

Атомные часы на ультрахолодных атомах для навигационных систем

25 Июня 2025 г.

Афанасьев Антон Евгеньевич

С.н.с. Лаборатории лазерной спектроскопии ИСАН

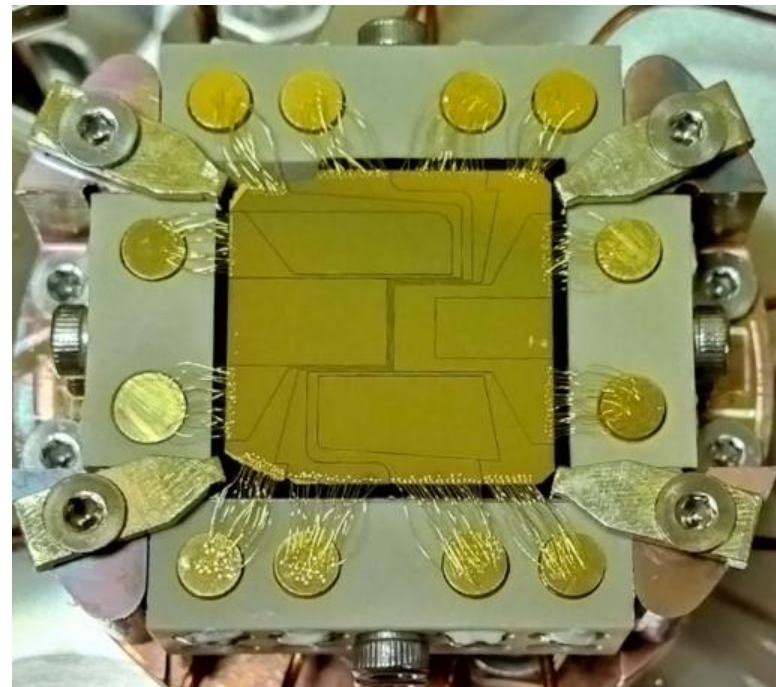
Балыкин Виктор Иванович

Г.н.с. Лаборатории лазерной спектроскопии ИСАН

Основная информация об организации



Основная деятельность организации в области технологий оптоэлектроники и фотоники



Квантовая сенсорика

Разработка квантовых сенсоров на основе холодных и ультрахолодных атомов

Детектирование с предельной чувствительностью

Разработка методов детектирования единичных объектов (атомы, молекулы, квантовые точки)



Текущая коллаборация:

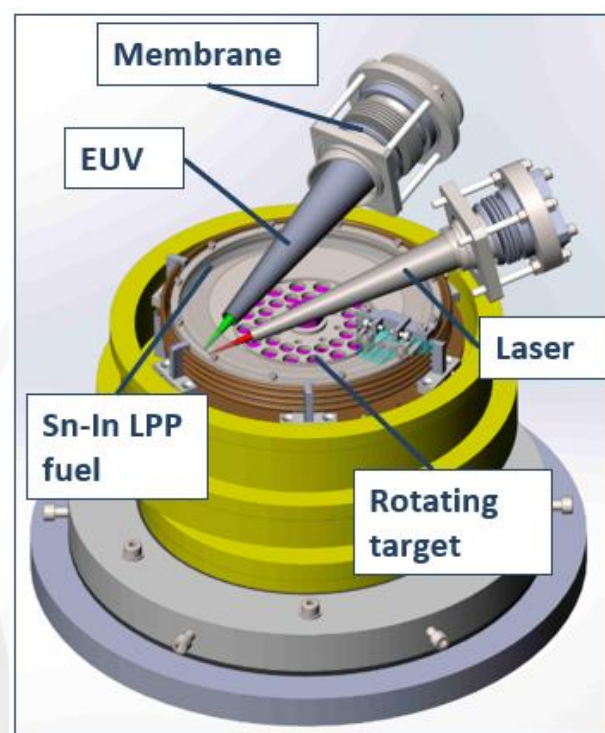
- Институт спектроскопии РАН
- ВНИИФТРИ

Ключевые элементы фотоники, исследуемые организацией

Атомный чип

Одномолекулярный секвенатор ДНК

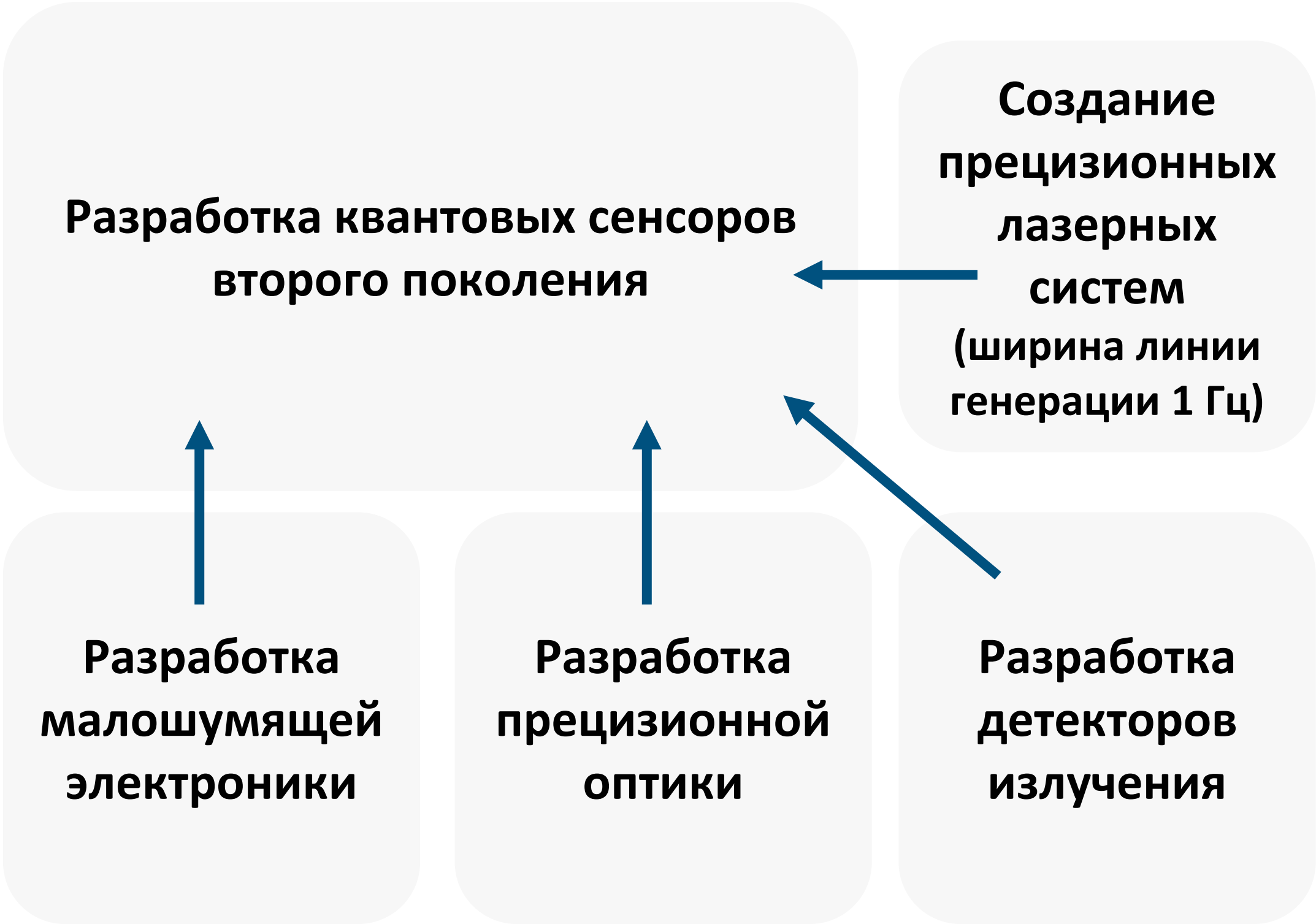
ЭУФ источник для инспекции фотошаблона при литографии



Исполнители:

- Институт аналитического приборостроения РАН (Головная организация)
- Институт спектроскопии РАН – оптический детектор
- ФИЦ Информационных и вычислительных технологий – биоинформационная платформа для анализа и обработки результатов
- ООО «Синтол» - реагенты и расходные материалы
- Алферовский университет – образовательные программы

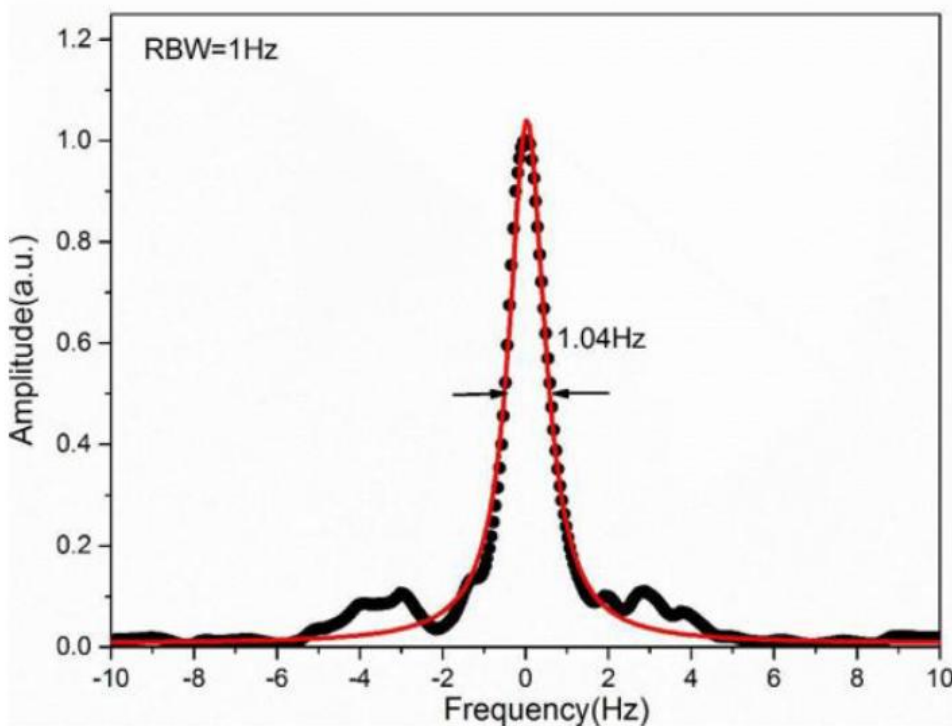
Приоритетные проблемные вопросы фотоники в РФ



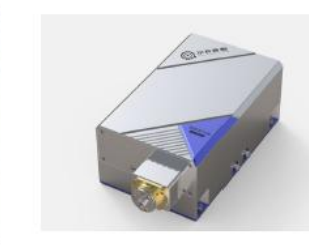
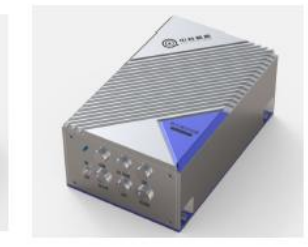
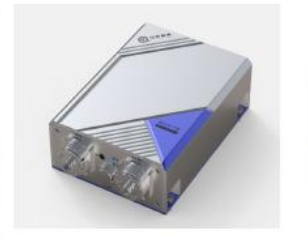
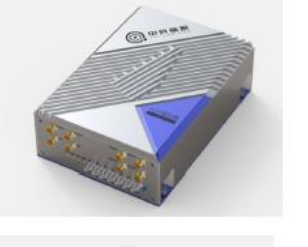
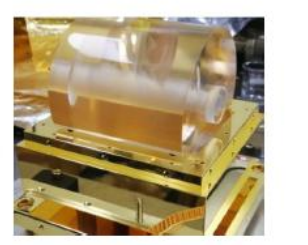
Вакуумные ячейки



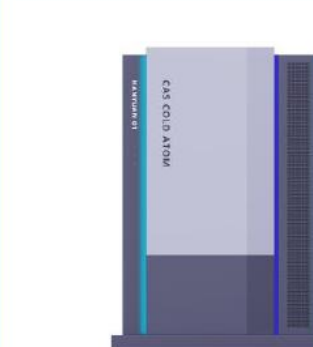
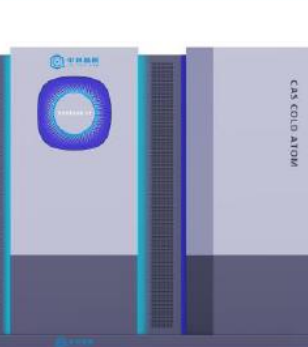
Ширина линии лазера



Номенклатура продукции компании CAS Cold Atom
(приведено для примера)

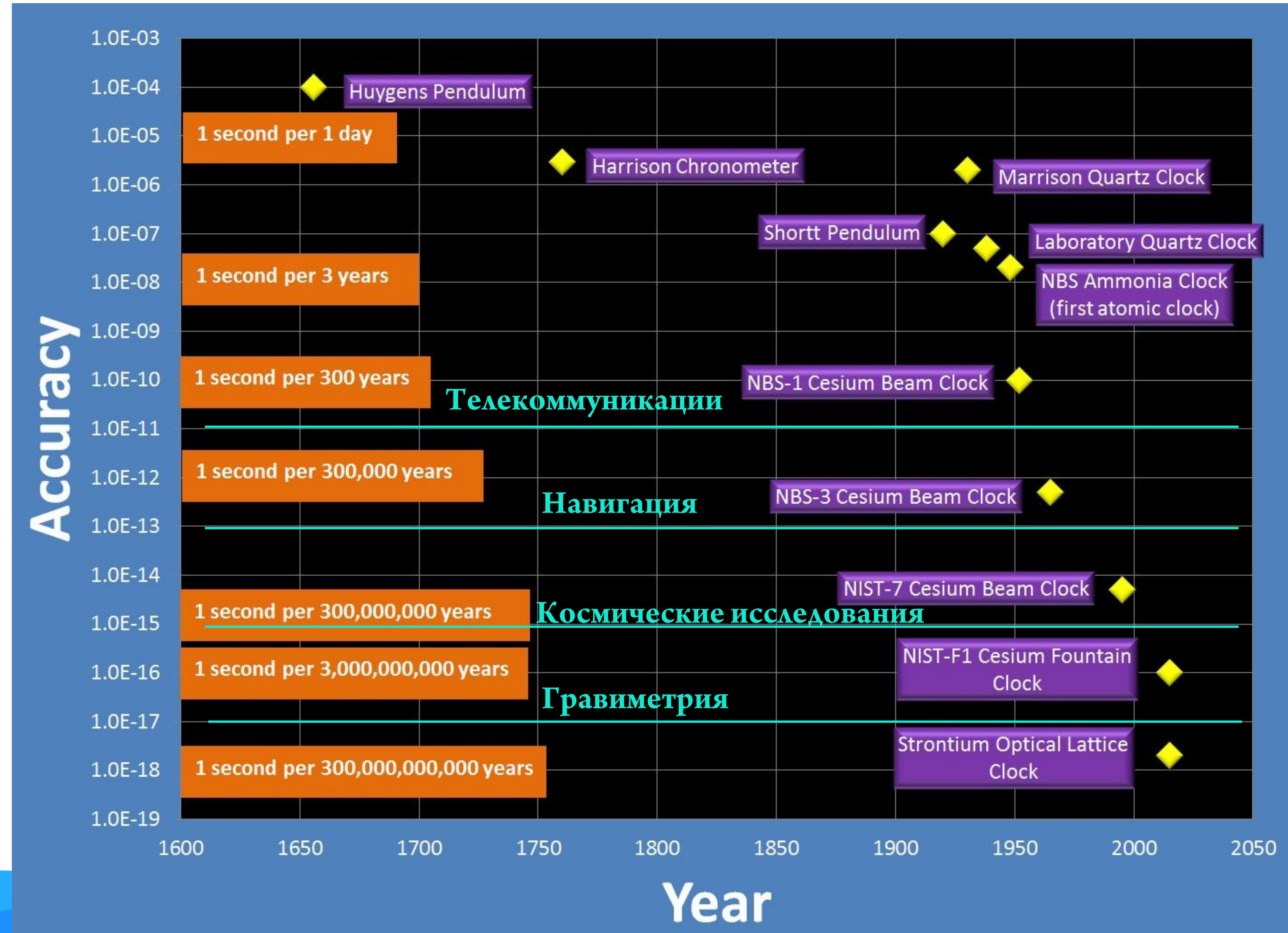
								
								
Vacuum	Lasers	Optical Assembly	Control electronics					

			
Portable gravimeter	High-precision gravimeter	Gradiometer	Marine gravimeter

		
Quantum computer	Quantum computing educational system	Cold atom array

Существующие стандарты частоты

Требуемая точность стандартов частоты для различных приложений



Отечественные стандарты частоты

Стандарт частоты	Производитель	Кратковременная нестабильность частоты (за 1 с)	Долговременная нестабильность частоты (за 1 сутки и более)	SWaP
Стандарт частоты рубидиевый фонтанного типа	ВНИИФТРИ	2×10^{-13}	2×10^{-16}	-
Стандарт частоты и времени водородный Ч1-1035	Время-Ч	$7,0 \times 10^{-14}$	$5,0 \times 10^{-16}$	101×55×55 cm 105 kg 100 W
Стандарт частоты рубидиевый сверхминиатюрный квантовый НАП-КПН	ВНИИФТРИ	3×10^{-11}	5×10^{-12}	5×5×3 cm 120 g 600 mW



Иностранные стандарты частоты

Стандарт частоты	Производитель	Кратковременная нестабильность частоты (за 1 с)	Долговременная нестабильность частоты (за 1 сутки и более)	SWaP
МНМ-2020 Водородный мазер	Microchip, USA	8.5×10^{-14}	1.5×10^{-15}	107×46×76 cm 246 kg 150 W
SA65 Chip Scale Atomic Clock (CSAC) Аналог НАП-КПН	Microchip, USA	3×10^{-10}	1×10^{-11}	4×3.5×1.1 cm 35 g 120 mW
cRb-Clock Коммерческие часы на холодных атомах	Spectra Dynamics, USA	7×10^{-13}	3×10^{-15}	22.3×38.1×47.6 cm 31 kg 120 W
MuClock	Muquans, France	4×10^{-13}	3×10^{-15}	155×55×80 cm 135 kg 250 W



Текущие проекты вне России

Компактные часы Системы для БПЛА



Квантовая навигационная система

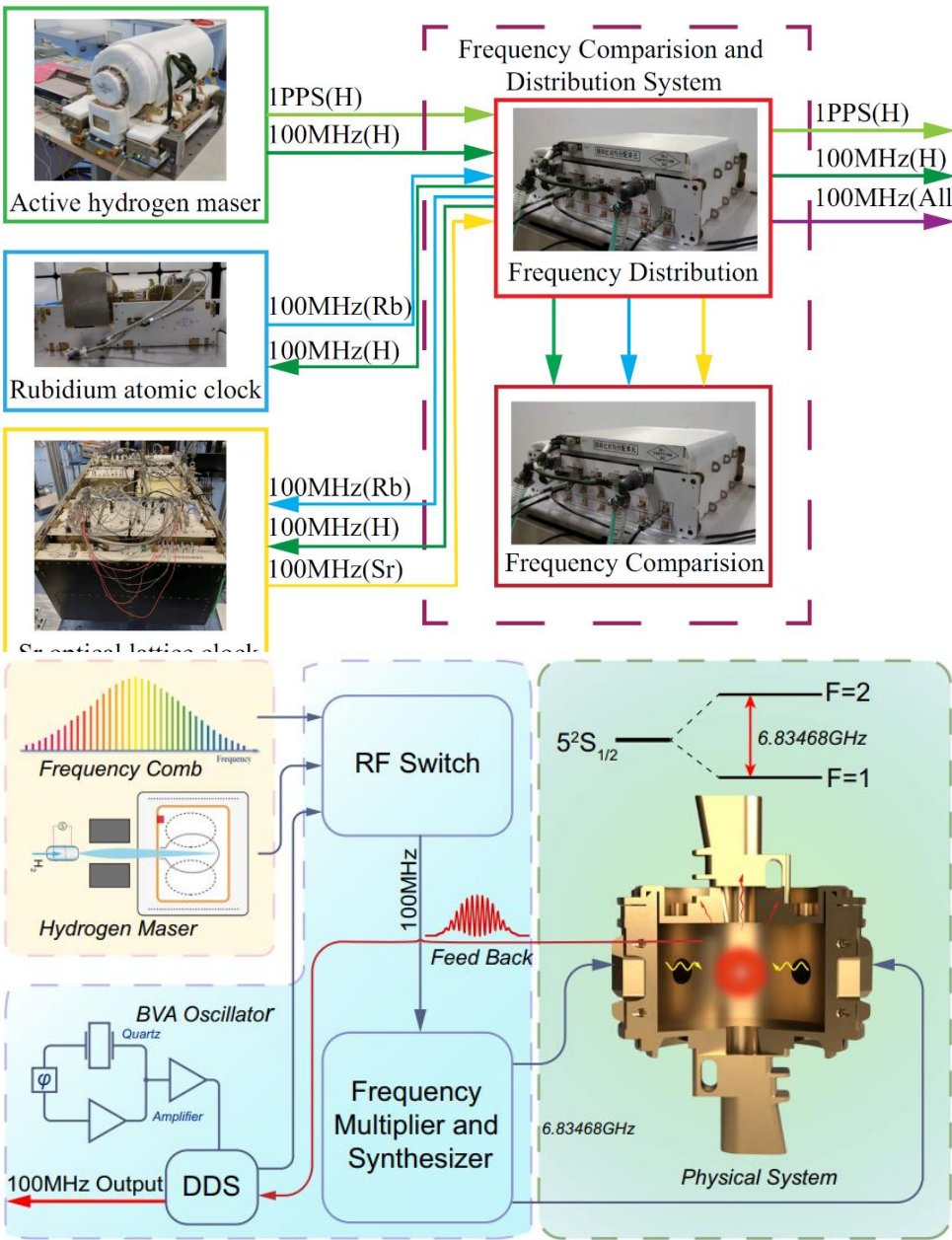


Атомные часы в космосе



Atomic Clock Ensemble in Space
(запуск на МКС 21 апреля 2025)

Точность:
 $1.1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$
 1.1×10^{-16} (лучше наземных стандартов)



**Кратковременная нестабильность
часов на борту китайской станции:**

Микроволновые атомные часы на
холодных атомах:
 $5.0 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$

Оптические атомные часы на
атомах Sr:
 $2.0 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$

Сравнение достижений в космическом пространстве

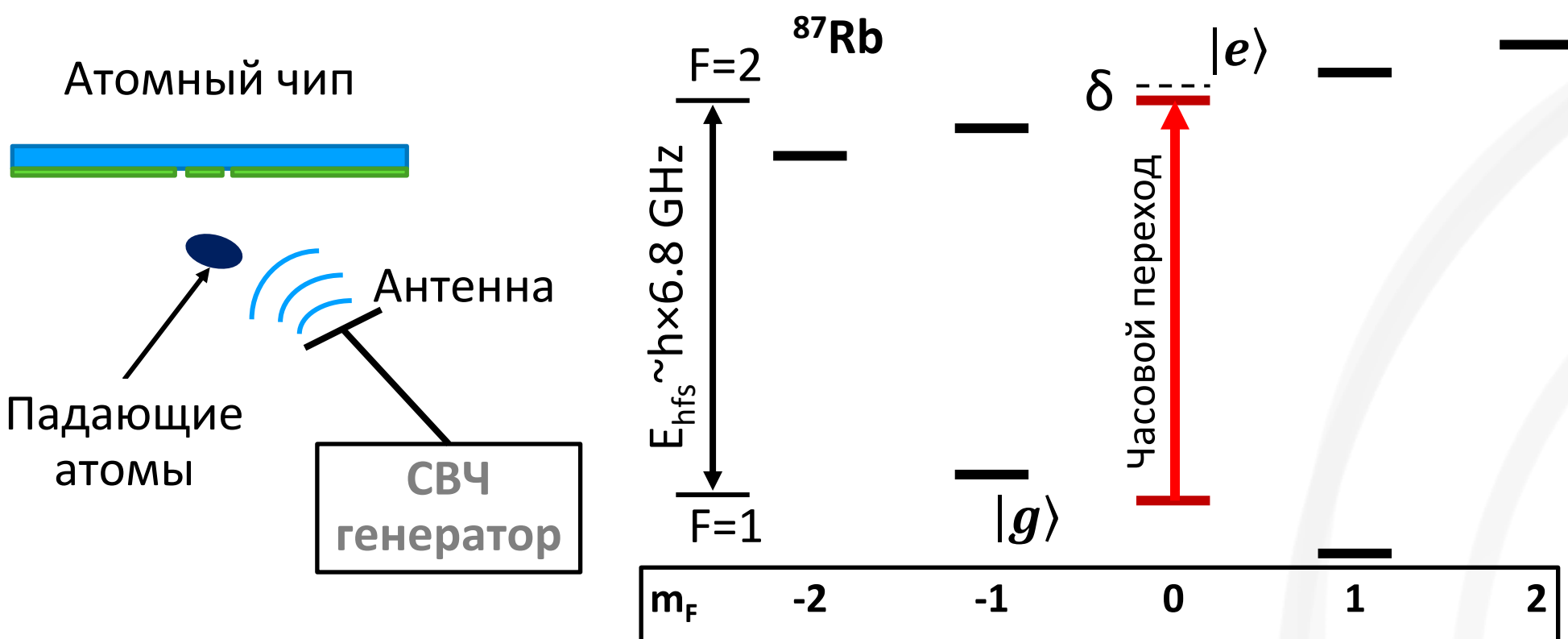


	США	Европа	Китай	Россия
Платформа	МКС	МКС (план) Спутники (план)	Китайская космическая станция	РОС(?)
Начало экспериментов в космосе	2018	2017	2017	-
Технология	Атомный чип	Атомный чип	3D-МОЛ	-
Кол-во атомов в БЭК	2×10^5	1×10^5	1×10^5	-
Стабильность часов на борту КА	-	-	$5.0 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ $2.0 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$	-

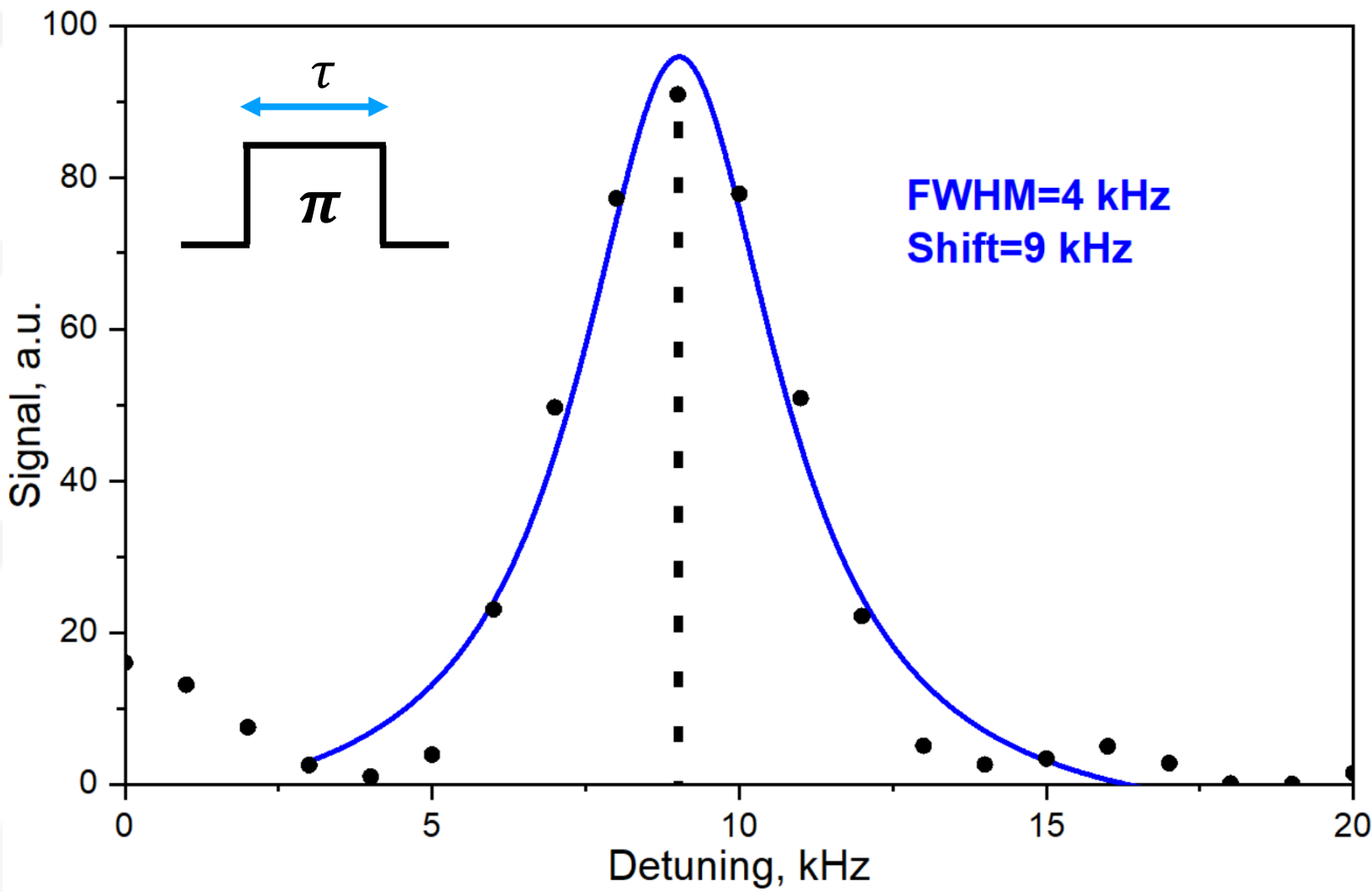
Перспективные атомные часы на холодных атомах и технологии оптического и атомного чипов

Атомный чип в ИСАН

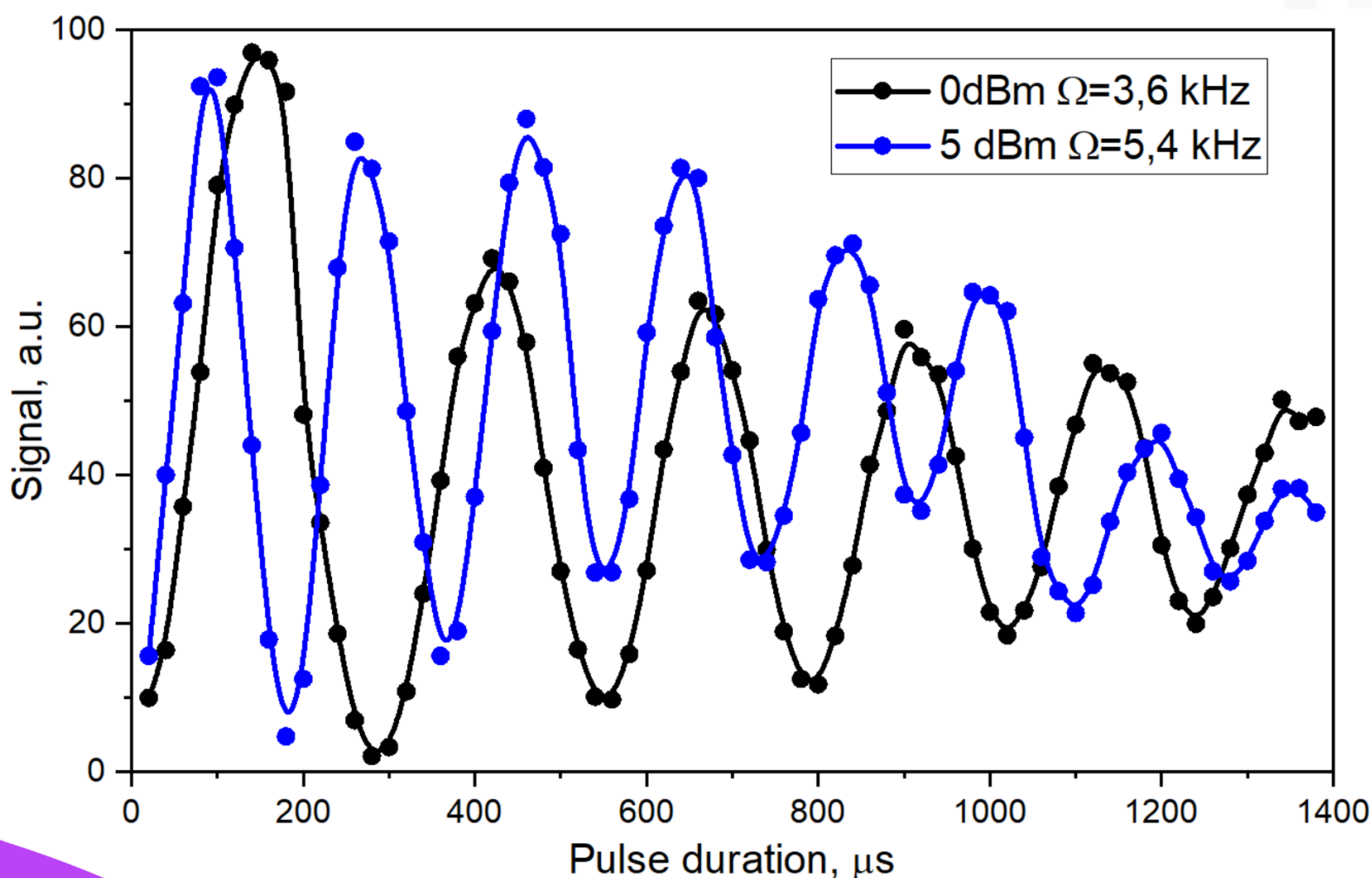
Схема измерения часового перехода



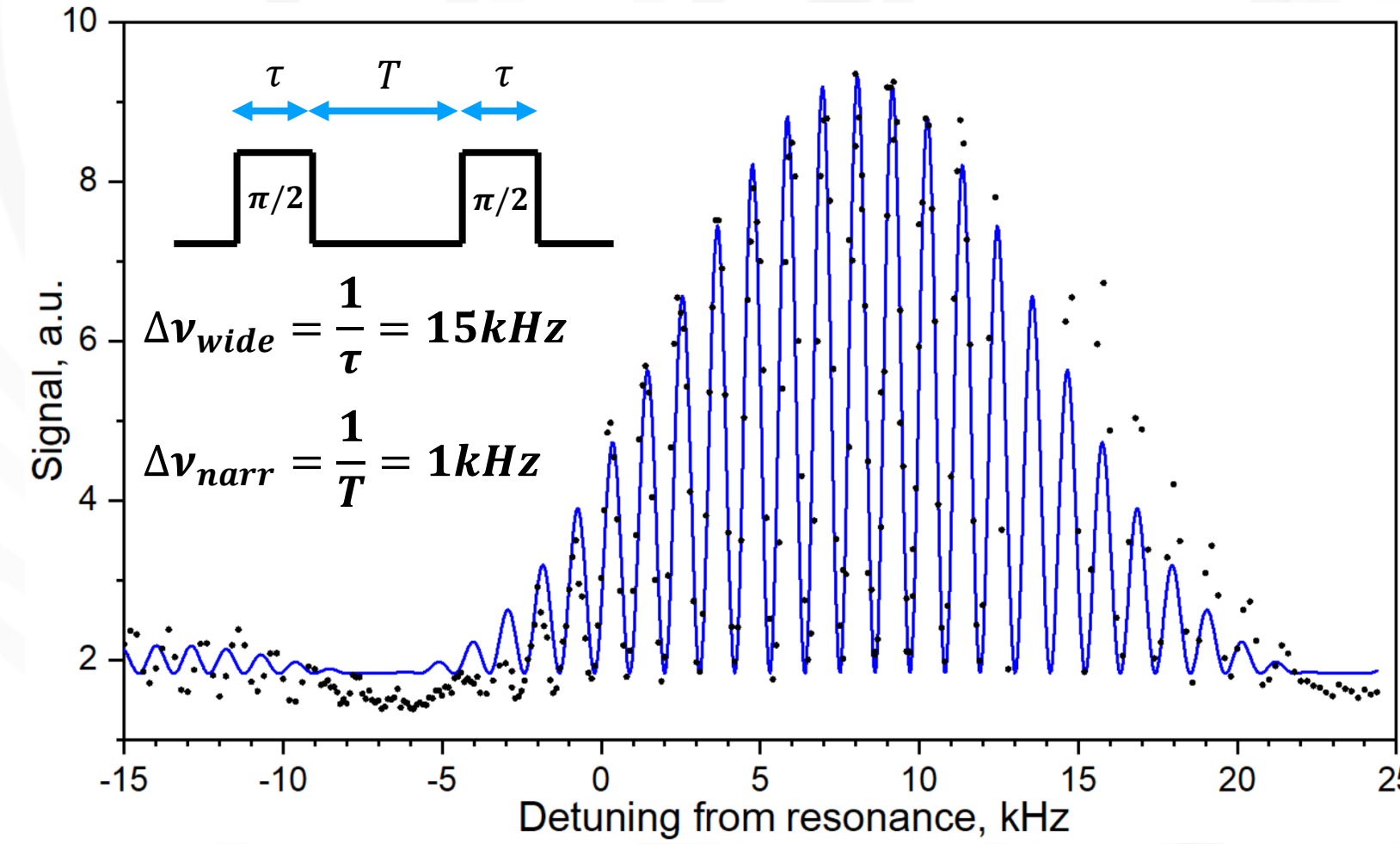
Спектр Раби



Осцилляции Раби

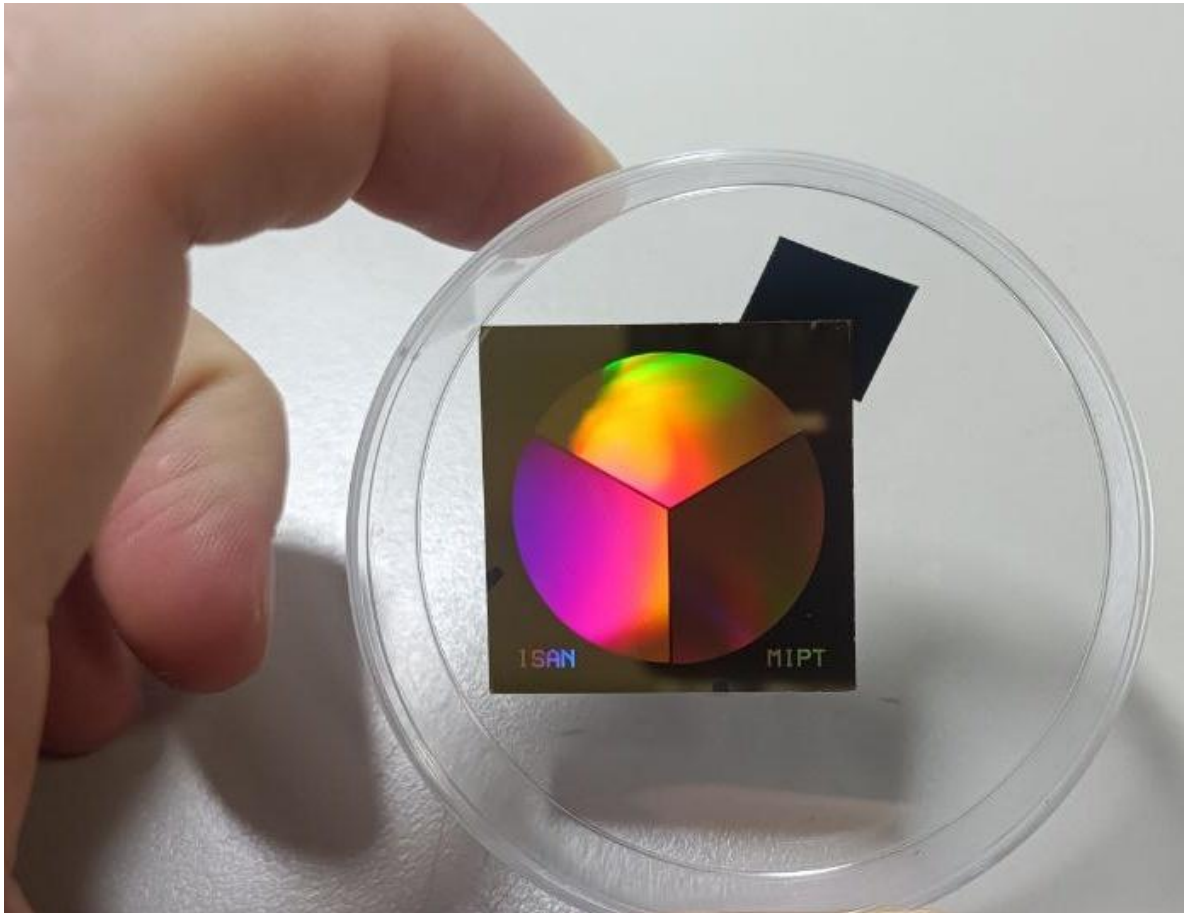


Спектр Рамзея

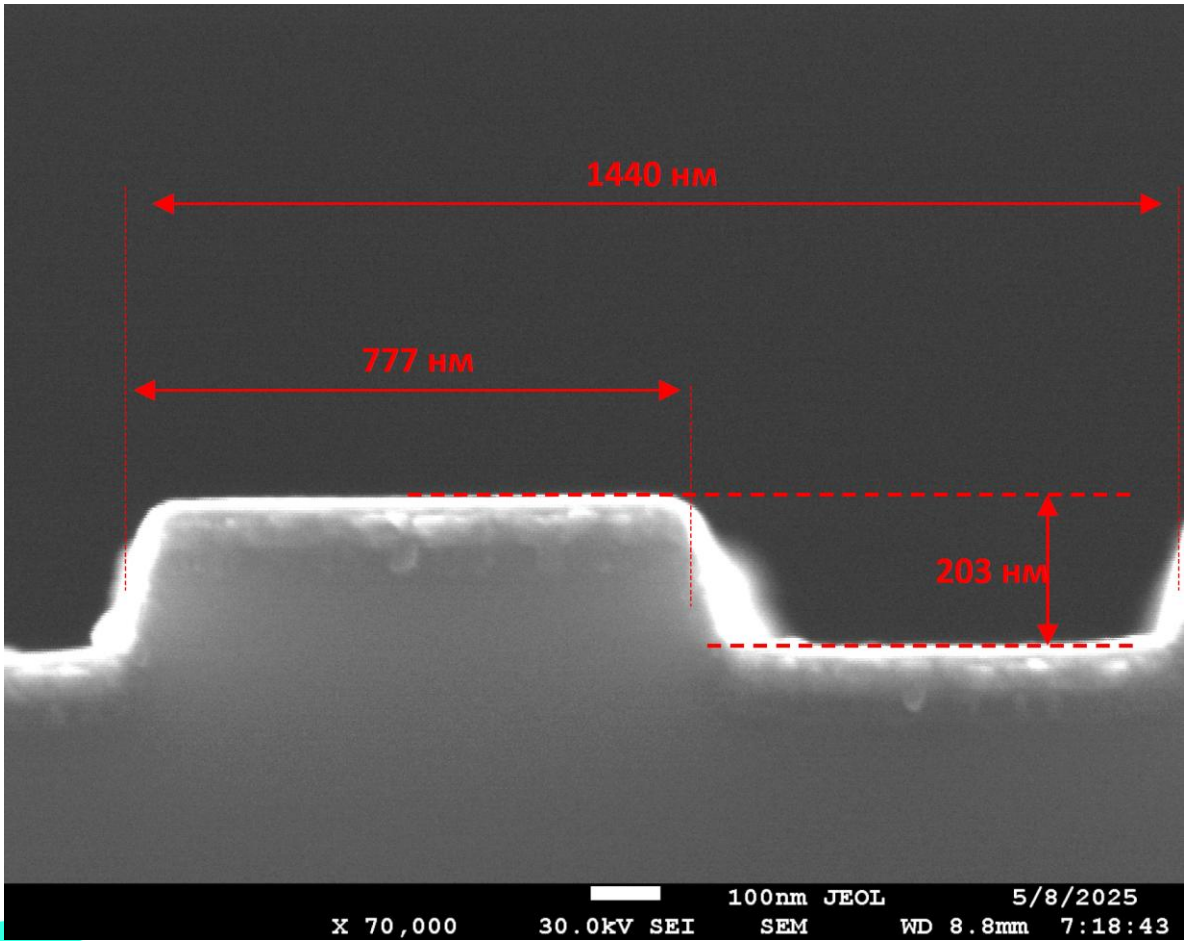


Оптический чип в ИСАН

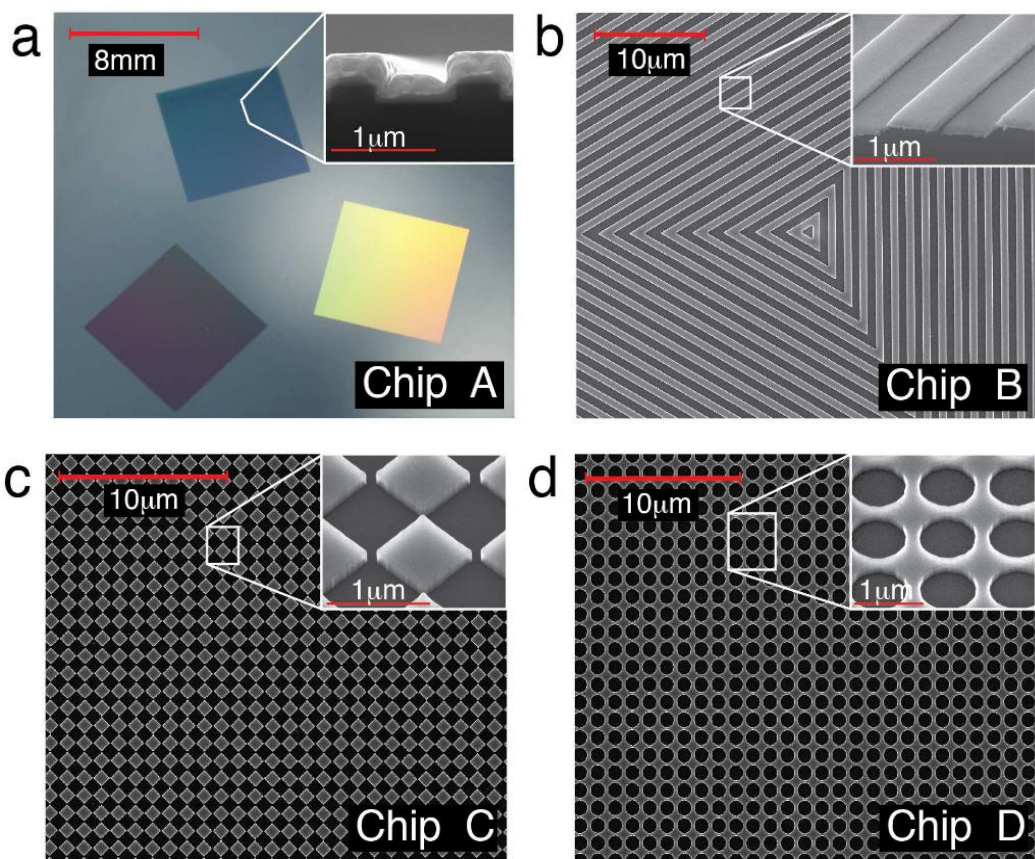
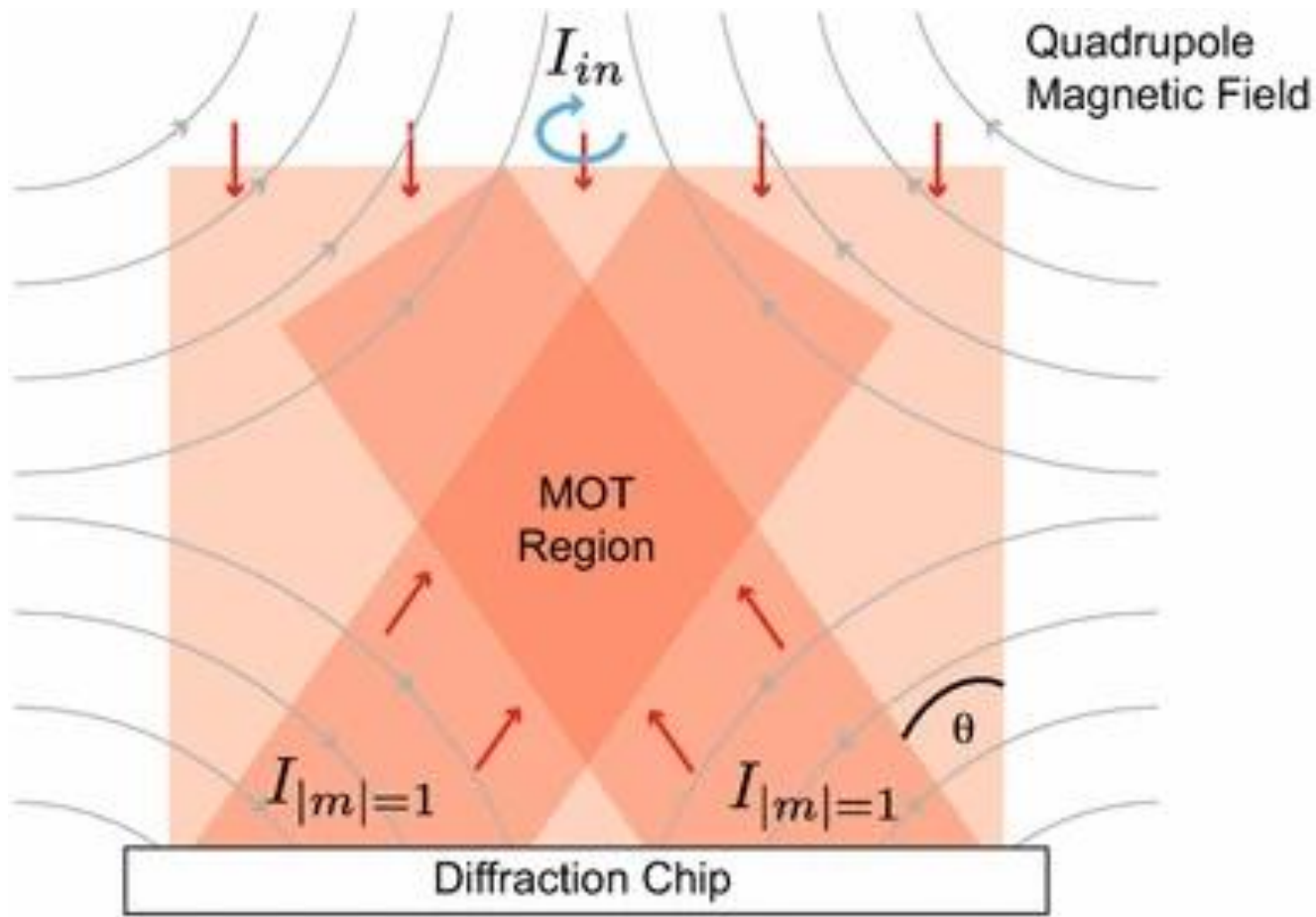
Оптический чип
(ИСАН-МФТИ)



Электронная микроскопия

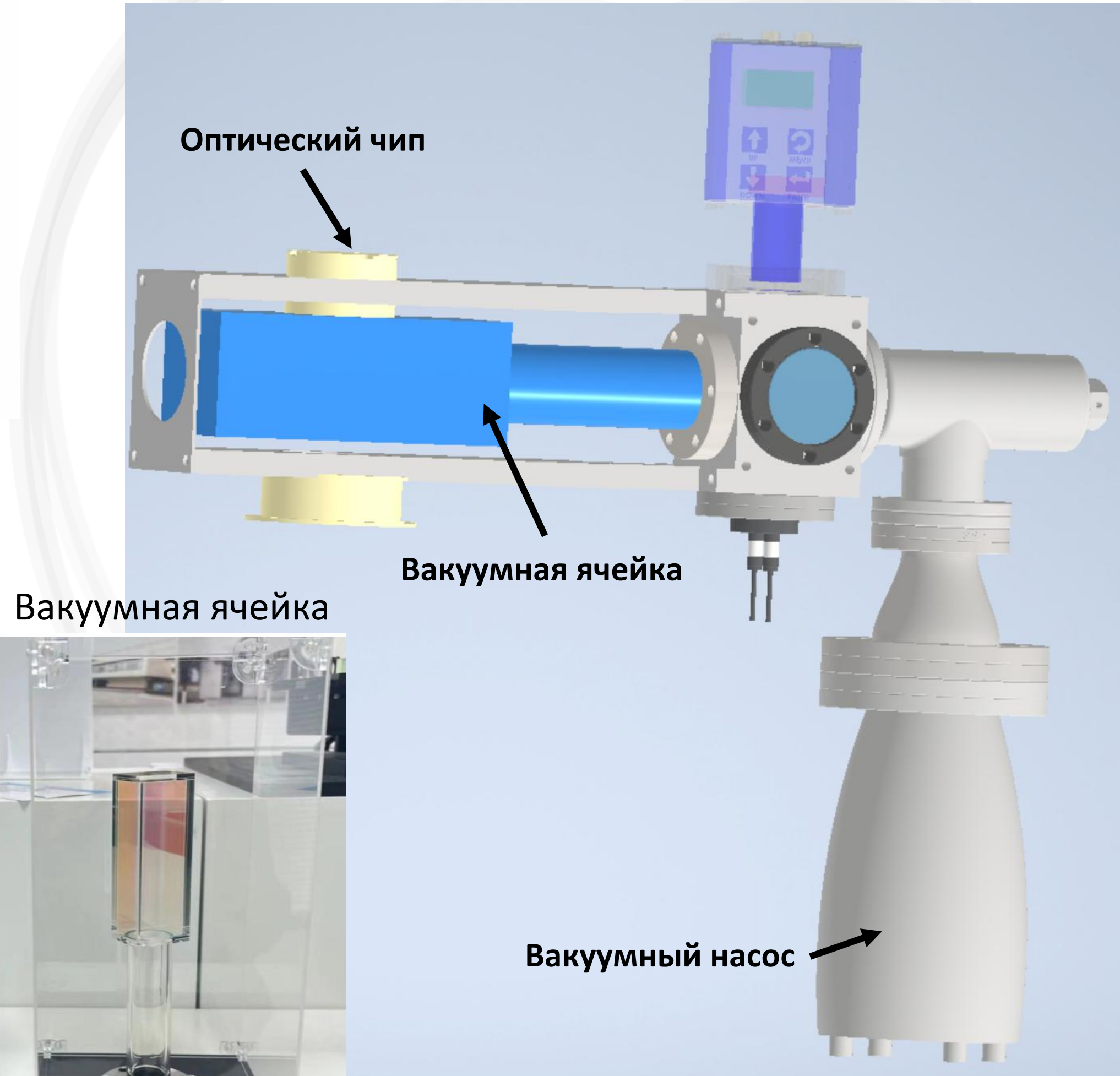


Принцип действия

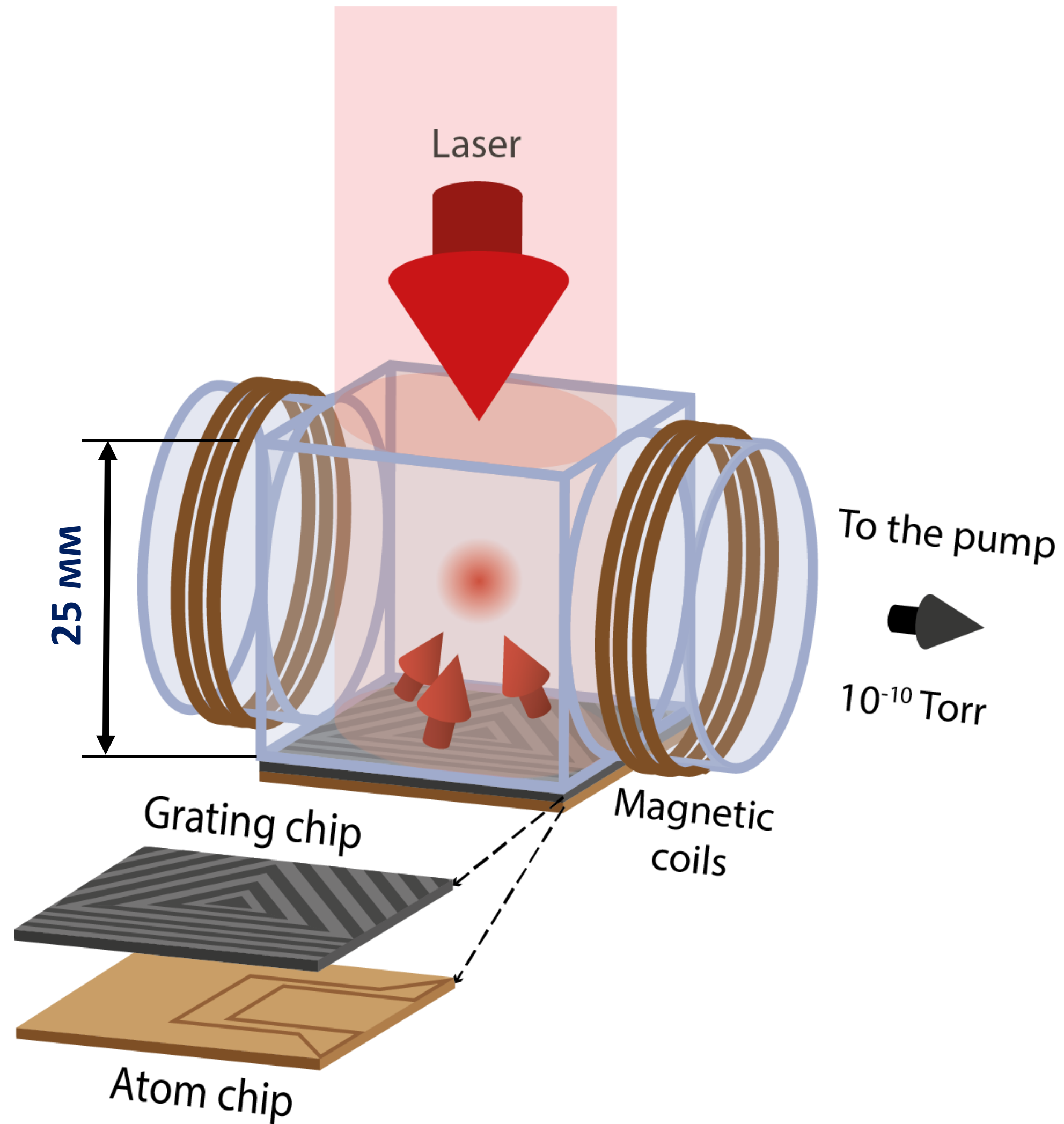


Cotter, J. P., McGilligan, J. P., Griffin, P. F., Rabey, I. M., Docherty, K., Riis, E., ... & Hinds, E. A. (2016). Design and fabrication of diffractive atom chips for laser cooling and trapping. *Applied Physics B*, 122, 1-6.

Модель создаваемой в ИСАН
экспериментальной установки



Перспективный компактный модуль для квантовой сенсорики на основе холодных атомов



Области применения:

1. Атомные часы (транспортируемые, спутники)
2. Акселерометры
3. Гироскопы
4. Гравиметры
5. Магнетометры
6. др.

Предложения по развитию отечественных технологий фотоники

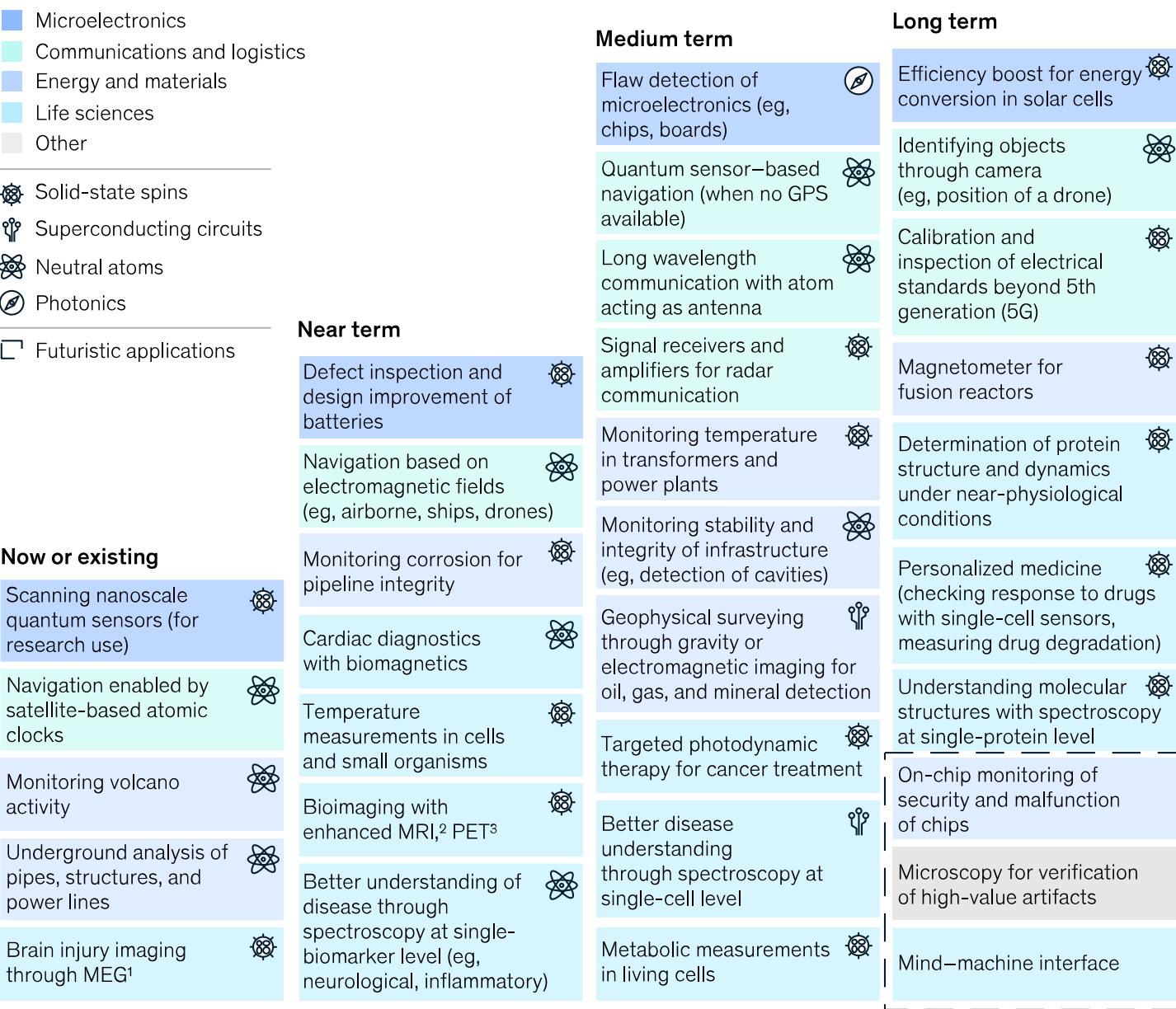
Начать развитие квантовой сенсорики в Российской Федерации.



Мировые тренды

Quantum sensing shows both short- and long-term potential for use cases in many industries.

Development timeline for quantum-sensing technologies, nonexhaustive



¹Magnetoencephalography.
²Magnetic resonance imaging.
³Positron emission tomography.
Source: Quantum sensing use cases: prospects and priorities for emerging quantum sensors, Quantum Economic Development Consortium, September 2022

Направления развития

- Навигация
- Телекоммуникация
- Промышленная безопасность

Предложения по развитию важнейших технологий на период до 2030 года

- Компактные атомные часы на основе холодных атомов

Предложения по развитию технологий на долгосрочную перспективу

- Атомная интерферометрия

Наличие/отсутствие компетенций/задела в указанных направлениях

- Ряд направлений развиваются в виде инициативной НИР

Сведения об уровне развития зарубежных технологий по тематике

- По всем направлениям существуют коммерчески доступные приборы
- Проводятся активные исследования размещения систем с холодными атомами на борту летательных аппаратов
- Проводятся активные исследования по использованию систем на основе холодных атомов в космическом пространстве

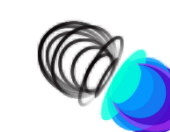
Оценка достигаемого результата от внедрения предлагаемых технологий

- Суверенитет в области квантовых технологий

Перечень потенциальных организаций-исполнителей

- ВНИИФТРИ, ИСАН, ИЛФ, ФИАН

Предложения в дорожную карту развития фотоники и оптоэлектроники на ближайшую и долгосрочную перспективу



ФОРУМ
БУДУЩЕЕ
ФОТОНИКИ



Включить разработку компактных атомных стандартов частоты на основе ультрахолодных атомов в Комплексную программу обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации в области фотоники «Развитие фотоники на период до 2030 года» и плановый период до 2035 года

Спасибо за внимание!



25 Июня 2025 г.

