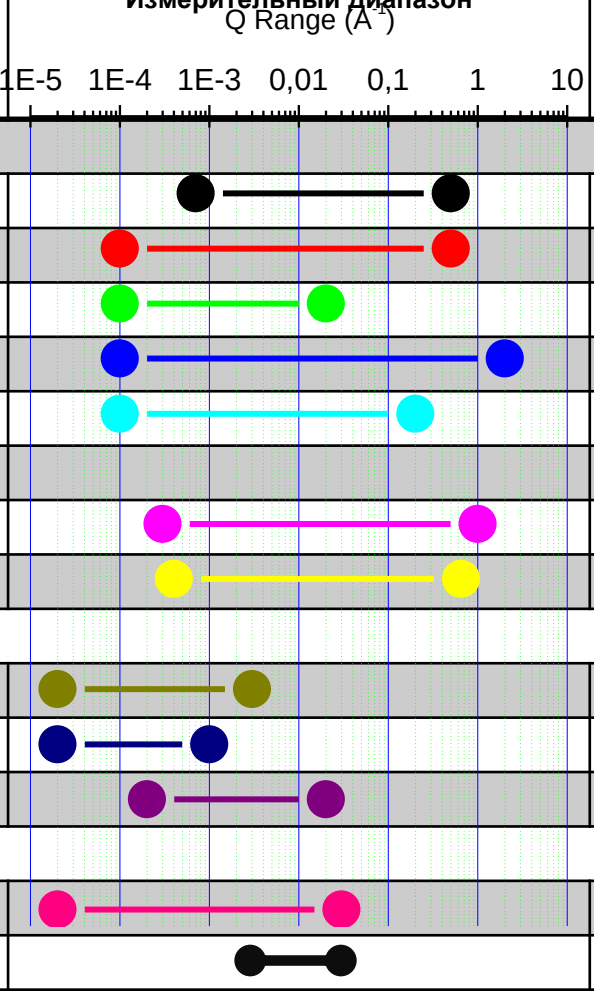
Концепция установки спин-эхо МУРН для реактора ПИК

Четвериков Ю. О., Величко Е. В.*, Ласаков М.*,*
Аксельрод Л. А., Забенкин В. Н.*, W. Kraan***
ФГБУ ПИЯФ
TU Delft

Малоугловые установки нейтронных реакторов: измерительные возможности и интенсивность проводимых работ

Название	Источник нейтронов (MW)	Измерительный диапазон Q Range (A^{-1})	Начало ведения статистики	Кол-во выполненных работ *	Интенсив-ность работ (n/год)
SANS					
KWS-1	FRM-II (20)		2008	143	23.8
KWS-2	FRM-II (20)		2007	279	39.9
KWS-3	FRM-II (20)		2010	63	15.7
SANS-1	FRM-II (20)		2012	35	17.5
REFSANS	FRM-II (20)		2006	60	7.5
D11	ILL (58)		1995	774	41.7
D22	ILL (58)		1995	688	36.7
USANS					
S18	ILL (58)		2010	19	4.6
NIST	BT-5 (20)		2002	134**	10.7
MAUD	LWR-15 (10)		2009	-	-
SESANS					
SESANS	IRI(2)		1999	96**	6.4
СЭМУРН	ВВРМ(13)		2005	~10**	1

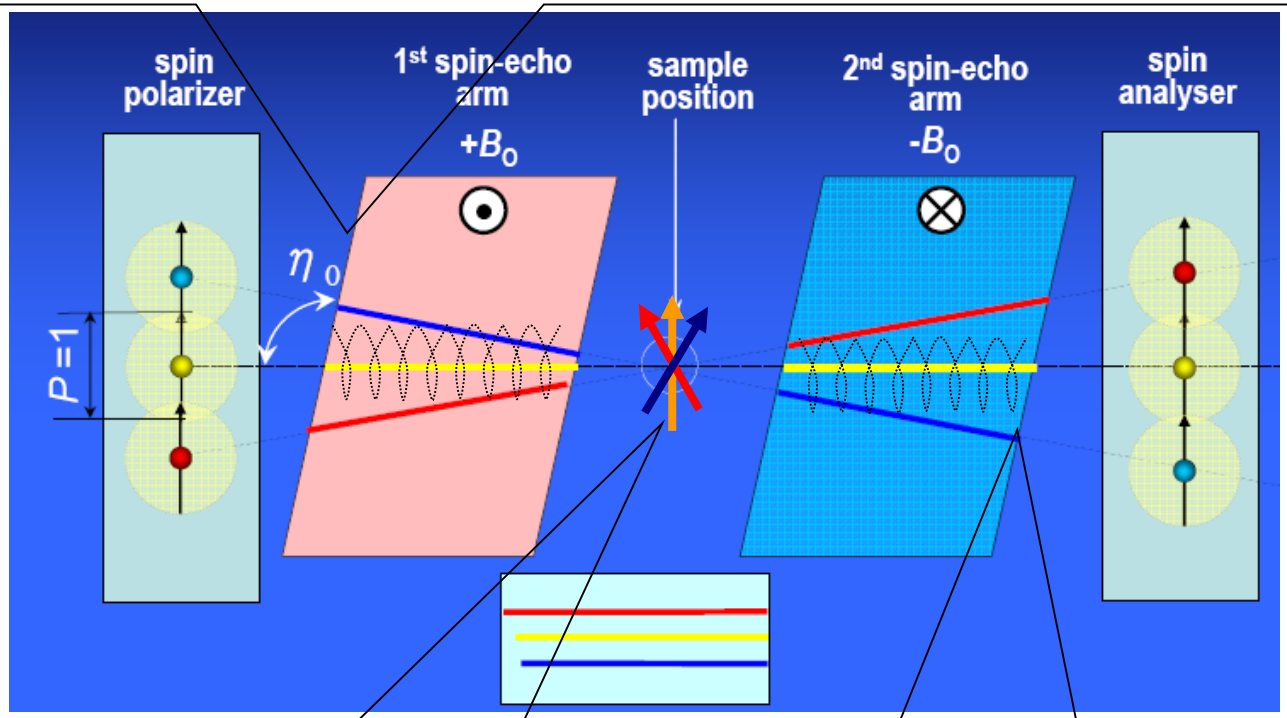


*- число отчетов, выложенных в доступ пользователей на сайтах FRM-II, ILL

**- число публикаций, выложенных на сайтах TU Delft, и NIST (CNR)

Кодирование и декодирование траектории нейтрона при помощи прецессии нейтрона в магнитном поле

Входя в область магнитного поля спин нейтрона начинает прецессировать

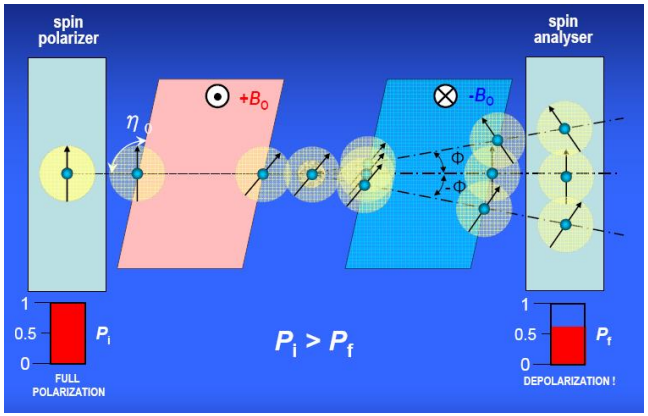


Фаза прецессии в позиции образца зависит от длины пути нейтрона в магнитном поле

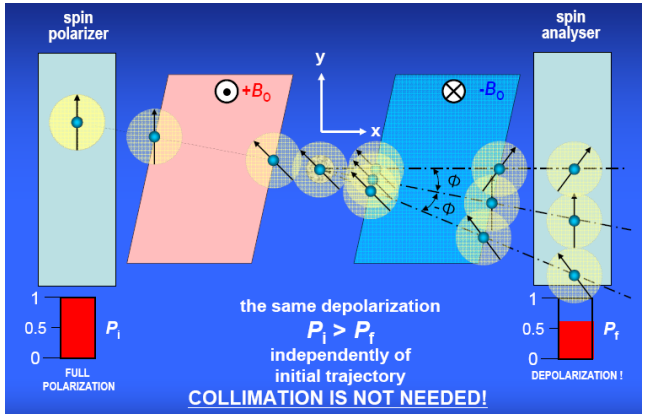
В отсутствии рассеяния, вторая область прецессии, зеркальная первой, восстанавливает спиновое состояние нейтрона

Деполяризация как индикатор рассеяния

Изменение траектории нейтронов из за рассеяния на образце приводит к деполяризации нейтронного пучка

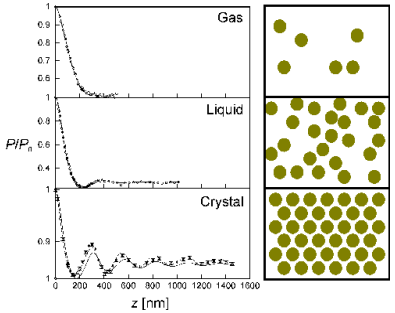


Деполяризация практически не зависит от коллимации первичного пучка нейтронов!!!



Парные корреляции:

Результаты СЭМУРН



-Исследование материалов в широком диапазоне масштабов структуры: от нескольких нанометров до нескольких микрон.(Фрактальные объекты, упаковка белка в клетках)

-Повышение эффективности измерений МУРН (УМУРН) объектов с крупномасштабными неоднородностями (больше 10 нм).

(Магнитные домены, фотонные кристаллы, коллоидные растворы)

Особенности метода СЭМУРН

$\Phi = B\, s^2 \sin^2 \varphi$

Инвариант Лагранжа-Гельмгольца [*]; $s\varphi = const$

Φ- поток излучения; B – яркость; s- размер излучателя,

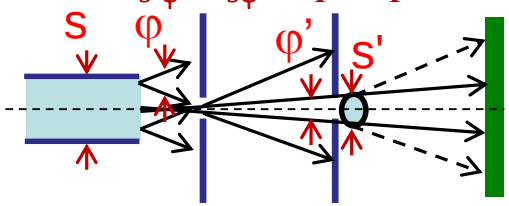
φ - угол расходимости излучения

Методика МУРН (УМУРН)

s≈5 см; φ ≈1°

s'≈1 см; φ' ≈0.1-0.001°

s'φ'<<sφ → Φ'<<Φ



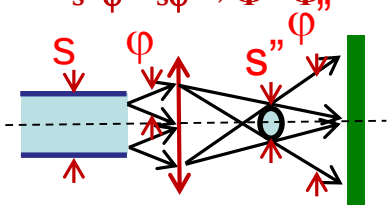
Методика СЭМУРН

Измерения SESANS не зависят от коллимации первичного пучка!!!

s≈5 см; φ ≈1°

s"≈1 см; φ" ≈5°

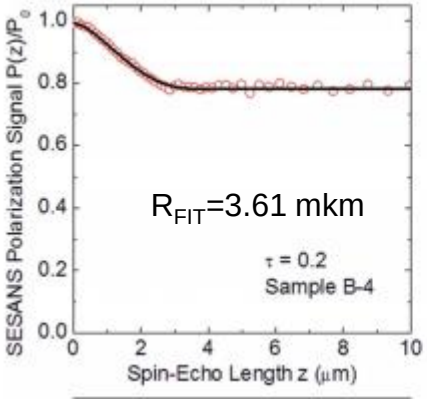
s"φ"=sφ → Φ'=Φ„



Методика СЭМУРН позволяет получить максимально возможный поток на образце

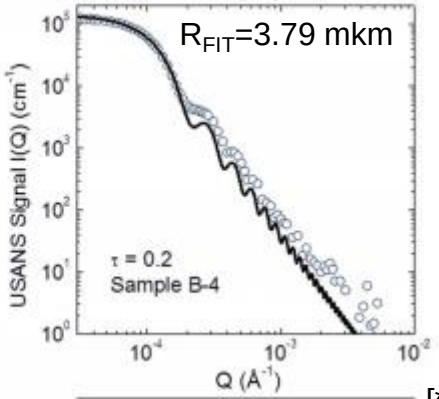
СЭМУРН

4 часа, реактор 2MW



УМУРН

8 часов, реактор 20 MW



[**]

УМУРН- точные измерения рассеяния:

- больший динамический диапазон измеряемого сигнала;
- точные измерения слабых рассеивателей

СЭМУРН- метод светосильного эксперимента:

- образцы малого размера;
- серийные измерения множества образцов;
- исследования локальных неоднородностей в объеме образца (МУР интроскопия);
- In situ эксперименты

* Слюсарев Г. Г. О возможном и не возможном в оптике, Издательство АНСССР, (1944) Стр. 20

** Rehm C, Barcer J, Bouwman W.G., Pynn R. DCD USANS and SESANS: a comparison of two neutron scattering techniques applicable for the study of large-scale structures Ap. Crystallography 46, (2013)

СЭМУРН установки

СЭМУРН с намагниченными фольгами, в качестве Pi- флипперов

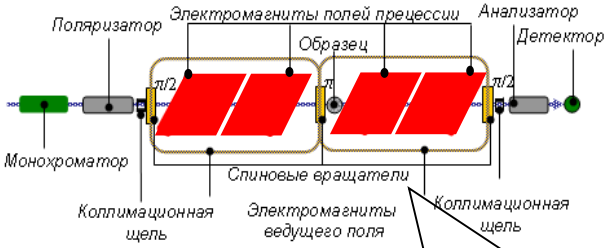
СЭМУРН с адиабатическими резонансными Pi- флипперами

СЭМУРН с длинными полями прецессии

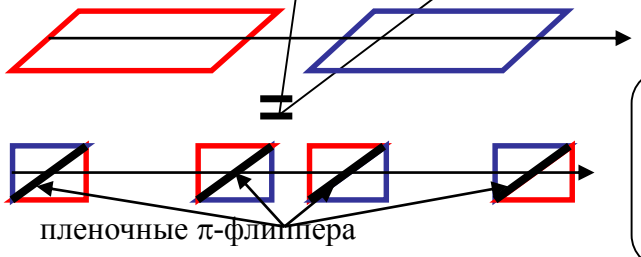
Установка SESANS Технического университета Дельфта (Нидерланды):

Установка Offspec импульсного нейтронного источника ISIS (Великобритания):

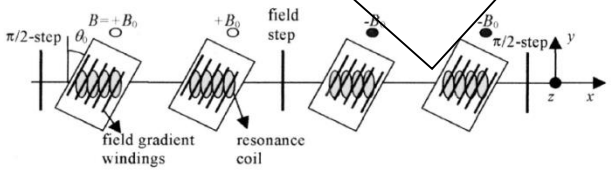
СЭМУРН ПИЯФ (ВВРМ):



Относительно маленький угол наклона фольг θ_0~5.5^0 позволяет достичь больших величин δ (δ ~ctg θ_0)



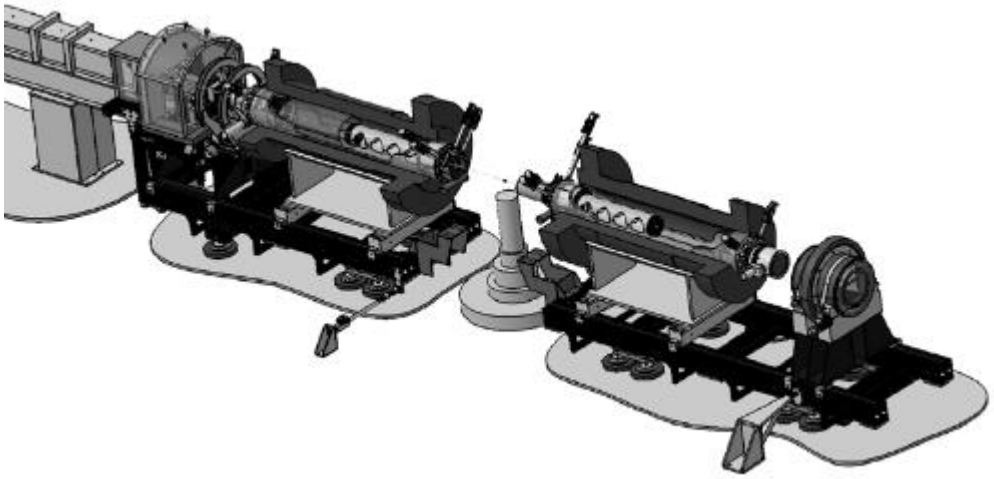
Использование адиабатических резонансных флипперов позволяет использовать прибор на импульсных источниках, с изменяющейся длиной волны



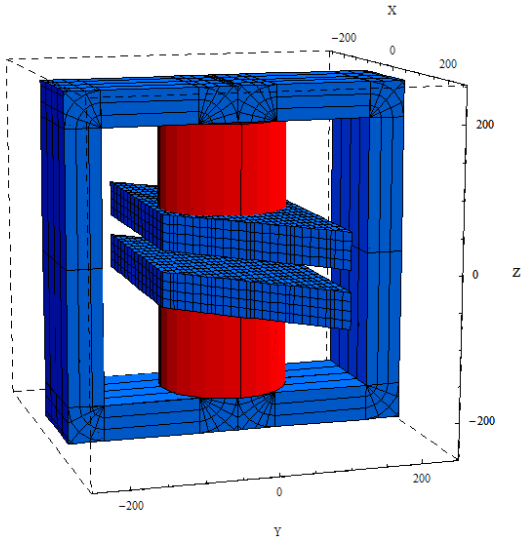
Поля прецессии более однородные, что улучшает поляризацию

Спин- Эхо установки нейтронных реакторов: измерительные возможности и интенсивность проводимых работ

Название	Источник нейтронов (MW)	Измерительный диапазон τ range (ns) 10^{-4} 10^{-3} 10^{-2} 10^{-1} 10^{0} 10^{1} 10^{2} 10^{3}	Начало ведения статистики	Кол-во выполненных работ *	Интенсив-ность работ (n/год)
CNSE					
J-NSE	FRM-II (20)		2007	101	14.4
IN11	ILL(58)		1995	187	9.8
IN15	ILL (58)		1997	155	9.1
RNSE					
RESEDA	FRM-II (20)		2008	17	2.8
SESANS	IRI(2)		1999	96**	6.4
СЭМУРН	ВВРМ(13)		2005	~10**	1



Реализация СЭМУРН метода:
Низкая интенсивность на образце



	DCD USANS NIST	SESANS Delft
Характеристики методов		
Производительность установки	Низкий поток на образце и детекторе	Высокий поток на образце и детекторе
Параметры установок		
Мощность реактора (MW)	20	2
Горизонтальная расходимость пучка (рад)	0.044	0.0018
Вертикальная расходимость пучка (рад)	$3.7*10^{-6}$	0.003
Поток на образце ($см^{-2}сек^{-1}$)	**17300**	**625**

???

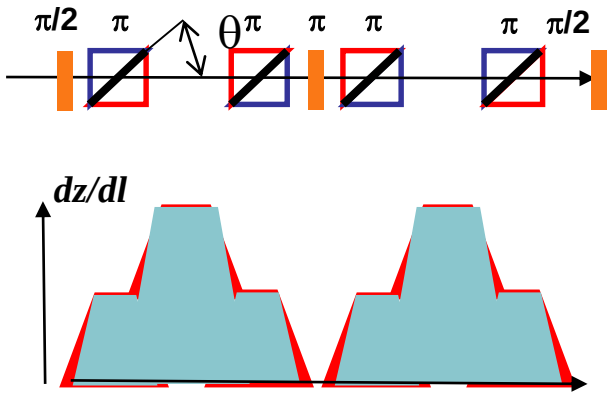
Низкая производительность установки **SESANS Delft** обусловлена :

1) коллимацией пучка из за **ограниченного размера области однородности магнитного поля** и малой угловой апертуры поляризатора и анализатора;
2) **Нестабильностью магнитного поля в магнитах с железным ярмом**, приводящей к пределу точности измеряемой поляризации в 0.2 % (точность не может быть увеличена длительным временем счета).

** Rehm C, Barcer J, Bouwman W.G., Pynn R. DCD USANS and SESANS: a comparison of two neutron scattering techniques applicable for the study of large-scale structures Ap. Crystallography 46, (2013)

Совершенствование техники СЭМУРН: Конфигурация поля

С намагниченными фольгами, (адиабатическими флипперами)



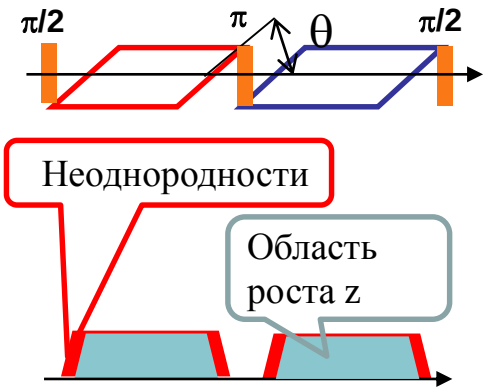
достоинства:

- существуют действующие установки (SESANS Delft; OffSpec);
- максимальное z при заданной величине поля B

недостатки:

- большая длина установки;
- малая однородность поля из за большого числа магнитов малых размеров;
- большое число вращателей поляризации (7)

С двумя длинными полями прецессии



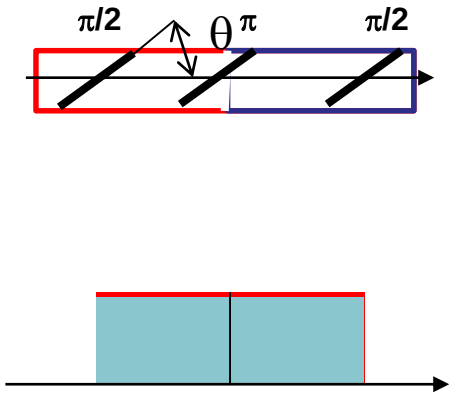
достоинства:

- существуют действующая установка (СЭМУРН ПИЯФ);
- малая длина установки;
- Улучшенная однородность, из за увеличения размеров магнитов
- малое число вращателей поляризации (3)

недостатки:

- малый z диапазон из за большого θ

С одним полем



достоинства:

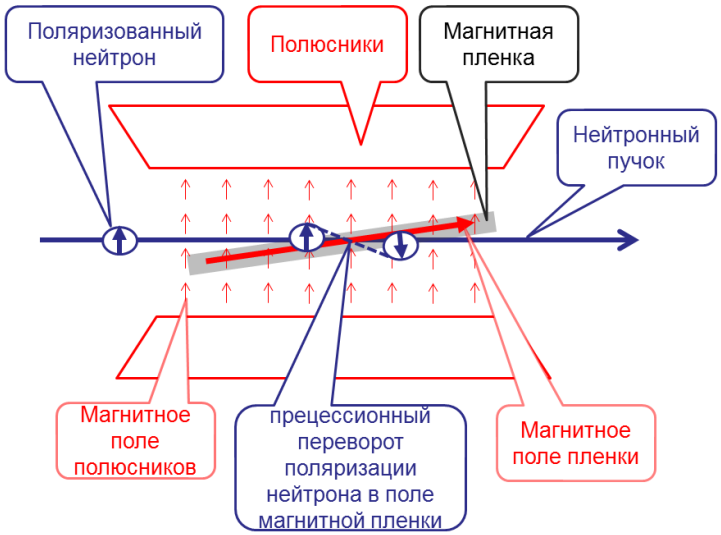
- малая длина установки;
- большой диапазон z, из за малого θ;
- лучшая однородность, из за расположения областей прецессии в области однородного поля
- малое число вращателей поляризации (3)

недостатки:

- не существует действующей установки

Критические технологии:
плоские вращатели поляризации в больших внешних полях

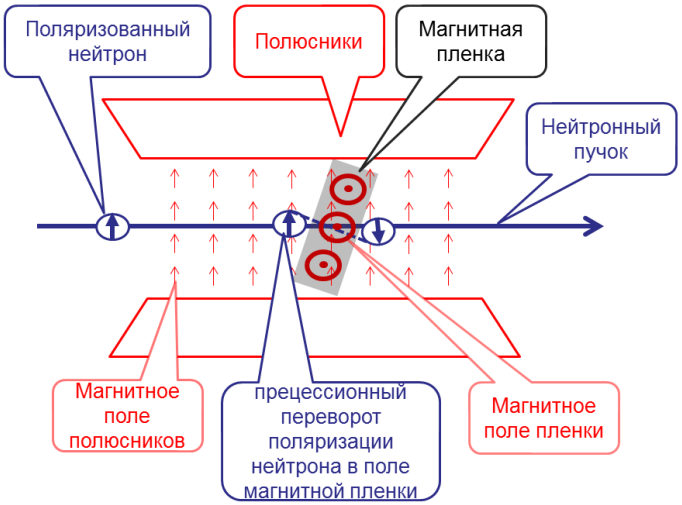
Магнитомягкие пленки вращатели поляризации:



достоинства:
-существуют действующие вращатели на основе FeNi пленок;
-работает в широком диапазоне полей;

недостатки:
- можно использовать только в магнитах с полем, перпендикулярным пучку;
- нельзя использовать при больших углах пленки к пучку (θ)
- не полный переворот из за не нулевого угла между нормалью к ведущему полю и полем фольги.

Плоские вращатели с фиксированным направлением поля:



достоинства:
- можно использовать в магнитах с полем как параллельным так и перпендикулярным пучку;
- можно использовать при больших углах пленки к пучку (θ)

недостатки:
- технология не разработана : внутри вращателя необходимо создавать поле либо за счет больших токов, доступных только сверхпроводникам, либо созданием пленок одноосных жестких магнетиков;

Изготовление и аттестация магнитомягких пленок

Требования к пленкам-вращателям поляризации

1) малое отклонение по толщине от заданного значения (<5%)
2) намагничивание до насыщения в малых полях (2 Э);
3) высокая намагниченность (>0.5Т);
4) высокая однородность магнитной толщины на большой площади (<5% в области нейтронного пучка 15Х3 см²);
5) низкая деполяризация нейтронного пучка (<2 %)

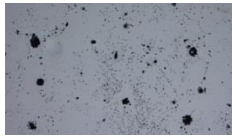
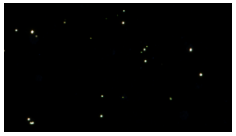
Метод изготовления

Магнетронное напыление на установке ОНФ (7-ой корпус ПИЯФ, Ласаков М.)

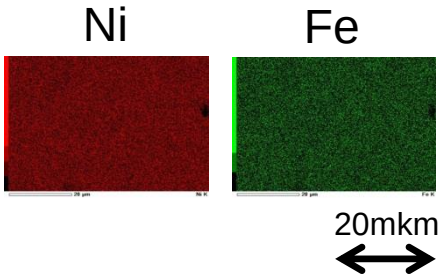
Аттестация образцов:

Определение толщины пленки:
оптический интерферометр: *Нахождение толщины по оптическому изображению скола образца;*
взвешивание:*. Нахождение толщины по разности масс до и после напыления;*
профилиметр: *Для определения толщины и однородности по толщине магнитной пленки образца- свидетеля использовался профилиметр Dektak УГУ.*

Определение элементного состава и дефектности пленки
Оптическая микроскопия: *для выявления дефектов образцы-свидетели были исследованы на оптическом микроскопе в светлом и темном поле*

Определение распределения элементного состава пленки: *Для выявления элементного состава и однородности пленки использовались спектрометры SEM X RAY и TXRF (Nanohunter) УГУ.*



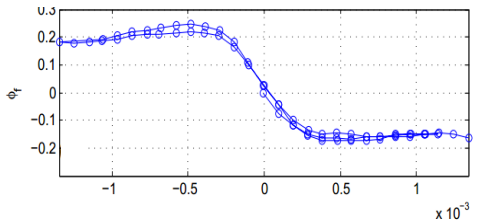
Element	Mass%	Error%
Si K	0.96	0.11
S K	0.88	0.09
Fe K	15.99	0.39
Ni K	82.17	0.77

Исследование магнитных свойств магнитомягких пленок

3D анализ поляризации нейтронов: *исследовались поворот поляризации и деполяризация нейтронного пучка, прошедшего сквозь пленку, наклоненную под углом 5,5 град.*

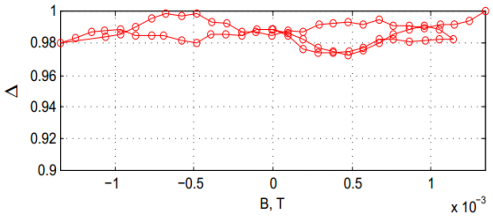
поворот поляризации:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{P_{xy}-P_{yx}}{P_{xx}+P_{yy}}\right)$$

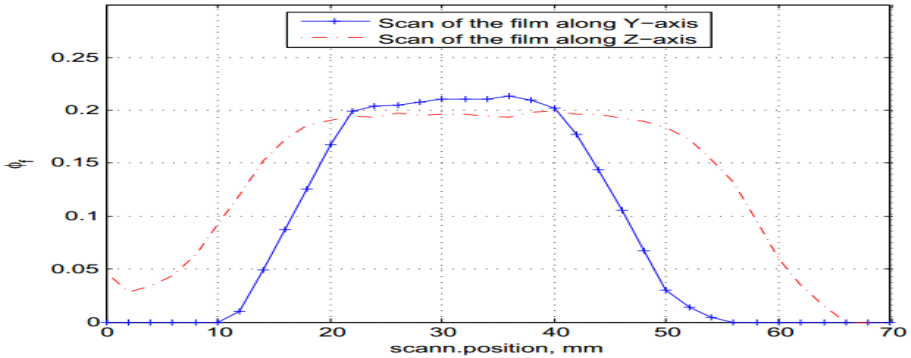


модуль вектора поляризации:

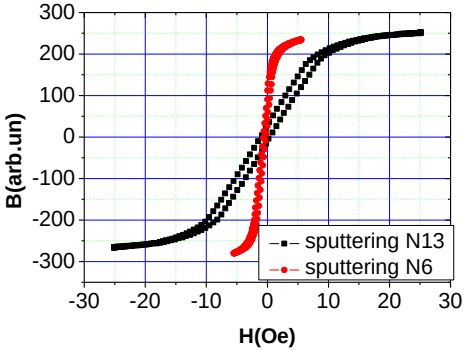
$$\begin{vmatrix} P_{xx} & P_{xy} & P_{xz} \\ P_{yx} & P_{yy} & P_{yz} \\ P_{zx} & P_{zy} & P_{zz} \end{vmatrix}$$



Профиль магнитной толщины: поворот поляризации, при смещении пленки в направлениях Y и Z перпендикулярных оси пучка:



Измерения феррометра : *исследовалось магнитное поле пленки в зависимости от приложенного внешнего поля*



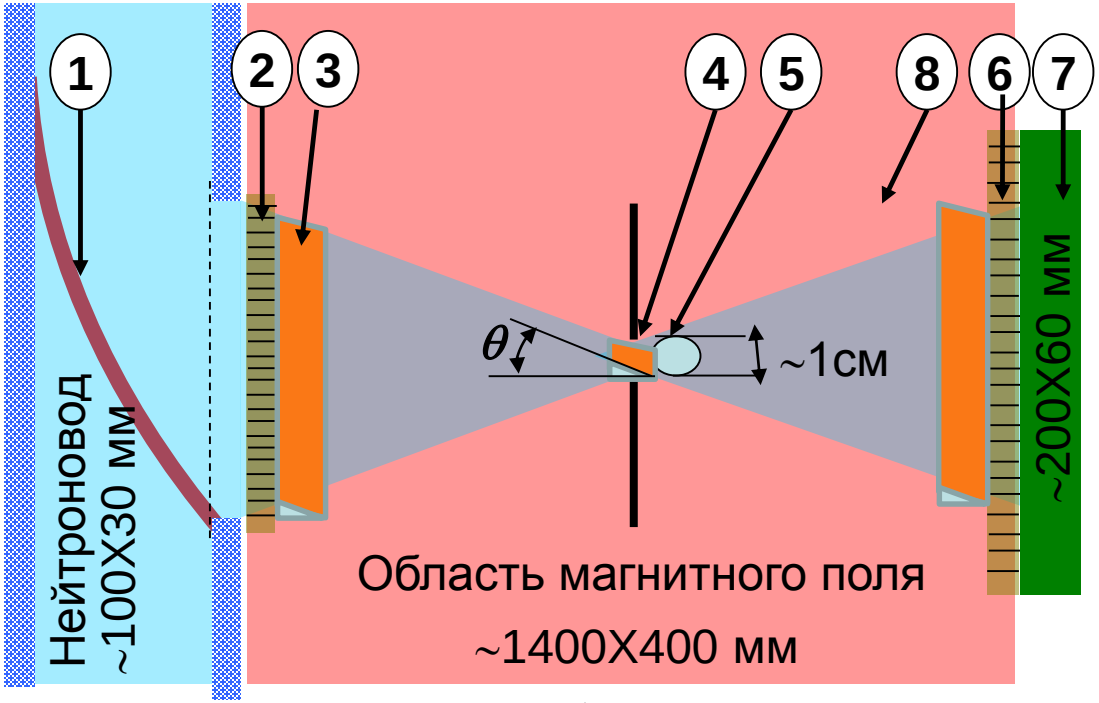
По результатам измерений в технологию напыления вносились изменения.

Всего сделано 14 циклов напыления.

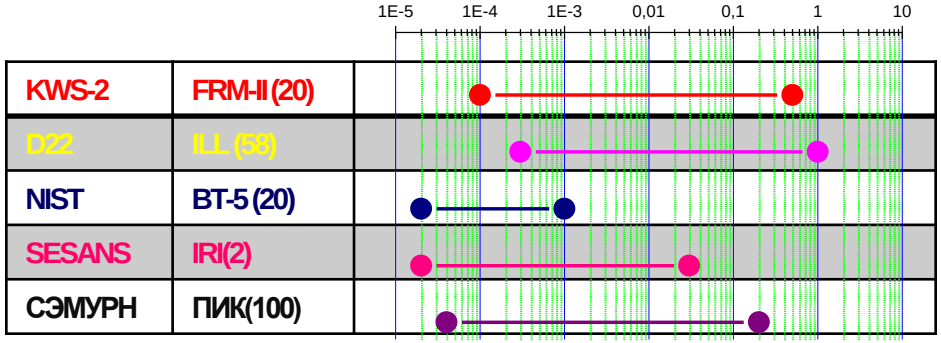
внесены следующие изменения:

- подобран состав мишени напыления;
- подобраны температурные условия напыления;
-минимизированы неоднородности по толщине пленки;
- обнаружена зависимость магнитных свойств пленки от величины и направления магнитного поля в процессе напыления, найдено оптимальное направление поля;
- обнаружено негативное влияние остаточного количества воздушных газов (10^{-4}Тор) в процессе напыления на магнитные свойства пленки.

Концепция СЭМУРН ПИК
с фокусирующей оптической схемой



1) Фокусирующий монохроматор;
2) Поляризатор;
3) Пленочные pi/2 (pi) вращатели
4) Пленочный pi флиппер
5) Образец
6) Анализатор
7) 2-х координатный детектор
8) Электромагнит поля прецессии



Предполагаемые параметры установки	
λ	4.4 (PG [002])
Δλ/λ	0.02
диапазон z	4-10000 нм
разрешение Δz/z	0.1
Q диапазон	$4*10^{-5}$ -0.2 A^{-1}
усиление потока на образце за счет фокусировки	15
поток на образце	10^6- 10^8 n/cm^{2}s
сечение пучка у образца	1X1 см
характерное время измерений образца	5-20 мин
магнитное поле	0.0004-0.2 T
Θ_0	10 град.
Поляризация пучка	0.8-0.96
Условная граница равной эффективности с МУРН установками	10 нм

Концепция СЭМУРН ПИК, планы

- Разработка технологии изготовления пленочных FeNi вращателей с высокой эффективностью переворота и однородностью, предназначенных для использования в широком диапазоне магнитных полей (0.0002-0.2 T);

- Экспериментальная проверка конфигурации Спинового Эха, основанной на трех пленочных вращателях ($\pi/2$; π; $\pi/2$), размещенных в однородном магнитном поле;

- Детальная проработка и подготовка концепции установки международному экспертному комитету по строительству установок на ПИК;

- Оформление концепции установки для экспертизы со стороны европейского сообщества нейтронного спинового эха

Выводы

1) **Современные установки не эффективно реализуют потенциал метода СЭМУРН, но несмотря на это способны обеспечивать публикационную активность на уровне более совершенных УМУРН установок;**

2) **Для эффективной реализации метода необходима исследовательская работа по созданию и аттестации плоских вращателей поляризации, численному моделированию, расчету и экспериментальной проверке схемы спинового эха. Необходимы вложения в разработку, конструирование и создание узлов установки;**

3) **Реализация концепции установки СЭМУРН ПИК позволит на несколько порядков снизить время измерений малоуглового рассеяния, использовать образцы малого объема, исследовать локальные области образца.**