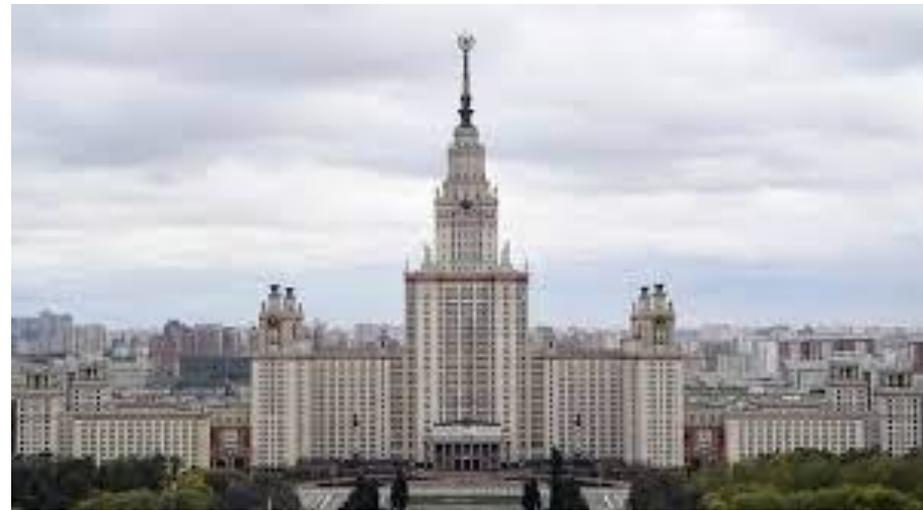




ВЫСОКОДОБРОТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МИКРОРЕЗОНАТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В НЕЛИНЕЙНОЙ И КВАНТОВОЙ ОПТИКЕ, МИКРОВОЛНОВОЙ ФОТОНИКЕ

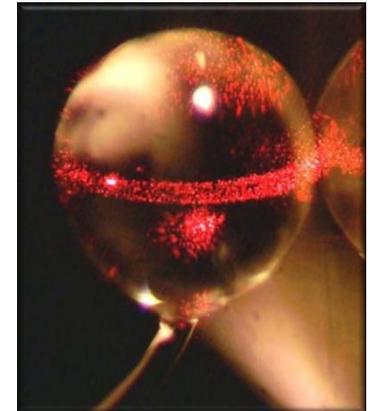
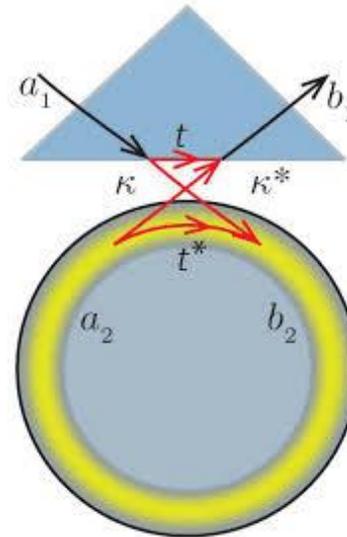
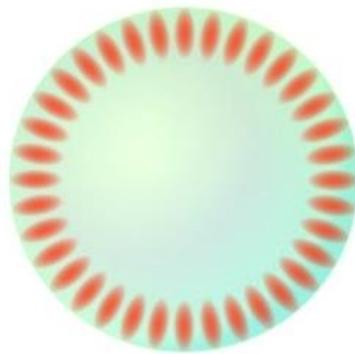
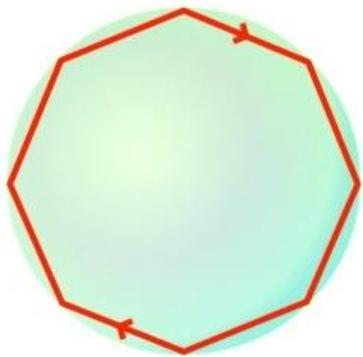
И.А. Биленко,
группа когерентной микрооптики и радиофотоники

**Российский Квантовый Центр,
Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова**





Моды типа «шепчущей галереи»



МШГ резонаторы – многомодовые. Для некоторых диэлектриков потери могут быть малы.



Историческая справка



В.Б. Брагинский
(1931-2016)



Nov 1986

$$V = 3.5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-5} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 = 4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^3$$

$$\epsilon = \frac{2W \cdot Q}{\omega} = \frac{2 \cdot 0.1 \text{ mW} \cdot 10^6}{3 \cdot 10^{15}} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^{15}} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{3} \approx 2 \cdot 10^{-6}$$

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{6 \cdot 3 \cdot 10^{10}}{7 \cdot 10^5} = 3 \cdot 10^{15}$$

$$\hbar \omega = 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^{15} = 3 \cdot 10^{-12}$$

$$\frac{\sum E^2 V}{8\pi} = \epsilon; \quad E^2 = \frac{8\pi \epsilon}{EV} = \frac{25 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 4 \cdot 10^{-10}} = 4 \cdot 10^4$$

$$E = 2 \cdot 10^2 \cdot 300 = 60 \frac{\text{mV}}{\text{cm}} \Rightarrow Q = 10^6$$

$$E = 6000 \frac{\text{mV}}{\text{cm}} \quad Q = 10^8 \text{ photons}$$

$$\left(\frac{\hbar \omega}{W}\right)_{\text{квант}} \approx \frac{1}{2} E^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^{-13} \cdot 4 \cdot 10^4 = 2 \cdot 10^{-9}$$

малая величина

Тепловой нагрев: — и связь с частотой.
СВЧ

Сидерическая ШИМ!

Тепловое расширение резонатора



1986: “Нам удалось сделать СВЧ-резонаторы WGM с $Q > 10^8$. Почему бы не попробовать оптику?”



Physics letters A, 137(7-8), 393-397.

QUALITY-FACTOR AND NONLINEAR PROPERTIES OF OPTICAL WHISPERING-GALLERY MODES

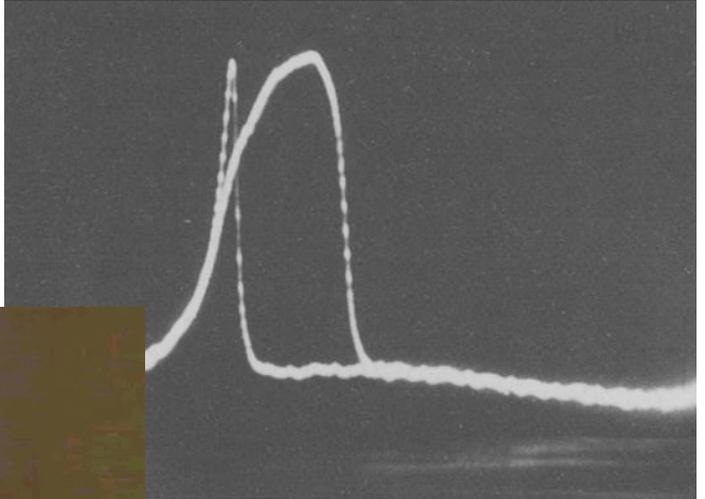
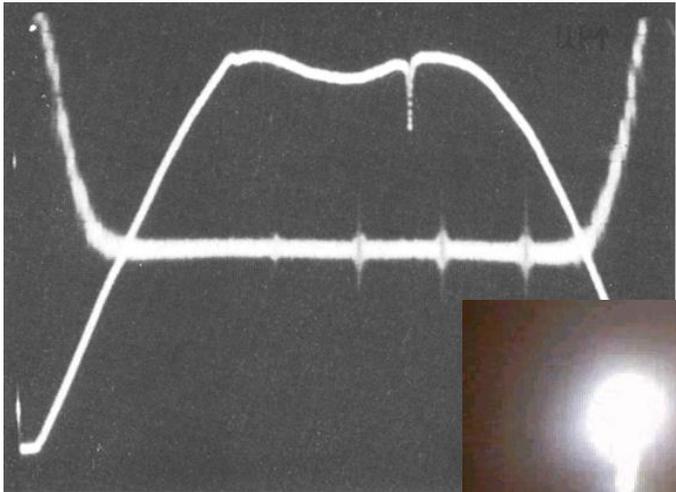
V.B. BRAGINSKY, M.L. GORODETSKY and V.S. ILCHENKO

Cited: 1153

Department of Physics, Moscow University, 119899 Moscow, USSR

Received 10 March 1989; accepted for publication 21 March 1989

The properties of optical resonators with quality-factor $Q \geq 10^8$, effective volume of e.m. field localization $V_{\text{eff}} \approx 10^{-9} \text{ cm}^3$ and threshold power of optical bistability $W_{\text{bist}} \approx 10^{-5} \text{ W}$ are described. The prospects to reduce V_{eff} and W_{bist} are discussed.





Whispering gallery modes – a retrospective

Ultimate Q of optical microsphere resonators

M. L. Gorodetsky, A. A. Savchenkov, and V. S. Ilchenko

We demonstrate the quality factor $Q = (0.8 \pm 0.1) \times 10^{10}$ of whispering-gallery modes in fused-silica microspheres at 633 nm, close to the ultimate level determined by fundamental material attenuation as

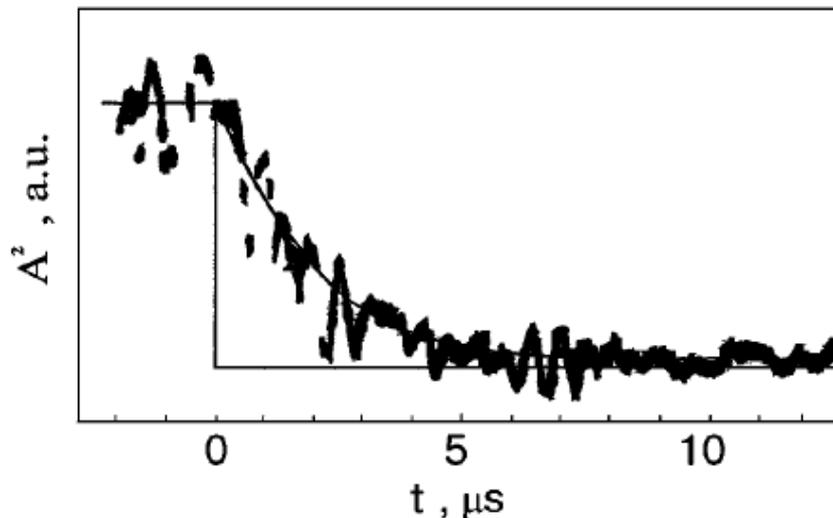


Fig. 1. Mode energy damping curve for a WG mode in a 750- μm sphere. Estimated damping time $\tau = 2.7 \mu\text{s}$; $\lambda = 633 \text{ nm}$.

Optics Letters 21(7), 453-455 (1996)

Cited: 1409



Whispering gallery modes – a retrospective

Ultimate Q of optical microsphere resonators

M. L. Gorodetsky, A. A. Savchenkov, and V. S. Ilchenko

We demonstrate the quality factor $Q = (0.8 \pm 0.1) \times 10^{10}$ of whispering-gallery modes in fused-silica microspheres at 633 nm, close to the ultimate level determined by fundamental material attenuation as

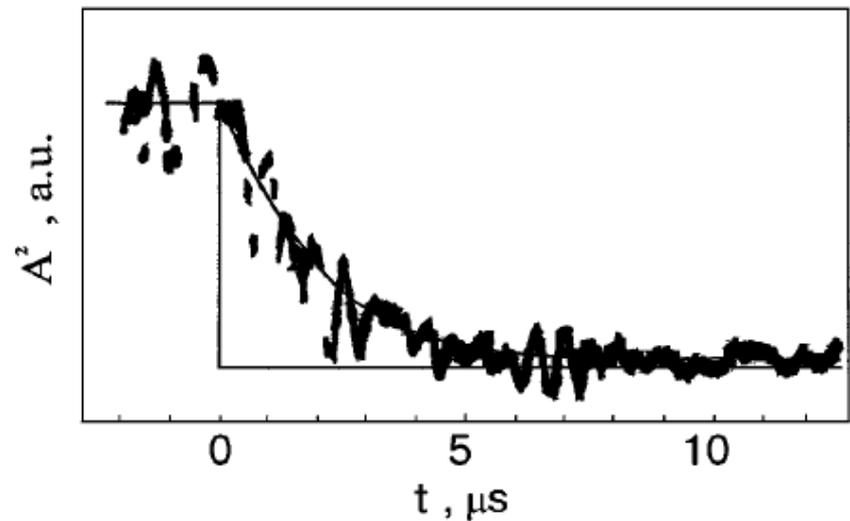
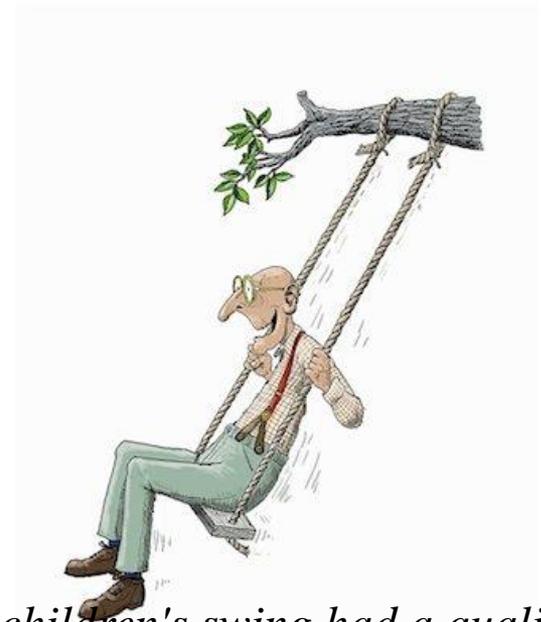


Fig. 1. Mode energy damping curve for a WG mode in a $750\text{-}\mu\text{m}$ sphere. Estimated damping time $\tau = 2.7 \mu\text{s}$; $\lambda = 633 \text{ nm}$.

Optics Letters 21(7), 453-455 (1996)

Cited: 1409



If a children's swing had a quality factor $Q \sim 10^9$, once pushed one could swing for 30 years!



Optics express, 15(11), 6768-6773 (2007)

Optical resonators with ten million finesse

Cited: 431

Anatoliy A. Savchenkov, Andrey B. Matsko, Vladimir S. Ilchenko, and Lute Maleki

Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, MS 298-100, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109-8099

Andrey.Matsko@jpl.nasa.gov

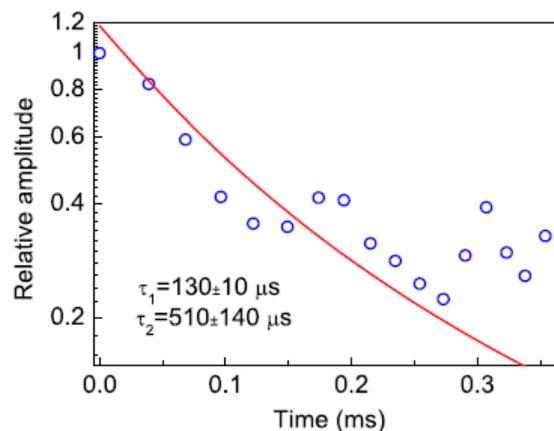
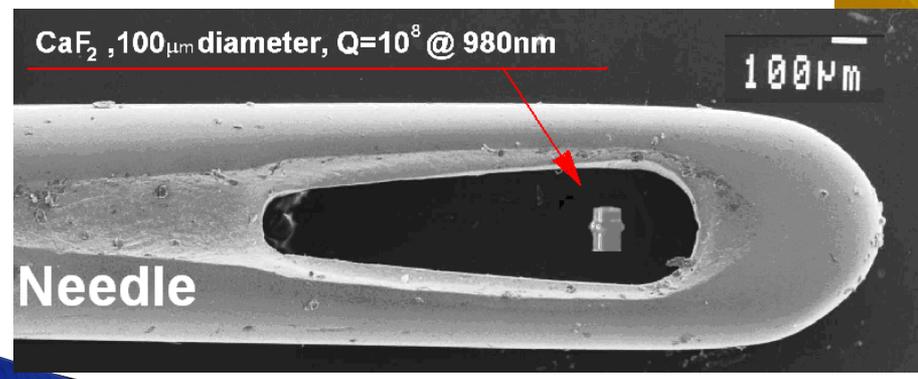
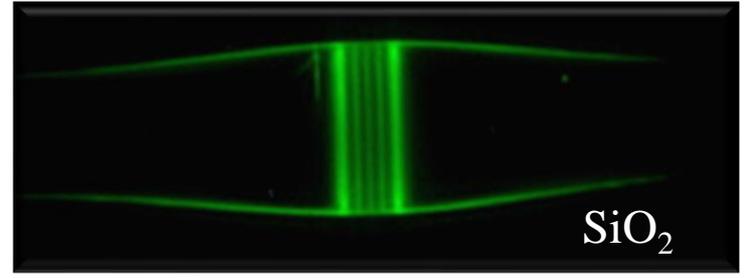
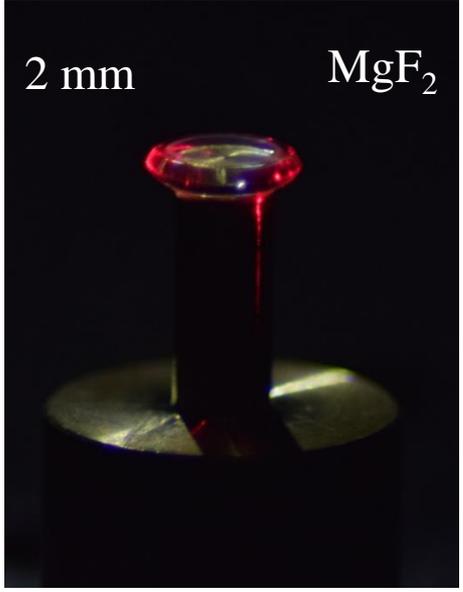


Fig. 3. Change of the signal amplitude shown in Fig. 2(c) with time. Initial and final quality factors are $Q = (7.9 \pm 0.5) \times 10^{10}$ and $Q = (3 \pm 1) \times 10^{11}$ respectively. Solid line stands for the theoretical fit of the ringdown signal found using formalism presented in [19]. A small oscillation of the decaying signal may result from the residual scattering in the material becoming observable at the given value of quality factor.



Объёмные резонаторы из кристаллов и стёкол



Изготовление: алмазное точение + асимптотическая полировка (кристаллы), плавление (стёкла).

Новые материалы для высокодобротных микрорезонаторов

Результаты:

Si – КМОП совместимый материал:
рекордная добротность $Q = 2 \times 10^9$ получена в 2018.

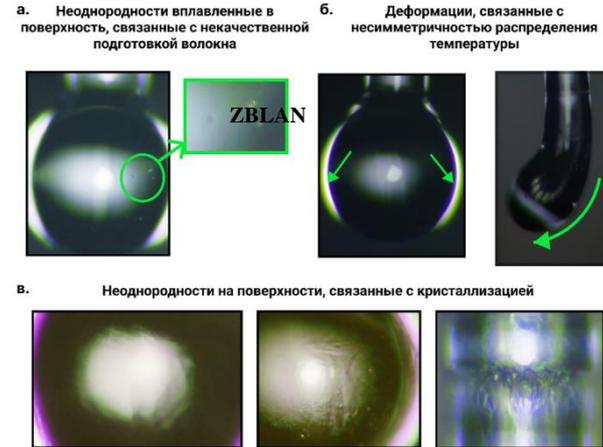
Недавно:

BaMgF – прозрачен вплоть до УФ, $\chi^{(2)}$ и $\chi^{(3)}$
– $Q \sim 10^9$ @ $1.5 \mu\text{m}$

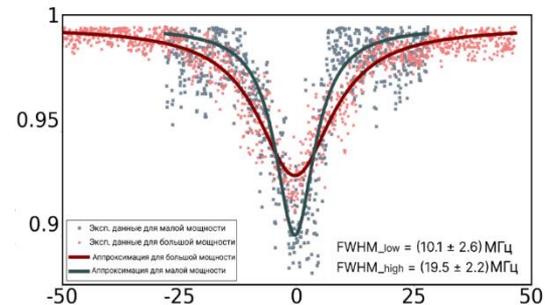
ZBLAN ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$)
 $Q \sim 5 \times 10^8$ @ $1.5 \mu\text{m}$, $Q \sim 2 \times 10^7$ @ $2.6 \mu\text{m}$

GaAs – полупроводник, $\chi^{(2)}$ и $\chi^{(3)}$ – $Q \sim 10^6$
@ $1.5 \mu\text{m}$

Ge полупроводник, низкие потери в ИК
 $Q \sim 10^7$ @ $2.6 \mu\text{m}$, измерена величина
двухфотонных потерь



Tebeneva, T. S., Shitikov, A. E., Benderov, O. V., Lobanov, V. E., Bilenko, I. A., & Rodin, A. V. Ultrahigh-Q WGM microspheres from ZBLAN for the mid-IR band. *Optics Letters*, 47(24), 6325-6328, 2022.



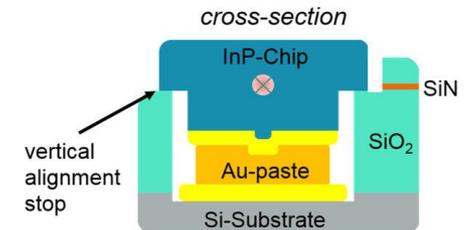
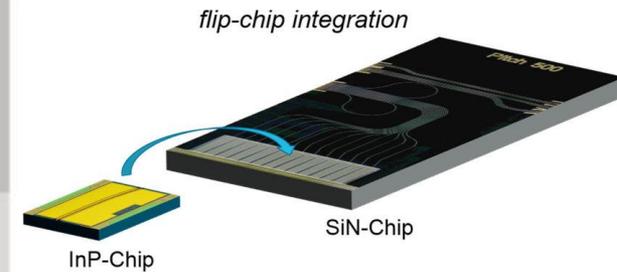
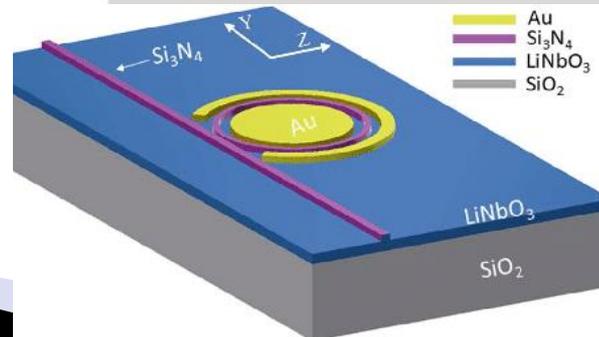
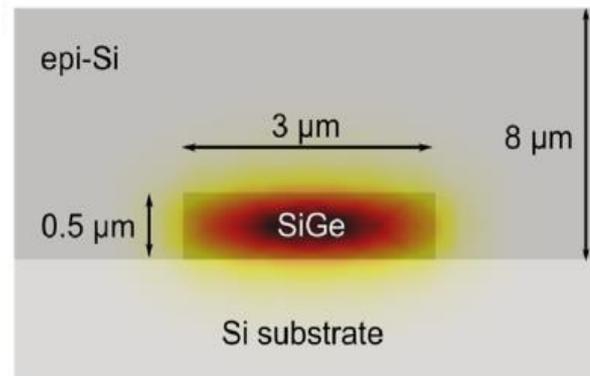
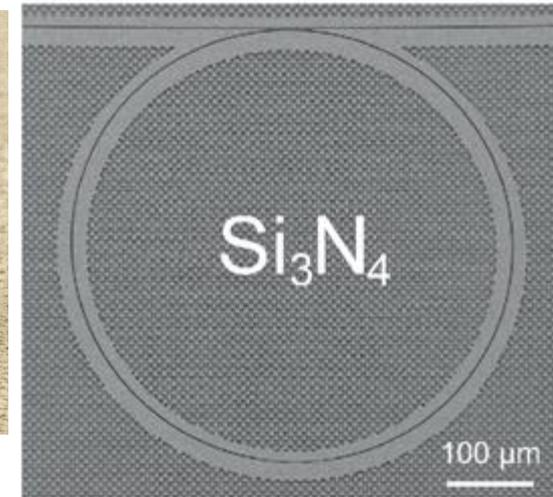
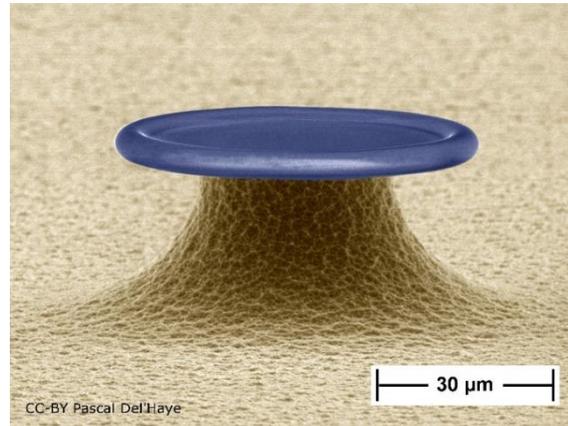
Tebeneva, T. S., Lobanov, V. E., Chermoshentsev, D. A., Min'kov, K. N., Kaplunov, I. A., Vinogradov, I. I., Bilenko, I. A., Shitikov, A. E. Crystalline germanium high-Q microresonators for mid-IR. *Optics Express*, 32(9), 15680-15690, 2024.



Высокооборотные интегральные резонаторы

Материалы:

1. SiO₂ (травление+оплавление)
2. Технологии на основе КМОП:
 - a. Si (но ТРА на 1.55 μm)
 - b. Si₃N₄
 - c. AlN
 - d. SiGe
3. AlGaAs
4. LiNbO₃
5. Комбинации, другие.

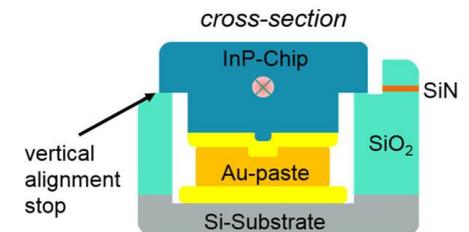
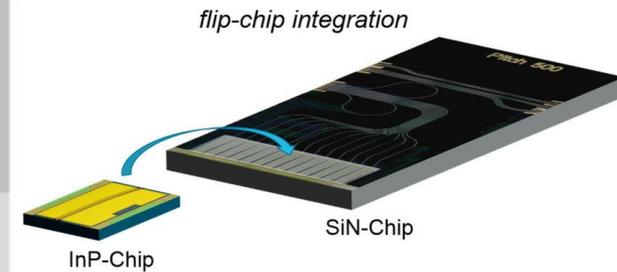
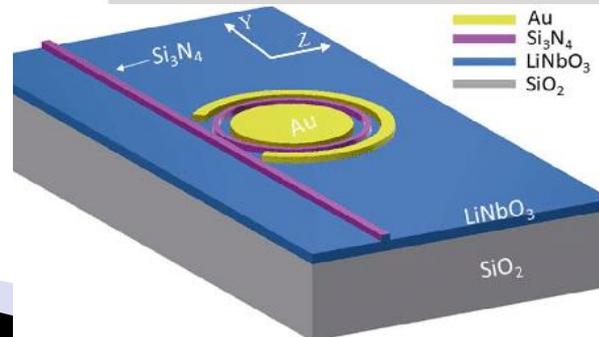
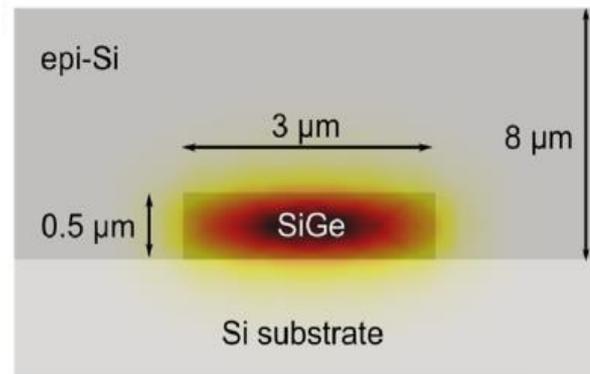
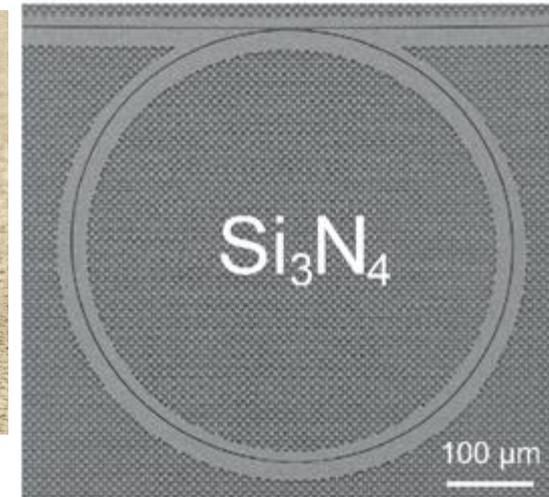
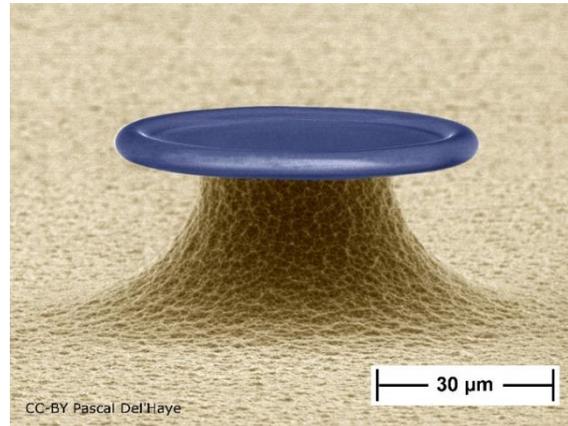




Высокодобротные интегральные резонаторы

Материалы:

1. SiO₂ (травление+оплавление)
2. Технологии на основе КМОП:
 - a. Si (но ТРА на 1.55 μm)
 - b. Si₃N₄ n=2, прозрачен от 4 до 0.4 мкм, технология готова к массовому производству
3. AlGaAs
4. LiNbO₃
5. Комбинации, другие.





Si₃N₄ интегральные высокодобротные микрорезонаторы



INME (Russia)



Ligentec (Swiss)



SUSTech (China)

Technology	Substrative	Additive	Hybrid
Thickness	250 – 1000 nm	300-800 nm	80-300 nm
Quality factor	3×10^6	5×10^6 3×10^7	2×10^7
Integrated heaters	Yes	Yes	No Yes

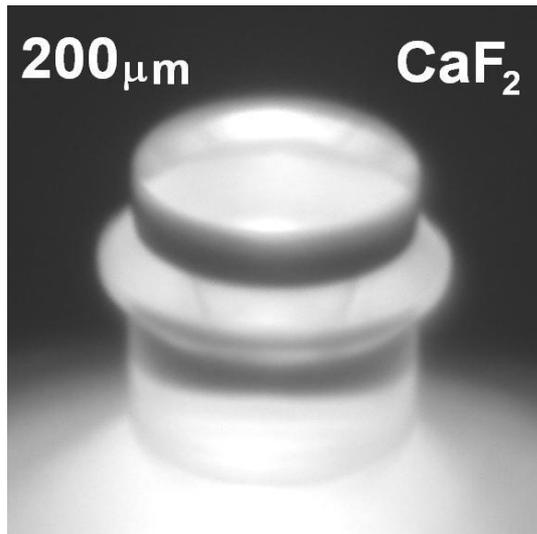


Кристаллические или интегральные?



RQC

Russian
Quantum
Center



$Q > 10^7$ (high
confinement)
 $Q \sim 2 \times 10^8$ (low
confinement)



$Q > 10^9$

За:

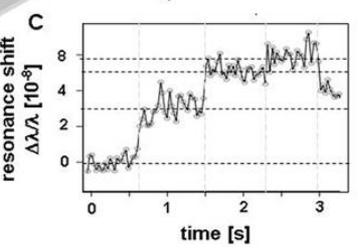
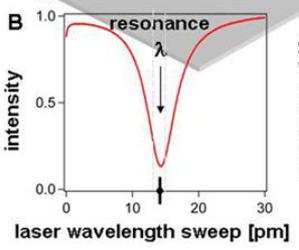
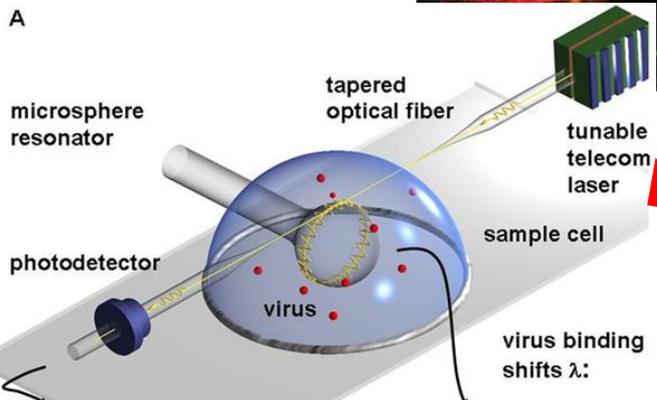
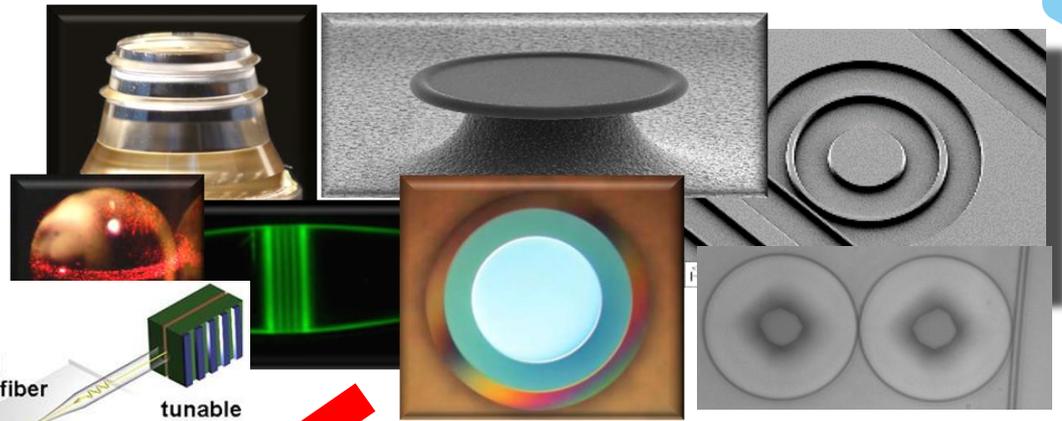
- Рекордная добротность
- Работают от ИК до УФ.
- Настраиваемая связь

За:

- Готовы к массовому производству
- Воспроизводимость
- Одномодовые
- Гибкий и масштабируемый дизайн



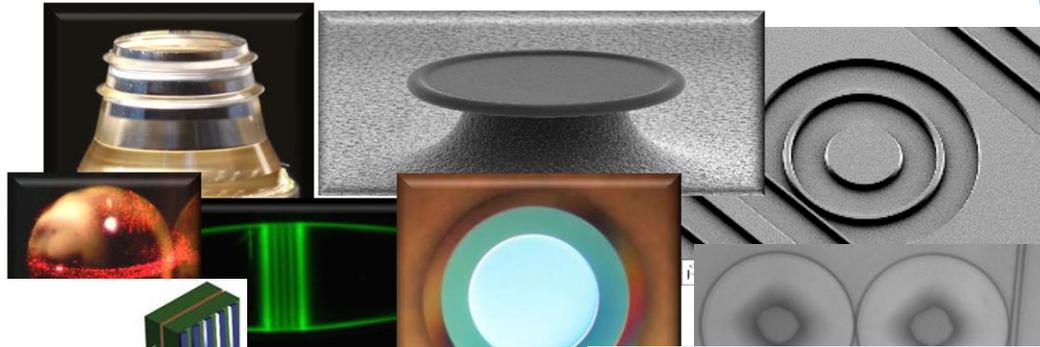
Области применений



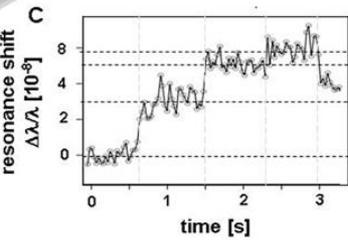
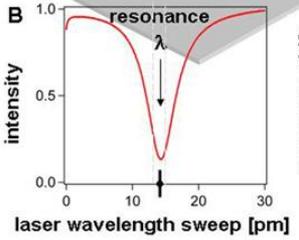
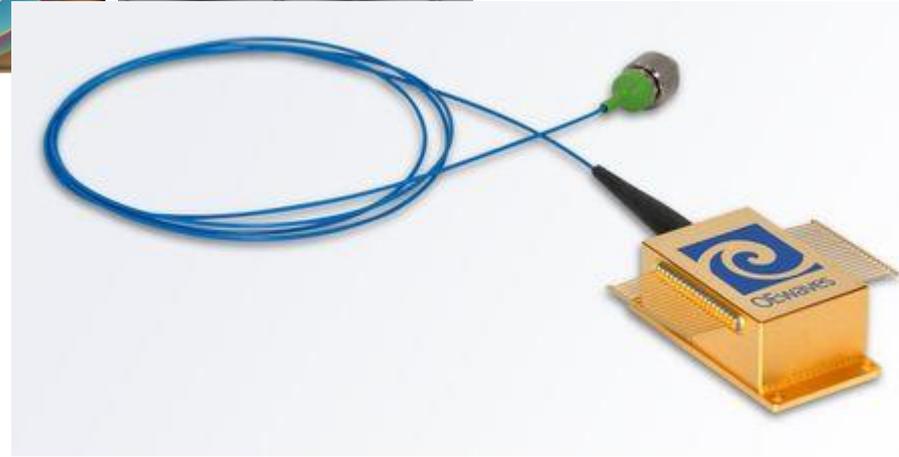
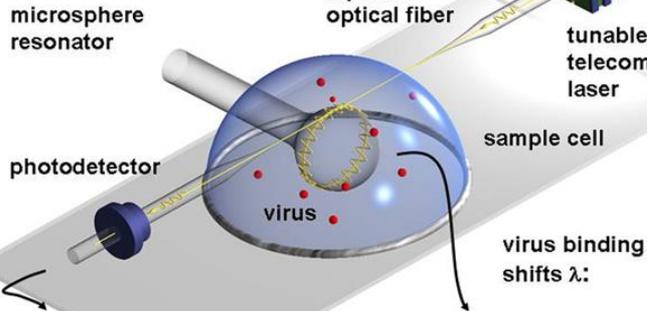
Сенсоры



Области применений



A

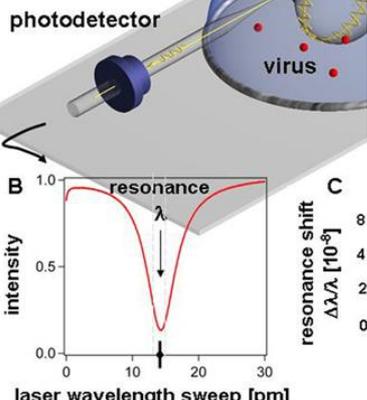
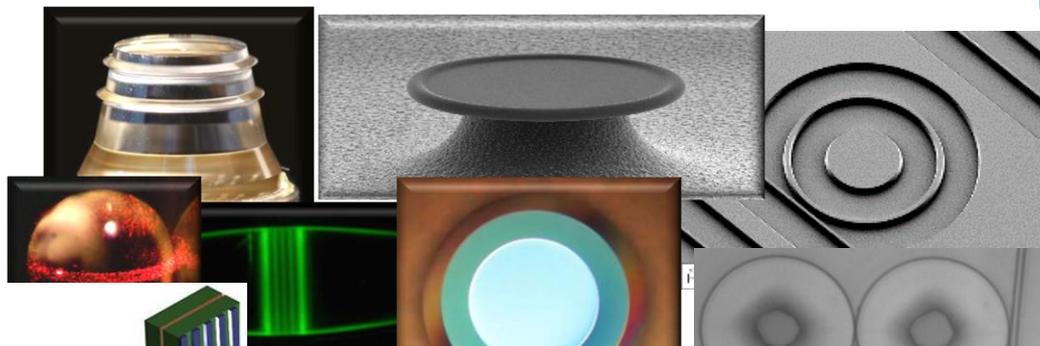


Узкополосные лазеры

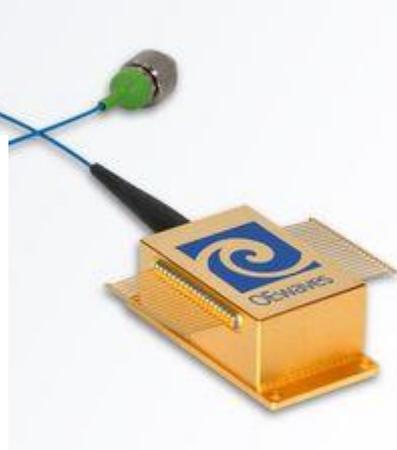
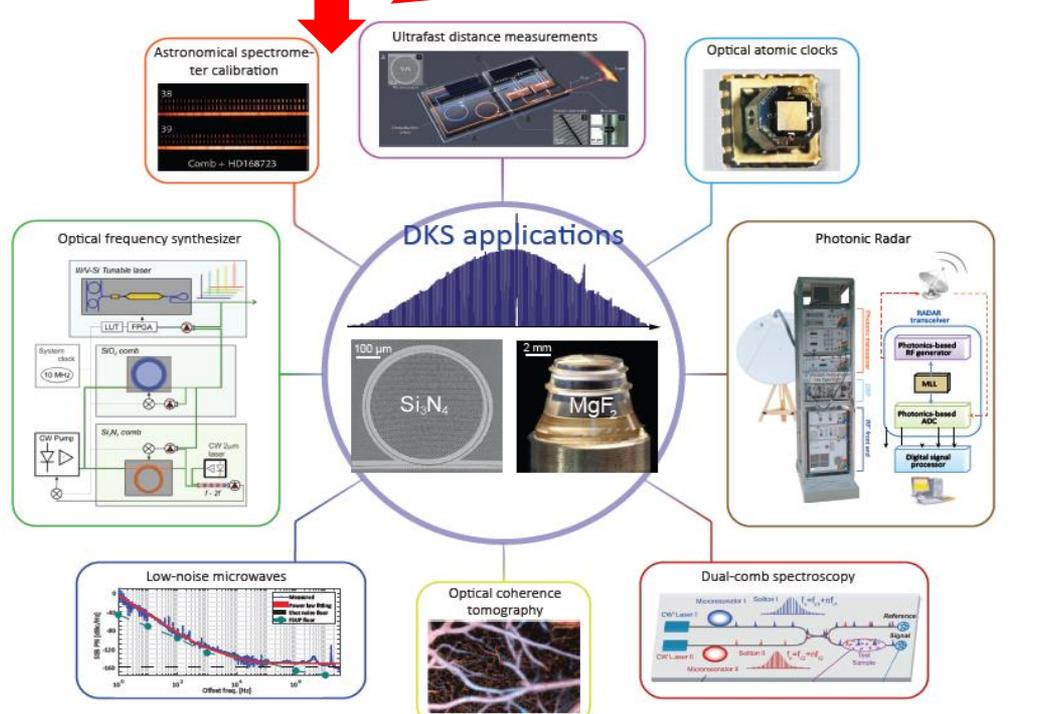
Сенсоры



Области применений



Сенсоры



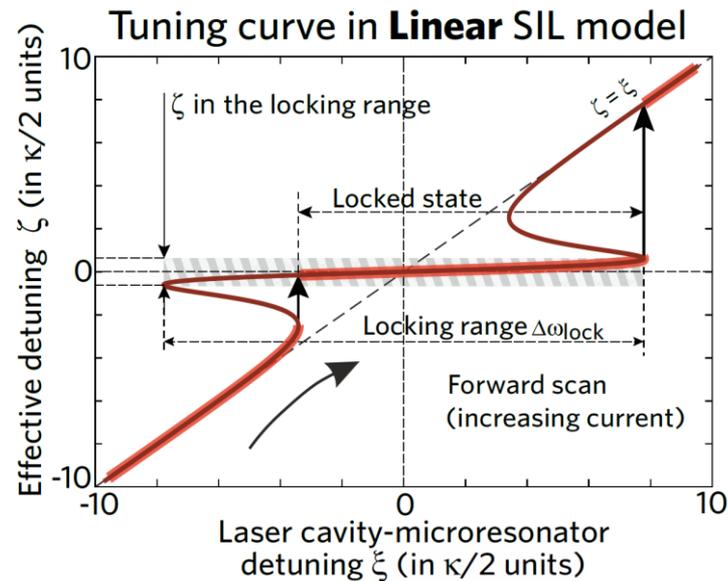
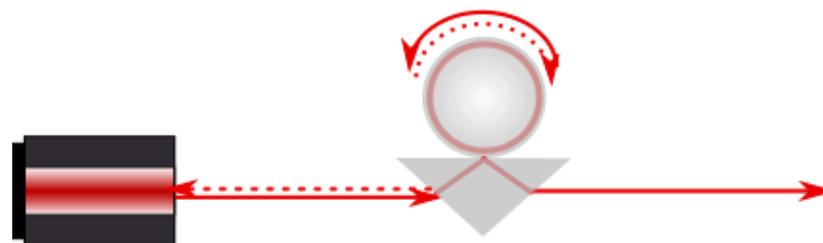
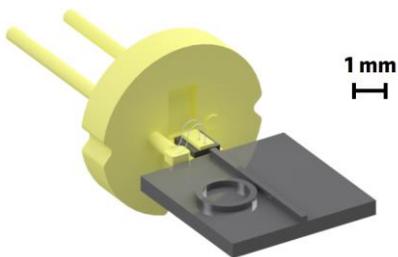
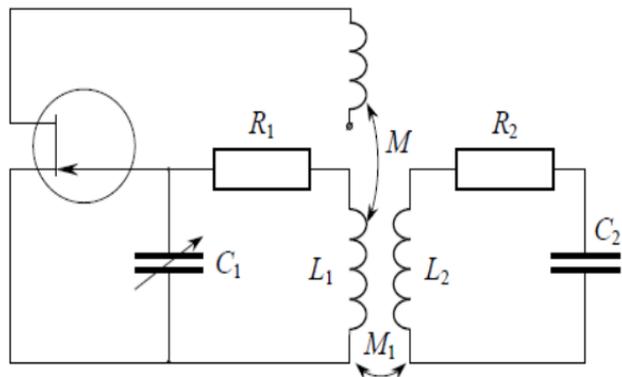
Узкополосные лазеры

Приложения на основе частотных гребёнок



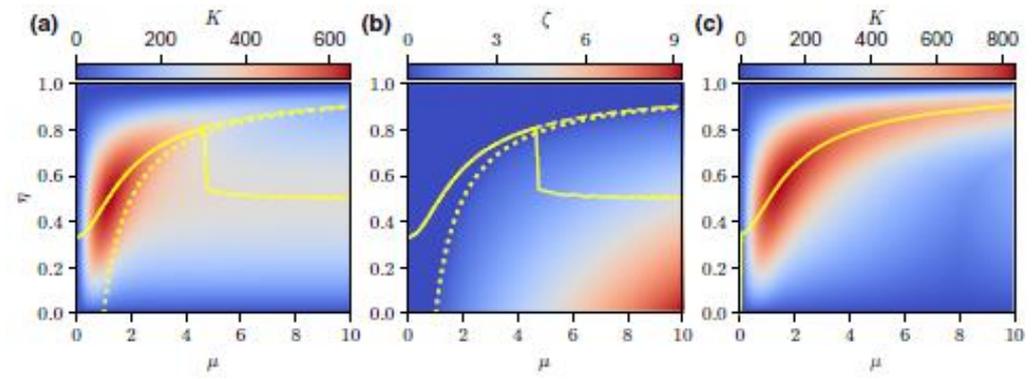
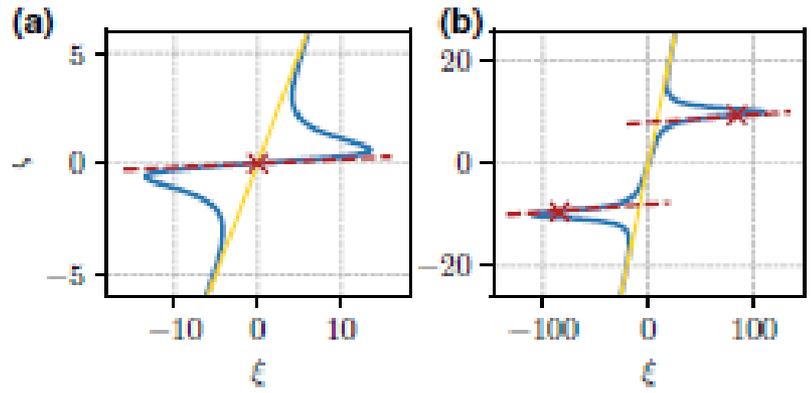
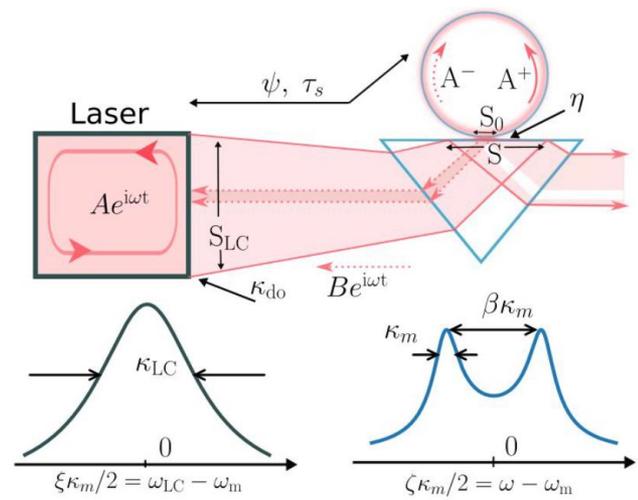
Эффект затягивания частоты

Резонансное Рэлеевское рассеяние создаёт оптическую обратную связь





Оптимизация затягивания

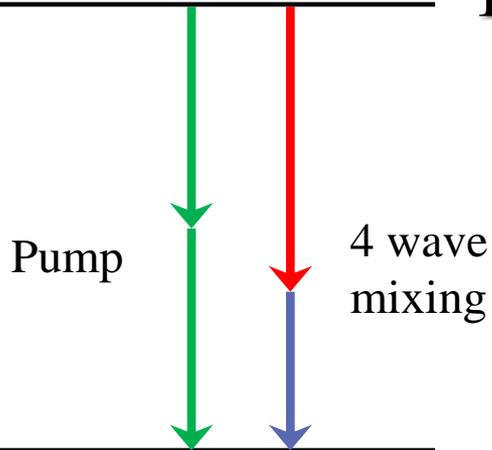


Коэффициент стабилизации можно увеличить в 100 раз!

R. Galiev et. Al. PHYSICAL REVIEW APPLIED 14, 014036 (2020)

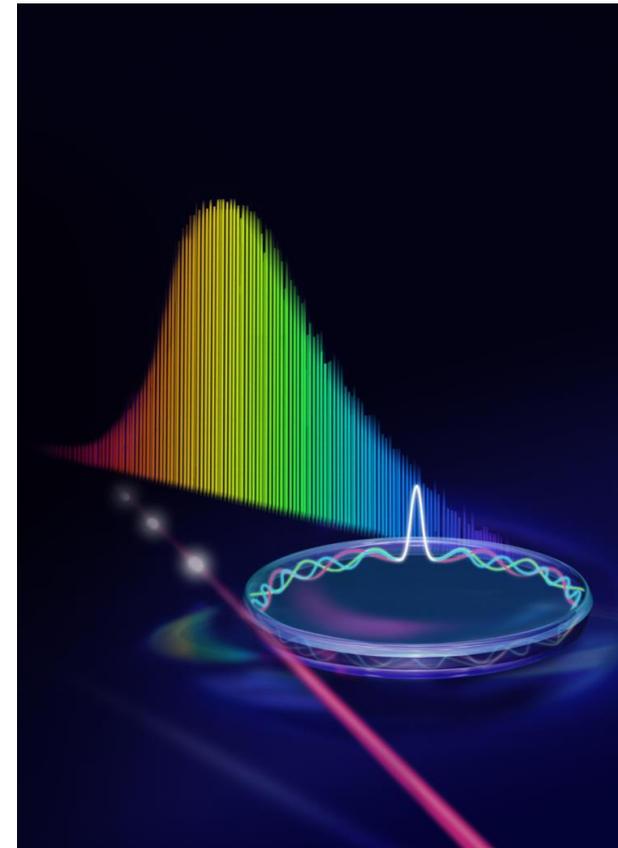
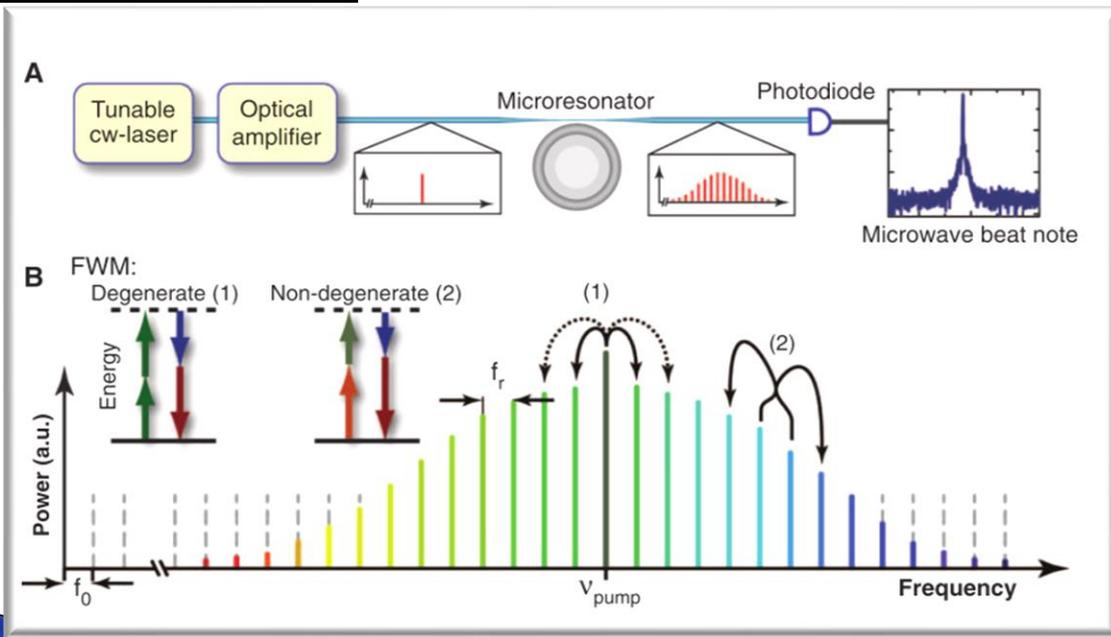


Генерация частотных гребёнок В микрорезонаторах



Порог четырёхволнового смешения:

$$P_{thr} \propto \frac{V_m}{Q^2}$$



P. Del'Haye et al., 2007 (MPQ)

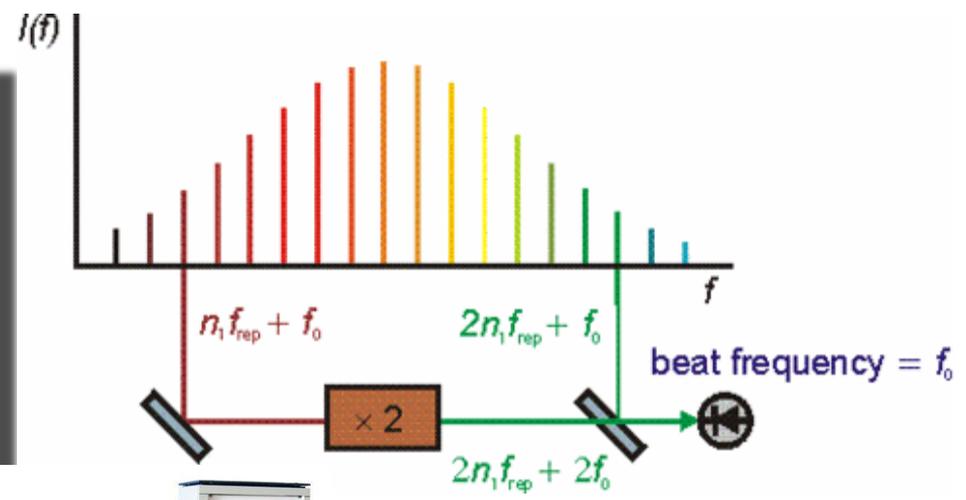
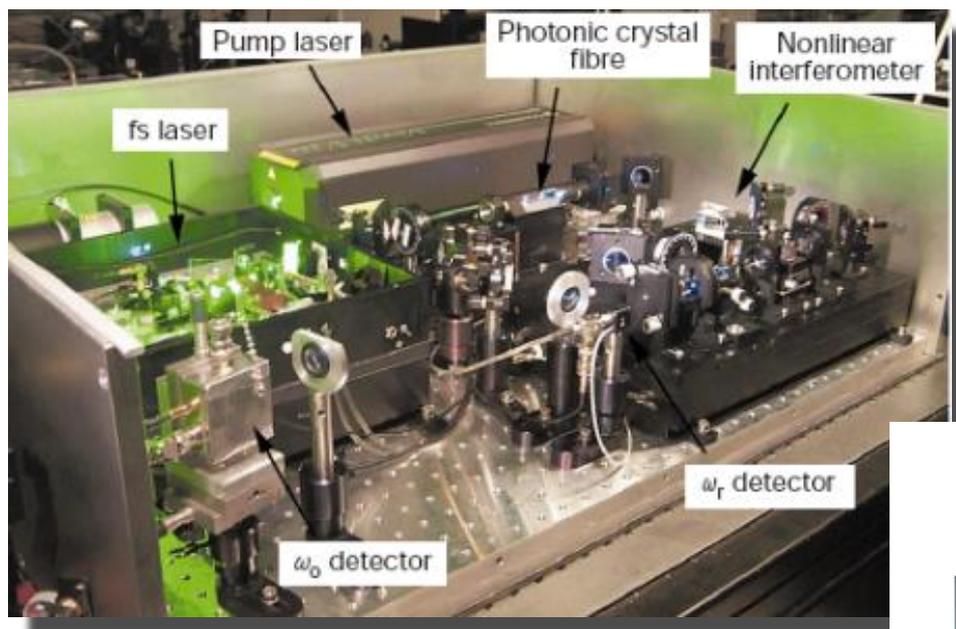
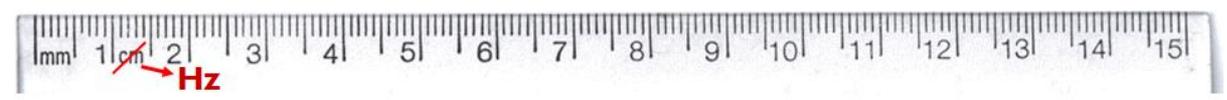


Частотная гребёнка – радиооптический мост



Nobel Prize Physics 2005:

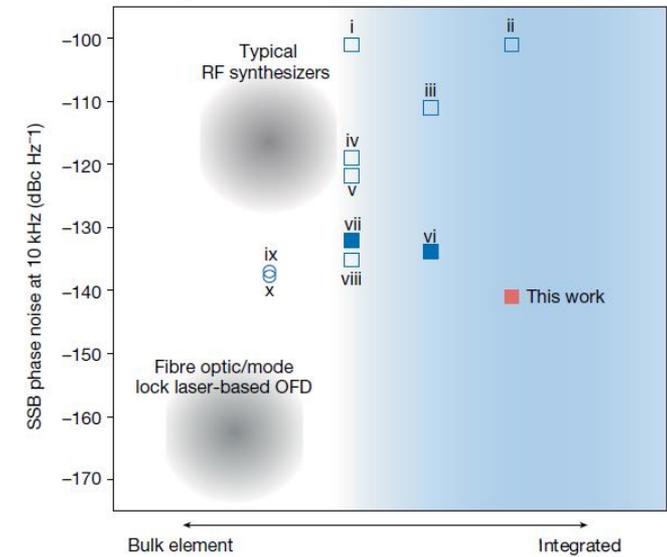
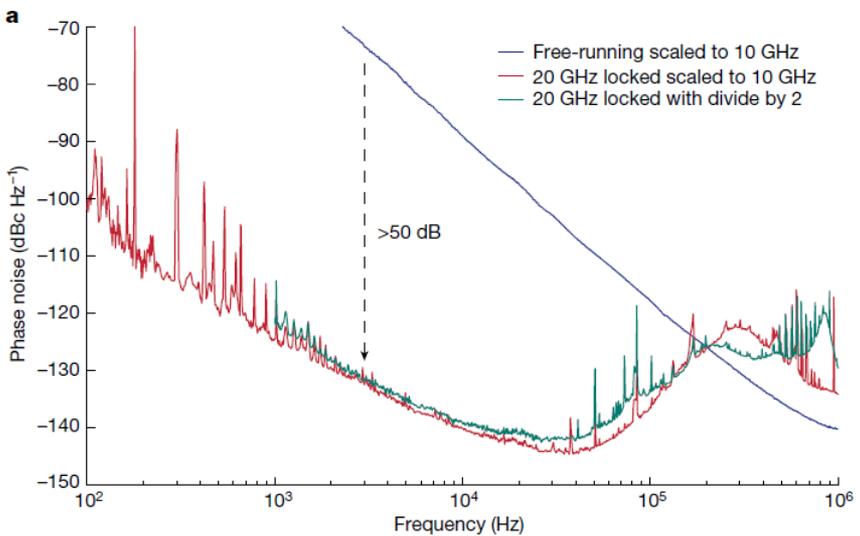
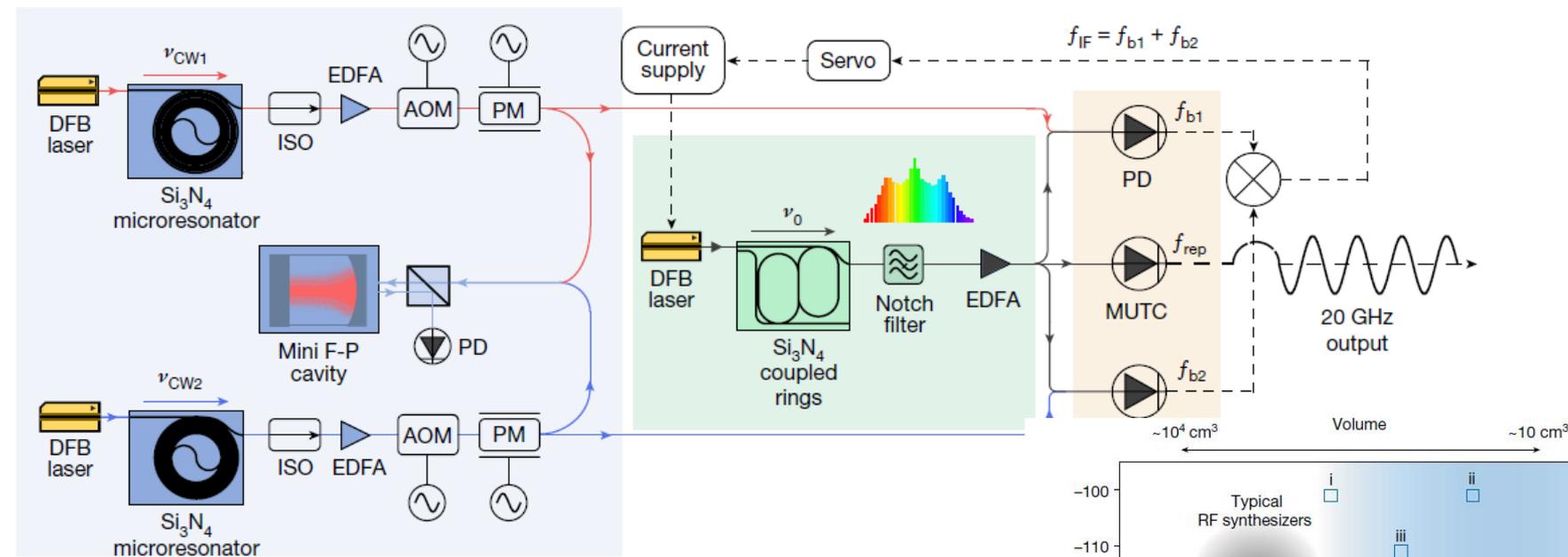
"for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique"



Комб-генератор –
коммерчески
доступное устройство



Радиофотонные генераторы на микрорезонаторах

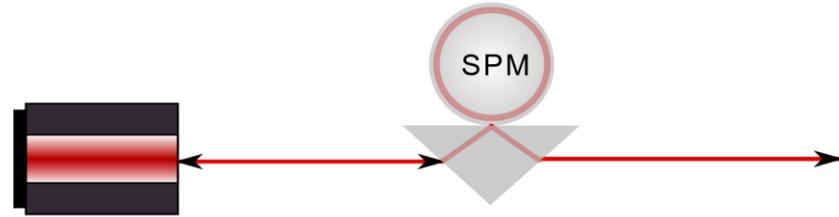


Kudelin, I., Groman, W., Ji, Q. X., Guo, J., Kelleher, M. L., Lee, D., ... & Diddams, S. A. (2024). Photonic chip-based low-noise microwave oscillator. *Nature*, 627(8004), 534-539.



Нелинейное затягивание

Нелинейность резонатора в корне меняет динамику затягивания:



$$\frac{dN}{d\tau} = J_N - \frac{\kappa_N}{\kappa_0} N - N g_l |A_l|^2,$$

$$\frac{dA_l}{d\tau} = \left(i\xi_0 - i\nu_\xi \tau + (1 + i\alpha_g) N g_l - \frac{\kappa_l}{\kappa_0} \right) A_l - e^{i\Omega_l t} \sum_{\mu} \tilde{\kappa}_{\text{Laser}} A_{\mu}^{-} e^{-i\omega_{\mu}^{(1)}(t-t_s)},$$

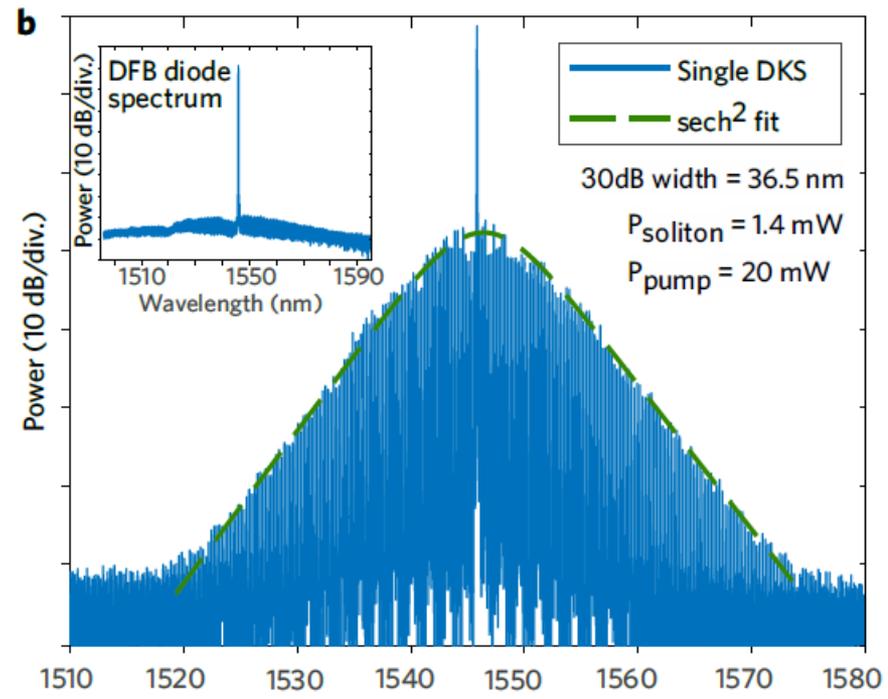
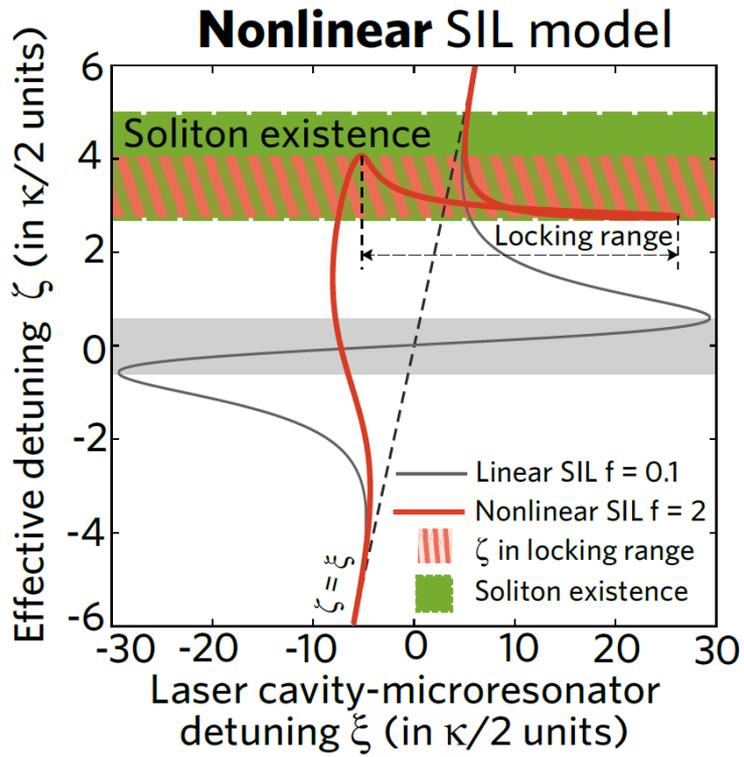
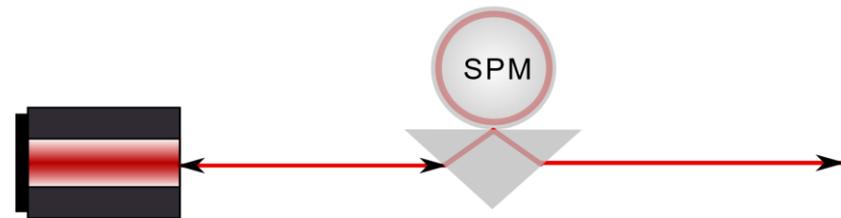
$$\frac{dA_{\mu}^{+}}{d\tau} = \left(-\frac{\kappa_{\mu}}{\kappa_0} - id_2 \mu^2 \right) A_{\mu}^{+} + i\beta_{\mu} A_{\mu}^{-} + i\tilde{g}_{\mu} S_{\mu}^{+} - \tilde{\kappa}_{\text{WGR}} e^{i\omega_{\mu}^{(1)} t} \delta_{0\mu} A_l e^{-i\Omega_l(t-t_s)},$$

$$\frac{dA_{\mu}^{-}}{d\tau} = \left(-\frac{\kappa_{\mu}}{\kappa_0} - id_2 \mu^2 \right) A_{\mu}^{-} + i\beta_{\mu} A_{\mu}^{+} + i\tilde{g}_{\mu} S_{\mu}^{-}.$$

Kondratiev, N. M., Lobanov, V. E., Lonshakov, E. A., Dmitriev, N. Y., Voloshin, A. S., & Bilenko, I. A. Numerical study of solitonic pulse generation in the self-injection locking regime at normal and anomalous group velocity dispersion. *Optics Express*, 28(26), 2020.



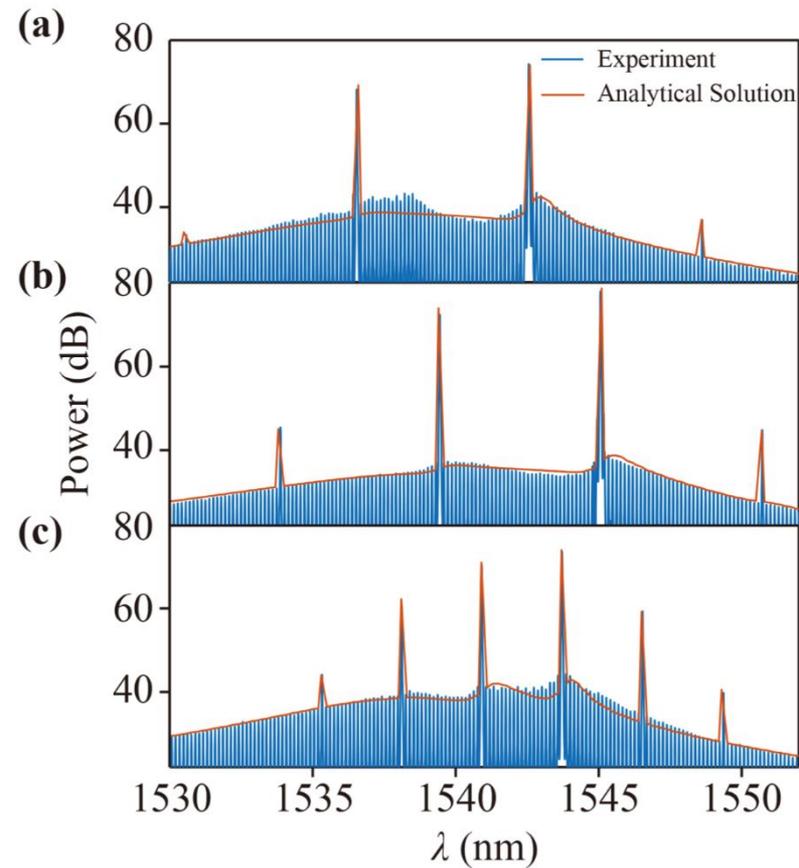
Нелинейное затягивание



Voloshin, A. S., Kondratiev, N. M., Lihachev, G. V., Liu, J., Lobanov, V. E., Dmitriev, N. Y., ... & Bilenko, I. A. Dynamics of soliton self-injection locking in optical microresonators. *Nature communications*, 12(1), 1-10, 2021.



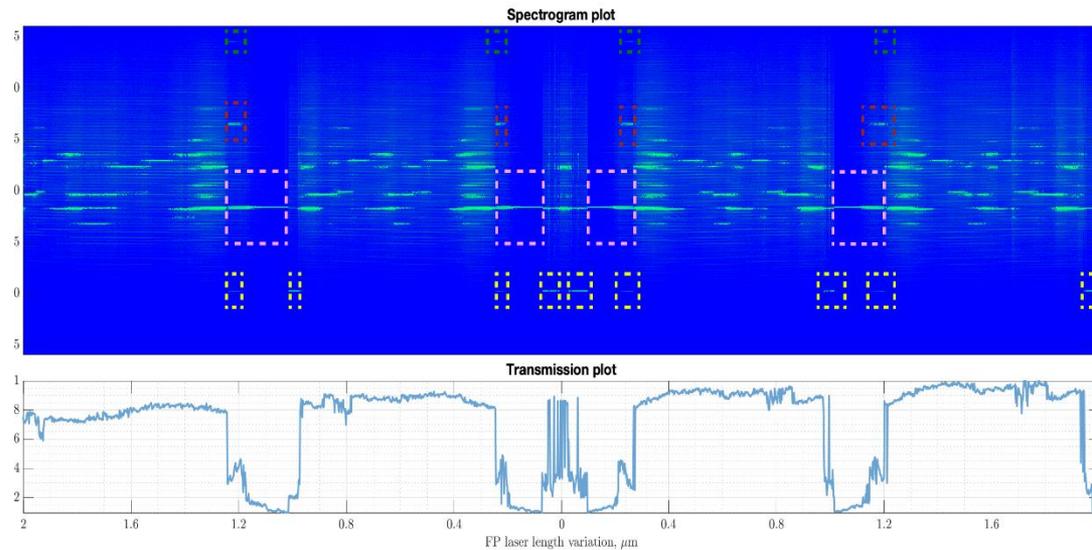
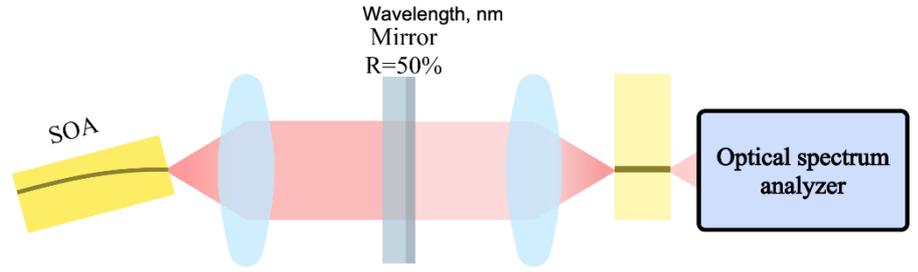
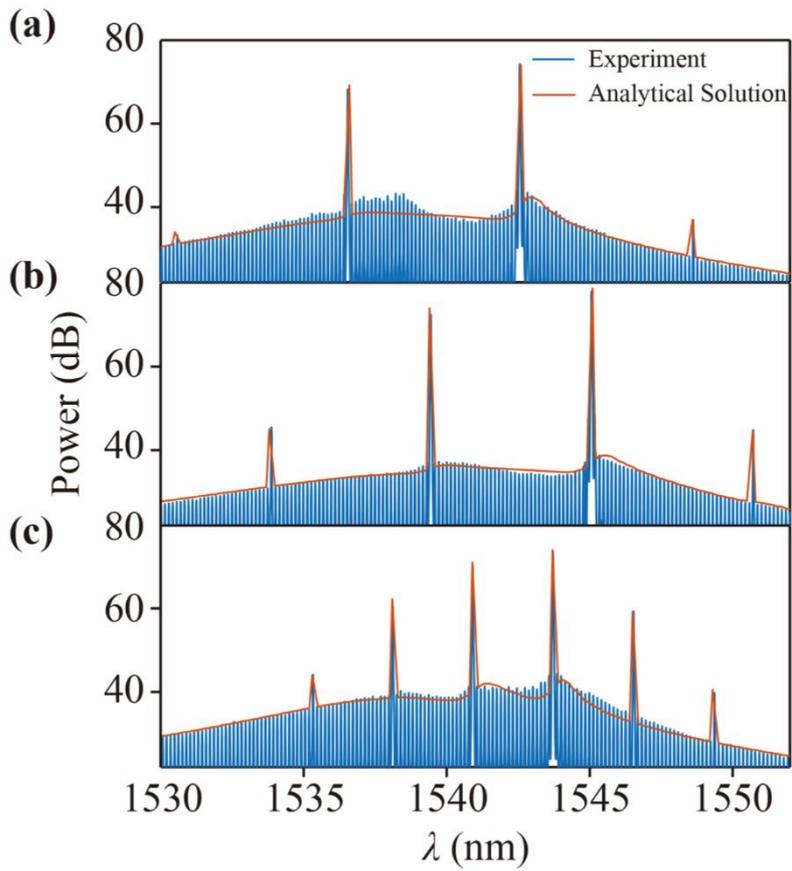
Многочастотное затягивание



В 2018 году было (случайно?)
обнаружено, что затягиваться может
не только одна, но и несколько мод
многочастотного лазера.



Многочастотное затыгивание



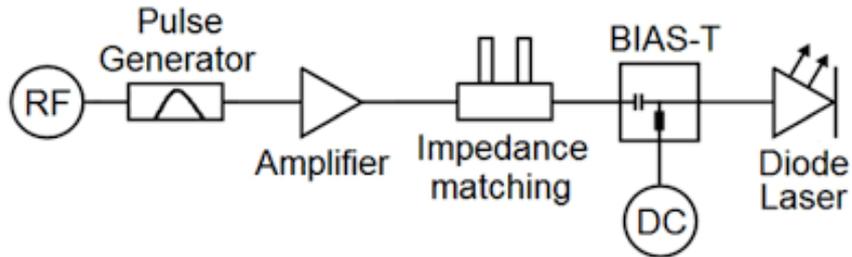
В 2018 году было (случайно?) обнаружено, что затыгиваться может не только одна, но и несколько мод многочастотного лазера.

Теперь этот эффект изучен, найден способ получения желаемого количества узких линий.

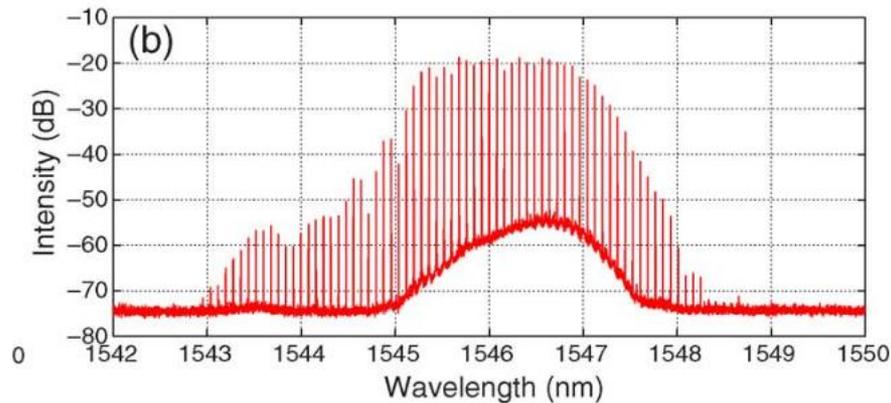
Danilin, A. N., Lobanov, V. E., Koptyaev, S. N., Chermoshentsev, D. A., & Bilenko, I. A. (2023). Multi-frequency self-injection locking of a FSR-tunable multimode laser diode. *Optics Letters*, 48(22), 5972-5975.



Затягивание в режиме gain switch



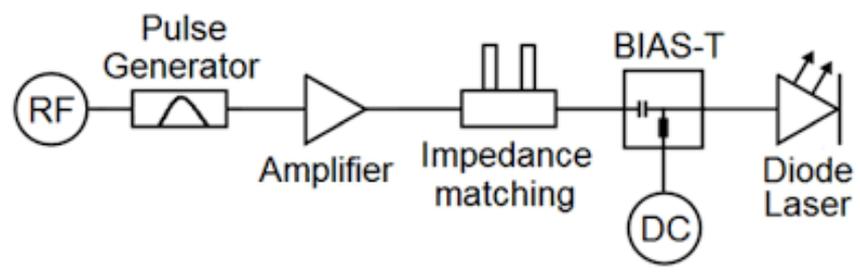
gain switch – глубокая модуляция тока диода, обычно используется для формирования коротких импульсов



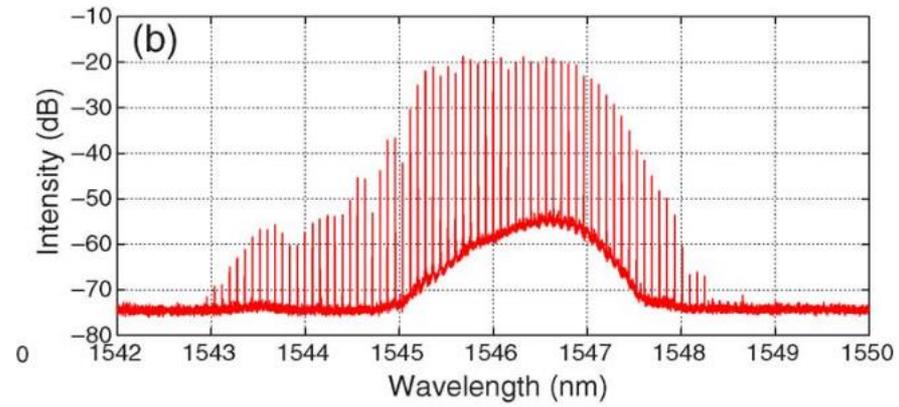
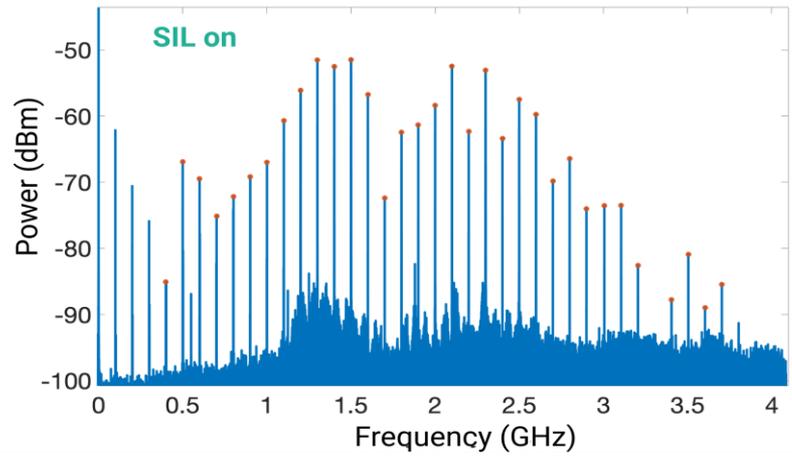
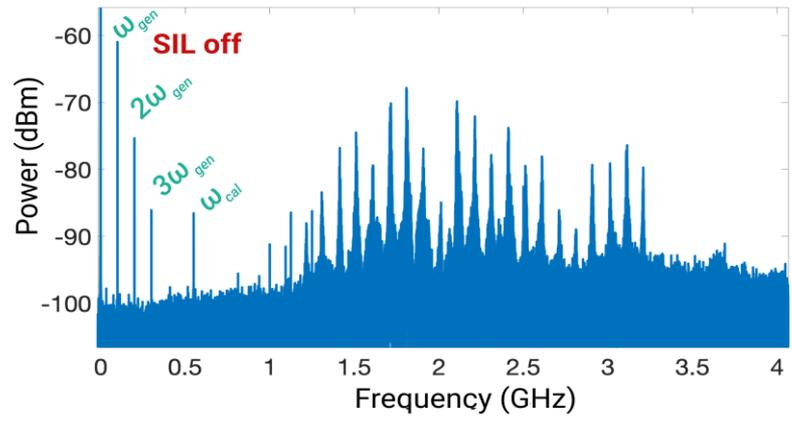
Спектр имеет вид гребёнки



Затягивание в режиме gain switch



gain switch – глубокая модуляция тока диода, обычно используется для формирования коротких импульсов



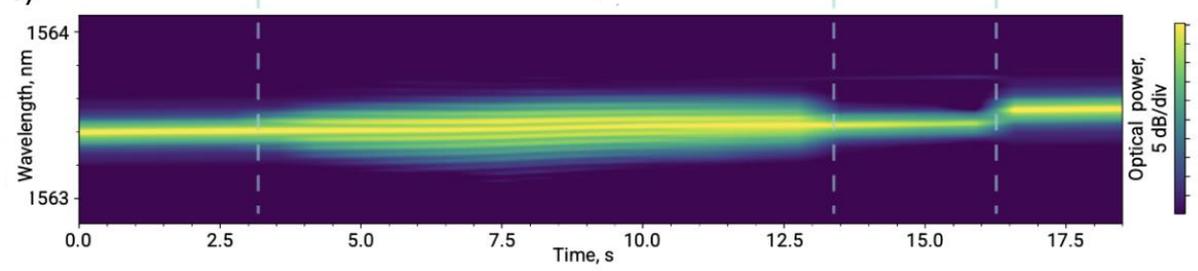
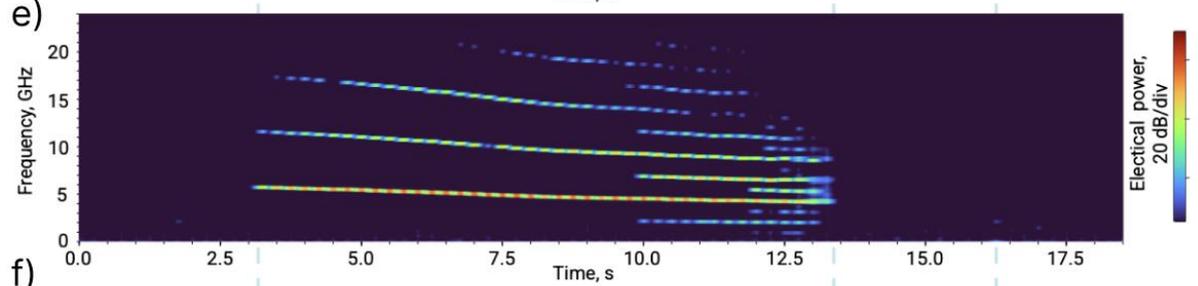
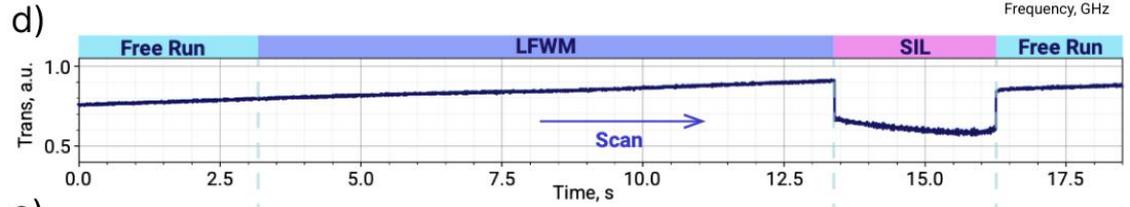
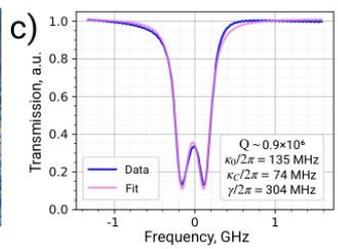
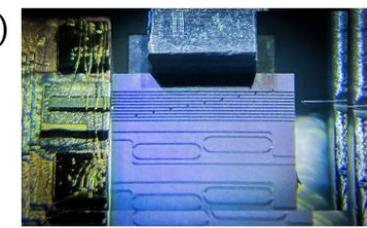
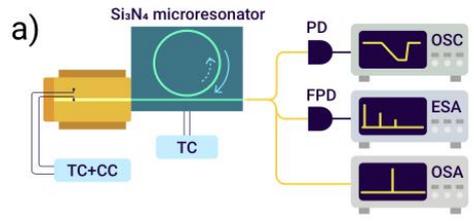
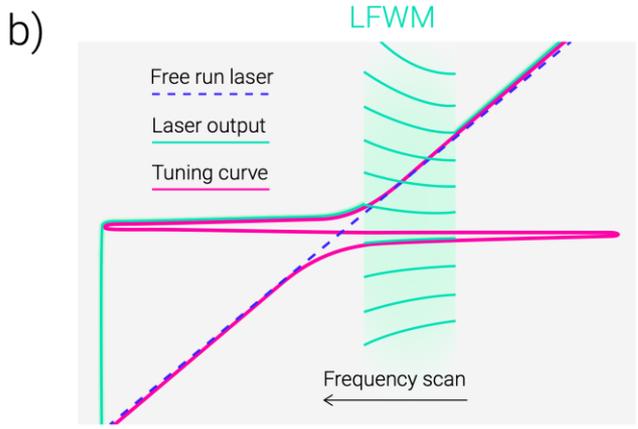
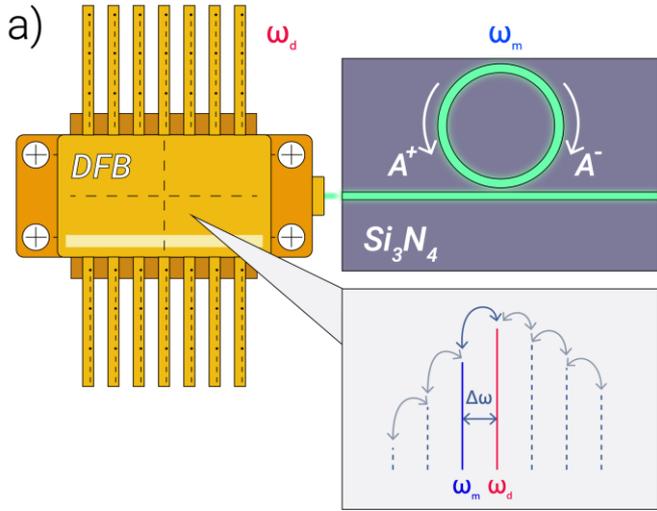
Спектр имеет вид гребёнки

В режиме затягивания происходит сужение **всех** линий. Затягивание не теряется!

Shitikov, Artem E., et al. "Self-injection locking of a gain-switched laser diode." *Physical Review Applied* 15.6 (2021): 064066.



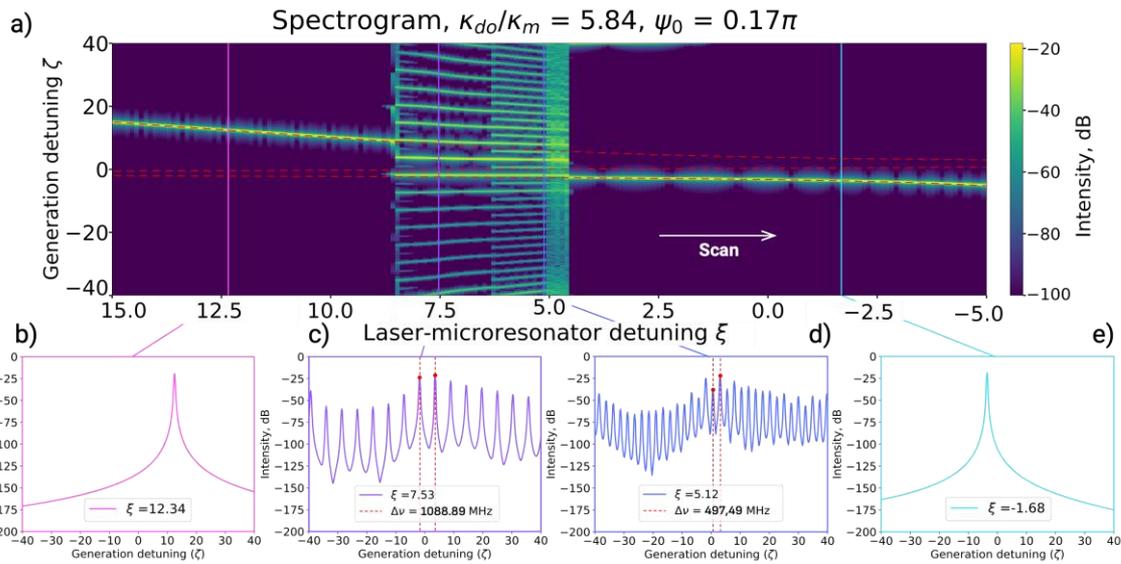
Четырёхволновое смешение в лазере



Sokol D.M. et al., "Four-wave mixing in a laser diode gain medium induced by the feedback from a high-Q microring resonator", *Optica Open*, (2024)

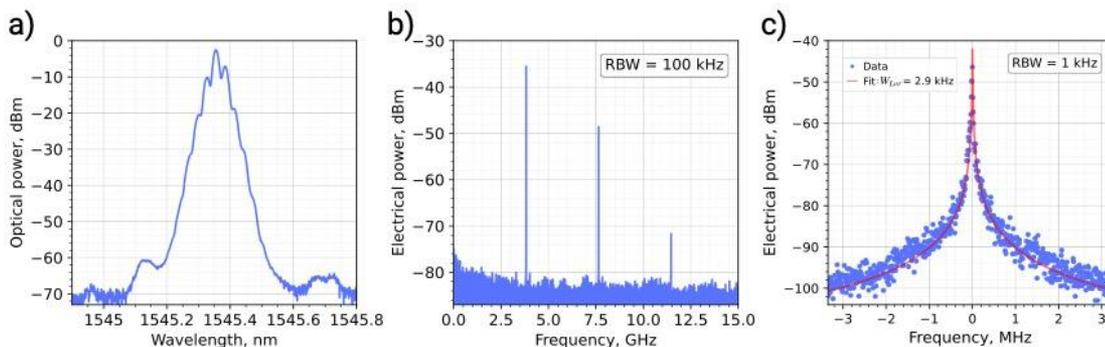


Четырёхволновое смешение в лазере



Численное моделирование в хорошем согласии с эксперимент

Стабильный перестраиваемый генератор СВЧ



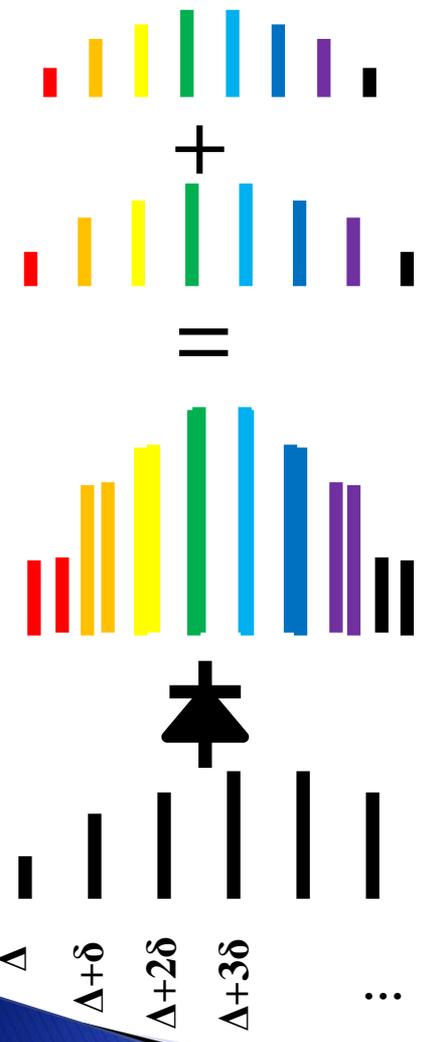
Sokol D.M. et al., "Four-wave mixing in a laser diode gain medium induced by the feedback from a high-Q microring resonator", *Optica Open*, (2024)



Гибридный интегральный

источник двойной частотной гребенки

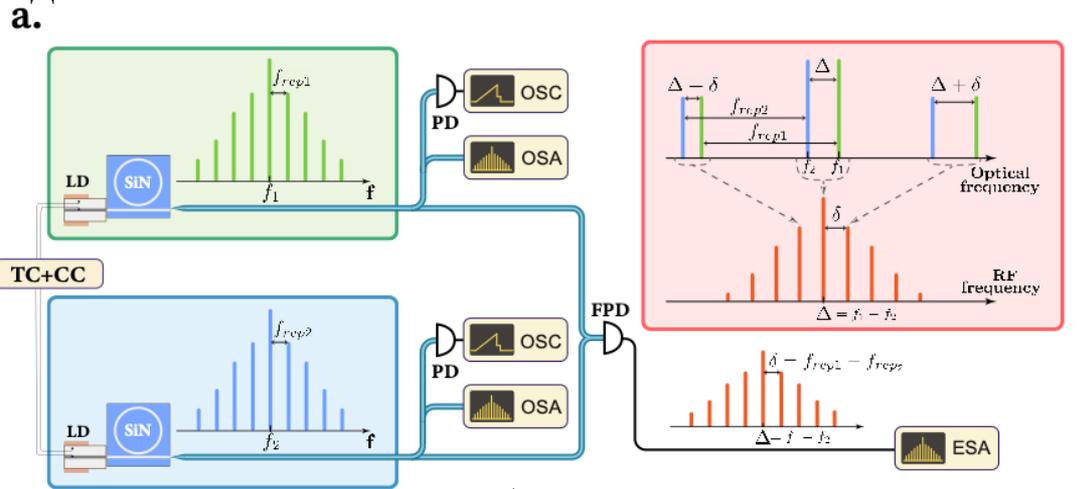
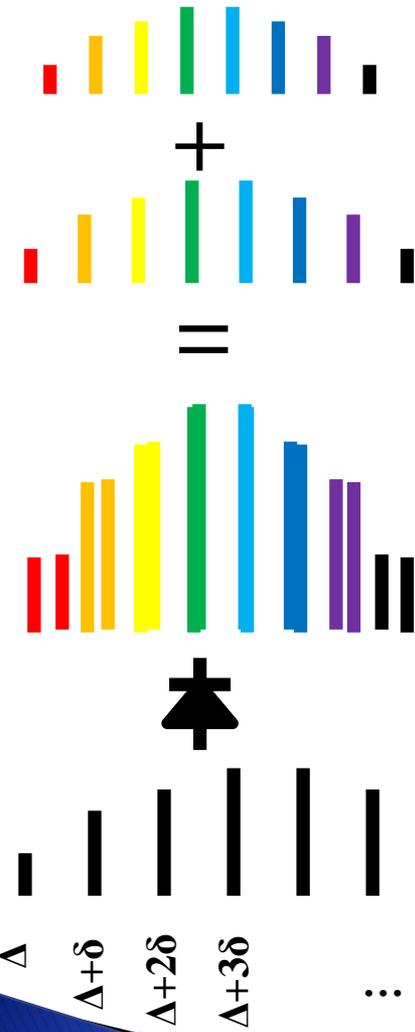
Биения двух частотных гребёнок с немного отличающимся интервалом между линиями дают их реплику в радиодиапазоне, удобную для анализа.





Гибридный интегральный источник двойной частотной гребенки

Биения двух частотных гребёнок с немного отличающимся интервалом между линиями дают их реплику в радиодиапазоне, удобную для анализа.

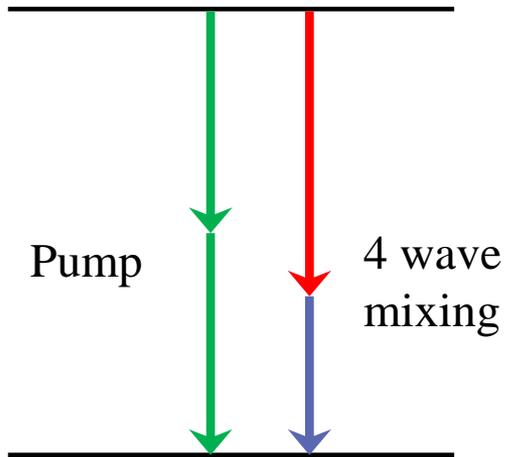


Создан прототип с шириной спектра 400 нм и рекордной эффективностью преобразования накачки (~40%)

Dmitriev, N. Y., Koptyaev, S. N., Voloshin, A. S., Kondratiev, N. M., Min'kov, K. N., Lobanov, V. E., ... & Bilenko, I. A. (2022). Hybrid integrated dual-microcomb source. Physical Review Applied, 18(3), 034068.

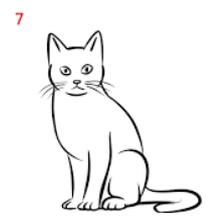
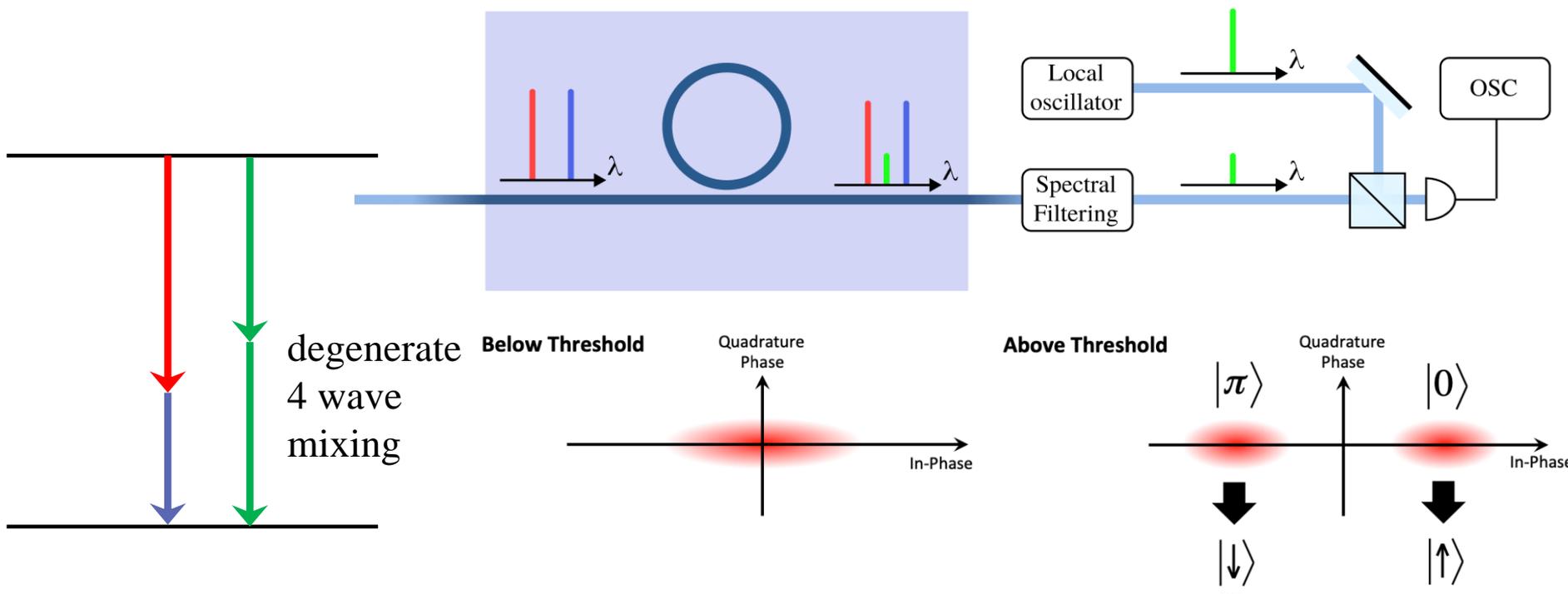


Вырожденная параметрическая Генерация и квантовое сжатие



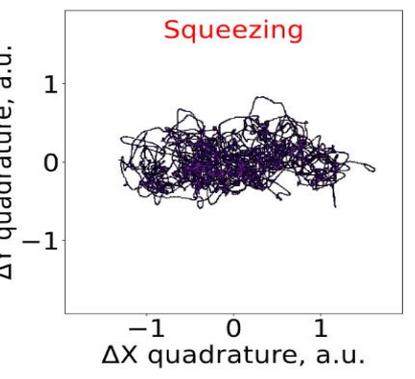
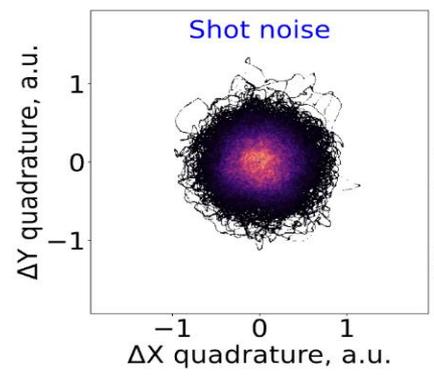
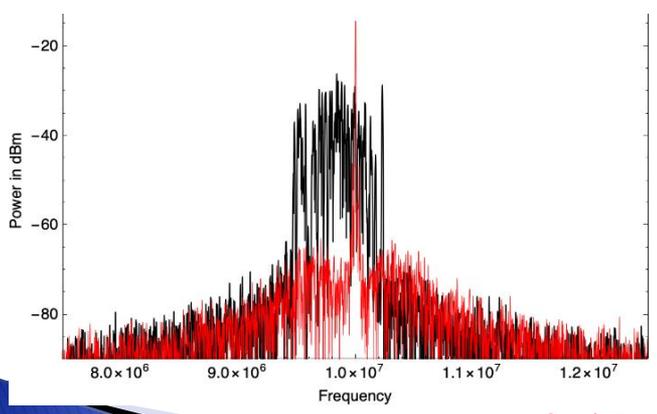
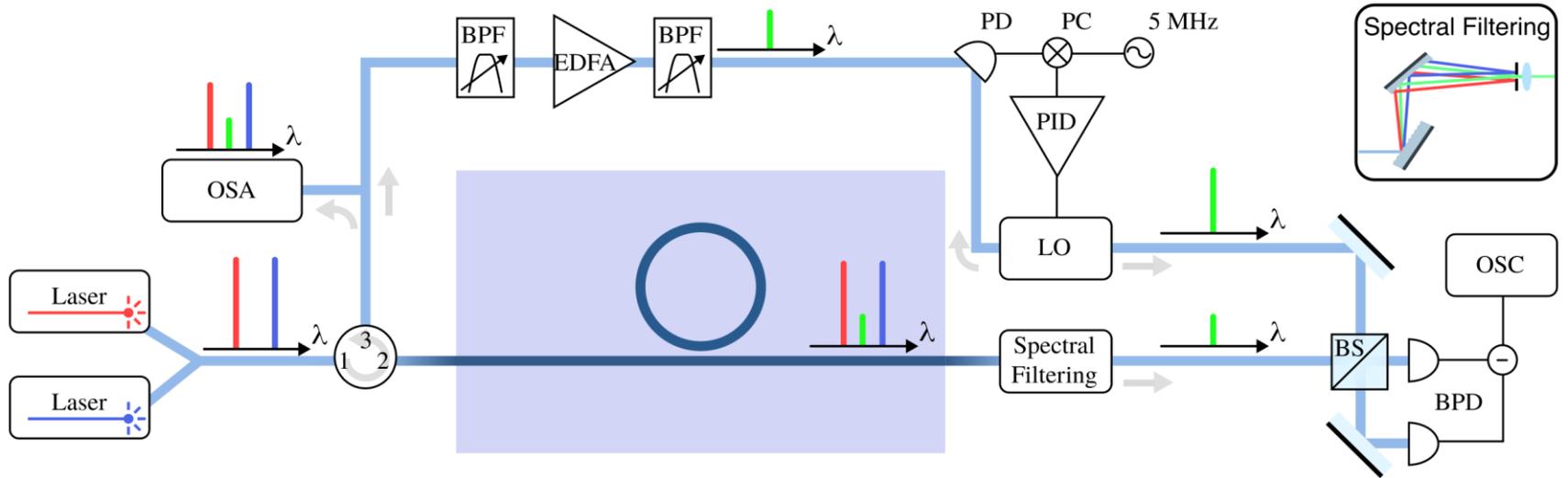


Вырожденная параметрическая Генерация и квантовое сжатие





Вырожденная параметрическая Генерация и квантовое сжатие



2 dB сжатие измерено на выходе! – соответствует 5 dB внутри



Спасибо за внимание!

