

Торжественное заседание Президиума СО РАН,
посвященное 55-летию Сибирского отделения
Российской академии наук

16 ноября 2012 года

Квантово-оптические технологии: прорыв в будущее

академик С.Н. Багаев

**Институт лазерной физики
Новосибирск, Россия**

Лауреаты Нобелевской премии по физике (1964)



А.М.Прохоров



Н.Г.Басов



Ч.Таунс

Нобелевская премия по физике за фундаментальные работы в области квантовой электроники, приведшие к созданию генераторов и усилителей на основе принципа мазера – лазера

Лауреаты Нобелевской премии по физике (2012)



Серж Харош

Дэвид Вайнленд

Нобелевская премия по физике за прорывные экспериментальные работы, позволяющие измерять и манипулировать отдельными квантовыми системами.

Современные проблемы оптики и лазерной физики

1. Лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения с использованием ультрахолодных атомов и ионов ($T < 10^{-3}$ - 10^{-6} K) и оптические стандарты частоты нового поколения ($\delta\nu/\nu \sim 10^{-17}$ - 10^{-18}).
2. Фемтосекундные оптические часы: фундаментальные физические эксперименты и глобальная навигационная система.
3. Генерация атто- и фемтосекундных лазерных импульсов экстремальной интенсивности (10^{24} – 10^{26} Вт/см²), релятивистская и ультра-релятивистская оптика и новые направления в науке и технологии, включая:
 - физика взаимодействия экстремальных световых полей с веществом;
 - создание источников когерентного излучения в рентгеновском и γ диапазонах;
 - ускорение заряженных частиц (электроны, позитроны, ионы) мощным фемтосекундным излучением;
 - создание компактных лазерных ускорителей протонов для медицинской диагностики и терапии;

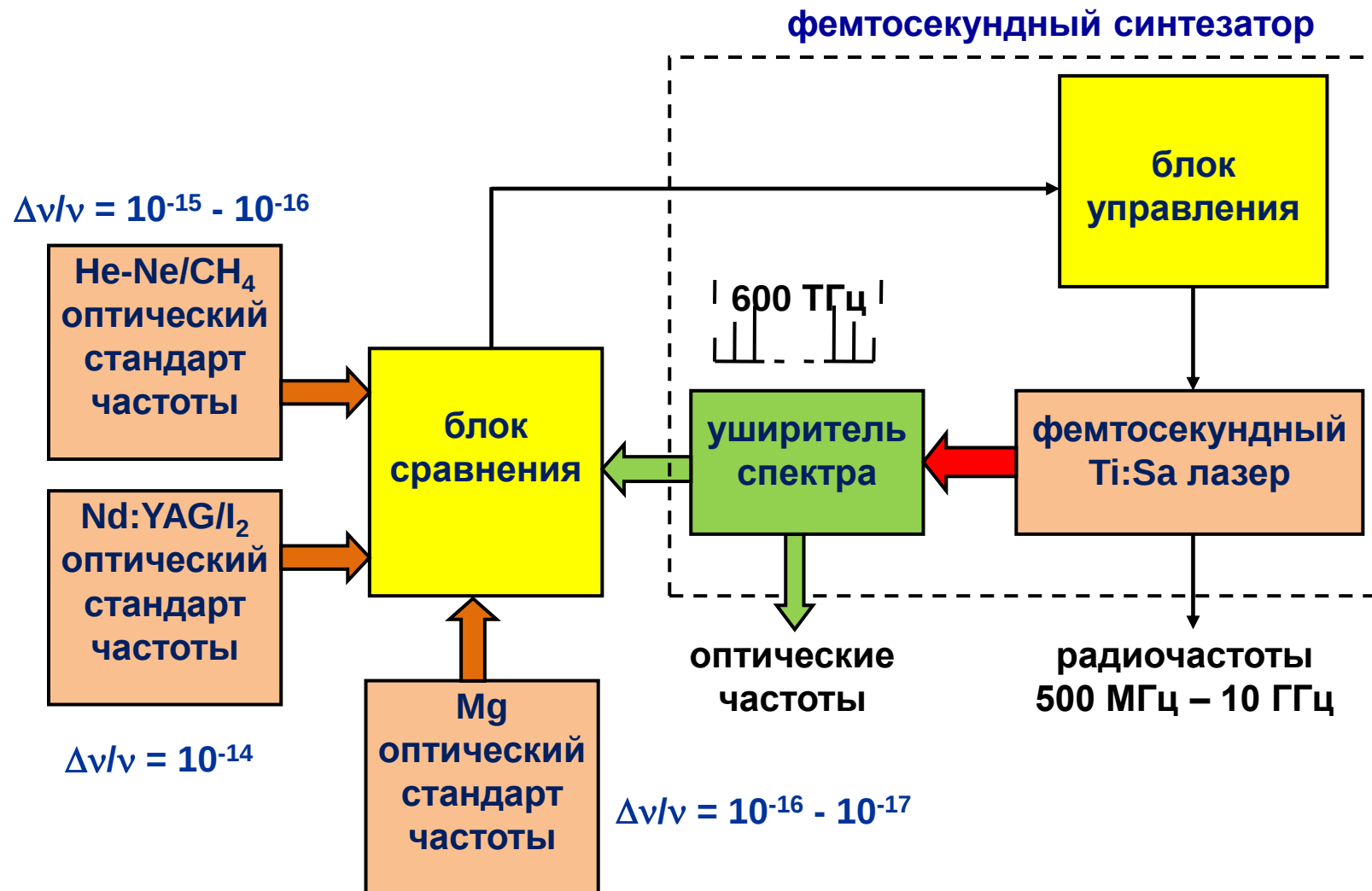
4. Мощные твердотельные лазеры с диодной накачкой ($P > 100$ кВт) с использованием в качестве активной среды нового перспективного материала – лазерной (оптической) керамики.
5. Ультрахолодные атомы и атомная оптика.
6. Квантовая оптика, квантовая информация и квантовые компьютеры, квантовая криптография.
7. Нанофотоника и нанотехнологии.
8. Создание высокоинтенсивных лазерных источников ТГц излучения для решения задач в области физики, химии и биомедицины.
9. Лазерный мониторинг окружающей среды и проблемы экологии.
10. Лазерные технологии в промышленности и новые лазерно-плазменные нанотехнологии.
11. Лазерный мониторинг геодинамики и прогноз землетрясений.
12. Лазеры в медицине и биологии.

Этапы развития оптических часов

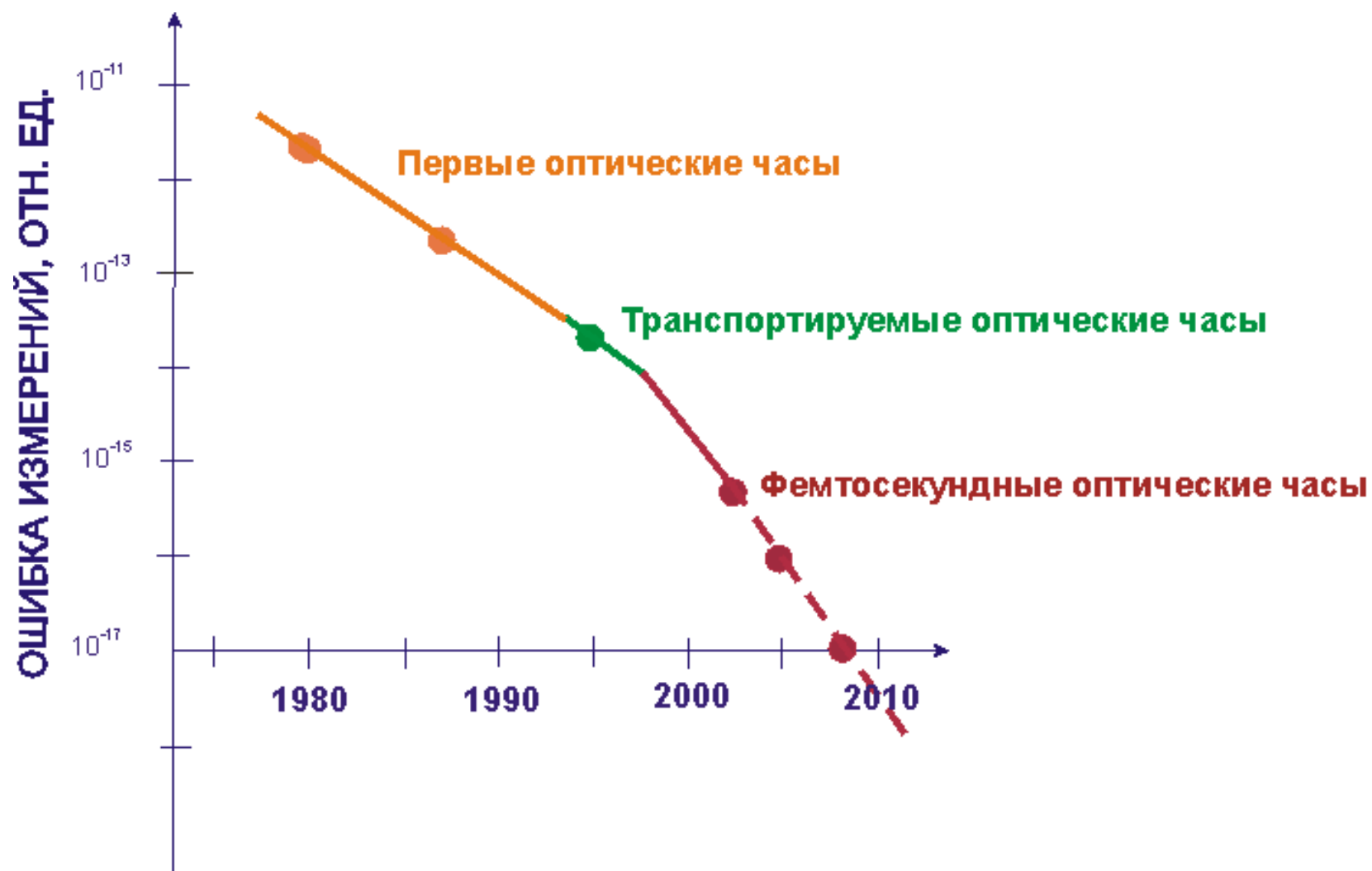
- 1981** – **Первые в мире оптические часы**
(Институт лазерной физики, Новосибирск, точность измерений частоты и времени: $10^{-11} - 10^{-12}$)
- 1996** – **Транспортируемые оптические часы**
(Институт лазерной физики, Новосибирск, точность измерений частоты и времени: $10^{-13} - 10^{-14}$)
- 2000-2001**
по настоящее время – **Фемтосекундные оптические часы**
(точность измерений частоты и времени: 10^{-16} и выше)

С.Н.Багаев и др. *Appl. Phys. B.*, v.70, p.375, 2000.

Блок-схема универсальных ФОЧ ИЛФ СО РАН



Точность абсолютных измерений частоты



Стандарты частоты: состояние и перспективы

1) Мобильные (транспортируемые) оптические стандарты частоты

He-Ne/CH₄ ($\Delta\nu/\nu \sim 10^{-15} - 10^{-16}$), Nd:YAG/I₂ ($\Delta\nu/\nu \sim 10^{-14}$),

Yb:YAG/I₂ ($\Delta\nu/\nu \sim 10^{-15}$)

2) Оптические стандарты частоты на «ультрахолодных» атомах и ионах ($T \leq 1 \mu\text{K}$) с использованием методов лазерного охлаждения частиц и их локализации в оптических ловушках

Q – фактор (добротность): $10^{13} - 10^{14}$

Атомы: Ca, ^{24,26}Mg, ¹⁷⁴Yb, ⁸⁷Sr, ⁸⁸Sr, Hg ⁸⁷Sr $\Delta\nu/\nu = 1 \times 10^{-16}$

Перспективы: ²⁴Mg, ⁸⁷Sr $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-17} - 10^{-18}$

одиночные ионы: Hg⁺, Al⁺, Yb⁺, Sr⁺, In⁺... Hg⁺, Al⁺ $\Delta\nu/\nu = 1.9 \times 10^{-17}$

Перспективы: Yb⁺, In⁺, Hg⁺, Al⁺ $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-18}$

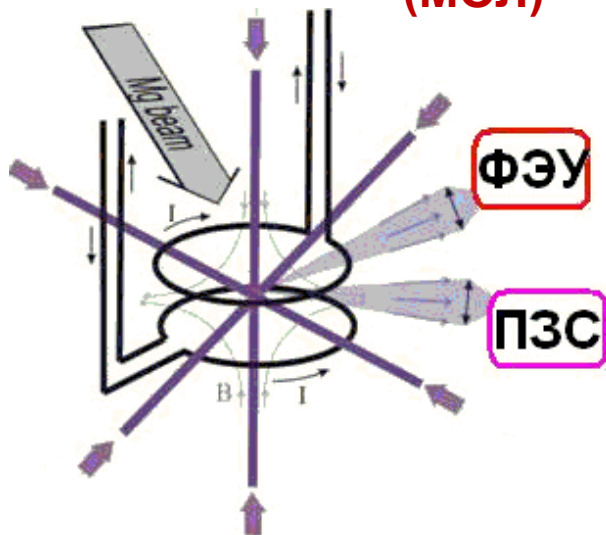
3) Прямая связь между частотами оптического и микроволнового диапазона с помощью фемтосекундного синтезатора

$$\Delta(\nu_{\text{opt}} \rightarrow \nu_{\text{microw}}) \sim 10^{-18}$$

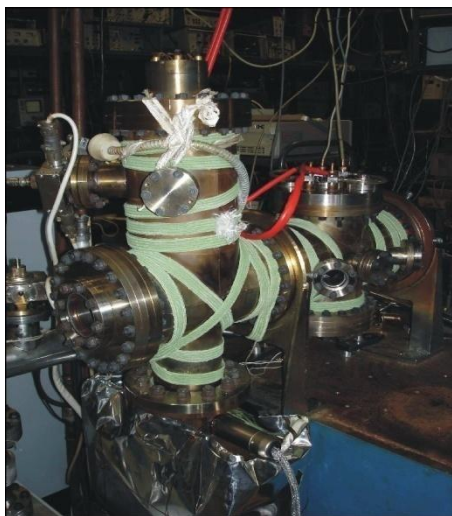
Сверхточные оптические часы с погрешностью на уровне 10^{-17} - 10^{-18} станут реальными квантовыми инструментами для:

- углубления наших знаний в области фундаментальных физических принципов природы (принципиальные эксперименты в физике);
- реализации точного контроля полетов космических аппаратов в дальнем космосе;
- создания нового поколения систем спутниковой навигации (ГЛОНАСС и др.), позволяющих реализовать субсантиметровую точность мониторинга объектов и управления ими на Земле и в космосе;
- повышения точности астрономических наблюдений (в радиотелескопах, оптических каналах связи со спутниками и т.п.);
- сверхточной синхронизации национальных шкал времени разных стран.

Схема магнитооптической ловушки (МОЛ)



Высоковакуумная ($P \leq 10^{-9}$ Торр) камера МОЛ для атомов магния



Облако охлажденных ($T \leq 3$ мК) и локализованных в МОЛ атомов магния ($N \sim 10^6$)

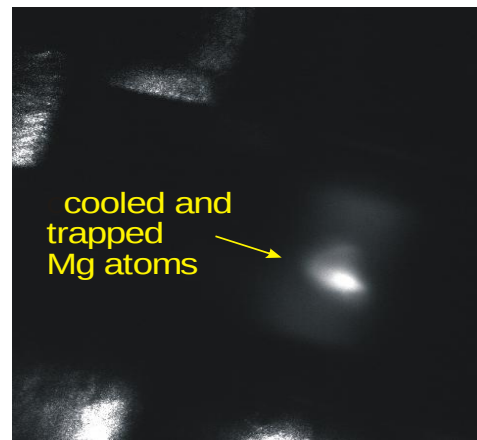
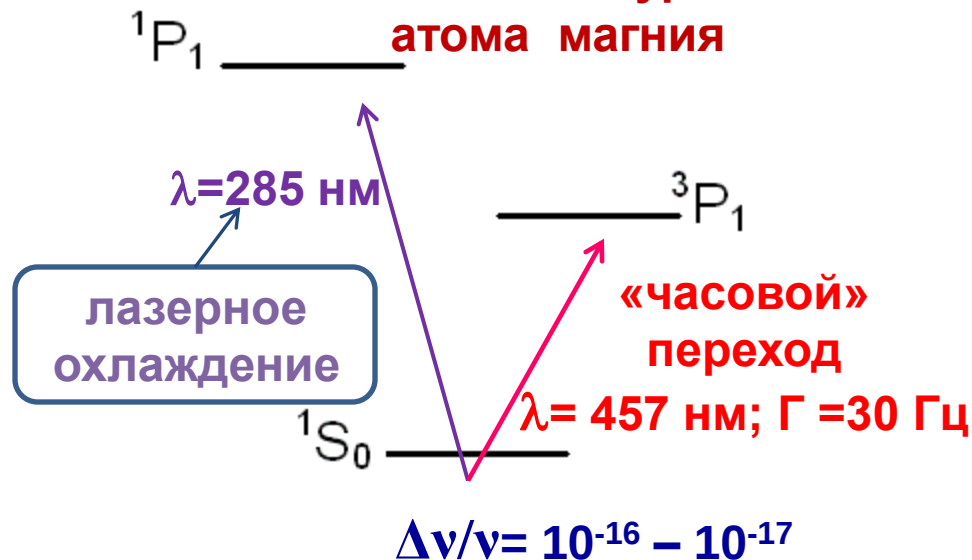
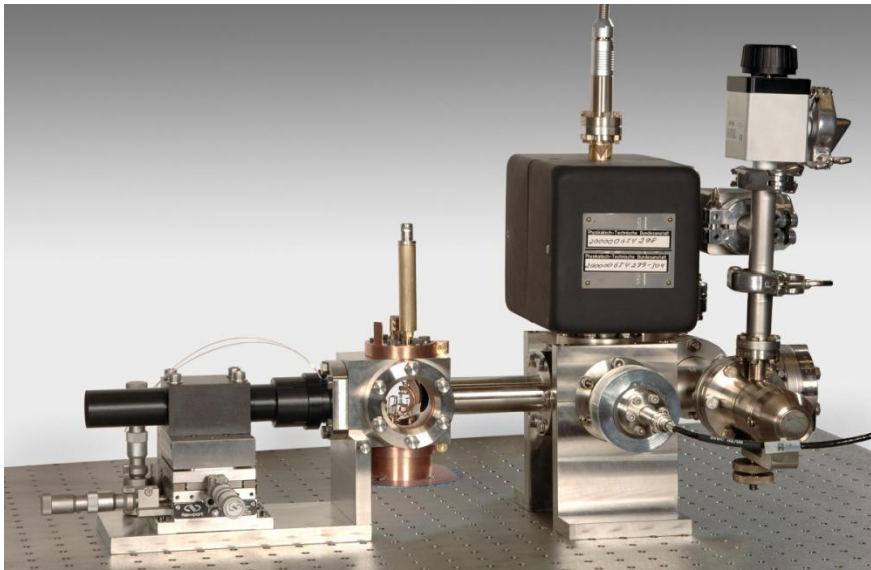


Схема нижних уровней атома магния



В ИЛФ СО РАН впервые в мире предложен метод существенного (вплоть до трех порядков от своей величины) подавления сдвига частоты «часового» перехода в атоме или ионе, связанного с тепловым излучением окружающей среды (т.н. «blackbody radiation shift»).

Например, для иона $^{171}\text{Yb}^+$, оказалось возможным подавить тепловой сдвиг до уровня 10^{-18} в достаточно широком диапазоне комнатных температур (300–15K). С использованием предложенного метода, в ИЛФ СО РАН совместно с Физико-техническим Институтом (PTB, Брауншвейг, Германия) ведутся работы по созданию $^{171}\text{Yb}^+$ - оптического стандарта частоты со стабильностью $10^{-17} - 10^{-18}$.



$^{171}\text{Yb}^+$ ионная ловушка
и вакуумная система откачки.

V.I. Yudin, A.V. Taichenachev, M.V. Okhapkin, S.N. Bagayev, Chr. Tamm, E. Peik, N. Huntemann, T.E. Mehlstäubler, F. Riehle. Atomic clocks with suppressed blackbody radiation shift. Phys. Rev. Lett., Vol. 107, 030801 (2011).

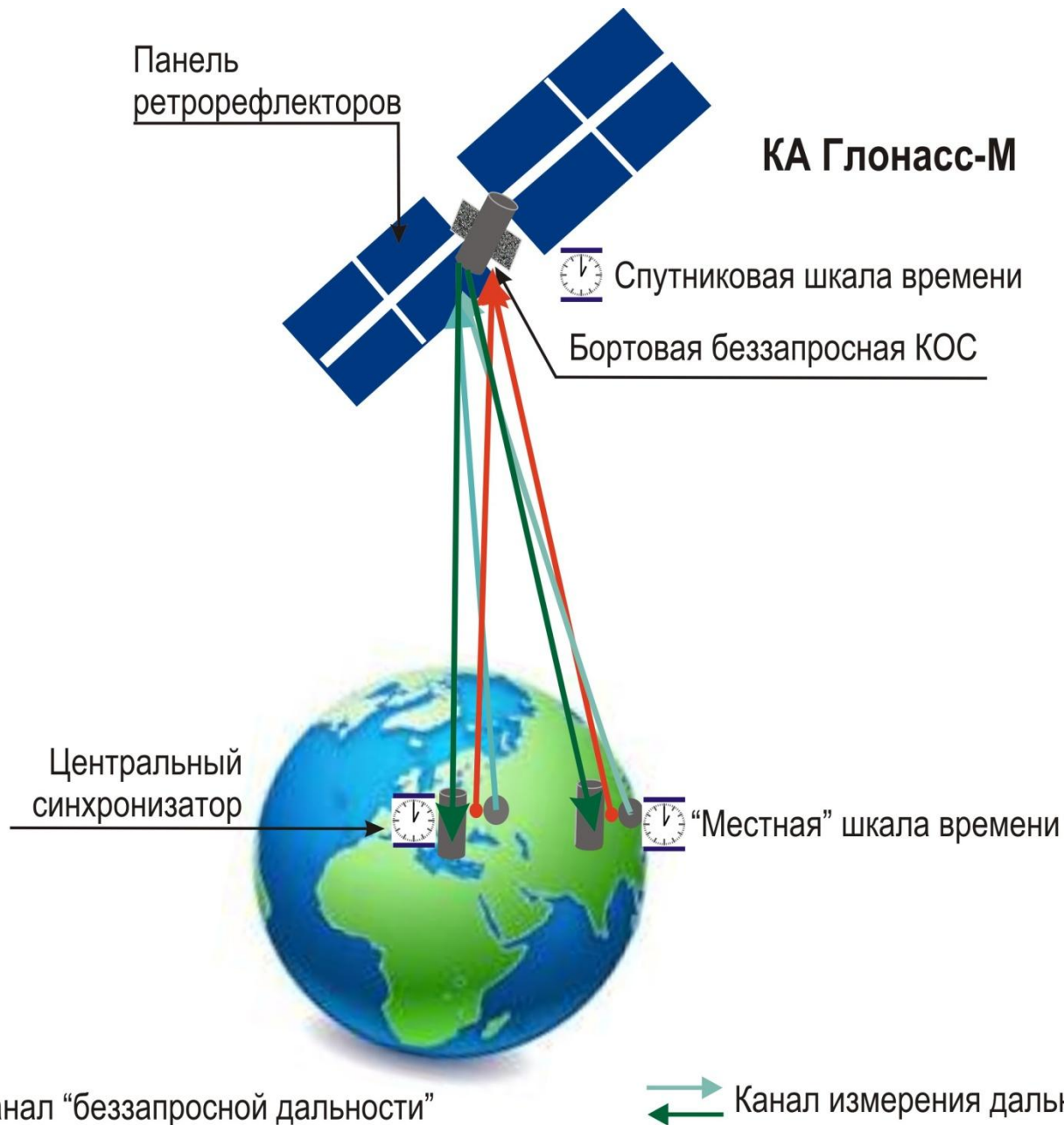
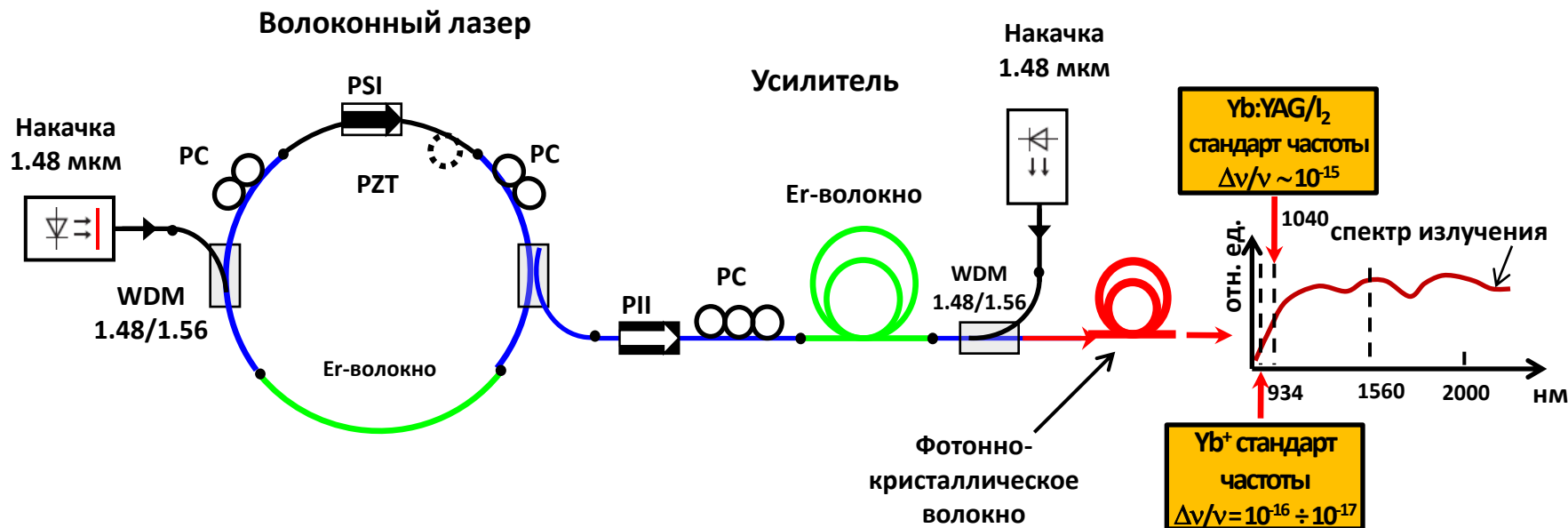


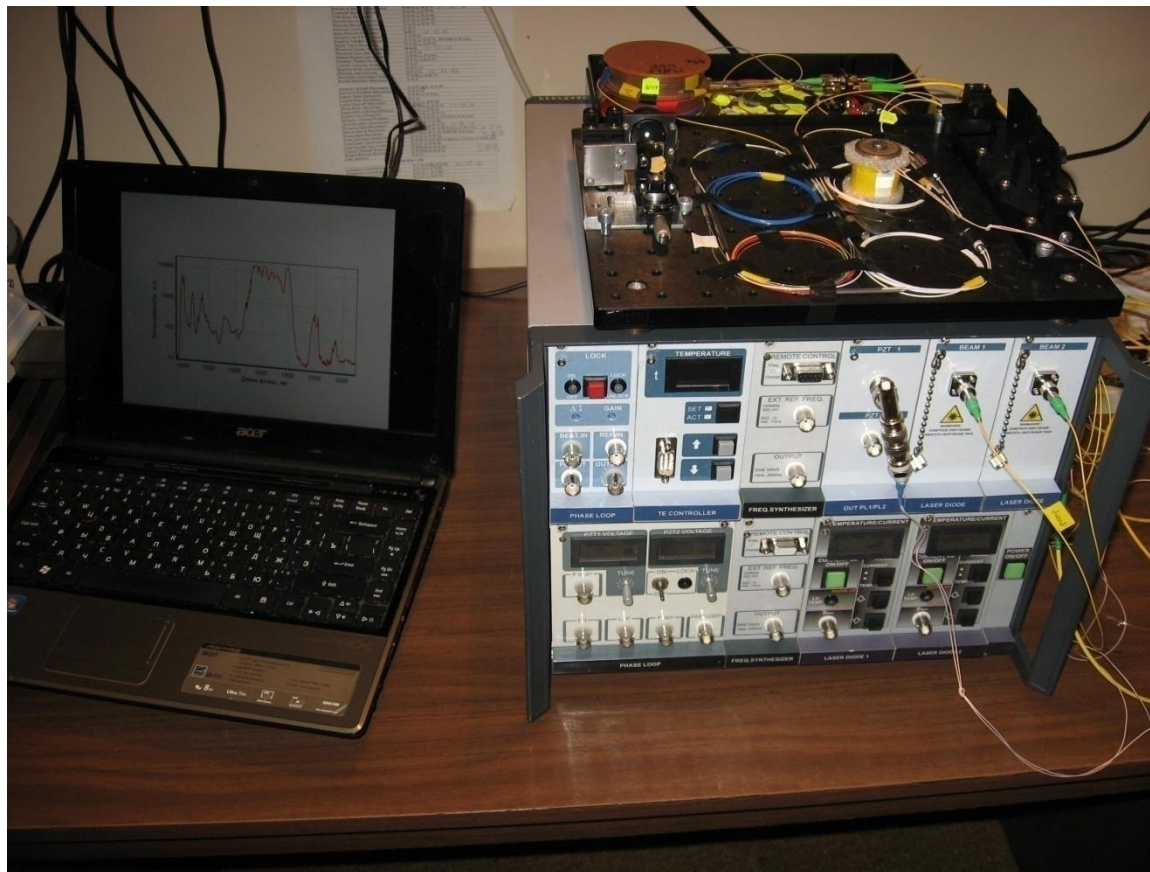
Схема передачи времени на удаленный наземный пункт с помощью беззапросной квантово-оптической системы

Схема мобильных волоконных фемтосекундных оптических часов с Yb:YAG/I₂ и Yb⁺ стандартами частоты



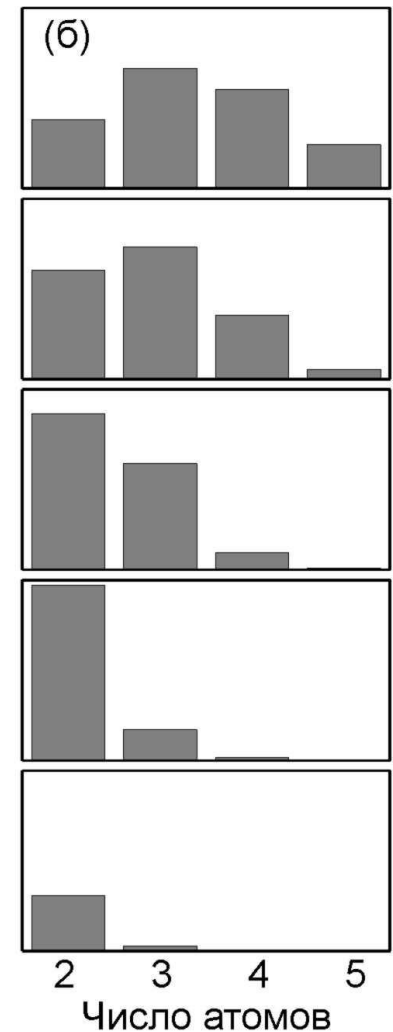
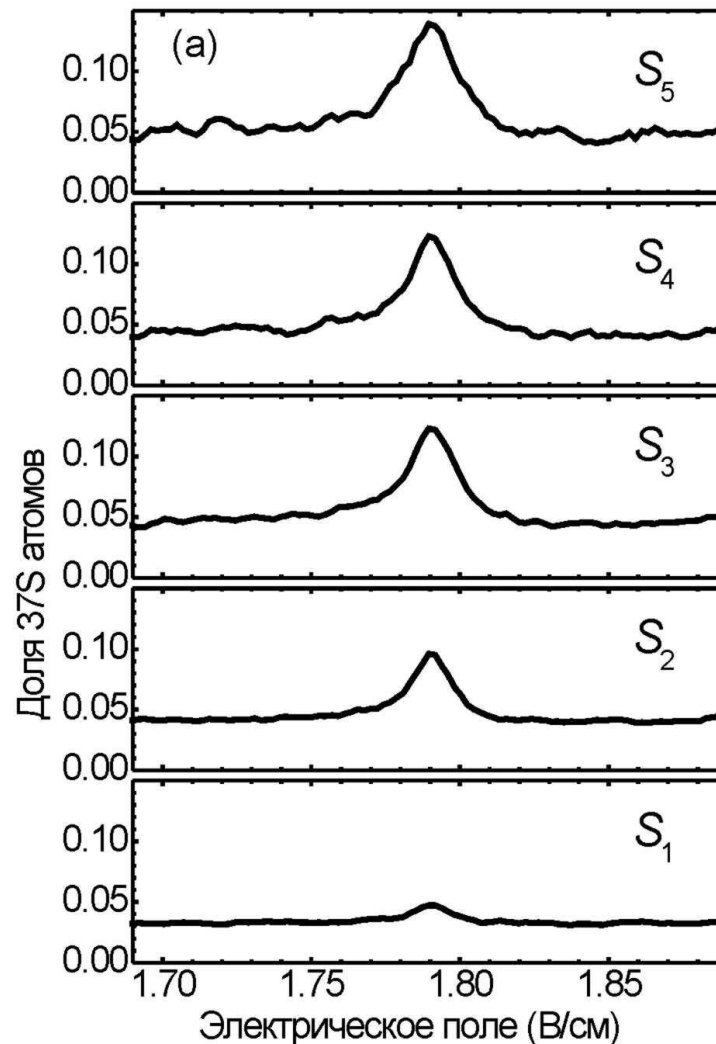
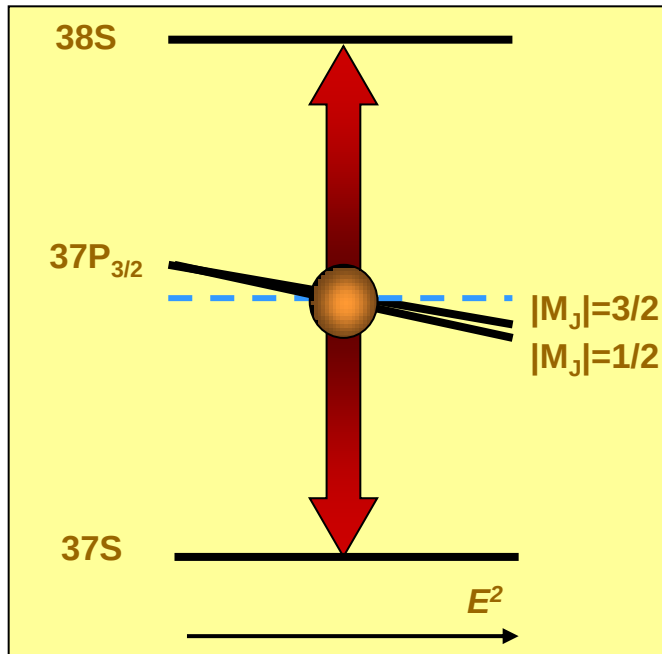
центральная длина волны ~ 1,56 мкм;
длительность импульса ~ 200 - 150 фс;
средняя мощность без усилителя ~ 20 мВт;
средняя мощность с усилителем ~ 130 мВт;
суперконтинуум – 900 ÷ 2300 нм.

Волоконный синтезатор радио-оптических частот с электронным блоком накачки и управления



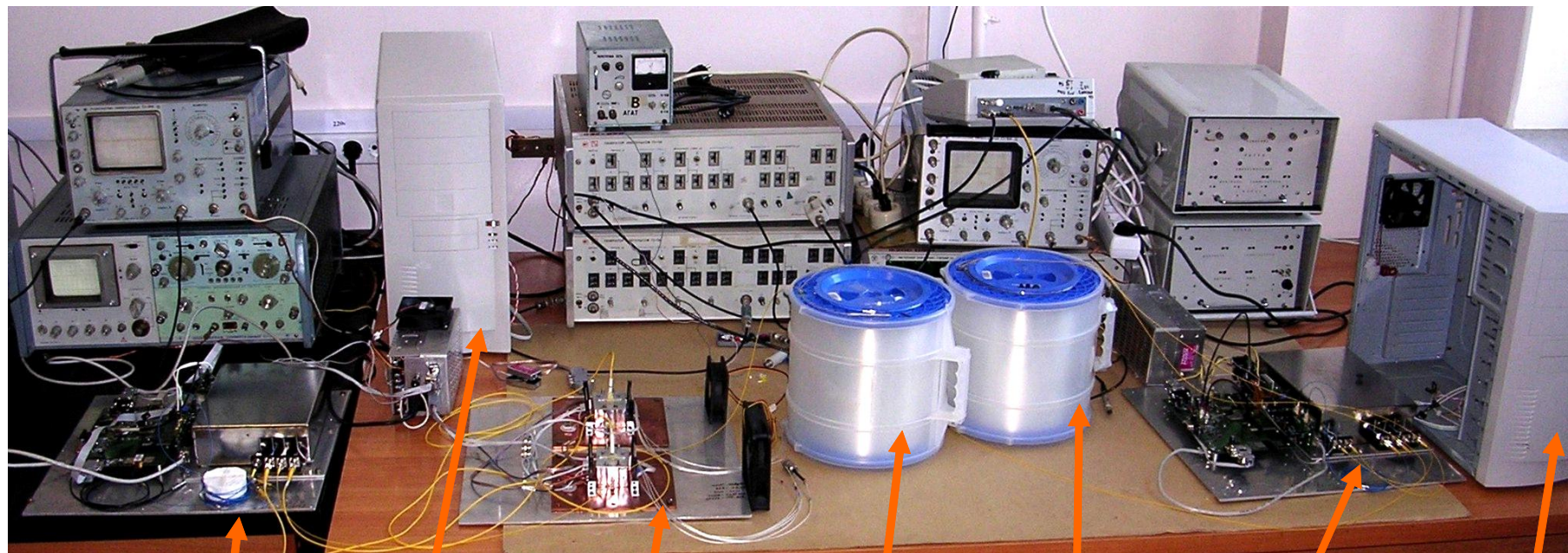
Первое наблюдение резонансного диполь-дипольного взаимодействия двух ридберговских атомов

Резонанс Фёрстера



I.I.Ryabtsev, D.B.Tretyakov,
I.I.Beterov, V.M.Entin,
Phys. Rev. Lett. 2010, v.104,
p.073003

Экспериментальная система для генерации квантового ключа в оптоволоконной линии связи (разработка ИФП СО РАН)



Модуль
БОО

Корпус
БОО

Модуль
детек-
торов

Квант.
канал
25 км

Накоп.
линия
25 км

Модуль
АЛИСА

Корпус
АЛИСА

Длина оптической линии

Частота лазерных импульсов

Среднее число фотонов в импульсе

Квантовая эффективность

Скорость генерации ключа

25-50 км (до 100 км в перспективе)

5 - 20 МГц

0,1 - 0,3

10 - 20%

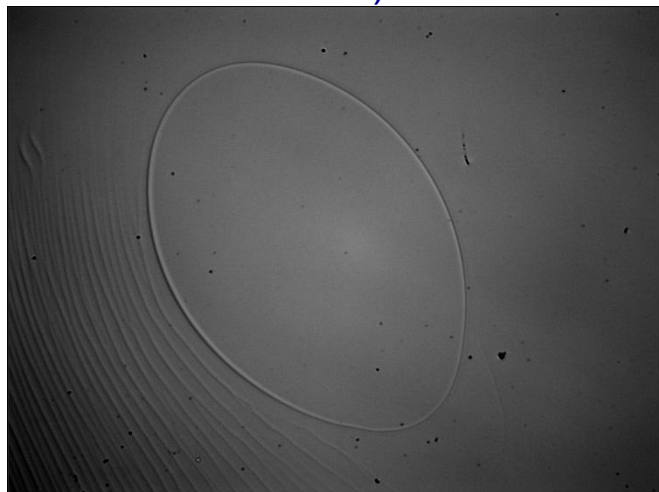
1-10 кбит/с

*В.Л.Курочкин, А.В.Зверев, Ю.В.Курочкин, И.И.Рябцев, И.Г.Неизвестный,
Микроэлектроника, 2011, т.40, №4, с.264-273.*

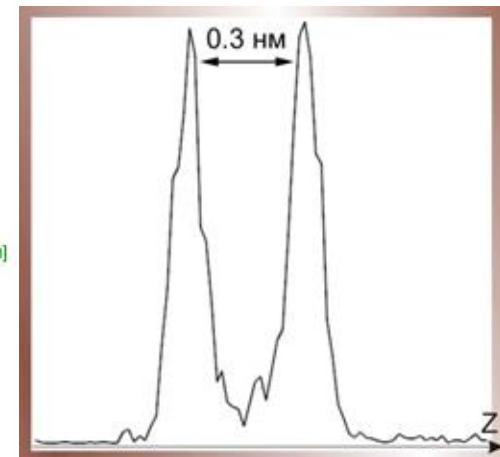
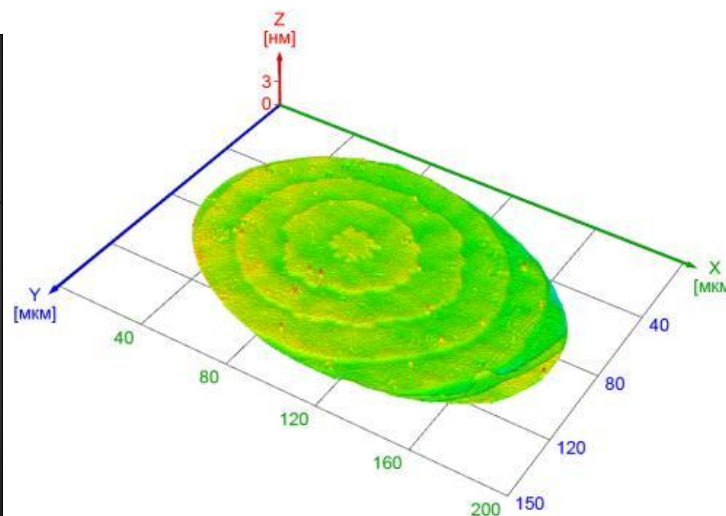


Оптическая нанопрофилометрия с субатомным разрешением по глубине

В КТИ НП СО РАН при использовании в низкокогерентном интерферометре **атомно-гладкого зеркала** (АГЗ) и оригинальных алгоритмов и программ достигнут «измерительный прорыв мирового уровня»: **разрешение по глубине при измерении рельефа удалось радикально улучшить в десятки раз – до десятков пикометров**. Изготовитель АГЗ – ЦКП «Наноструктуры» при Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (чл.-к. РАН А.В. Латышев).



Атомно-гладкое зеркало
в измерительной зоне
(размеры зеркала $160 \times 200 \mu\text{m}$)



3D рельеф и гистограмма высот
измеренных одноатомных ступеней
на поверхности кристалла Si.

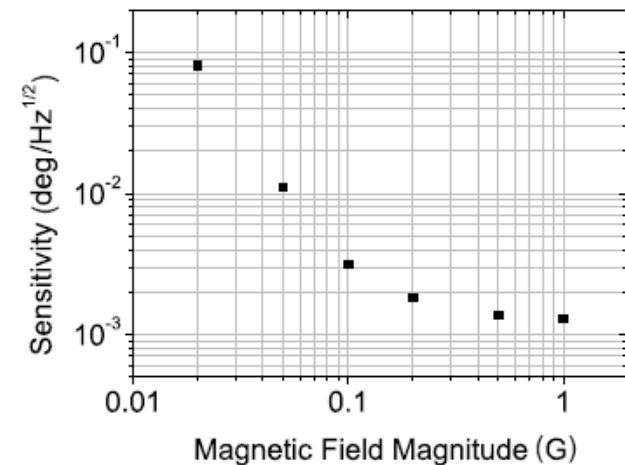
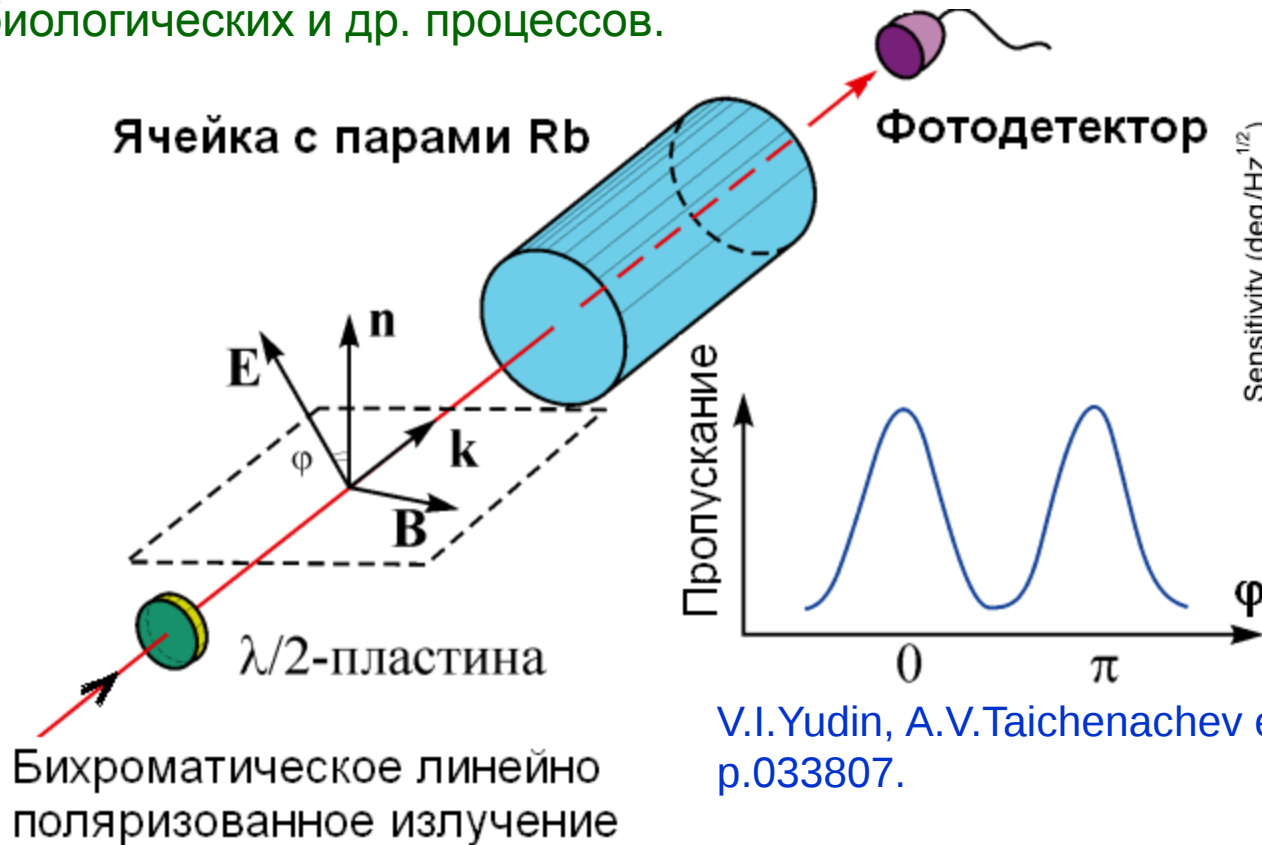
Разрешение по глубине – менее 50 пикометров

Экспериментально подтверждено, что оптическими методами можно измерять **высоту** нанорельефа поверхности **в один атом**. Это открывает возможность создания эффективных бесконтактных измерительных систем с субатомным разрешением по глубине.

Новый метод квантовой магнитометрии

В ИЛФ СО РАН на основе нестандартной схемы возбуждения резонансных уровней атомов ^{87}Rb линейно поляризованным бихроматическим полем разработан и исследован принципиально новый метод векторной квантовой магнитометрии, позволяющий измерять направление магнитного поля с беспрецедентной точностью – до уровня одной угловой секунды.

Метод может найти широкое применение в современных навигационных системах, контрольно-измерительных приборах для мониторинга физических, геофизических, биологических и др. процессов.



V.I.Yudin, A.V.Taichenachev et al. Phys. Rev. A, 2010, v.82, p.033807.

Лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения и оптические стандарты частоты (исторические этапы)

1967 – 1968

- Предложен метод насыщенного поглощения (В.С.Летохов, В.П.Чеботаев)
- Первое наблюдение узких оптических резонансов насыщенного поглощения в He-Ne/Ne лазере ($\lambda = 0.63$ мкм) (В.Н.Лисицын и В.П.Чеботаев)
- Первое использование резонансов насыщенного поглощения для стабилизации частоты лазера (С.Н.Багаев и др.)
- Предложено использование колебательно-вращательных переходов молекул, в частности, CH_4 , на $\lambda=3.39$ мкм (С.Н.Багаев, В.П.Чеботаев)

В.С.Летохову и В.П.Чеботаеву в 1978 году присуждена Ленинская премия.

1. В.С.Летохов, Письма ЖЭТФ., 1967, т. 6, с. 597-600.
2. В.Н.Лисицын, В.П.Чеботаев, Sov. Phys.-ЖЭТФ, 1968, т. 27, с. 227-229.
3. С.Н.Багаев, Ю.Д.Коломников, В.П.Чеботаев, Доклады на Научно-технической конференции по квантовой электронике, Ереван, 1967; IEEE J. of Quantum Electronics, 1968, т. QE-4, с. 868.

Фемтосекундные оптические часы

Революционным прорывом в области увеличения точности абсолютных измерений оптических частот на несколько порядков явилось предложение об использовании особенностей излучения фемтосекундного лазера стабилизированного по оптическому стандарту частоты. Передача частоты из оптического в радиодиапазон происходит в одном каскаде. (Bagayev S.N., Chebotayev V.P., Klementyev V.M., Pyltsin O.I., *Proceedings of the Tenth International Conference on Laser Spectroscopy*; M. Ducloy, E. Giacobino and G. Camy, eds. World Scientific, 1991, p.91). Такие оптические часы называются фемтосекундными оптическими часами (ФОЧ).

Оптические стандарты частоты нового поколения на ультрахолодных атомах и ионах

Конкуренция между одиночными ионами и нейтральными атомами

Одиночные ионы: Hg^+ , Al^+ , Yb^+ , Sr^+ , In^+ ...

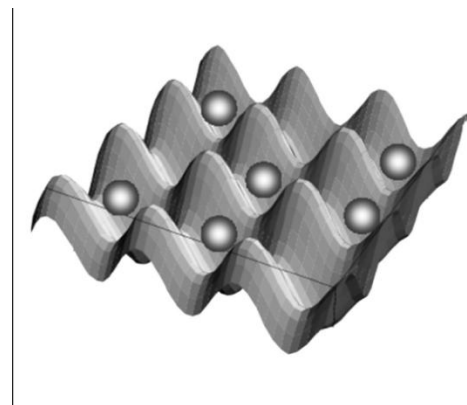
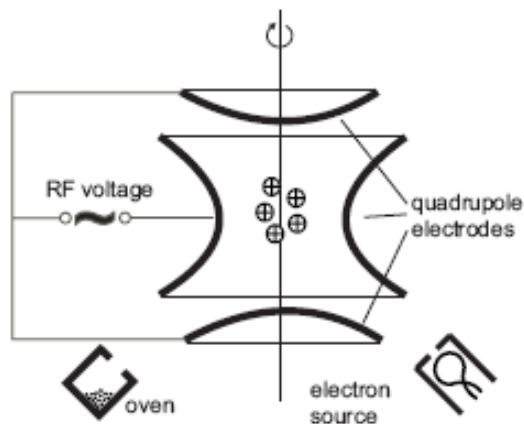
Щелочноземельные атомы: Ca , Mg , $^{174,173}\text{Yb}$, $^{87,88}\text{Sr}$, Hg ...

Лучший контроль движения

Лучшее отношение сигнал/шум;
число атомов $N_{\text{at}} \sim 10^4 - 10^6$

Более высокая точность

Более высокая стабильность



Оптическая
решетка

Эффекты движения атомов: квадратичный эффект Доплера, эффект отдачи, пролетный эффект являются основными ограничителями точности стандартов частоты

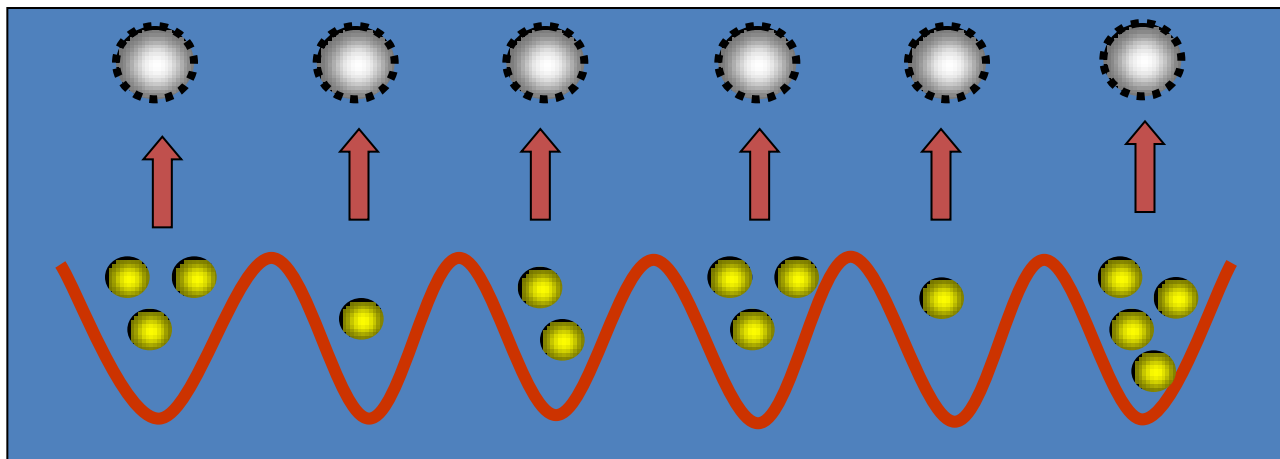


Оптические стандарты частоты нового поколения на ультрахолодных атомах и ионах

Экспериментальные исследования по созданию оптических стандартов частоты на холодных атомах и ионах ведутся в крупных метрологических центрах мира: NIST (США), PTB (Германия), SYRTE (Франция), NPL (Англия), Япония и Италия.

В России такие исследования ведутся в Институте лазерной физики СО РАН (Mg, Yb⁺, In⁺ - стандарты частоты) и во ВНИИФТРИ Росстандарта (Sr- стандарт частоты).

Детерминированное возбуждение одиночных ридберговских атомов на основе дипольной блокады и лазерных импульсов с чирпом частоты



Частота коллективных осцилляций

$$\Omega_N = \Omega_1 \sqrt{N}$$

