

# ПРИКЛАДНАЯ РАДИОФИЗИКА

УДК 537.635:621.37/.39.029.65

## МАГНИТНЫЙ РАДИОСПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «КВАРК» МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

С. В. Недух

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова, НАН Украины,  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [sv\\_grey@ire.kharkov.ua](mailto:sv_grey@ire.kharkov.ua)*

Представлено описание основных характеристик и функциональных возможностей магнитного радиоспектроскопического комплекса «КВАРК». Продемонстрирована возможность радиоспектроскопического комплекса «КВАРК» проводить исследования различных магнитных микро- и наноструктур методом магнитного резонанса в диапазоне частот 20-60 ГГц, диапазоне полей 0-1,9 Тл, интервале температур 77-300 К. Приведены и проанализированы экспериментальные результаты использования в составе электродинамических модулей комплекса различных наборов специализированных резонансных ячеек (перенастраиваемый объемный резонатор, перенастраиваемый открытый резонатор, волноводный концентратор СВЧ поля). Показано, что использованная модульная система построения комплекса позволяет быстро модифицировать его для измерения нерезонансных эффектов гигантского магнитного сопротивления/импеданса и туннельного магнитного сопротивления/импеданса.

Приведены результаты исследований различных классов наноструктур, полученные с помощью радиоспектроскопического комплекса «КВАРК». Ил. 6. Библиогр.: 12 назв.

**Ключевые слова:** электронный магниторезонансный радиоспектрометр, миллиметровый диапазон длин волн, микро- и наноструктуры.

Среди большого количества методов исследования магнитной структуры наноманетков особое место занимает метод электронного спинового резонанса (ЭСР). Этот метод позволяет обнаруживать и выделять из полной магнитной восприимчивости очень небольшие ее изменения, обусловленные различными причинами, получать такую точную детальную информацию о магнитных свойствах вещества, которую едва ли можно получить какими-либо другими методами.

Одновременно с этим в течение последних лет наблюдается устойчивый рост интереса к исследованию магнитных микро- и наноструктур. В их число входят: мультислоистые пленки магнитный металл/немагнитный металл (сверхрешетки), которые демонстрируют эффект гигантского магнитного сопротивления/импеданса (ГМС/ГМИ) [1-4]; гранулярные пленки (наноразмерные гранулы магнитного металла, внедренные в диэлектрическую матрицу), демонстрирующие эффекты туннельного магнитного сопротивления/импеданса (ТМС/ТМИ) и его аналог в инфракрасной области – магниторефракторный эффект (МРЭ). Интерес к таким структурам связан во многом с тем, что применение подобных искусственных материалов в электронике, благодаря их специфическим свойствам, позволяет говорить о возникновении новой науки – спинтроника [5].

Применение метода ЭСР в миллиметровом диапазоне длин волн позволяет исследовать высокочастотные и магнитные свойства низкоразмерных магнетиков непосредственно в частотной области их предполагаемого применения.

Однако существующие в настоящее время коммерческие модели радиоспектрометров СВЧ диапазона, как правило, работают на фиксирован-

ной частоте, используя в качестве резонансной ячейки не перенастраиваемый объемный резонатор.

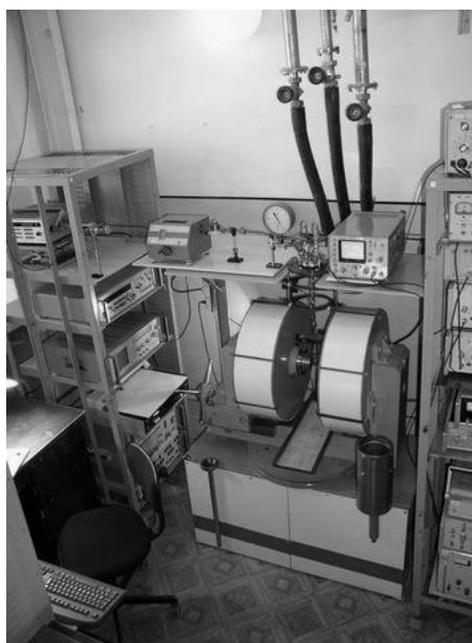
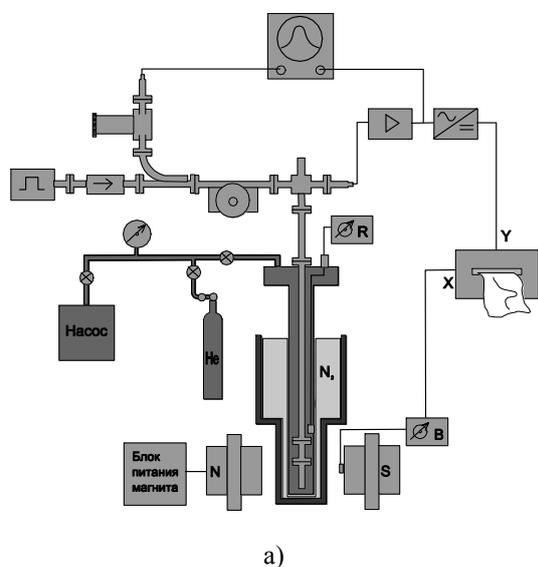
В данной работе представлен магнитный радиоспектроскопический комплекс «КВАРК», позволяющий методом ЭСР в широком диапазоне СВЧ частот и широком интервале температур исследовать магнитные свойства различных микро- и нанообъектов. Данный радиоспектроскопический комплекс оборудован набором специализированных резонансных ячеек (в качестве которых используются объемный прямоугольный перенастраиваемый резонатор, перенастраиваемый двухзеркальный открытый резонатор (ОР)), системой измерения угловых зависимостей магнитных спектров, автоматизированной системой сбора и обработки экспериментальных данных.

**1. Конструкция и принцип работы.** Магнитный радиоспектроскопический комплекс «КВАРК» предназначен для измерения спектров ЭСР в диапазоне частот 20-60 ГГц, температур 77-300 К в присутствии внешних магнитных полей 0-19 Тл. Структурная схема и общий вид радиоспектрометра с криогенным электродинамическим модулем приведены на рис. 1.

Радиоспектрометр собран по модульно-блочной схеме, что позволяет оперативно проводить замену различных функциональных блоков. Функционально радиоспектрометр включает в себя электродинамический блок, куда функционально включен модуль СВЧ генератора, блок детектирования, вакуумно-криогенный блок, блок электромагнита, блок юстировки, резонансные ячейки.

В блоке детектирования реализованы возможности записи сигнала с СВЧ детектора как функции магнитного поля (развертка по полю) в

аналоговом (самописец, осциллограф) и цифровом видах. Созданный модуль сопряжения и прикладное программное обеспечение позволяют в ходе эксперимента регистрировать сигнал на мониторе ПК в режиме реального времени, проводить предварительную обработку полученных данных [6].



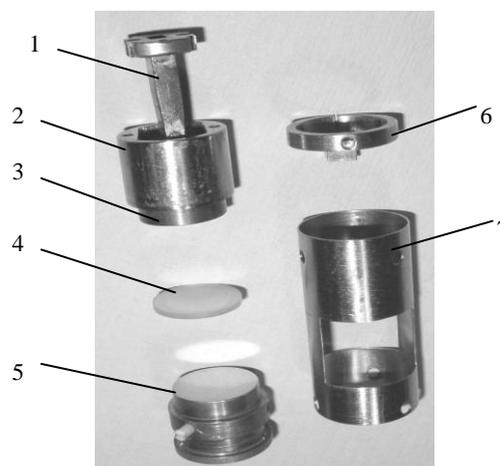
б)

Рис. 1. Схема радиоспектроскопического комплекса «КВАРК» (а) и его внешний вид (б)

Для расширения функциональных возможностей комплекса разработан и создан набор электродинамических модулей и набор резонансных ячеек (рис. 2), входящих в состав этих электродинамических модулей.



а)



б)



в)

Рис. 2. Резонансные ячейки радиоспектроскопического комплекса «КВАРК»: а) перенастраиваемый объемный резонатор; б) перенастраиваемый открытый двухзеркальный резонатор: 1 - волновод; 2 - юстировочный кожух; 3 - сферическое зеркало; 4 - макет образца; 5 - плоское зеркало; 6 - юстировочное кольцо; 7 - каркас резонатора; в) элементы резонансной ячейки электродинамического модуля с системой точной юстировки

Набор электродинамических модулей представлен криогенным модулем, позволяющим проводить эксперимент в интервале температур  $T=77-300\text{ K}$ , и модулем с высокоточной системой юстировки. Модуль с высокоточной системой юстировки позволяет проводить исследования при комнатной температуре и использует в качестве резонансной ячейки ОР. Все разработанные электродинамические модули функционируют во всей рабочей полосе частот комплекса.

В качестве резонансной ячейки комплекса при проведении измерений методом ЭСР используются:

в криогенном модуле:

- набор перенастраиваемых объемных резонаторов (рис. 2,а);

- набор перенастраиваемых ОР с набором зеркал различного радиуса кривизны (рис. 2,б);

в модуле с высокоточной системой юстировки:

- перенастраиваемый ОР с набором зеркал различного радиуса кривизны и набором диафрагм - концентраторов СВЧ поля (рис. 2,в).

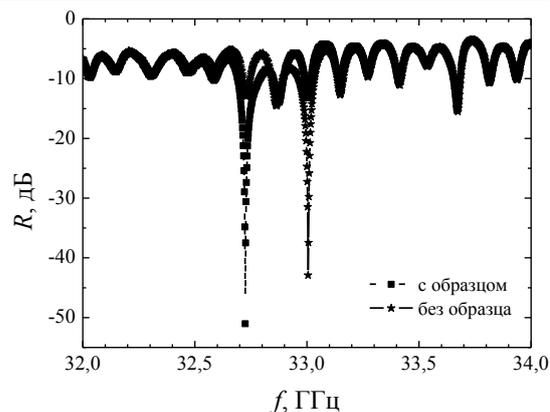
Особенностью используемого в качестве резонансной ячейки комплекса объемного резонатора является наличие трансформатора сопротивлений, позволяющего в ходе эксперимента регулировать величину параметра связи между резонатором и волноводным трактом, а также подвижного коротко замыкающего поршня, позволяющего настроить резонатор на нужную резонансную частоту. Применение в составе криогенного электродинамического модуля ОР позволяет улучшить теплообмен между исследуемым образцом и хладагентом по сравнению со случаем использования объемного резонатора.

Модульная конструкция комплекса позволяет оперативно перенастроить комплекс для исследования эффектов ГМС/ГМИ и ТМС/ТМИ в образцах (так называемый нерезонансный режим радиоспектрометра). В таком режиме комплекс «КВАРК» позволяет проводить исследования эффектов ГМС/ГМИ, ТМС/ТМИ в миллиметровом диапазоне длин волн (20-140 ГГц) в интервале температур 77-300 К. Достижимое магнитное поле в этом случае  $\pm 0,2$  Тл [7].

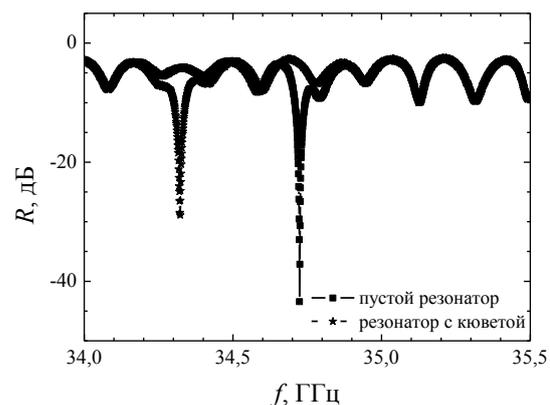
В нерезонансном режиме (в дополнение к уже перечисленным) в качестве резонансной ячейки комплекса может быть применен волноводный концентратор СВЧ поля [7].

На рис. 3 представлены экспериментальные спектры резонаторов, на основе которых построены резонансные ячейки радиоспектроскопического комплекса. На рис. 3,а приведен пример резонансных линий ОР без образца и с образцом, полученные при комнатной температуре. Видно, что помещение образца в резонатор приводит к смещению резонансного пика на величину  $\Delta f \sim 0,6$  ГГц без заметного снижения величины добротности.

На рис. 3,б приведены аналогичные спектры для объемного прямоугольного резонатора. В этом случае смещение резонансного пика, обусловленное введением в резонатор пустой фторопластовой кюветы, составило величину  $\Delta f \sim 0,8$  ГГц. Наблюдаемая в обоих случаях неоднородность кривой вне зоны резонансных пиков обусловлена переотражениями СВЧ волны в волноводном тракте.



а)



б)

Рис. 3. Спектры резонаторов, используемых в качестве резонансных ячеек радиоспектрометра: а) фрагмент спектра открытого двухзеркального резонатора,  $Q_{нар} \sim 2000$ ; б) фрагмент спектра объемного прямоугольного резонатора,  $Q_{нар} \sim 3000$

Как видно из рис. 3,а, несмотря на то, что диаметр зеркал открытых двухзеркальных резонаторов всего лишь в 3-4 раза больше рабочей длины волны, достигнутые значения добротности ( $Q \approx 2000-3000$ ) подтверждают целесообразность построения резонансной ячейки на таком типе резонаторов для работы в диапазоне 20-60 ГГц. Одновременно с высокой добротностью мы получаем разреженный резонансный спектр (в полосе 1,5-2 ГГц находится один резонансный пик), удобный доступ к образцу в ходе эксперимента, широкие возможности позиционирования образца в резонаторе как в горизонтальной плоскости (на поверхности зеркала), так и в вертикальной (в зазоре между зеркалами).

В ходе разработки электродинамической части радиоспектроскопического комплекса «КВАРК» были проведены эксперименты по применению совместно с открытым двухзеркальным резонатором гониометра – механической системы, позволяющей изменять взаимную ориентацию между нормалью к исследуемому образцу и осью резонатора.

На рис. 4 представлены экспериментально полученные угловые зависимости резонансных спектров калибровочного образца. По результатам эксперимента предложенная гониометрическая схема позволяет получать угловые зависимости магниторезонансных спектров с точностью не хуже  $1^\circ$ .

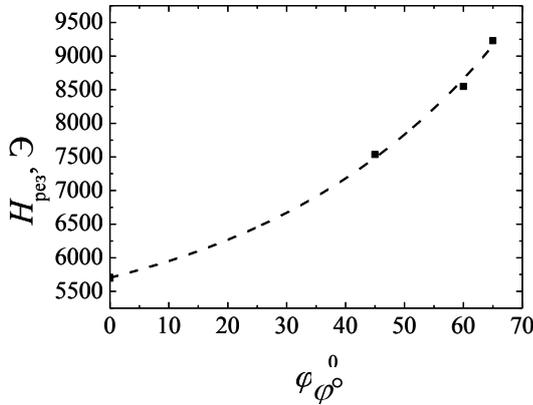


Рис. 4. Угловые зависимости магнитных резонансных спектров

В качестве высокочастотного генератора в радиоспектрометре применяется стандартный СВЧ генератор. Использование высокочастотного источника с широкой полосой перестройки, позволяет проводить экспериментальные исследования в широкой рабочей полосе частот без смены генератора.

Однако возможности комплекса могут быть расширены за счет использования специализированных высокостабильных генераторов СВЧ. Так, в работе [8] представлены результаты по использованию в составе комплекса «КВАРК» в качестве СВЧ генератора высокостабильного синтезатора частоты. Как следует из полученных экспериментальных результатов, достигнутые величины долговременной и кратковременной частотной стабильностей данного синтезатора позволяют проводить магниторезонансные исследования образцов, обладающих узкими резонансными линиями ( $\Delta H \sim 10^\circ \text{ Э}$ ).

**2. Экспериментальные результаты.** Магнитный радиоспектрометрический комплекс «КВАРК» успешно используется для изучения магнитных свойств наноразмерных структур различного состава.

В работах [7, 9, 10] с помощью комплекса «КВАРК» впервые в частотном диапазоне 36-54 ГГц в мультислойной пленке Co/Cu зарегистрирован высокочастотный аналог эффекта ГМС – эффект ГМИ. На рис. 5 представлена типичная экспериментально полученная зависимость относительного модуля коэффициента прохождения СВЧ волны  $\frac{\Delta T}{T} = \frac{T(H) - T_{\min}}{T_{\min}} 100\%$  от приложенного внешнего магнитного поля  $H$ .

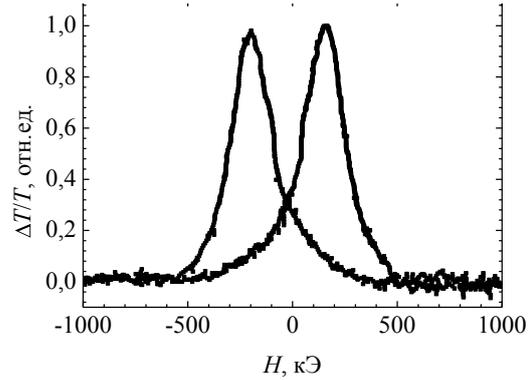


Рис. 5. Зависимость относительного модуля коэффициента прохождения СВЧ волны от внешнего магнитного поля [9]

В работах [6, 11] представлены результаты исследования магнитных наногранулярных пленочных структур  $\text{CoAlO}$ ,  $\text{CoTiO}$ ,  $\text{CoSiO}$  и  $\text{CoFeMgF}$  методом ферромагнитного резонанса и нерезонансным методом.

В работе [12] представлены результаты применения радиоспектрометрического комплекса для исследования серий гранулярных магнитных нанопленок состава  $(\text{CoFeZr})_x\text{SiO}_{1-x}$  и  $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$ . В этой работе продемонстрированы возможности комплекса по исследованию магнитных свойств наноразмерных структур резонансными и нерезонансными методами в едином экспериментальном цикле. На рис. 6 представлена зависимость резонансной частоты от внешнего магнитного поля  $H$  в частотном диапазоне 38 - 45 ГГц в виде  $\nu_{\text{рез}} = f(H_{\text{рез}})$  для серий гранулярных магнитных нанопленок состава  $(\text{CoFeZr})_x\text{SiO}_{1-x}$ .

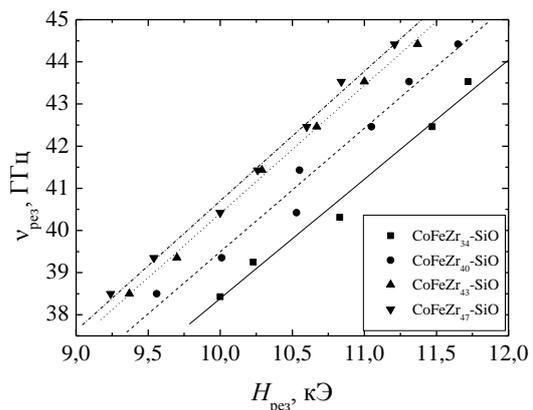


Рис. 6. Зависимость резонансной частоты от внешнего магнитного поля  $H$  в частотном диапазоне 38-45 ГГц

**Выводы.** Таким образом, в работе представлено описание радиоспектроскопического комплекса «КВАРК» миллиметрового диапазона длин волн. Приведены экспериментальные результаты исследований, демонстрирующие широкие методические возможности комплекса.

Показано, что применение в ключевых местах комплекса нестандартных технических

средств позволило во много улучшить возможности радиоспектрометра, несмотря на то, что комплекс в целом построен с использованием стандартного оборудования (блок генератора, магнитная система, аналоговый блок приема и обработки данных). Среди уникальных возможностей комплекса отметим:

- применение СВЧ генератора с широкой полосой перестройки позволяет использовать для анализа экспериментальных результатов метод резонансных частотно-полевых зависимостей;

- применение в качестве резонансной ячейки миллиметрового диапазона длин волн двузеркального ОР обеспечивает в ходе эксперимента удобство доступа к образцу и открывает широкие возможности по манипулированию образцом без существенного уменьшения величины добротности и нарушения однородности поля в резонаторе;

- возможность получения в ходе эксперимента, как угловой зависимости резонансных спектров, так и резонансной частотно-полевой зависимости позволяет проводить более полный анализ экспериментальных данных;

- использование в блоке приема и обработки данных цифровой системы получения данных позволяет в масштабе реального времени следить за ходом эксперимента а также использовать методы цифровой обработки данных.

Автор выражает благодарность проф. Равлику А. Г., проф. Грановскому А. Б. за предоставленные образцы.

1. Baibich M. N., Broto J. M., Fert A. et al Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices // Phys.Rev.Lett. - 1988. - 61, N21. - P.2472-2475.
2. Levy P. M. Giant magnetoresistance in magnetic layered and granular materials // Chapter in SOLID STATE PHYSICS, edited by H.Ehrenreich and D.Turnbull, Cambridge MA: Academic Press. - 1994. - 47. - P.367-462.
3. John Q. Xiao, J. Samuel Jiang., Chien C. L. Giant Magnetoresistance in Nonmultilayer Magnetic Systems // Phys. Rev. Lett. - 1992. - 68. - P.3749-3755.
4. Krebs J. J., Lubitz P., Chaiken A. et al Magnetic resonance determination of the antiferromagnetic coupling of Fe layers through Cr // Phys. Rev. Lett. - 1989. - 63, N15. -P.1645-1648.
5. Zutic I., Fabian J., Das Sarma S. Spintronic: Fundamental and applications // Rev. Mod. Phys. - 2004. - 76. - P.323-410.
6. Tarapov S., Granovsky A., Derkach V. et al Electron Spin Resonance Properties of Magnetic Granular GMI-Nanostructures in Millimeter Waveband // Intern. Journ. of Infrared and Millimeter Waves. - 2004. - 25, N11. - P.1581-1589.
7. Деркач В. Н., Недух С. В., Равлик А. Г. и др. Высоочастотные свойства многослойных структур Co/Cu в миллиметровом диапазоне // Радиофизика и электроника - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2002. - 7, N1. - С.115-118.
8. Варавин А. В., Ермак Г. П., Недух С. В. и др. Прецизионный контроль частоты в ЭПР спектрометре миллиметрового диапазона // Радиофизика и электроника - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2006. - 11, N3. - С.451-455.
9. Tarapov S., Nedukh S., Derkach V. et al High frequency magnetoresonance and magnetoimpedance in Co/Cu multilayers with variable interlayer thickness // Intern. Journ. of Infrared and Millimeter Waves. - 2001. - 22, N11. - P.1669-1679.

10. Belozorov D. P., Derkach V. N., Nedukh S. V. et al Magnetization and impedance measurement of multilayer Co/Cu structure in millimeter waveband // Journ. Magn. Magn. Mater. - 2003. - 263, N3. - P.315-323.
11. Granovsky A. B., Kozlov A. A., Nedukh S. V. et al Microwave-Frequency Spin-Dependent Tunneling in Nanocomposites // Physics of the Solid State. - 2005. - 47, N4. - P.738-741.
12. Багмут Т. В., Недух С. В., Ходзицкий М. К. Магнито-резонансные и магнитоимпедансные свойства наноконструкций со спин-зависимым туннельным магнитосопротивлением // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2005. - 10, N2. - С.276-280.

## MAGNETIC RADIOSPECTROSCOPIC COMPLEX "KVARK" OF MILLIMETER WAVEBAND LENGHTS

S. V. Nedukh

Design features of magnetic radiospectroscopic complex "KVARK" and its operates opportunities are present. The preferences of radio-spectroscopic complex "KVARK", applied to carry out investigations of magnetic micro- and nanostructures by magnetoresonance technique at frequency band 20-60 GHz, field band 0-1,9 T, temperature band 77-300 K are demonstrated. Experimental analysis of usage of same specialized resonator cells (tunable cavity, tunable open resonator, waveguide EHF field concentrator) embedded into electrodynamic modules of complex are given. It is shown, that module-based design of the complex allows to modify quickly it for measurement of non resonance effects of Giant Magnetic Resistance/Impedance and Tunnel Magnetic Resistance/Impedance as well.

Experimental results of study of some prospective magnetic nanostructures proving the advantage of radiospectroscopic complex "KVARK" usage are presented.

**Key words:** electron magnetoresonance radiospectrometer, millimeter waveband length, micro and nanostructures.

## МАГНІТНИЙ РАДІОСПЕКТРОСКОПІЧНИЙ КОМПЛЕКС «КВАРК» МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ

С. В. Недух

Подано опис основних характеристик і функціональних можливостей магнітного радіоспектроскопічного комплексу «КВАРК». Продемонстровано можливість радіоспектроскопічного комплексу «КВАРК» проводити дослідження різних магнітних мікро- і наноструктур методом магнітного резонансу в діапазоні частот 20-60 ГГц, діапазоні полів 0-1,9 Тл, інтервалі температур 77-300 К. Наведено і проаналізовано експериментальні результати використання в складі електродинамічних модулів комплексу різних наборів спеціалізованих резонансних комірок (об'ємний резонатор, що перенастроюється, відкритий резонатор, що перенастроюється, хвилевідний концентратор НВЧ поля). Показано, що використана модульна система побудови комплексу дозволяє швидко модифікувати його для виміру нерезонансних ефектів гігантського магнітного опору/імпедансу та тунельного магнітного опору/імпедансу.

Наведено результати досліджень різних класів наноструктур, що отримані за допомогою радіоспектроскопічного комплексу «КВАРК».

**Ключові слова:** електронний магніторезонансний радіоспектрометр, міліметровий діапазон довжин хвиль, мікро і наноструктури.

Рукопись поступила 16 октября 2007 г.