



Сенсоры для магнитной диагностики комплекса NICA/MPD и эксперимента VM@N

Д-р Инесса Большакова

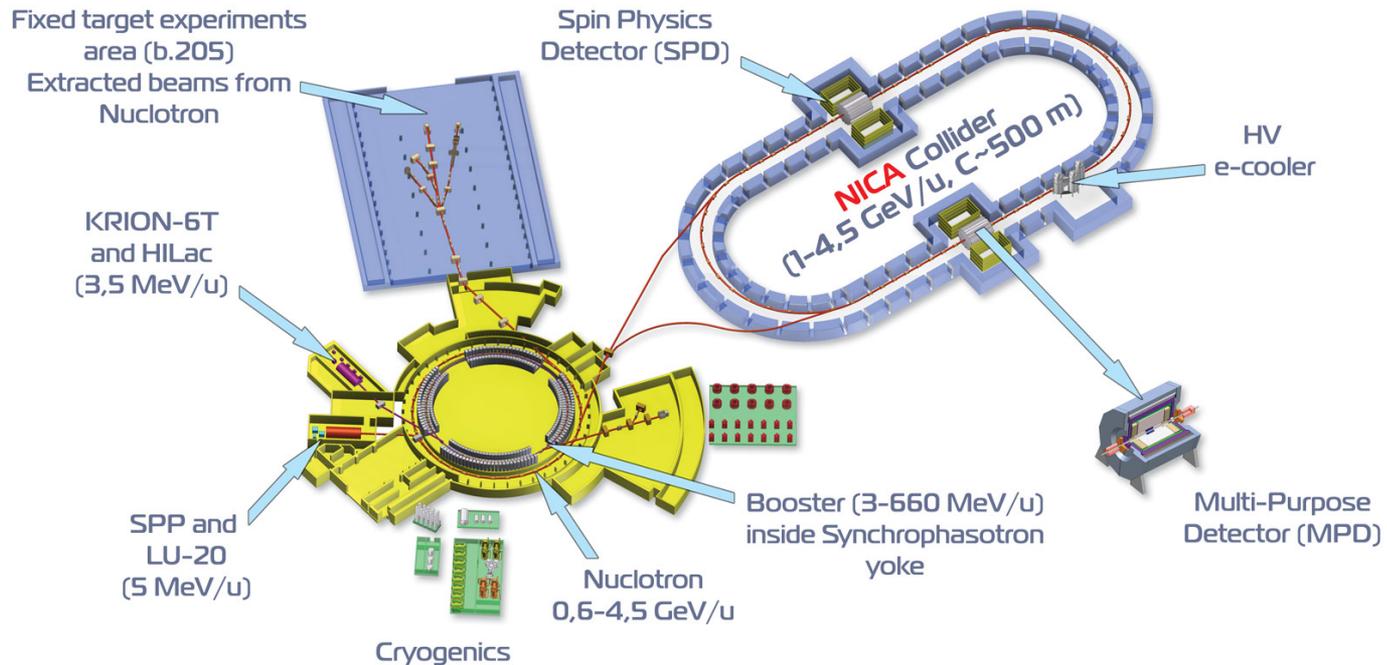
**Лаборатория Магнитных Сенсоров
Национального университета «Львовская политехника»**

Контактная информация:
ул. Котляревского 1, Львов 79013, УКРАИНА
тел/факс: +38 (032) 261 34 82
e-mail: inessa@mail.lviv.ua
inessa@misl.lviv.ua
inessa.bolshakova@gmail.com



Магнитные системы ускорительно-накопительного комплекса NICA/MPD: обсуждение магнитоизмерительных задач

Superconducting accelerator complex **NICA** (**N**uclotron based **I**on **C**ollider **f**Acility)





Лаборатория Магнитных Сенсоров



Наш опыт создания радиационно стойких сенсоров

1. Разработаны методы повышения радиационной стойкости полупроводниковых материалов

Методы стабилизации материалов:

- химическое легирование;
- радиационная модификация.

2. Созданы радиационно стойкие холловские сенсоры

Чувствительность после облучения нейтронами:

- 99,95% – после облучения до $\Phi = 10^{15} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$;
- 95% – после облучения до $\Phi = 10^{17} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$.

3. Изготовлена интеллектуальная магнитоизмерительная аппаратура для радиационных условий

Включает:

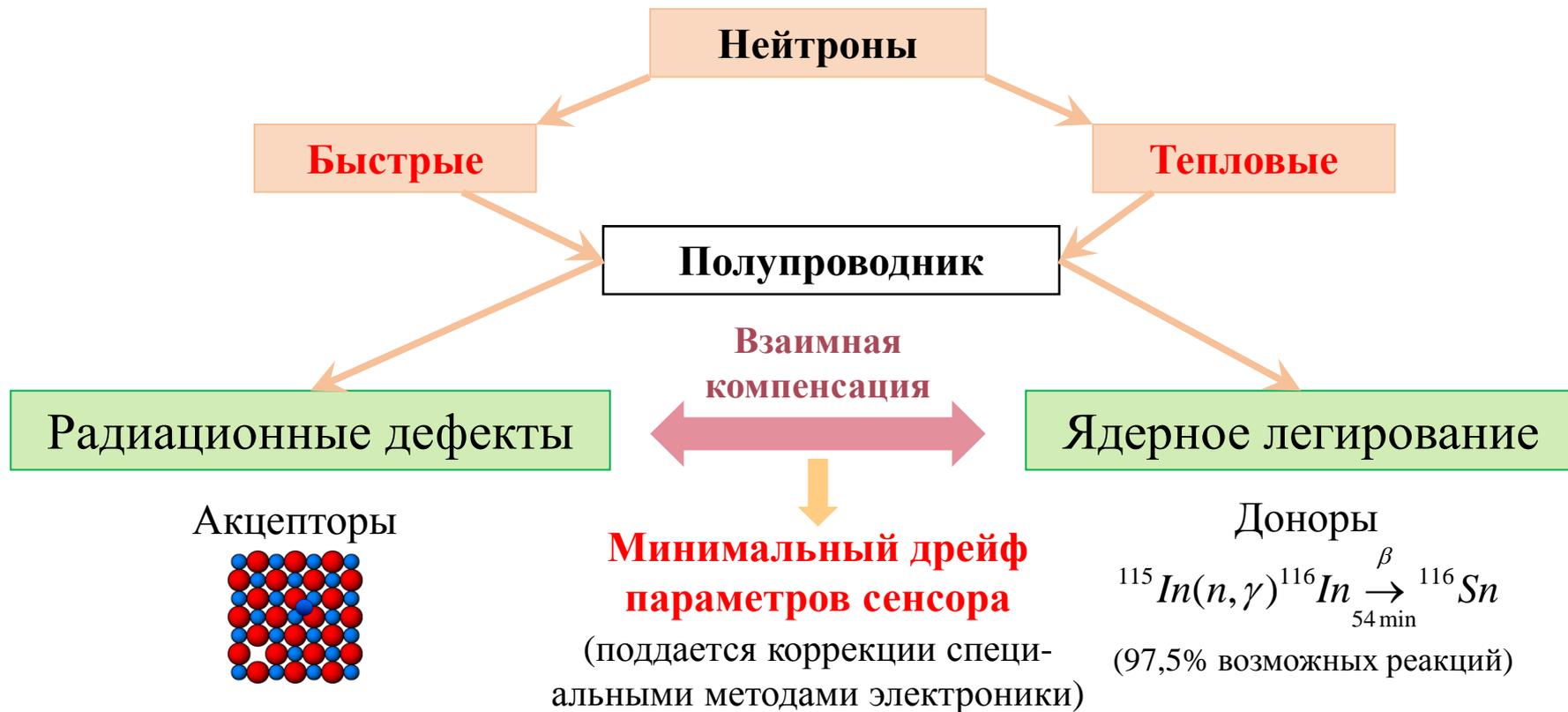
- радиационно стойкие сенсоры магнитного поля;
- управляющую электронику;
- программное обеспечение.

Основные функции:

- измерение в радиационных полях;
- самодиагностика;
- автоматическая in-situ коррекция сигнала;
- измерение магнитного поля с высокой точностью – 0,1%;
- измерение магнитного поля в широком диапазоне частот (от DC до 200 кГц).



Радиационно-физические процессы в холловских сенсорах при облучении

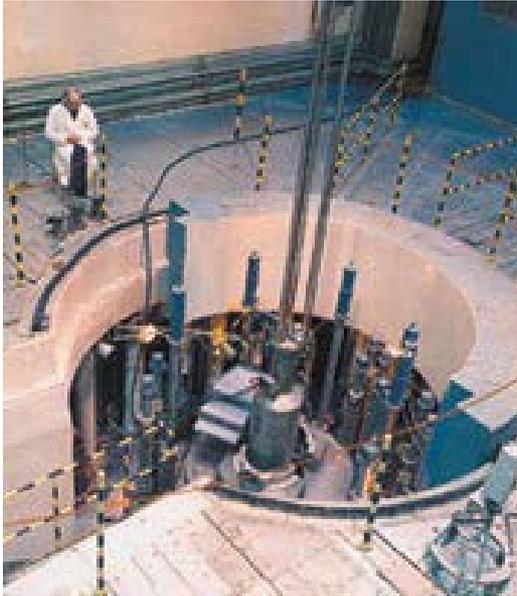


Методы стабилизации параметров полупроводниковых сенсоров включают:

- Химическое легирование полупроводниковых материалов (InSb, InAs) комплексом легирующих примесей (донорных, изовалентных, редкоземельных) до оптимальной исходной концентрации свободных носителей заряда.
- Радиационное модифицирование – предварительное введение определенного количества радиационных дефектов.



Испытание радиационной стойкости сенсоров в ядерных реакторах:



ИБР-2

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия



ВВР-М

Петербургский институт ядерной физики, Россия



ВВР-ц

Физико-химический институт им.Л.Я.Карпова, Обнинск, Россия



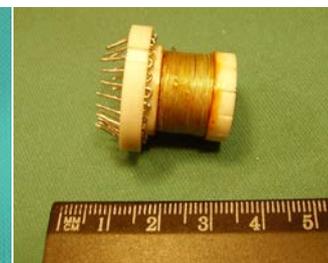
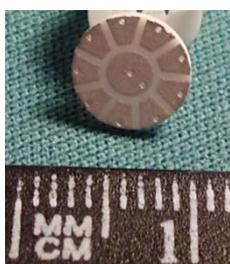
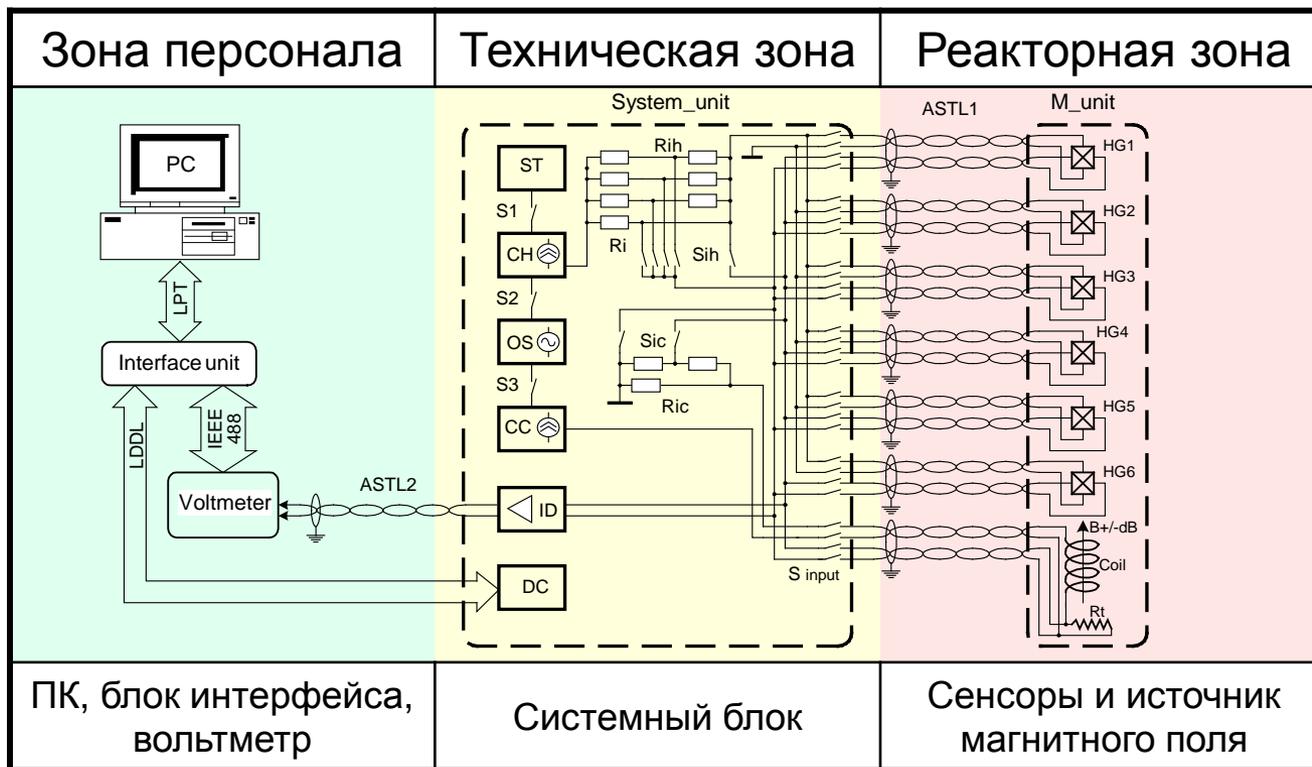
LVR-15

Nuclear Research Institute, Řež, Czech Republic



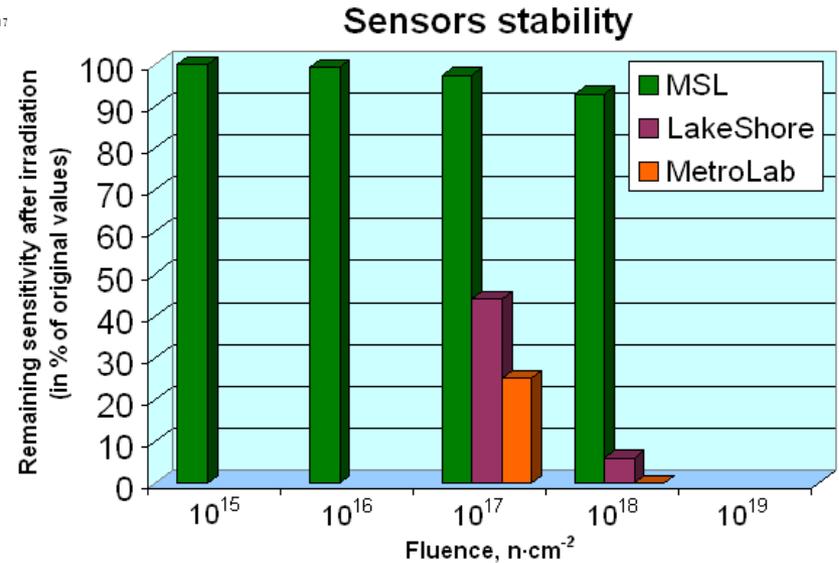
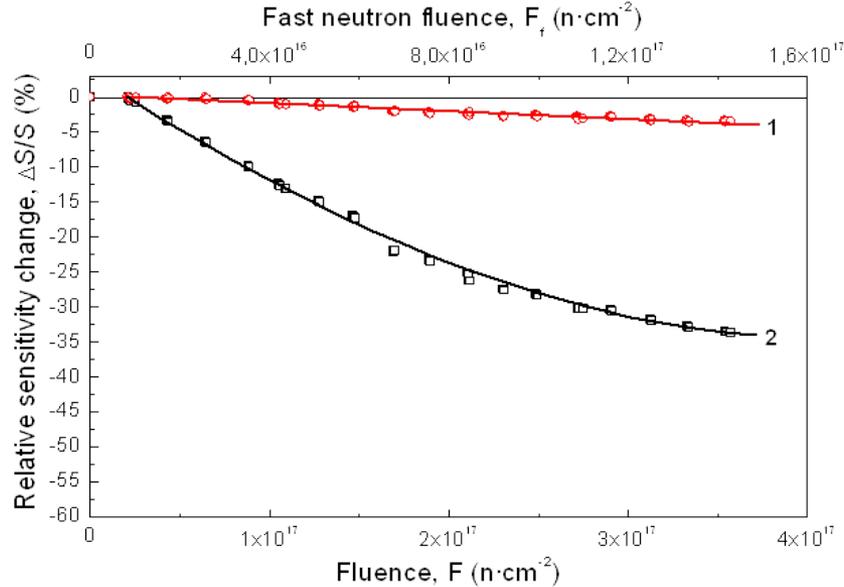
Метод *in-situ* тестирования сенсоров в ядерных реакторах

Структурная схема измерительной системы





Испытание радиационной стойкости сенсоров



Результаты тестирования сенсоров на основе гетероструктуры InSb/i-GaAs в реакторных нейтронах:
кривая 1 – радиационно стойкие сенсоры ЛМС;
кривая 2 – промышленные сенсоры.

Сравнение с сенсорами известных фирм:
LakeShore Cryotronics Inc. (USA)
и MetroLab Technology SA (Switzerland)

Сенсоры на основе InSb работоспособны до флюенсов нейтронов $F = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, что превышает максимальный флюенс в местах размещения ex-vessel сенсоров на ITER

$$F = 10^{15} \text{ см}^{-2} \rightarrow \Delta S/S = 0.04\%$$

$$F = 10^{16} \text{ см}^{-2} \rightarrow \Delta S/S = 0.08\%$$

$$F = 10^{17} \text{ см}^{-2} \rightarrow \Delta S/S = 5\%$$

$$F = 10^{18} \text{ см}^{-2} \rightarrow \Delta S/S = 10\%$$



Магнитные элементы комплекса **NICA/MPD**

(из Концептуального Проекта – всего более **200** магнитов)

- ❑ Канал транспортировки ионов низкой энергии: от источника к магнитному ускорителю
(*квадрупольные линзы, магнитный спектрометр*)
- ❑ Канал транспортировки ионов высокой энергии: от линейного ускорителя в Бустер
(*поворотные магниты, квадрупольные линзы*)
- ❑ Канал транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон и/или в зал для экспериментов на фиксированной мишени
(*кикерный и септумный магниты*)
- ❑ Канал транспортировки пучков, выведенных из Нуклотрона в кольца коллайдера
(*дипольные магниты*)
- ❑ Магнитная система Бустера
(*дипольные магниты, фокусирующие и дефокусирующие линзы*)
- ❑ Магнитная система электронного охлаждения
(*сверхпроводящий соленоид*)
- ❑ Магнитная система колец коллайдера
- ❑ Магнитная система MPD
- ❑ Магнитная система SP41/CBM (проект BM@N)



Задача 1:

Мониторирование полей дипольных магнитов на каналах транспортировки пучков, выведенных из Нуклотрона

Техническое задание:

1. Контроль стабильности установленного значения магнитного поля для:
 - заданного режима
 - соотношения значений при переходе от одного режима к другому
2. Магниты СП-12А, СП-12, Сп-40 и др.
3. Диапазон измеряемых полей (0,2 ÷ 2,2) Тл
4. Диапазон температуры (10 ÷ 40) С°
5. Среда вакуум
6. Измерение стабильности одной основной компоненты магнитного поля 1D
7. Точность относительных измерений 0,1%
8. Требования к точности измерения абсолютной величины магнитного поля уточняются
9. Радиационные нагрузки – уточняются
10. Размер зонда в направлении измеряемой компоненты поля (5 ÷ 8) мм
11. Длина кабеля от зонда к управляющей электронике 2,5 м



Постановка задачи: Г.В. Трубников, П.А. Рукояткин

ИСМАРТ, Дубна, ОИЯИ, 19 – 23 ноября 2012

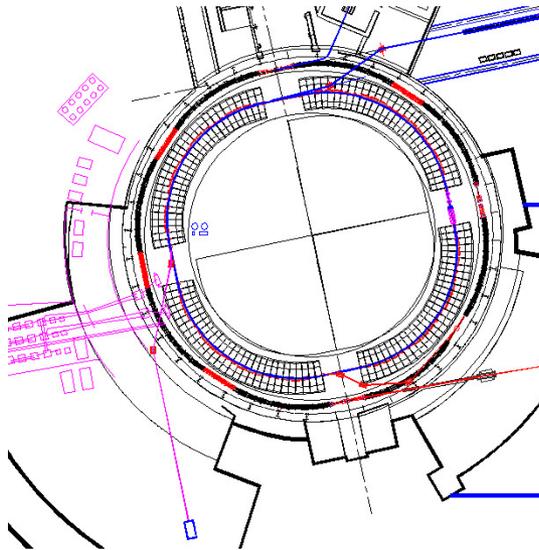


Задача 2: *Измерение карты полей в магнитных элементах Бустера:*

- дипольных магнитах
- квадрупольных линзах

Техническое задание:

1. Магнитная индукция основной (вертикальной) компоненты дипольных магнитов 2 Тл
2. Температура $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$
3. Точность относительных измерений 0,01%
4. Размеры магнитной системы:
 - длина 200 см
 - высота (поперечный размер) 10 см
5. Форма конструкции дипольных магнитов – криволинейная



Магнитные элементы Бустера

Постановка задачи: Г.В. Трубников, А.В. Смирнов, Х. Малиновски, В.М. Дробин



Задача 3:

Измерение однородности поля в сверхпроводящем соленоиде системы электронного охлаждения

Техническое задание:

1. Магнитная индукция основной (продольной) компоненты поля соленоида с антикриостатом 0,2 Тл
2. Температура $(20\pm 5)^\circ\text{C}$
3. Точность относительных измерений 0,1%
4. Диаметр антикриостата / длина 10 см / 250 см
5. Форма конструкции соленоида с антикриостатом – прямолинейная

Задача 4:

Ферромагнитометр для измерения слабых и остаточных полей

Техническое задание:

1. Диапазон измеряемых полей $(0,2\div 0,3)$ мТл
2. Порог чувствительности 2,5 нТл
3. Погрешность измерения 2%
4. Температурные условия $(20\pm 5)^\circ\text{C}$

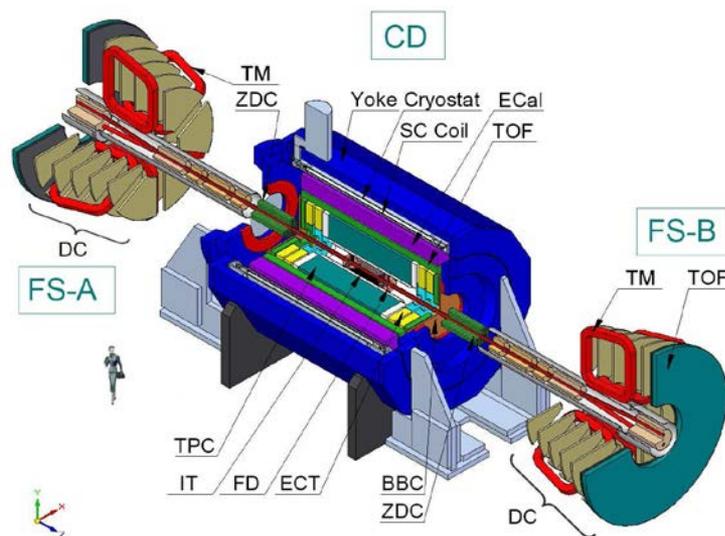
Постановка задачи: Г.В. Трубников, А.В. Смирнов, Х. Малиновски, В.М. Дробин



Задача 5: *Картографирование магнитного поля детектора MPD*

Технические требования:

- | | |
|---|----------------------|
| 1. Индукция магнитного поля | 0,5 Тл |
| 2. Однородность магнитного поля | $4 \cdot 10^{-4}$ Тл |
| 3. Точность относительных измерений | $< 0,01\%$ |
| 4. Точность измерения абсолютной величины поля – уточняется | |
| 5. Радиационная нагрузка – уточняется | |
| 6. Автоматизированная система сбора данных | |



Многоцелевой
детектор MPD

Обсуждение задачи: А.С. Водопьянов, В.М. Головатюк



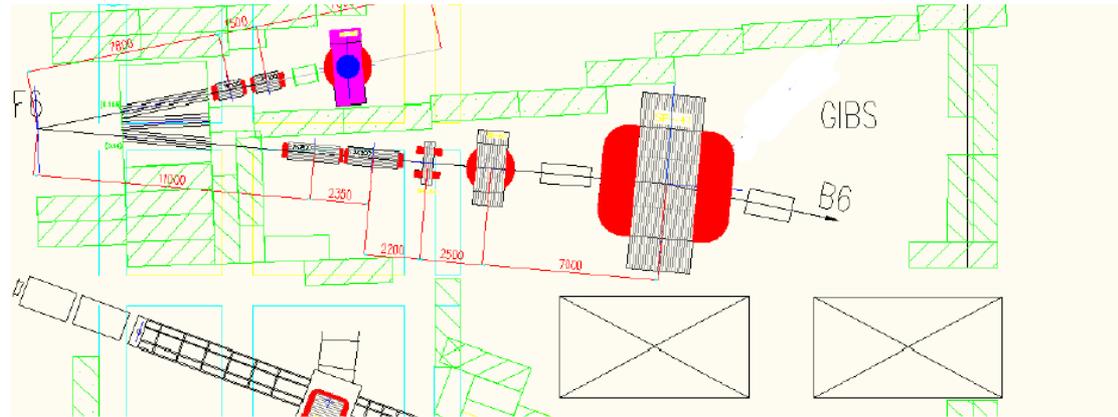
Задача 6:

Измерение карты магнитного поля и система мониторинга анализирующего магнита SP-41 для проекта VM@N

Технические требования:

1. 3D измерение карты магнитного поля «тёплого» магнита SP41 в объёме $(150 \times 100 \times 250) \text{ см}^3$
2. Максимальное магнитное поле 1,5 Тл
3. Картографирование с шагом 1 см
4. Точность измерений 0,05 %
5. Периодичность измерений 1раз / 100 мсек
6. Температура $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$

Магнитная схема линии пучка В6 с магнитом SP-41 в корпусе 205.



Постановка задачи: В.П. Ладыгин



Для выполнения требований ТЗ проекта **VM@N** необходимо:

1. Увеличить максимальное значение измеряемого поля:
с 1 Тл до $(1,5 \div 2)$ Тл
2. Повысить точность измерения в $5 \div 10$ раз:
от 0,1% до $(0,01 \div 0,05)\%$
3. Обеспечить периодичность измерений:
с 1 раз/сек до 10 раз/сек
4. Обеспечить картографирование магнитного поля
с шагом 1 см

Проведенный в MSL анализ требований ТЗ показал,
что все перечисленные требования **выполнимы**.



Технические решения выполнения требований ТЗ проекта **ВМ@N**

(1)

1. ТЗ: *Максимальное измеряемое поле (1,5÷2) Тл*

Сенсоры и управляющая электроника предназначены для измерения больших магнитных полей до ≥ 5 Тл.

Наша метрологическая система для тестирования сенсоров HMS 7504 фирмы LakeShore Cryotronics, Inc. (USA) позволяет использовать поля до 3 Тл.

Прецизионный ЯМР магнитометр РТ 2025 фирмы MetroLab Technology SA (Switzerland) позволяет проводить калибровку сенсоров и аппаратуры в диапазоне $\pm(0,35\div 1)$ Тл.

Ограничение верхнего и нижнего предела поля в данный момент связано только с наличием одного ЯМР зонда для диапазона $(0,35\div 1)$ Тл.

Решение: приобрести 2 ЯМР зонда
для диапазонов $(0\div 0,35)$ Тл и $(1\div 2)$ Тл



Технические решения выполнения требований ТЗ проекта **VM@N**

(2)

2. ТЗ: Точность измерения 0,05 %

Решение:

- 2.1. Минимизировать планарный эффект (перекрёстную чувствительность) путём уменьшения в 10 раз активного слоя сенсоров при сохранении чувствительности.
- 2.2. Минимизировать температурный коэффициент чувствительности путём изготовления сенсоров из более широкозонного полупроводникового материала InAs.

Примечание: участие в выполнении п.п. 2.1 и 2.2 согласовано с Центром Нанотехнологий НИЯУ МИФИ.

- 2.3. Для калибровки сенсоров создать оснастку с оптическим контролем.
- 2.4. Минимизировать тенземагнитный эффект путём оптимизации:
 - (1) согласовать коэффициенты линейного расширения материалов подложки сенсора и элементов конструкции зонда;
 - (2) найти эластичные и теплопроводящие компаунды.
- 2.5. Термостатирование ключевых узлов управляющей электроники.



Технические решения выполнения требований ТЗ проекта **ВМ@N**

(3)

3. ТЗ: **Обеспечить периодичность измерений 10 раз/сек**

В предыдущих прототипах:

Периодичность измерения 1 раз/сек, поскольку большая не требовалась. Поэтому использовался один АЦП для всех 3 магнитных сенсоров и датчика температуры: эти 4 канала измерения работают последовательно, что определяет скорость измерения.

Решение:

- (1) Использовать 4 АЦП (вместо 1) и 4 источника тока, что обеспечит в 4 раза большую скорость измерения и одновременность.
- (2) Заменить используемые 24-разрядные АЦП ADUC 745 на более скоростные АЦП AD 7791 фирмы Analog Devices.
- (3) Увеличить частоту выборки (количество измерений в сек), поскольку мы работаем значительно выше предела шумов АЦП.

Требование 0,05% от 2 Тл составляют 1 мТл.

Шумы АЦП составляют 60 мкТл.

Анализ показал, что приведенные решения позволяют обеспечить периодичность измерений 40 раз/сек, т.е. 1 раз в 25 мсек.



Технические решения выполнения требований ТЗ проекта **ВМ@N**

(4)

4. ТЗ: *Картографирование магнитного поля с шагом 1 см*

Решение:

Использовать координатные системы CERN'а для процедуры картографирования поля, адаптированные к установкам ОИЯИ.



Примеры ***применения радиационностойких сенсоров и аппаратуры для магнитной диагностики***

- ✓ в термоядерных реакторах
- ✓ в ускорителях заряженных частиц
- ✓ в космических аппаратах



Трёхкоординатный магнитометр **MSL-3DM1**

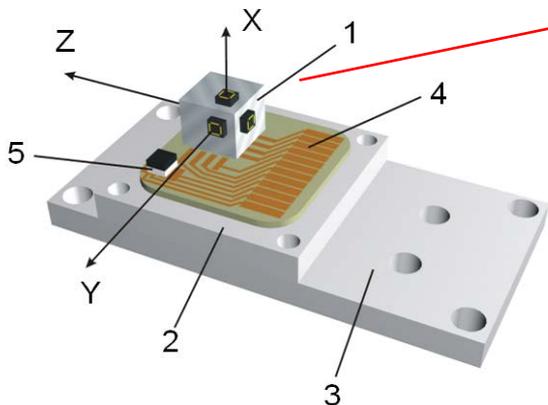
Назначение: измерение магнитного поля в сверхпроводящем соленоиде с антикриостатом для ускорительного комплекса NICA



Состав: 1 – трёхкоординатный 3D зонд с холловскими сенсорами для измерения пространственного распределения компонентов вектора магнитной индукции в сверхпроводящих соленоидах; 2 – блок управляющей электроники; 3 – кабель USB; 4 – блок питания к блоку управляющей электроники; 5 – нуль-камера для экранирования 3D зонда от магнитного поля Земли; 6 – ноутбук для визуализации результатов измерения; 7 – блок питания для ноутбука.

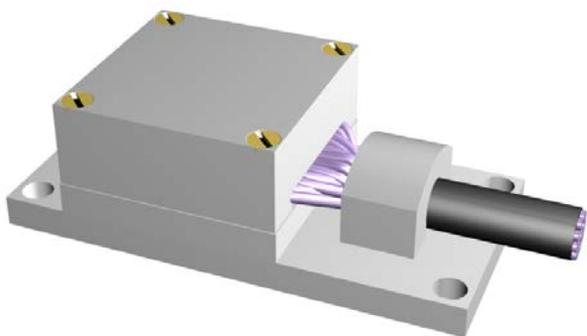


Конструкция 3D-зонда с холловскими сенсорами

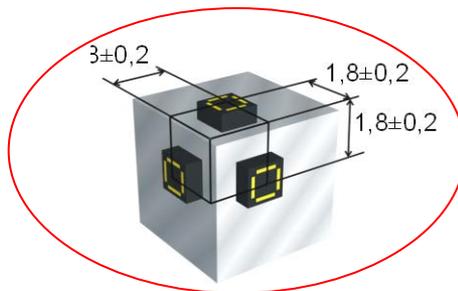


Общий вид сборки:

- 1 – кубик с сенсорами;
- 2 – основание для кубика;
- 3 – базовая пластина;
- 4 – монтажная плата;
- 5 – сенсор температуры



Оптические методы позиционирования сенсоров с точностью $\leq 10'$



размеры активной области зонда:
 $(1,8\pm 0,2)\times(1,8\pm 0,2)\times(1,8\pm 0,2)$ мм³.

В состав 3D зонда входят:

- три ортогонально развернутых холловских сенсора квадратной формы с габаритными размерами $(1,1\times 1,1\times 0,52)$ мм³ и с размерами чувствительного элемента $(0,2\times 0,2\times 0,002)$ мм³.
- кубик, изготовленный из стекла К8 для установки на нем сенсоров по трем ортогональным осям X, Y, Z. Размеры кубика $(4,0\pm 0,2)\times(4,0\pm 0,2)\times(4,0\pm 0,2)$ мм³. Грани кубика ориентированы строго под углами 90° с точностью $\pm 10'$. Ортогонально расположенные сенсоры образуют активную область зонда с размерами $(1,8\pm 0,2)\times(1,8\pm 0,2)\times(1,8\pm 0,2)$ мм³.
- основание для размещения кубика изготовлено из сплава Д16Т и представляет собою параллелепипед с размерами $(19,6\pm 0,2)\times(19,6\pm 0,2)\times(2,8\pm 0,1)$ мм³, допуски при изготовлении углов и плоскопараллельности граней не превышают $10'$.
- базовая пластина зонда размерами $(40,0\pm 0,1)\times(19,7\pm 0,1)\times(2,8\pm 0,1)$ мм³ изготовлена из сплава Д16Т с допуском не превышающим $10'$ при изготовлении углов и плоскопараллельности граней.
- монтажная плата выполнена из стеклотекстолита с нанесенными медными дорожками для приварки выводов.



Блок управления. Программное обеспечение



Основные функции блока управления:

- точность измерительных каналов блока электроники 0,05%;
- питание сенсоров и терморезистора стабильным током;
- коммутация и усиление входных сигналов;
- помехоустойчивые измерения слабых сигналов;
- измерение температуры и компенсация температурного дрейфа;
- многоканальное аналого-цифровое преобразование сигналов сенсоров;
- функции преобразования сигналов сенсоров;
- связь магнитометра с персональным компьютером;

Программное обеспечение

«MSL 3D Magnetometer Software» позволяет:

- установить параметры протокола обмена данными (Setup);
- запустить и остановить процесс измерения (Measure: Start/Stop);
- сохранить данные измерения;

Предусмотрена возможность обеспечения записи текущего значения магнитной индукции с возможностью программных изменений.





Калибровка магнитометра

Оборудование для калибровки 3D-зонда:

- Холловская измерительная система HMS 7504 фирмы LakeShore Cryotronics, Inc. (USA)
- ЯМР магнитометр PT 2025 фирмы MetroLab Technology SA (Switzerland) с точностью лучше чем ± 5 ppm в диапазоне индукции (0,35÷1) Тл

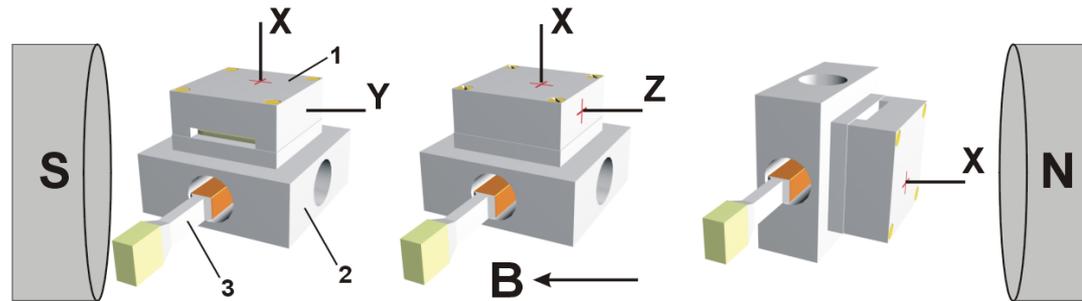


Схема ориентации 3D-зонда при калибровке.

1 – 3D-зонд, 2 – оснастка (25×25×14 мм³), 3 – ЯМР зонд

Функции преобразования сенсоров представляются полиномами 3-го порядка.

$$B_{x_corr} = f(V_{Hx_corr}) = a_{x3} \times V_{Hx_corr}^3 + a_{x2} \times V_{Hx_corr}^2 + a_{x1} \times V_{Hx_corr}$$

$$B_{y_corr} = f(V_{Hy_corr}) = a_{y3} \times V_{Hy_corr}^3 + a_{y2} \times V_{Hy_corr}^2 + a_{y1} \times V_{Hy_corr}$$

$$B_{z_corr} = f(V_{Hz_corr}) = a_{z3} \times V_{Hz_corr}^3 + a_{z2} \times V_{Hz_corr}^2 + a_{z1} \times V_{Hz_corr}$$

Модуль вектора магнитной индукции

$$B_{3D} = \sqrt{B_{x_corr}^2 + B_{y_corr}^2 + B_{z_corr}^2}$$

Из результатов калибровочных измерений с применением ППП «MathCAD» вычисляются полиномиальные коэффициенты функции преобразования сигналов сенсоров, которые используются для определения компонентов и модуля вектора магнитной индукции.



Технические характеристики магнитометра **MSL-3DM1**

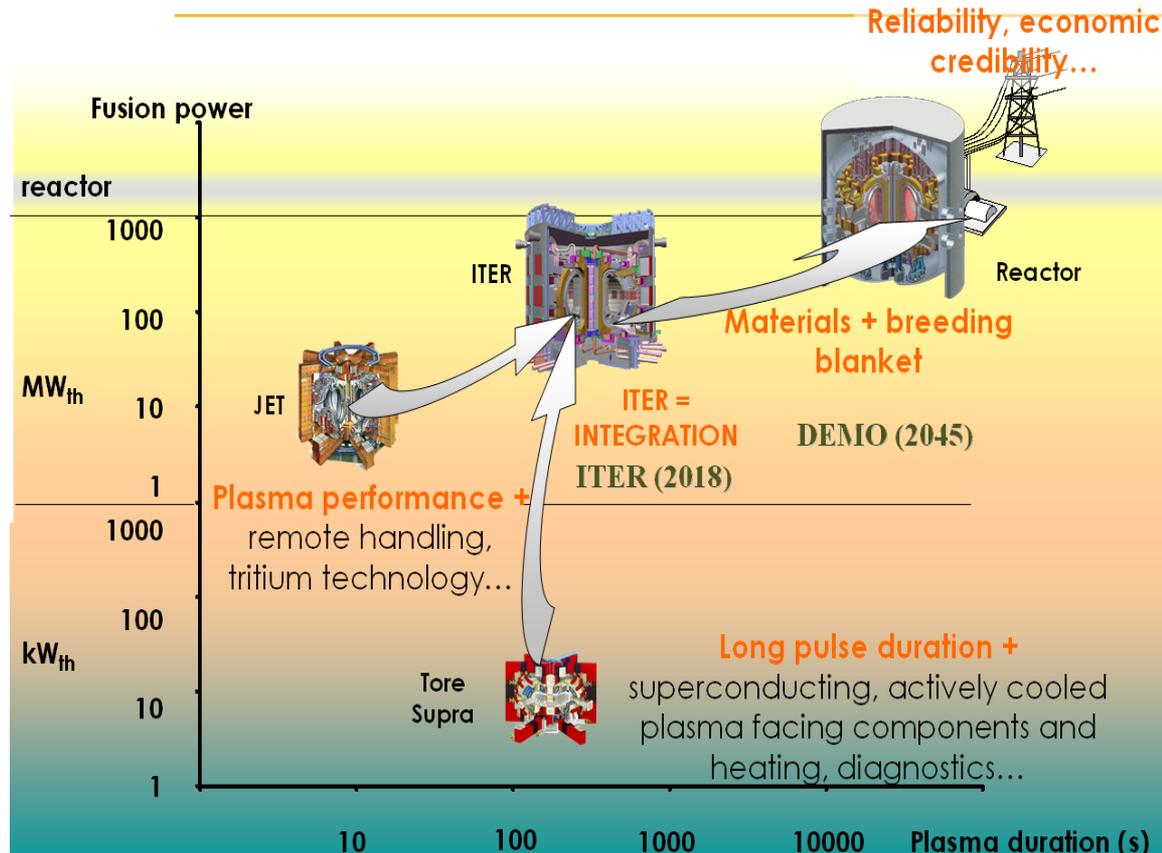
Сравнение с современными зарубежными холловскими **3D** магнитометрами

Модель	MSL-3DM1	THM 1176	Model 460
Производитель	Лаборатория Магнитных Сенсоров Львов, Украина	MetroLab Швейцария	LakeShore США
Точность измерения	0,1%	1%	0,35%
Разрешающая способность	0,1 мТл	3 мТл	0,1 мТл
Размеры чувствительного элемента сенсора	0,2 x 0,2 мм ²	0,15 x 0,15 мм ²	0,5 x 1,0 мм ²
Размеры активного объема 3D-зонда	1,8 x 1,8 x 1,8 мм ³	6,0 x 3,4 x 6,0 мм ³	4,0 x 4,0 x 3,6 мм ³
Размеры 3D-зонда	40 x 19,7 x 13,6 мм ³	113 x 16 x 10 мм ³	127 x 6 x 6 мм ³
Рабочий диапазон температуры	5÷25°C	0÷40°C	10÷40°C



...в термоядерных реакторах

Thermonuclear Reactor development



Проблемы магнитной диагностики токамаков

Существующая система магнитной диагностики ITER основывается на традиционных индуктивных преобразователях с интеграторами, которые не обеспечивают требуемой точности измерений :

- ✓ недостаточная точность измерения квазистационарных магнитных полей при длительных импульсах,
- ✓ инертность интеграторов при высокочастотных измерениях,
- ✓ радиационно-индуцированные паразитные эффекты (RIC, RIEMF, RIED).

Наше предложение:

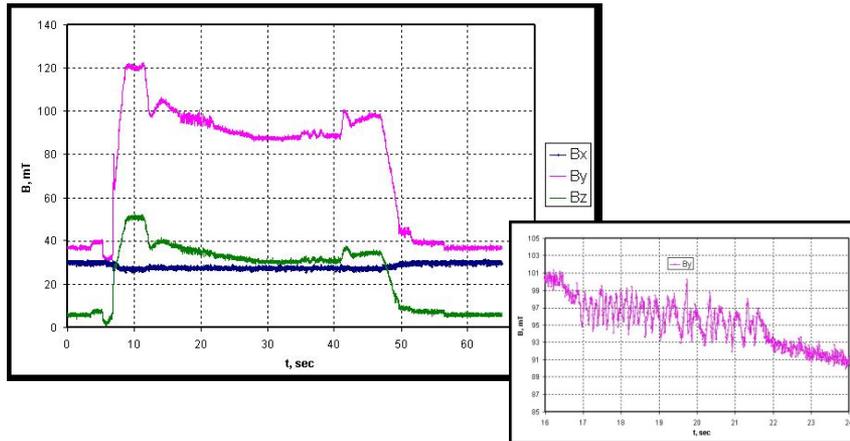
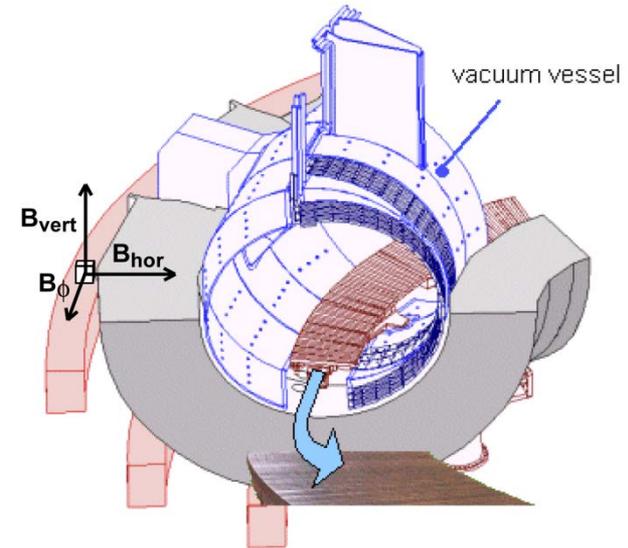
дополнить существующую систему магнитной диагностики ITER гальваномагнитной аппаратурой на основе радиационнстойких полупроводниковых холловских сенсоров, которая способна измерять steady-state магнитное поле при длительных импульсах с высокой точностью (погрешность не более 0,1%) в условиях облучения большими флюенсами нейтронов



Измерение магнитного поля в реакторе *Tore Supra* (Франция) – 2004



Размещение 3D-зонда в *Tore Supra*



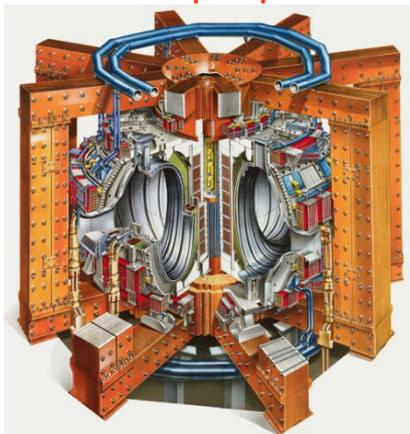
Результаты измерения магнитного поля
на *Tore Supra* в эксперименте № 34085
ИСМАРТ, Дубна, ОИЯИ, 19 – 23 ноября 2012



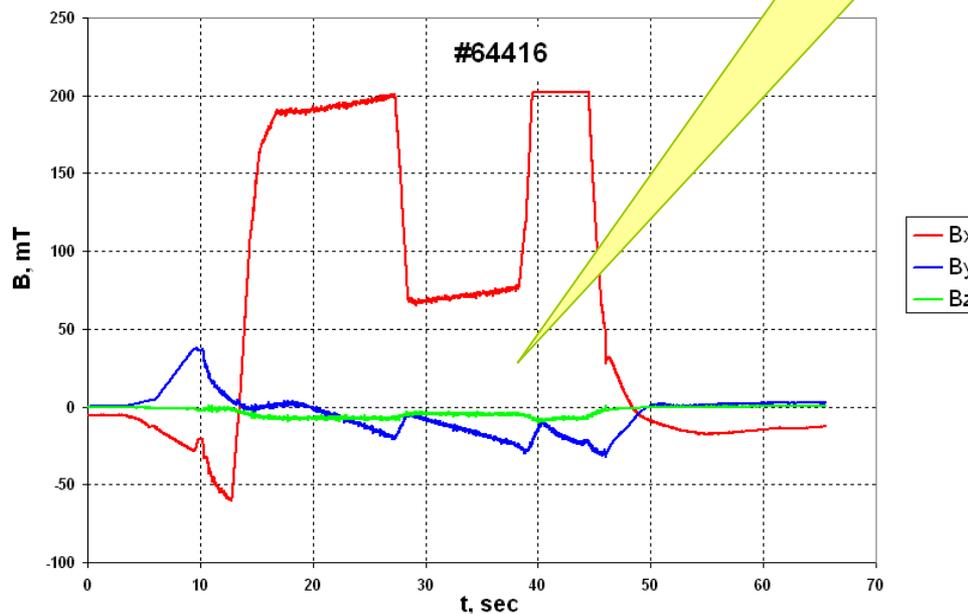


Измерение магнитного поля в реакторе Joint European Torus (UK) – 2005

JET в разрезе



Результаты
измерения
магнитного
поля на JET в
эксперименте
№ 64416

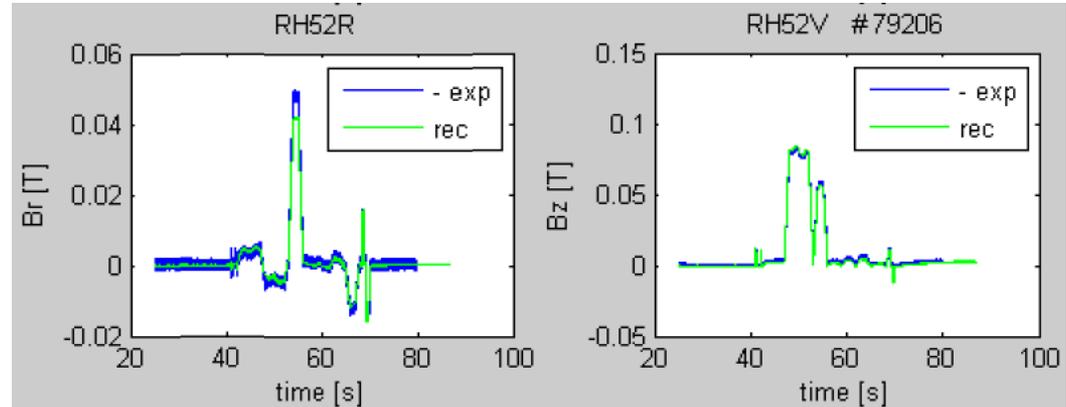


ИСМАРТ, Дубна, ОИЯИ, 19 – 23 ноября 20



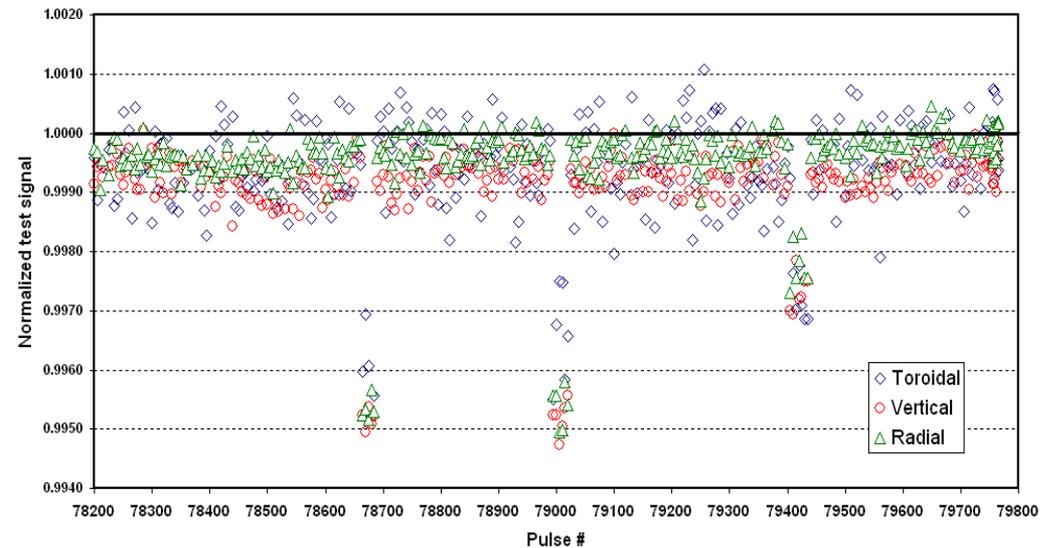
Результаты измерений магнитного поля в реакторе JET (2009)

Результаты измерений
хорошо совпадают со
значениями,
полученными в
модельных расчетах



Результаты in-situ
самокалибровки с помощью
измерения тестового
магнитного поля

Типичные отклонения
сигнала –
не более $\pm 0,1\%$





Отзыв JET о результатах использования аппаратуры



Close Support Unit - Culham
Culham Science Centre, Abingdon,
Oxon OX14 3DB, UK

Vincenzo Coccoresse, Operations and Enhancements
Tel: +44 (0)1235 46 5378
Fax: +44 (0)1235 46 4415
Email: vincenzo.coccoresse@jet.efda.org
Secretariat: Tel: +44 (0)1235 46 4614

Ref: 7008-FR-MLW-L/EC

22 December 2009

Mr Michel Zayet
Deputy Executive Director
Science and Technology Center in Ukraine (STCU)
21, Kameniariv Str.
Kiev
Ukraine, 03138

Subject: Collaboration between EFDA-JET and MSL in connection with STCU project #3988

Dear Mr Zayet

It is a pleasure to inform you that the cooperation between EFDA-JET and the Magnetic Sensor Laboratory (MSL) of Lviv Polytechnic National University has reached a successful conclusion. This cooperation was within the JET EP2 Enhancement Programme on JET magnetic diagnostics, in particular the JET-EP2 Project on "Radiation-hard Hall Probes" (RHP).

In the context of this JET-EP2 Project, the following activities were completed in close cooperation with MSL:

- Six 3D magnetic probes were installed on JET ex-vessel, comprising the radiation-hard Hall sensors and temperature sensors, and six electronics items, combined into 2 units, for processing the signals from the probes;
- The magnetic measurement instrumentation was integrated successfully into the Data Acquisition and Control System CODAS;
- All the Hall sensors and measurement channels demonstrated their functionality as expected. A very good match was obtained between the measurement of magnetic fields with Hall sensors and that expected from 2D and 3D modelling.

Following the positive conclusion of the pre-installation commissioning in May 2009, the installation of the Hall probes was completed in June 2009. The probes were then commissioned during the JET Experimental Campaign C27 which started in July 2009 and ended in October 2009. All six sets of 3D Hall probes operated faultlessly for the whole of the period and the measurements were recorded in the JET database.

Cont.../2

-2-
22 December 2009
7008-FR-MLW-L/EC

Moreover, the measurements correspond well to the values obtained in model calculations.

The successful testing in JET of the Hall sensors developed at MSL indicates that this concept is promising in view of possible applications for ITER magnetic diagnostics.

Best regards

PP Francesco Romanelli
EFDA Associate Leader for JET

Copies: E Coccoresse CSU Responsible Officer
J Dalton EFDA-CSU Administration
A Spinner CCFE
I Bolshakova MSL

Успешное тестирование на JET холловских сенсоров разработанных в MSL показывает, что эта концепция является перспективной ввиду возможности применения для магнитной диагностики ITER.

Все холловские сенсоры и измерительные каналы продемонстрировали ожидаемую функциональность. Было получено очень хорошее соответствие между результатами измерений магнитных полей холловскими сенсорами и значениями, ожидаемыми после 2D и 3D моделирования.



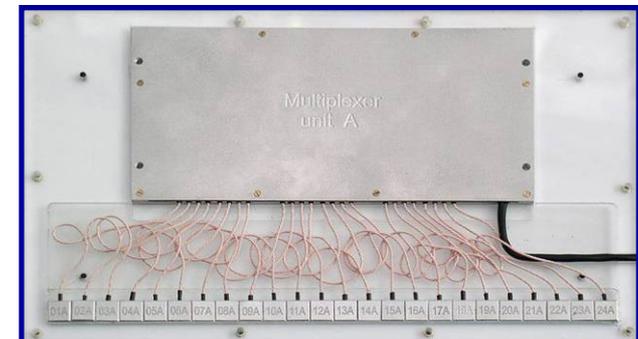
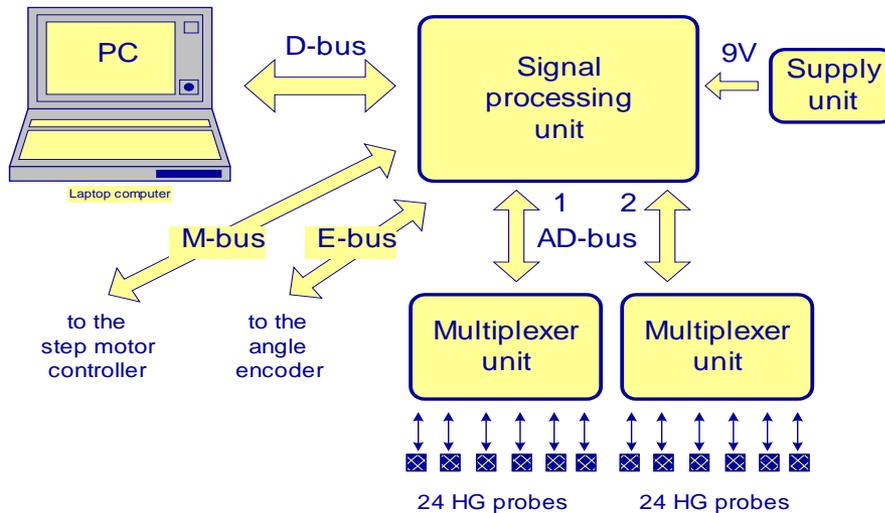
...в ускорителях заряженных частиц

Картограф магнитного поля циклотрона



Performed for National Institute of Radiological Science (Chiba, Japan)

High precision multi-channel Mapper



New concept:

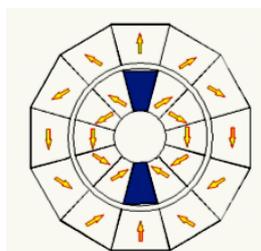
high precision electronics inside the magnet gap

48 magnetic field measurement channels

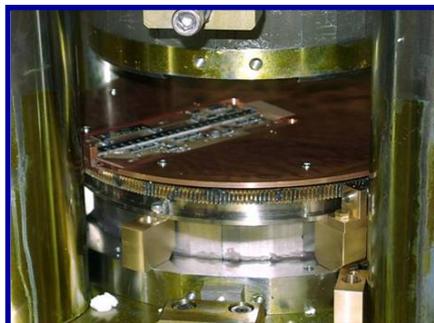
Magnetic field measurement error – 0.01%



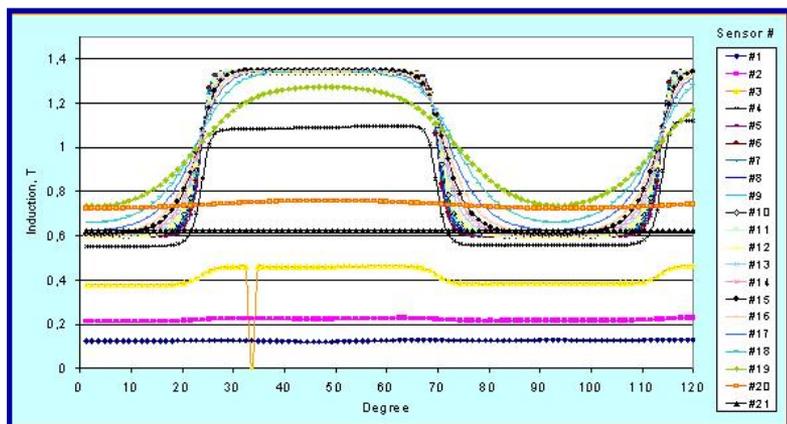
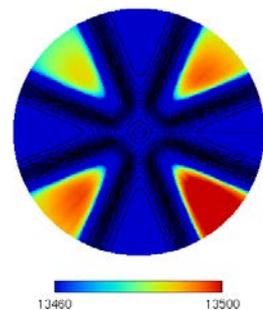
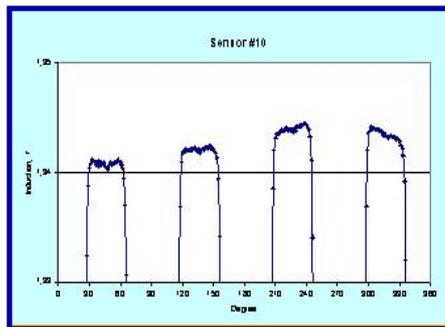
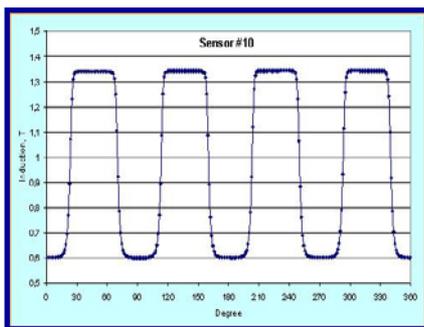
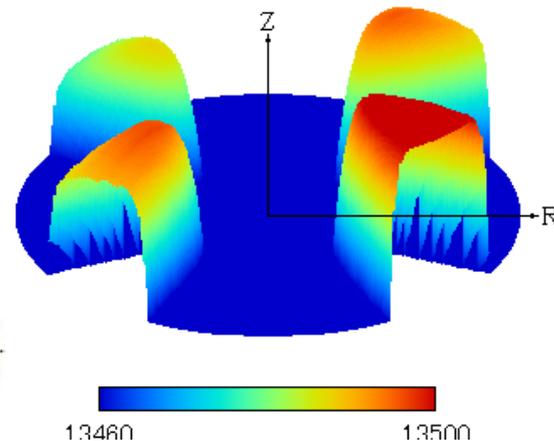
Картограф магнитного поля циклотрона



Extended Halbach circuit



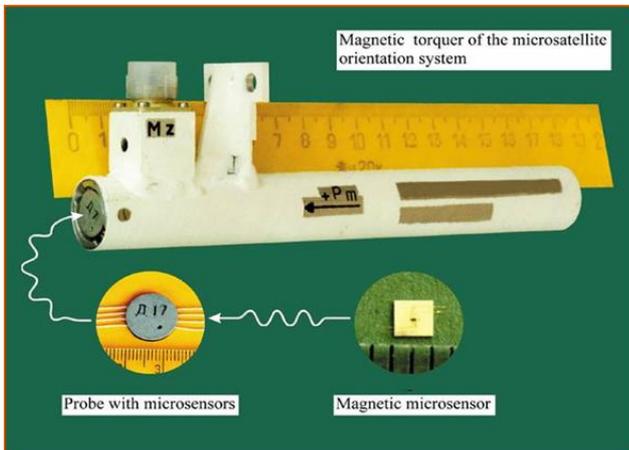
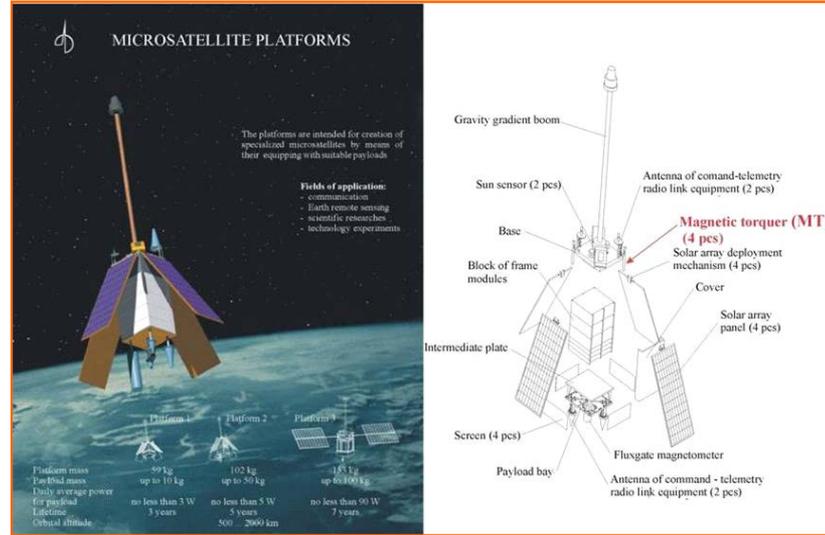
Performed for National Institute of Radiological Science, Chiba, Japan





...в космических аппаратах

Магнитометрический модуль для систем управления ориентацией и стабилизацией космических аппаратов



Магнитная чувствительность (K_B), В/Т	$\geq 10,0$
Ток потребления (I) при напряжении питания	0,007
Номинальная мощность потребления, Вт	0,2
Масса, кг	0,006
Габаритные размеры, мм	$\varnothing 17,2 \times 8,2$
Вероятность безотказной работы в течение 50000 час.	0,995



Patents



- 83 contributions at international conferences
- 110 publications
- 10 patents for invention, including patent of the UK and France

National patents:

№ 72824, № 72825, № 72826,
№ 72831, № 72832, № 73816,
№ 74628, № 76132, № 82496



Bolshakova I., Holyaka R.
UK Patent GB2427700
Method for measuring quasi-stationary magnetic field
Priorities: [UA 200506331 29 Jun 2006] / GB0518433.8

Bolshakova I., Holyaka R.
France Patent FR 2 887 991.
Procédé de mesure du champ magnétique quasi-statique
Priorite: [UA200506331 29 Jun 2006] Bulletin 07/01.





Publications

1. I. Bolshakova, Quercia A., Coccoresse V., Murari A., Holyaka R., Ďuran I., Viererbl L., Konopleva R., Yerashok V., JET EFDA Contributors and MSL LPNU Contributors. Magnetic Measuring Instrumentation with Radiation-Resistant Hall Sensors for Fusion Reactors: Experience of Testing at JET. IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol.(59), 99 (2), (2012).
2. Bolshakova I., Quercia A., Coccoresse V., Murari A., Ďuran I., Viererbl L., Yerashok V., Holyaka R. and JET EFDA Contributors. Instrumentation with Hall sensors for JET magnetic diagnostics. The results of the recent deuterium campaign at JET in 2009. IEEE Xplore: Proceedings of the 2nd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Application (ANIMMA), P.1-5, (2012).
3. Ďuran I., Bolshakova I., Viererbl L., Sentkerestiová J., Holyaka R., Lahodová Z., Bém P. Irradiation tests of ITER candidate Hall sensors using two types of neutron spectra. Rev. Sci. Instrum. 81, 10E122 (2010).
4. Moreau Ph., Lister J.B., Chitarin G., Peruzzo S., Vayakis G., Le-Luyer A., Pastor P., Malard Ph., Moret J.M., Testa D., Toussaint M., Fournier Y., Delogu R., Vila R., Romero J., Brichard B., Bolshakova I., Ďuran I., Envheva A. Development of a Magnetic Diagnostic Suitable for the ITER Radiation Environment. IEEE Xplore: Proceedings of the 1st International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Application (ANIMMA), P.1-8 (2010).
5. Murari A., Edlington T., Angelone M., Bertalot L., Bolshakova I., Bonheure G., Brzozowski J., Coccoresse V., Holyaka R., Kiptily V., Lengar I., Morgan P., Pillon M., Popovichev S., Prior P., Prokopowicz R., Quercia A., Rubel M., Santala M., Shevelev A., Syme B., Vagliasindi G., Villari R., Zoita V.L., JET-EFDA Contributors. Measuring the radiation field and radiation hard detectors at JET: Recent developments, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. Vol.593, P.492-504, (2008).
6. Bolshakova I., Ďuran I., Holyaka R., Hristoforou E., Marusenkov A.. Performance of Hall Sensor-Based Devices for Magnetic Field Diagnosis at Fusion Reactors. Sensor Letters. Vol.5, P.283-288, (2007).



Научная коллаборация ЛМС

