позволяет обеспечить долговременную работу без дозаправки жидким гелием. Первая ступень криорефрижератора используется для охлаждения теплового экрана, а холодопроизводительность его второй ступени используется для

реконденсации паров испарившегося жидкого гелия.

ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННОГО МРТ

МРТ позволяет получать изображения слоев в 3 основных плоскостях — аксиальной, сагитальной и фронтальной, — а также в наклонных плоскостях с углом наклона до 45°. Программное обеспечение МРТ реализует методы визуализации (см. рис. 4) с помощью основных импульсных последовательностей: SE (спин-эхо), GE (градиентное эхо), FSE (быстрое спин-эхо), IR (инверсия—восстановление), 3D (метод сканирования и реконструкции по алгоритму 3D Фурье). Минимальная толщина слоя плоскости сечения составляет в режимах 2D не более 2 мм, в режиме 3D — не более 0.5 мм. Пространственное разрешение в плоскости изображения при толщине слоя 5 мм позволяет различать структуры с линейными размерами не более 0.4 мм. Геометрические искажения линейных размеров на изображении не превышают ±3 % при толщине слоя 5 мм.



Рис. 4. Образцы томограмм, полученных на полноразмерном МРТ FullScan

Кроме того, программное обеспечение МРТ обеспечивает широкий спектр сервисных функций, таких как ввод данных пациента; выбор режима сканирования и задание его параметров; просмотр изображений и различные манипуляции с ними; постобработка изображений с помощью фильтров, подавляющих шумы и подчеркивающих границы областей; архивирование изображений на магнитных носителях; получение твердых копий изображения.

МРТ КОМПАКТНЫЙ ОРТОПЕДИЧЕСКИЙ

Помимо сканера всего тела, нами был создан специализированный ортопедический МРТ — MR Scanex. МРТ предназначен для получения изображений суставов конечностей человека. По статистическим данным, такие исследования составляют около 20 % всех МРТ-исследований. Магнит МРТ с индукцией магнитного поля 1.5 Тл имеет туннельную конструкцию с "теплым отверстием" 325 мм. Рабочая зона сканирования представляет собой сферу диаметром 160 мм. Стабильность и однородность магнитного поля аналогичны соответствующим характеристикам магнита всего тела. Магнит также является активно-экранированным. Расстояние от изоцентра магнитной системы до поверхностей с уровнем индукции 0.5 мТл составляет 2.5 м в продольном направлении и 1.7 м в радиальном.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ

Нами разработаны две модификации сверхпроводящего магнита, отличающиеся способом охлаждения обмоток. Одним из способов охлаждения обмоток является традиционная для современных МРТ описанная здесь схема с использованием жидкого гелия (реконденсация паров криорефрижератором).

Другая модификация представляет собой т. н. "сухой" магнит, где жидкий гелий не используется, а сверхпроводящие обмотки охлаждаются напрямую криорефрижератором. Это позволяет значительно сократить эксплуатационные затраты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Demikhov E., Kostrov E., Lysenko V. et al. 8 T cryogen free magnet with a variable temperature insert using a heat switch // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2010. Vol. 20, no. 3. P. 612–615. Doi: 10.1109/TASC.2010.2041592.
2. Naumov P.G., Lyubutin I.S., Frolov K.V., Demikhov E.I. A closed-cycle cryostat for optical and Mössbauer spectroscopy in the temperature range 4.2–300 K // Instruments and Experimental Techniques. 2010. Vol. 53, no. 5. P. 770–776. Doi: 10.1134/S0020441210050301.
3. Demikhov T., Kostrov E., Lysenko V., Demikhov E., Piskunov N. 9 T NbTi cryogen free HTS Test Stand // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2012. Vol. 22, no. 3. Article Sequence Number: 9501004. Doi: 10.1109/TASC.2011.2178994.
4. Demikhov E.I. Cryogenic devices for X-ray, synchrotron and neutron measurements // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2005. Vol. 543, no. 1. P. 365–367. Doi: 10.1016/j.nima.2005.01.257.
5. Demikhov E.I., Dolganov V.K., Filev V.M. Pretransitional anomalies in the rotation of the plane of polarization of light in ferroelectric liquid crystals // JETP Letters. 1983. Vol. 37, no. 7. P. 361–365.
6. Demikhov E., Stegemeyer H., Blumel Th. Domain growth laws for the phase ordering of chiral liquid crystals // Physical Review E. 1994. Vol. 49, no. 6. P. R4787–R4790. Doi: 10.1103/PhysRevE.49.R4787.
7. Demikhov E.I., John M., Krohn K. Preliminary communication Anomalous behaviour of photoactive free-standing smectic films under illumination // Liquid Crystals. 1997. Vol. 23, no. 3. P. 443–445. Doi: 10.1080/026782997208361.
8. Demikhov E., Stegemeyer H. Novel structures of a smectic C* phase with high spontaneous polarization in free-standing films // Liquid Crystals. 1995. Vol. 18, no. 1. P. 37–43. Doi: 10.1080/02678299508036588.

ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва

Контакты: Рыбаков Александр Сергеевич,
alecksandr@bk.ru

Материал поступил в редакцию: 24.11.2016

THE FIRST-IN-RUSSIA SUPERCONDUCTING MAGNET RESONANCE 1.5 TESLA IMAGING SYSTEM FOR HIGH-PRECISION MEDICAL DIAGNOSTICS

**E. I. Demikhov, V. V. Lysenko, E. A. Kostrov, T. E. Demikhov,
A. S. Rybakov, A. V. Bagdinov, Yu. A. Tysjachnykh, M. M. Konstantinov,
G. M. Pistrak, B. A. Shumm, V. Tarasov**

Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

The first-in-Russia 1.5 MRI system for high precision medical diagnostics is developed and manufactured. It is based on own 1.5 T superconducting magnet with warm bore 90 cm built in cooperation between FIAN and Russian RTI company (Moscow). The field homogeneity is about 2 ppm in 40 cm sphere; the magnet field stability is 0.01 ppm/h which equals the standard value of the class MRI systems. MRI allows to obtain images of the layers in the 3 main planes — axial, sagittal and frontal — as well as on inclined planes with an inclination of up to 45°. The minimum thickness of the section plane in 2D mode is not more than 2 mm, in 3D mode — no more than 0.5 mm. Spatial resolution in the image plane at a thickness of 5 mm layer structure allows to distinguish with the linear dimensions no more than 0.4 mm. The technical documentation is ready for production.

Keywords: superconducting coils, high magnet fields, MRI systems, cryogenic

REFERENCES

1. Demikhov E., Kostrov E., Lysenko V., Piskunov N., Troitskiy V. 8 T cryogen free magnet with a variable temperature insert using a heat switch. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010, vol. 20, no. 3, pp. 612–615. Doi: 10.1109/TASC.2010.2041592.
2. Naumov P.G., Lyubutin I.S., Frolov K.V., Demikhov E.I. A closed-cycle cryostat for optical and Mössbauer spectroscopy in the temperature range 4.2–300 K. *Instruments and Experimental Techniques*, 2010, vol. 53, no. 5, pp. 770–776. Doi: 10.1134/S0020441210050301.
3. Demikhov T., Kostrov E., Lysenko V., Demikhov E., Piskunov N. 9 T NbTi cryogen free HTS Test Stand. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, vol. 22, no. 3. Article Sequence Number: 9501004. Doi: 10.1109/TASC.2011.2178994.
4. Demikhov E.I. Cryogenic devices for X-ray, synchrotron and neutron measurements. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, vol. 543, no. 1, pp. 365–367. Doi: 10.1016/j.nima.2005.01.257.
5. Demikhov E.I., Dolganov V.K., Filev V.M. Pretransitional anomalies in the rotation of the plane of polarization of light in ferroelectric liquid crystals. *JETP Letters*, 1983, vol. 37, no. 7, pp. 361–365.
6. Demikhov E., Stegemeyer H., Blumel Th. Domain growth laws for the phase ordering of chiral liquid crystals. *Physical Review E*, 1994, vol. 49, no. 6, pp. R4787–R4790. Doi: 10.1103/PhysRevE.49.R4787.
7. Demikhov E.I., John M., Krohn K. Preliminary communication Anomalous behaviour of photoactive free-standing smectic films under illumination. *Liquid Crystals*, 1997, vol. 23, no. 3, pp. 443–445. Doi: 10.1080/026782997208361.
8. Demikhov E., Stegemeyer H. Novel structures of a smectic C* phase with high spontaneous polarization in free-standing films. *Liquid Crystals*, 1995, vol. 18, no. 1. pp. 37–43. Doi: 10.1080/02678299508036588.

Contacts: Rybakov Aleksandr Sergeevich,
alecksandr@bk.ru

Article received in edition: 24.11.2016