

Ю. В. Богачев, М. Н. Шишкина

**Учебно-методический комплекс «Экспериментальные методы магнитного резонанса»
как средство повышения качества подготовки специалистов в области квантовой
радиоэлектроники, компьютерных технологий и биотехнических систем**

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

***Аннотация.** Рассмотрены особенности учебно-методического комплекса (УМК) по экспериментальным методам и приборам магнитного резонанса. Проведен анализ учебных программ, лекционных курсов, методического и технического обеспечения лабораторного практикума, входящих в состав УМК и ориентированных на подготовку современных специалистов в области квантовой радиоэлектроники, компьютерных технологий и биотехнических систем.*

Ключевые слова: квантовые радиофизические эффекты; магнитный резонанс (МР); ядерный магнитный резонанс (ЯМР); электронный парамагнитный резонанс (ЭПР); магнитно-резонансная томография (МРТ)

I. ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие радиоэлектроники, вычислительной техники, сферы коммуникаций, медицины связано с использованием квантовых радиофизических эффектов, к которым относятся методы магнитного резонанса (электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), ядерного магнитного резонанса (ЯМР), оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР), комбинированных резонансов).

Современная приборная база радиоэлектроники (элементы оптоэлектроники, полупроводниковые структуры, твердотельные элементы СВЧ-электроники, радиационно-стойкие материалы, чипы

компьютеров и т.д.) основывается на различных квантовых спиновых состояниях электронов и ядер, которые можно обнаружить и управлять ими с помощью квантовых радиофизических методов. Области применения этих методов интенсивно и непрерывно расширяются, например, спиновые состояния NV-центров или дефектов кристаллической решетки в искусственных алмазах и карбиде кремния являются основой для создания высокоэффективных лазеров нового типа большей мощности и более широким диапазоном длин волн; высокотемпературного полевого транзистора с рабочей частотой до 50 ГГц; бета-гальванических батареек со сроком службы в тысячи лет, корпус которых выполнен из синтетических алмазов; квантовых магнитометров и компьютеров; СВЧ-приборов с уникальными теплопроводными свойствами и радиационной стойкостью; квантовых сенсоров или детекторов различных видов излучений, регистрации элементарных частиц в диапазоне от 5,5 эВ до ГэВ; устройств квантовой связи и т.д. [1].

Все большее применение в медицинской диагностике находят методы и аппаратура на основе явлений ядерного магнитного и электронного парамагнитного резонанса (ЯМР и ЭПР). В настоящее время магнитно-резонансная томография (МРТ) является основным методом визуализации биоструктур на атомно-молекулярном уровне *in vivo*. В последнее время активно развивается направление магнитно-резонансной тераностики [2], в котором высокие диагностические возможности метода МРТ сочетаются с терапевтическим воздействием на организм с помощью различных молекулярных соединений или физических полей. Методы МР-тераностики, уже нашедшие клиническое применение или находящиеся в стадии подготовки к клиническому апробированию, включают МРТ-управляемые высокоинтенсивную фокусированную ультразвуковую хирургию (абляцию опухолей), радиационную (рентгеновскими лучами) терапию, протонную терапию, радиочастотную терапию. В стадии исследований находятся новые методы МР-тераностики, такие как транскраниальная магнитная стимуляция, совмещенная с функциональной МРТ (TMS/fMRI), МРТ-управляемая фотодинамическая терапия. Число таких исследований непрерывно растет, и соответственно, возрастает роль МР-тераностики в современной медицине.

В связи с этим изучение квантовых радиофизических эффектов, методов и аппаратуры магнитного резонанса становится актуальным, особенно, в технических вузах. Однако, учебные программы технических университетов предполагают, по сути дела, только ознакомление студентов с основами квантовой физики как на лекционных занятиях, так и при проведении лабораторно-практических работ в курсе общей физики. Трудность изучения квантовых эффектов в учебных лабораториях связана с отсутствием или недостаточным количеством соответствующих этой тематике макетов лабораторных работ. Основные понятия магнитного резонанса – явления, лежащего в основе квантовой радиофизики, практически в технических вузах не изучаются.

С целью повышения качества подготовки инженеров с учетом современных достижений науки и техники разработан учебно-методический комплекс (УМК) «Экспериментальные методы магнитного резонанса», включающий в себя дополнительную учебную программу «Современные методы квантовой радиофизики» [1], учебно-методические пособия для студентов технических вузов [3, 4], аппаратуру и программное обеспечение как для учебного лабораторного практикума, так и для проведения научно-исследовательских работ в вузах [4].

II. УЧЕБНЫЕ ПРОГРАММЫ УМК

Изложение лекционных материалов по изучению квантовых эффектов, включая явления электронного парамагнитного и ядерного магнитного резонансов входит в основную образовательную программу курса общей физики технических вузов, но с ограниченным количеством часов (порядка 2-х часов вместе с изложением эффекта Зеемана).

В рамках дополнительной учебной программы «Современные методы квантовой радиофизики» [1] предусмотрена усиленная подготовка и изучение физических основ квантовой радиофизики, формирование профессиональных компетенций по применению современных методов магнитно-резонансных измерений и технологий. Магистранты получают навыки работы с современными

радиофизическими приборами, базами данных и знаний, учатся использованию пакетов прикладных программ обработки и анализа экспериментальных данных. Особое внимание уделяется вопросам научных исследований и разработки новых технических средств и технологий, использующих методы магнитного резонанса.

Дополнительная учебная программа «Современные методы квантовой радиофизики» ориентирована на подготовку бакалавров, магистров и специалистов и состоит из общенаучного и профессионального разделов, а также раздела «Практики и научно-исследовательская работа».

Общенаучный и профессиональный разделы предусматривают изучение студентами следующих дисциплин:

- основы квантовой радиофизики,
- методы магнитного резонанса (ЭПР, ЯМР, ОДМР, комбинированные резонансы),
- применение методов магнитного резонанса в науке и технике,
- магнитно-резонансная томография и тераностика,
- экспериментальные методики и аппаратура магнитного резонанса,
- информационно-измерительные системы и программные комплексы, ориентированные на магнитно-резонансные методы и технологии.

Раздел «Практики и научно-исследовательская работа» включает в себя учебный лабораторный практикум, производственные практики в различных учреждениях, научно-исследовательскую работу, в том числе - участие в конференциях и семинарах.

III. МЕТОДИЧЕСКОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УМК

При разработке методического и технического обеспечения УМК был использован опыт ученых и преподавателей кафедры физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ», кафедры ядерно-физических методов исследования СПбГУ и кафедры физики Поволжского ГТУ.

Учебно-методическая часть комплекса включает в себя методические указания «Магнитно-резонансные методы исследований» [3] и учебно-методическое пособие «Магнитный резонанс. Эффект Зеемана» [4]. Методические указания содержат описания лабораторных работ по разделу «Атомная физика» курса физики для студентов всех технических специальностей СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Учебно-методическое пособие имеет общую теоретическую часть, где излагаются физические основы явления магнитного резонанса, которые рассматриваются с точки зрения как классических, так и квантово-механических представлений. Подробно описываются частные эффекты, наиболее представительные из которых – электронный парамагнитный (ЭПР) и ядерный магнитный (ЯМР) резонансы. Анализируются основные характеристики спектров ЭПР и ЯМР (резонансные частоты, амплитуда и ширина линий, g-фактор Ланде, ядерный g-фактор, времена спин-спиновой и спин-решеточной релаксации, постоянные тонкой и сверхтонкой структур спектра ЭПР, и т. д.). Рассмотрены основные типы сверхтонкого электронно-ядерного взаимодействия (анизотропное – диполь-дипольное и изотропное – контактное взаимодействия).

В учебно-методическом пособии описывается устройство современной исследовательской аппаратуры ЭПР и ЯМР (функциональные схемы основных узлов, принципы работы, характеристики, особенности технической реализации, программное обеспечение). Приведены также описания лабораторных работ по магнитно-резонансным методам исследований, в которых изучаются основные принципы ЭПР и ЯМР, взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, квантовые эффекты в твердых и жидких телах. Работы носят исследовательский характер и предусматривают обстоятельный анализ экспериментальных результатов.

В качестве технической базы УМК были использованы разработки аппаратуры ЭПР каф. физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и аппаратуры ЯМР компании «Resonance Systems, GmbH» (Россия, Германия).

Лабораторные установки по исследованию вынужденных электронных переходов и ЭПР в слабом магнитном поле, по исследованию ЯМР и определению магнитных моментов протона, дейтона и лития выполнены на макетах упрощенных спектрометров ЭПР и ЯМР, реализованных с помощью

приборов – измерителей магнитной индукции Ш 1-1 и Ш 1-8, магнитных систем на основе катушек Гельмгольца и электромагнита.

Для выполнения лабораторных работ по дополнительным учебным программам специализированных курсов, для проведения студентами научных исследований разработаны автодинный и гомодинный спектрометры ЭПР (ЭПР-10 мини А и Г, соответственно). Для измерения времен ядерной спин-решеточной и спин-спиновой релаксации импульсными методами ядерного магнитного резонанса адаптирован малогабаритный лабораторный спектрометр ЯМР (модель «Спин Трэк»).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный учебно-методический комплекс «Экспериментальные методы магнитного резонанса» успешно применяется в лабораторном практикуме по разделу «Атомная физика» курса физики для студентов всех технических специальностей СПбГЭТУ «ЛЭТИ», апробирован при подготовке магистров по направлению № 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии» на кафедре биотехнических систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Подобный УМК может быть реализован для подготовки магистров по направлению № 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» на кафедре микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», а также может быть использован в других технических ВУЗах, в том числе для подготовки специалистов в передовых инженерных школах.

Список литературы:

1. Ю. В. Богачев, А. И. Мамыкин. Дополнительная образовательная программа «Современные методы квантовой радиофизики» для студентов технических вузов // Современное образование: содержание, технологии, качество. Материалы ХХІХ международной научно-методической конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. С. 431–433.
2. Богачев Ю.В., Фролов В.В., Чижик В.И. Магнитно-резонансная тераностика. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 224 с.
3. Магниторезонансные методы исследований: Методические указания к выполнению лабораторных работ по разделу «Квантовая физика»/ Сост.: Б.Ф. Алексеев, Ю.В. Богачев, Ю.Е. Зайцев, А.С. Сердюк, Н.Н. Кузьмина; Под ред. А.И. Мамыкина. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001. 32 с.
4. Ю.В. Богачев, Л.Ю. Грунин, М.Н. Князев, А.И. Мамыкин, В.В. Фролов. Магнитный резонанс. Эффект Зеемана: учеб.-метод. пособие / под ред. Ю.В. Богачева. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 55 с.

Yu. V. Bogachev, M. N. Shishkina

The educational and methodological complex "Experimental methods of magnetic resonance" as a means of improving the quality of specialists training in the field of quantum radio electronics, computer technologies and biotechnical systems

Saint Petersburg Electrotechnical University, Russia

Abstract. The features of the educational and methodological complex (EMC) on experimental methods and devices of magnetic resonance are considered. The analysis of educational programs, lecture courses, methodological and technical support of the laboratory workshop, which are part of the EMC and are aimed at training modern specialists in the field of quantum radio electronics, computer technologies and biotechnical systems, is carried out.

Keywords: quantum radiophysical effects; magnetic resonance (MR); nuclear magnetic resonance (NMR); electron paramagnetic resonance (EPR); magnetic resonance imaging (MRI)