

Научный совет РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных
и управляющих систем и материалов для ее создания»
Научный совет и научный семинар по теме «Системы металлизации»
27 марта 2019 г., РТУ МИРЭА

Магнитооптические пленки и пленочные наноструктуры для интегрально- оптических невзаимных устройств верхнего уровня УБИС

М. В. Логунов, С. А. Никитов

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

Обзор доклада

- **Межсоединения верхнего уровня УБИС и основные элементы оптики-на-кристалле**
- **Магнитооптические эффекты**
- **Интегрально-оптические невзаимные устройства**
Изоляторы, циркуляторы, интерферометры
- **Магнитооптические материалы**
Совместимость с технологиями УБИС. Термостабильность
- **Рабочая длина волны для оптики-на-кристалле**
- **Заключение**

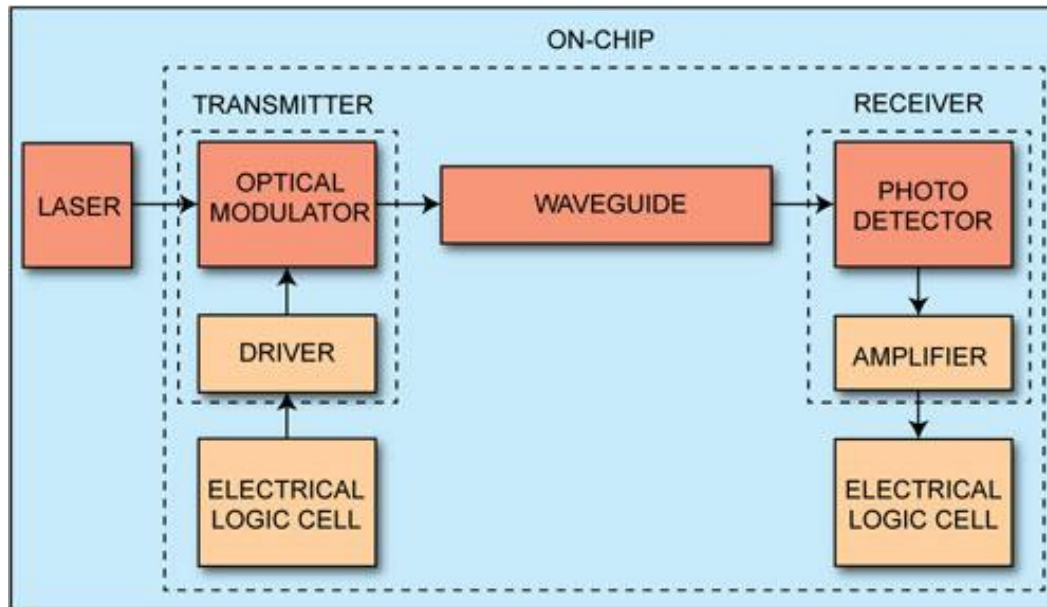
Металлизация и оптика-на-кристалле

Системы металлизации УБИС: до 80 км проводников на кристалле!

Особенности межсоединений верхнего уровня УБИС с помощью оптики-на-кристалле, по аналогии с волоконно-оптическими линиями связи:

- Высокая пропускная способность (выше несущая частота и частота модуляции)
- Отсутствие перекрестных помех
- Энергоэффективность
- Возможность использования спектрального уплотнения канала
- Масштабирование для обеспечения увеличивающихся потребностей в межсоединениях

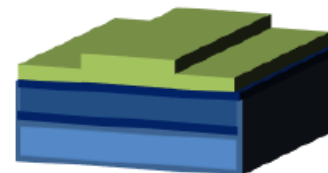
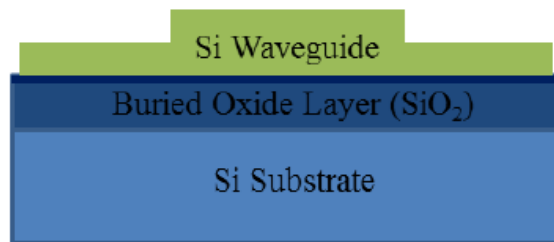
Элементы оптики-на-кристалле



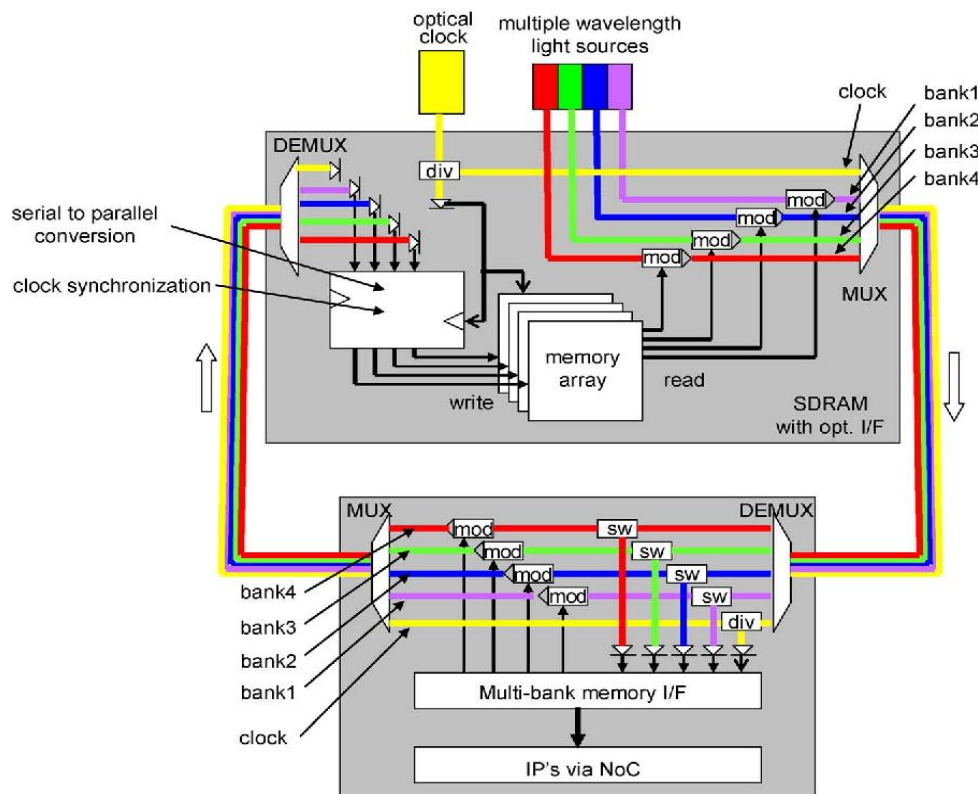
- Большая часть оптики-на-кристалле может быть интегрирована с технологиями производства УБИС

или

- Вся оптика-на-кристалле реализуется на платформе Si-фотоники



Si-фотоника: монолитная платформа



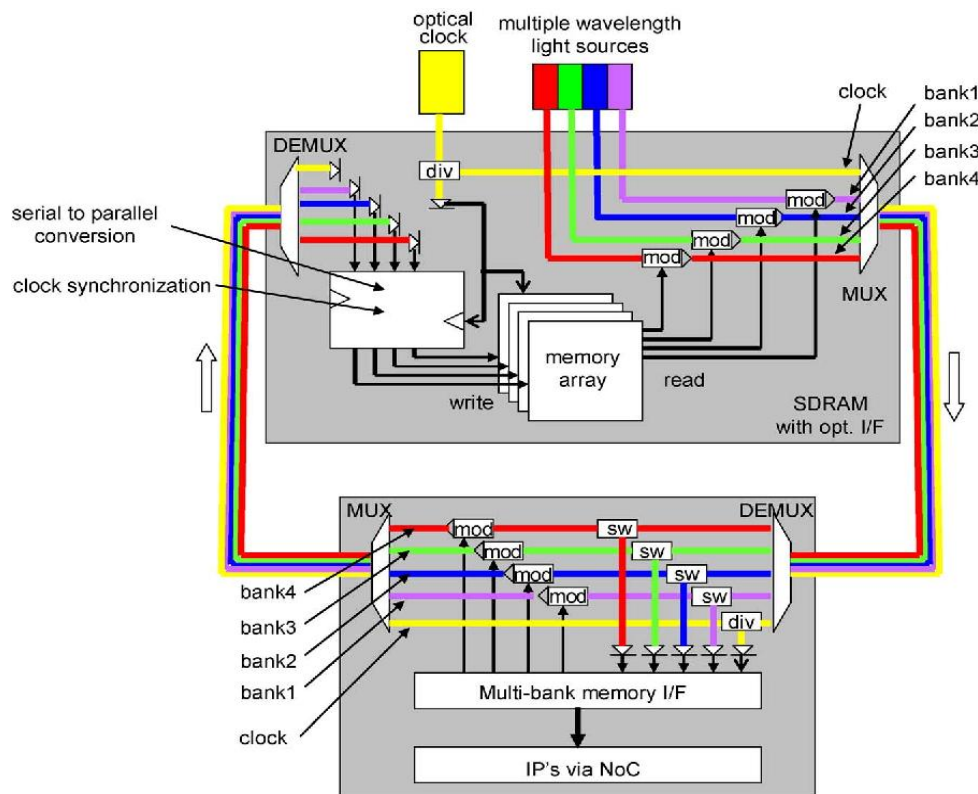
On-Chip Optical Interconnect.

K. Ohashi et al., Proc. IEEE (2009)

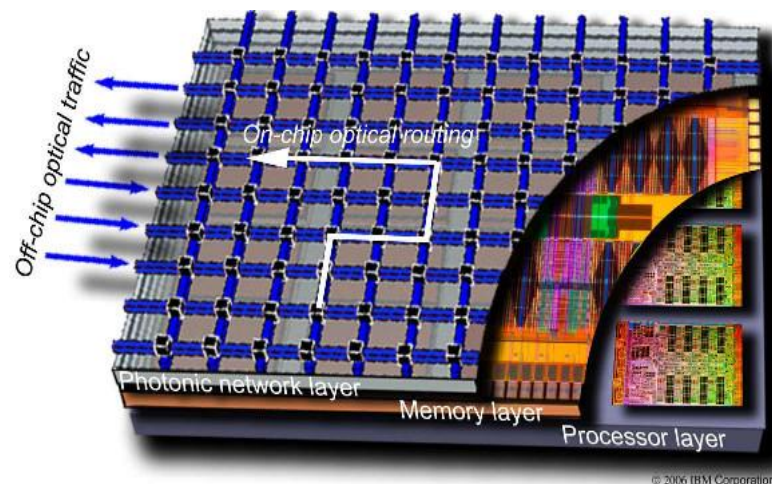
Integrated optical interconnect for
on-chip data transport.

I. O'Connor et al., IEEE (2006)

Si-фотоника: монолитная платформа



On-Chip Optical Interconnect.
K. Ohashi et al., Proc. IEEE (2009)
 Integrated optical interconnect for
 on-chip data transport.
I. O'Connor et al., IEEE (2006)



Концепция использования оптических линий связи в системах класса Network-on-chip (сеть с коммутацией пакетов). Чипы с оптическими шинами для связи процессора с памятью или различных блоков процессора между собой.
 IBM (2012): технология 90 нм, 50 транзисторов паралл., по 25 Гбит/с.

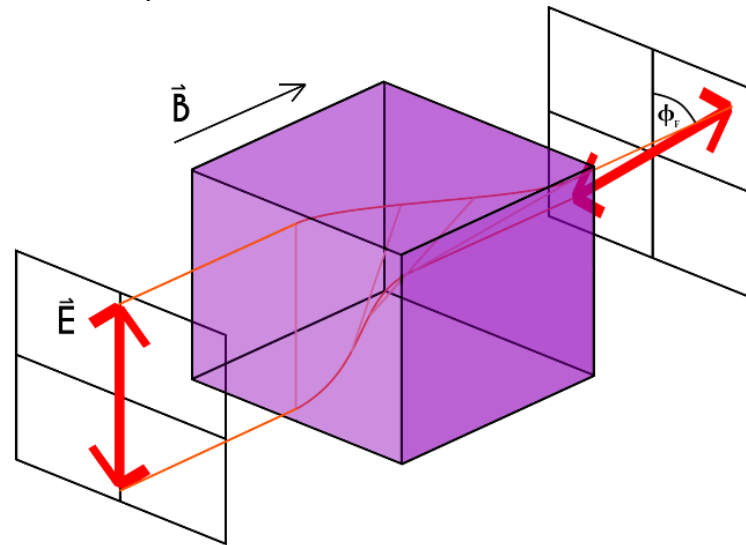
Магнитооптические эффекты

МО эффекты: Фарадея, Керра, Коттона-Мутона (Фохта)

- вращение плоскости поляризации света
- изменения поляризации света (эллиптичность)
- поглощение света (например, магнитный круговой дихроизм)

Эффект Фарадея (1845)

- линейно поляризованный свет
- магнитное поле вдоль направления распространения света
- вращение плоскости поляризации света

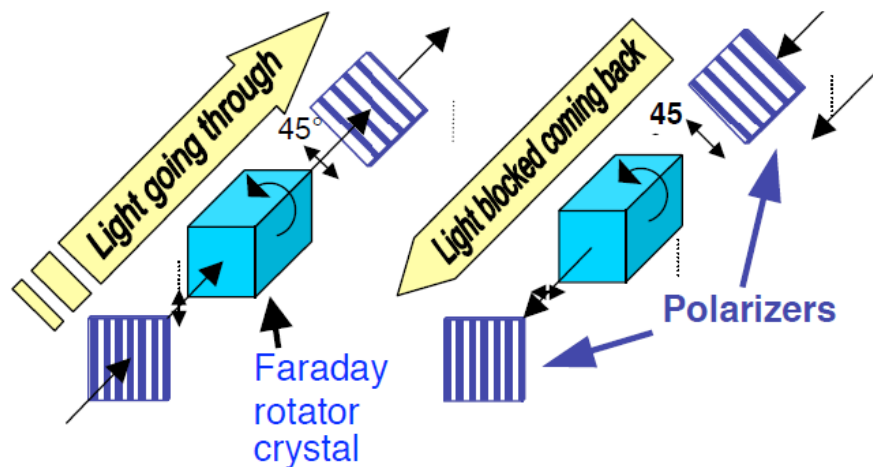


M. Faraday. Philos. T. R. Soc. Lond. 136, 1–20 (1846)

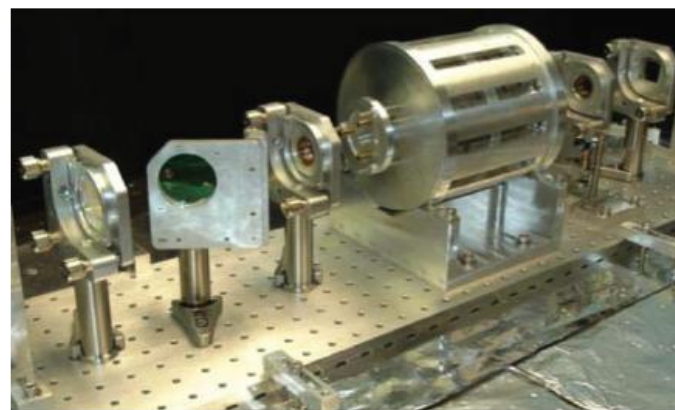
A. K. Zvezdin, V. A. Kotov. Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials (IOP Publishing Ltd, 1997)

Интегрально-оптические невзаимные устройства: оптический изолятор

Эффект Фарадея: выделенным направлением является направление продольного внешнего магнитного поля



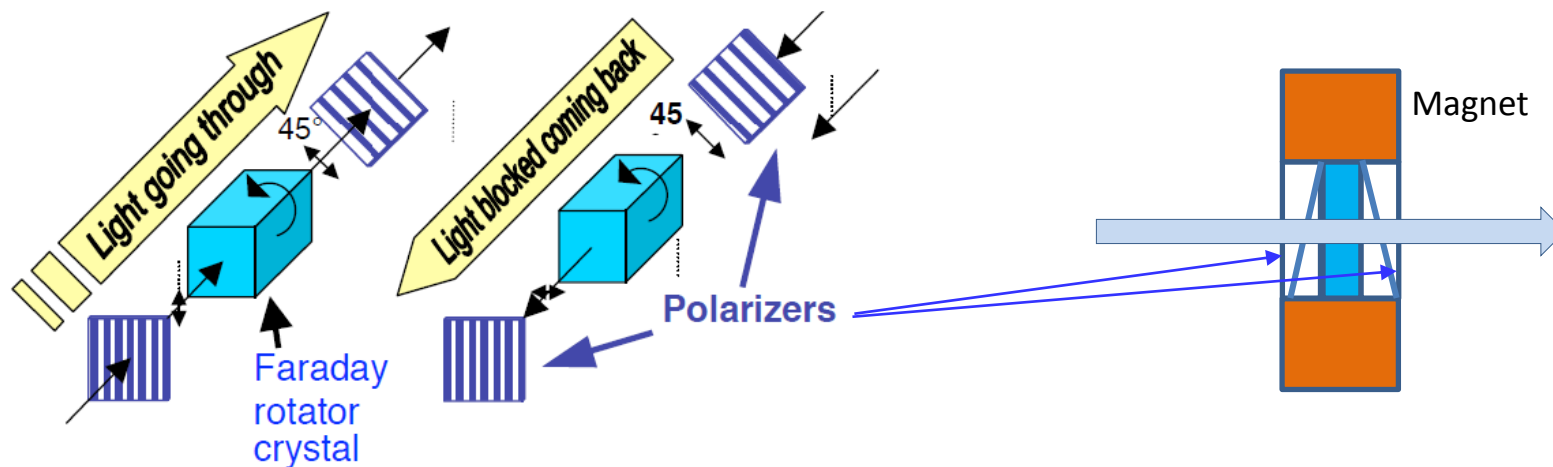
АО "НКТБ "Феррит": невзаимные ферритовые устройства метрового и дециметрового диапазонов.



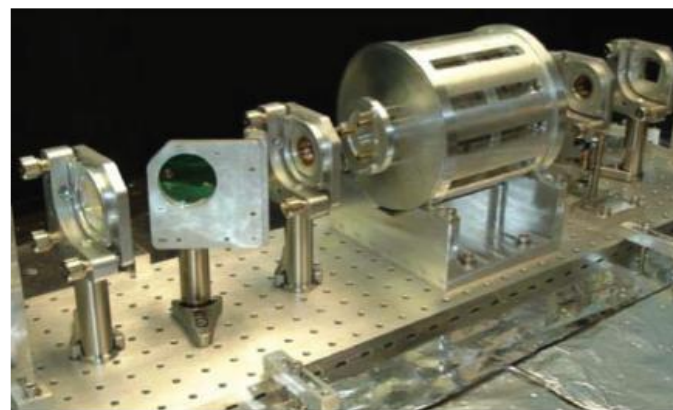
ИПФ РАН: оптический изолятор Фарадея. Детектор гравитационных волн: чувств. 10^{-19} м

Интегрально-оптические невзаимные устройства: оптический изолятор

Эффект Фарадея: выделенным направлением является направление продольного внешнего магнитного поля



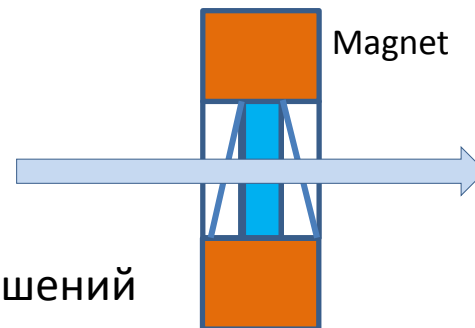
АО "НКТБ "Феррит": невзаимные ферритовые устройства метрового и дециметрового диапазонов.



ИПФ РАН: оптический изолятор Фарадея. Детектор гравитационных волн: чувств. 10^{-19} м

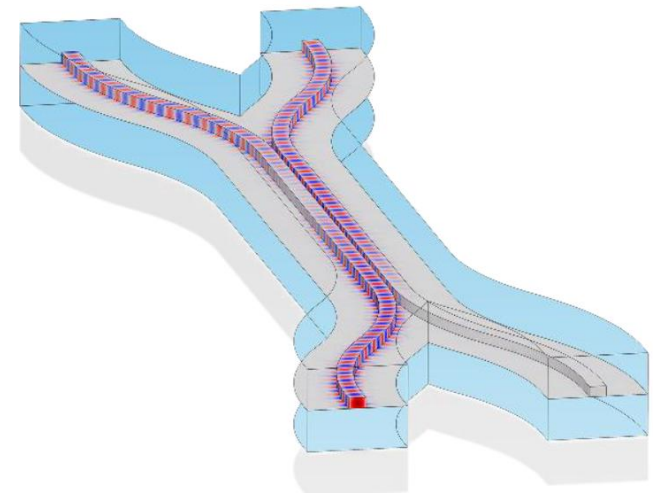
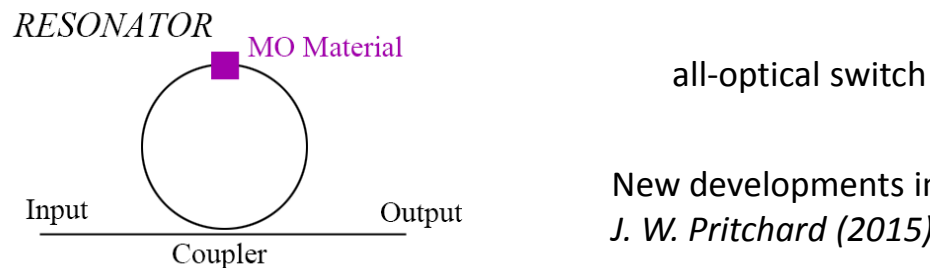
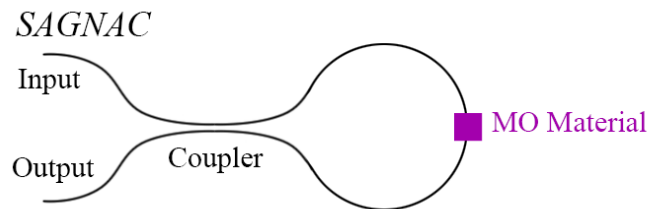
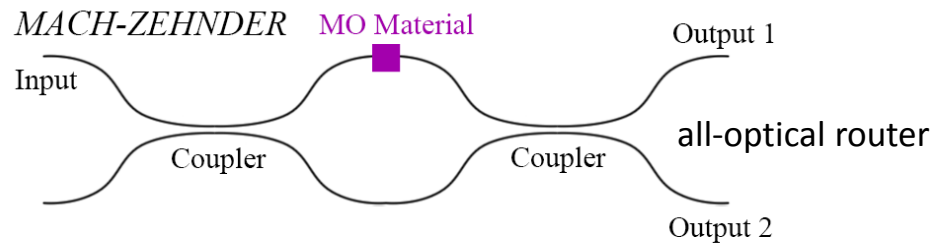
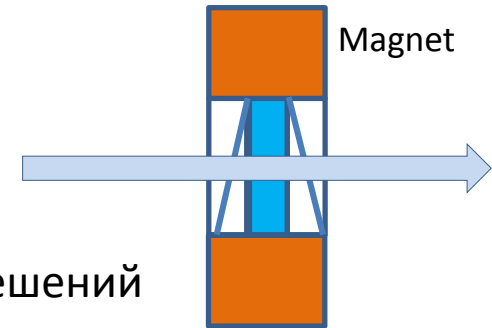
Оптический изолятор для оптики-на-кристалле

- Планарное исполнение
- Размеры
- Термостабильность
- Совместимость с технологиями УБИС
- Поиск новых материалов и технологических решений



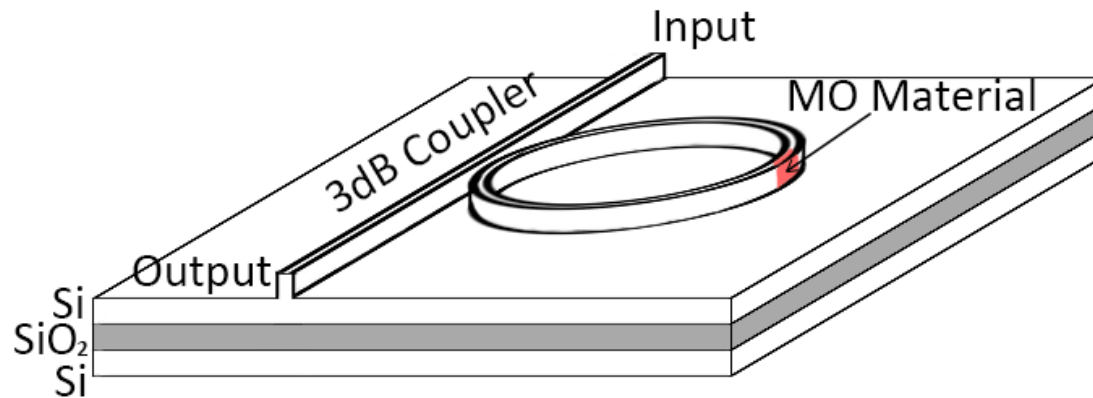
Оптический изолятор для оптики-на-кристалле

- Планарное исполнение
- Размеры
- Термостабильность
- Совместимость с технологиями УБИС
- Поиск новых материалов и технологических решений

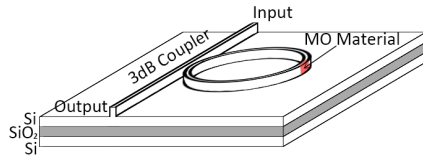


New developments in magneto-optic interferometric switching.
J. W. Pritchard (2015)

Оптический изолятор для оптики-на-кристалле

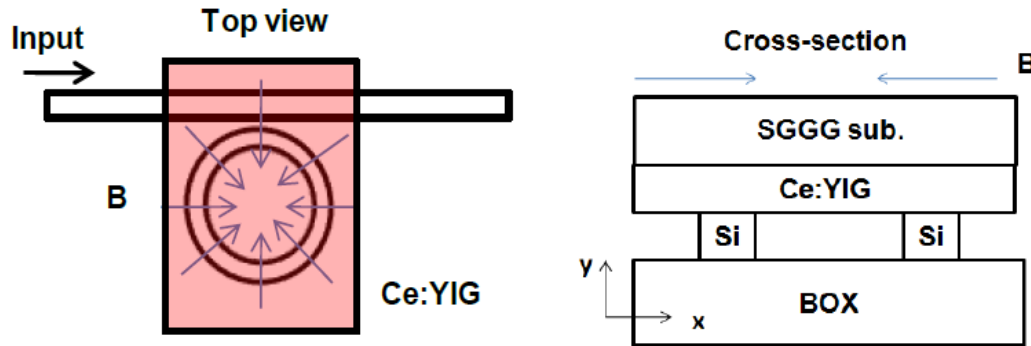


Оптический изолятор для оптики-на-кристалле

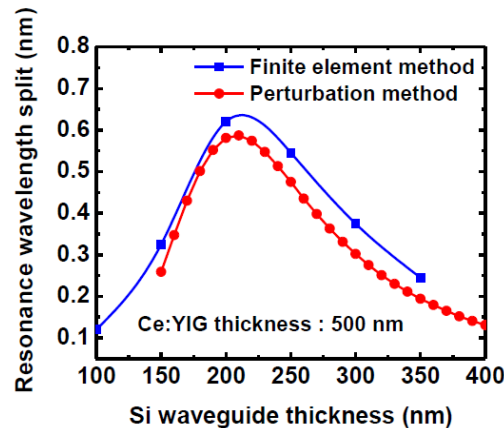
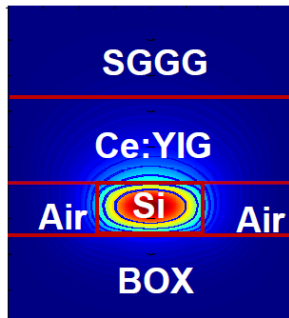


Magneto-optical nonreciprocal phase shift in garnet/silicon-on-insulator waveguides.

R. L. Espinola et al., Optics Letters 29, 941 (2004)

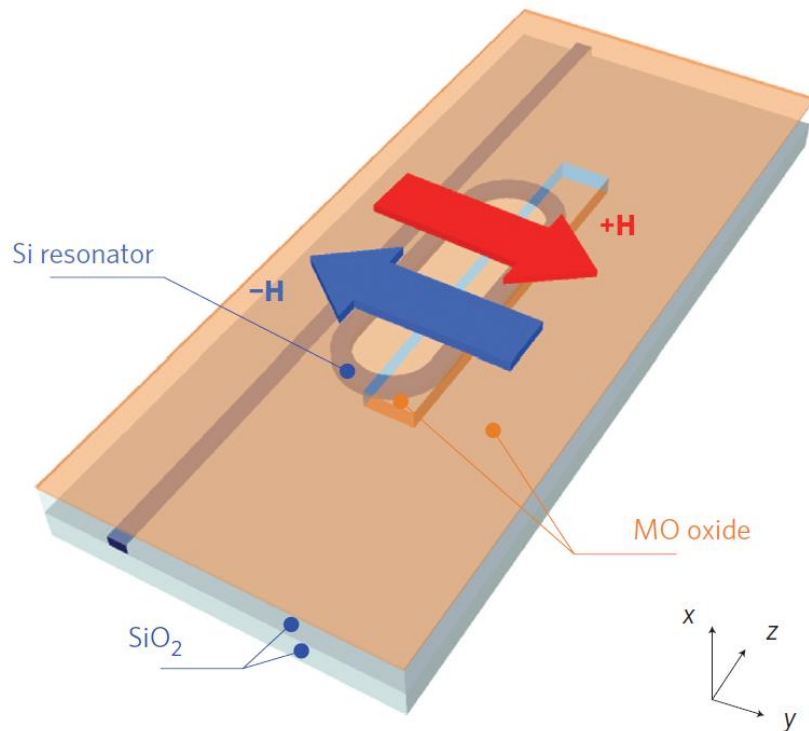


Silicon ring isolators with bonded nonreciprocal magneto-optic garnets. Si waveguide is 600 nm wide, 295 nm thick with 500-nm-thick Ce:YIG on the top. The diameter of the magnet (1.6 mm) is slightly smaller than that of the ring isolator (1.8 mm). 9-dB isolation at 1550 nm wavelength.



M.-C. Tien et al., Optics Express 19, 11740 (2011)

Монолитно интегрированный оптический изолятор для оптики-на-кристалле



On-chip optical isolation in monolithically integrated non-reciprocal optical resonators. 290 μm in length. 100 nm garnet film layer. 1,500 Oe magnetic field. Up to 19.5 dB isolation at 1,550 nm.

L. Bi et al., Nature Photonics 5, 758 (2011)

Monolithic on-Chip Nonreciprocal Photonics Based on Magneto-Optical Thin Films.

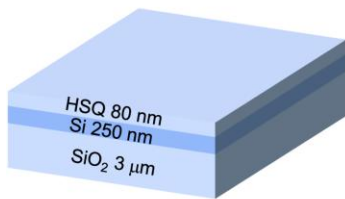
Hu, Juejun et al. Proc. SPIE, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies (2016)

Монолитно интегрированный оптический изолятор для оптики-на-кристалле

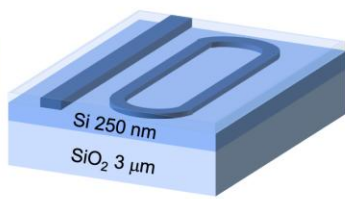
Nonreciprocal racetrack resonator based on vacuum-annealed magneto-optical cerium-substituted yttrium iron garnet.

T. Goto et al., Optics Express 22, 19047 (2014)

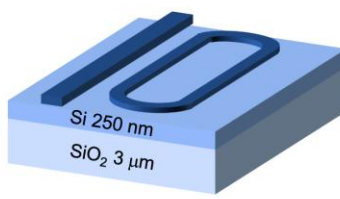
(a) HSQ coating



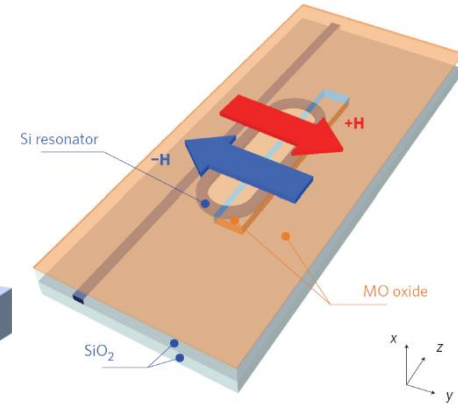
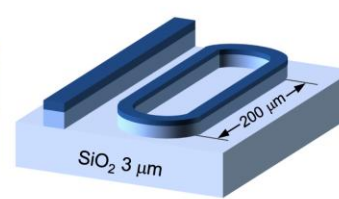
(b) EB exposure



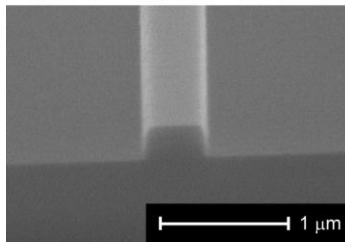
(c) Development



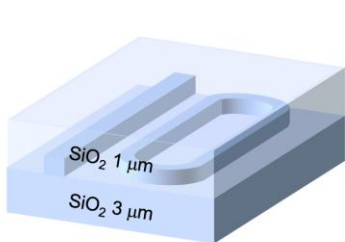
(d) Etching



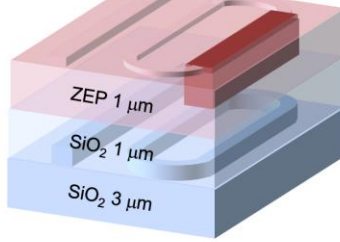
(e) Waveguide



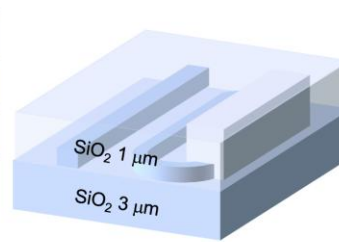
(f) CVD



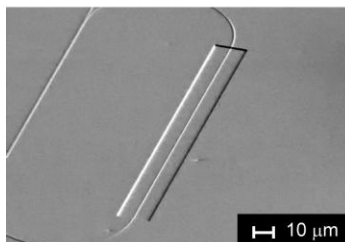
(g) ZEP coating & EB exposure



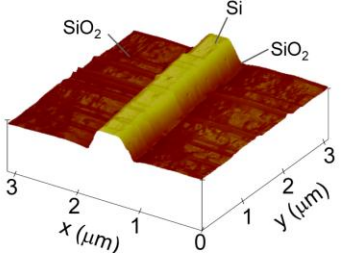
(h) RIE



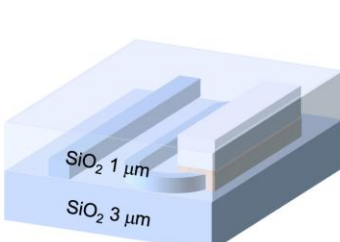
(i) Etched SiO2 surface



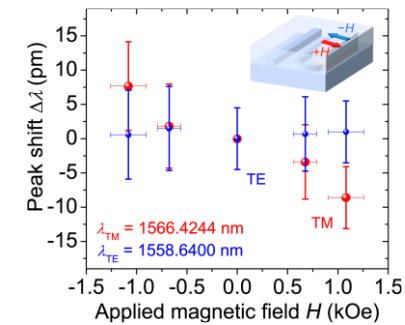
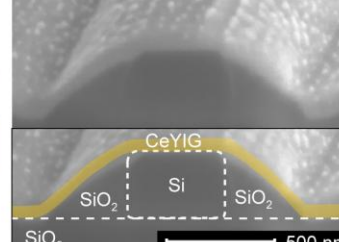
(j) Waveguide after RIE



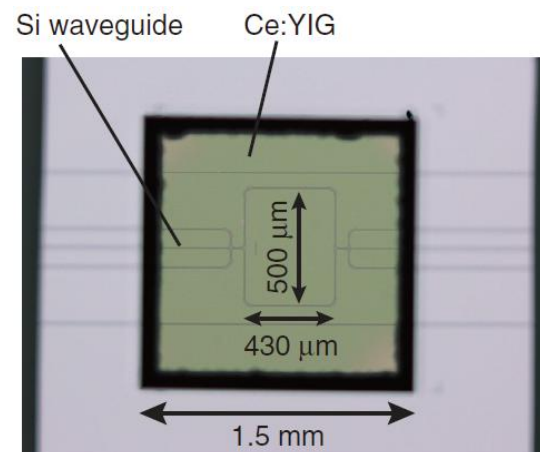
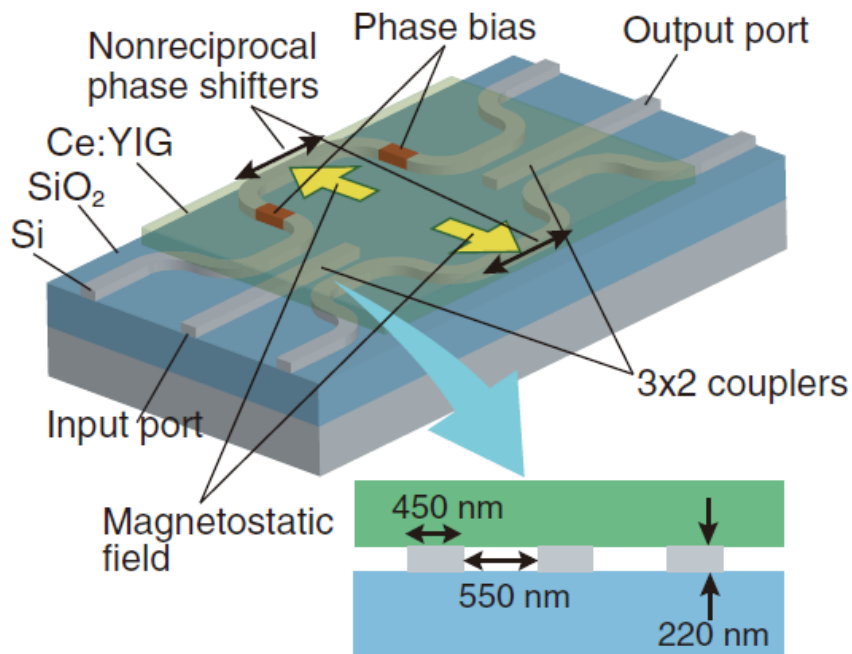
(k) MO film depo. & anneal



(l) MO covered waveguide



30 dB оптический изолятор для оптики-на-кристалле



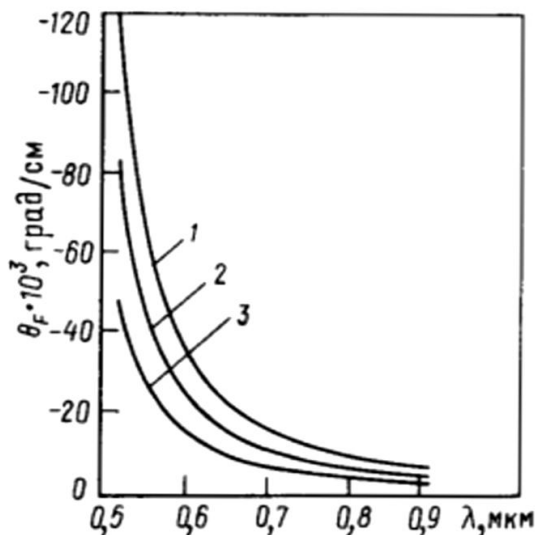
Microscope image of a fabricated MZI silicon waveguide optical isolator

Schematic illustration of an silicon-on-insulator (SOI) waveguide optical isolator based on Mach-Zehnder interferometer (MZI). **30 dB isolation** at 1548 nm.

Magneto-optical non-reciprocal devices in silicon photonics.

Y. Shoji et al., Science and Technology of Advanced Materials, 15:1, 014602 (2014)

Магнитооптические материалы



Ферриты со структурой граната,

напр. $(\text{Bi,Lu})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$

- Эффект Фарадея: $\Theta_F = f(\lambda)$

- Термостабильность: $\Theta_F = f(M)$, $M = f(T)$

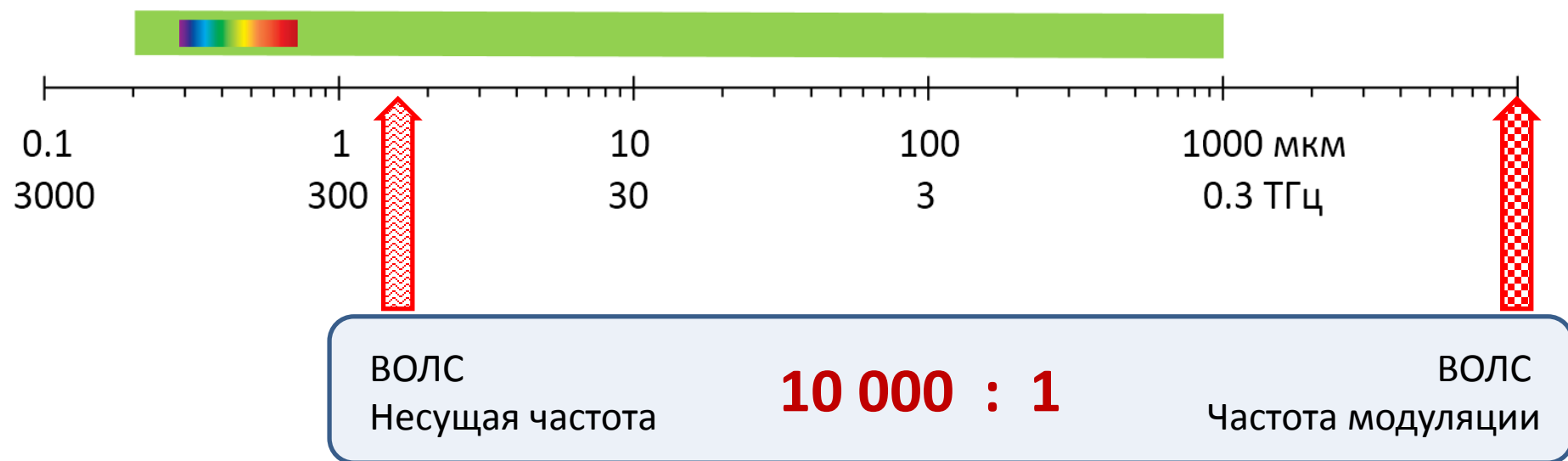
- Синтез гранатов на кремнии:
постоянная решетки $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ равна 1,238 нм,
тогда как для кремния – 0,543 нм

Технологии On-chip wireless silicon photonics: from reconfigurable interconnects to lab-on-chip devices. *C. García-Meca et al. Light: Science & Applications 6, e17053 (2017)*

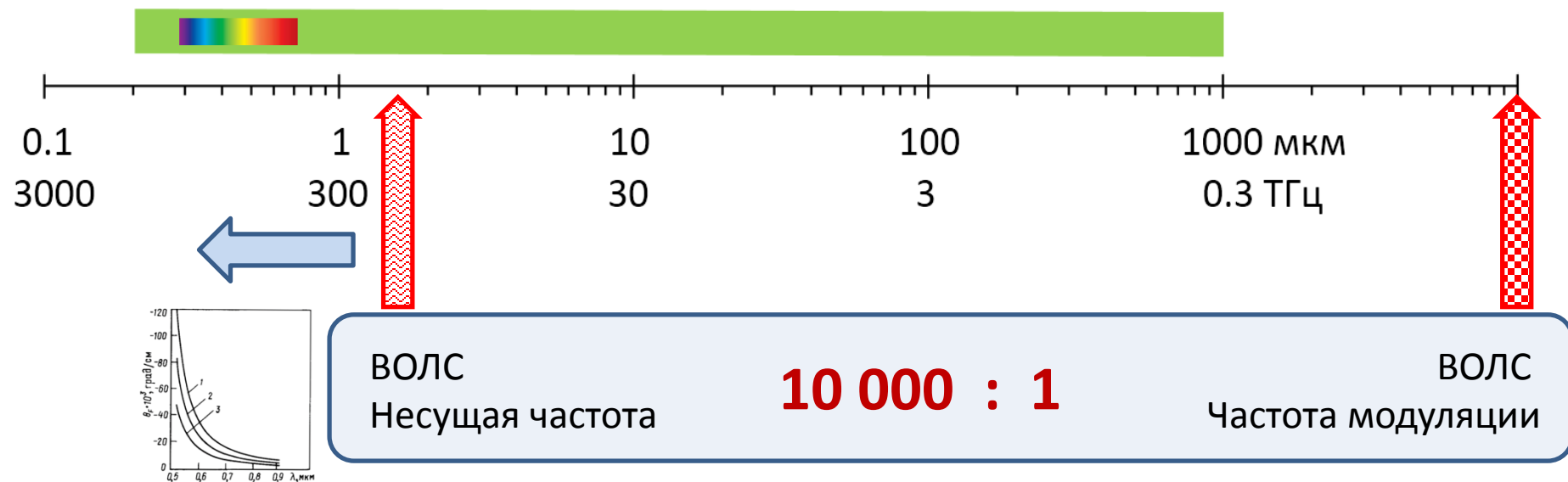
Поиск новых физических эффектов Nonreciprocal Transverse Photonic Spin and Magnetization-Induced Electromagnetic Spin-Orbit Coupling. *M. Levy & D. Karki. Scientific Reports 7:39972 (2017).*
Anomalously Damped Heat-Assisted Route for Precessional Magnetization Reversal in an Iron Garnet. *C. S. Davies et al., Phys. Rev. Letters 122, 027202 (2019)*

Длина волны On-chip optical interconnect using visible light. *W. Cai et al. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering 18(9):1288-1294 (2017)*

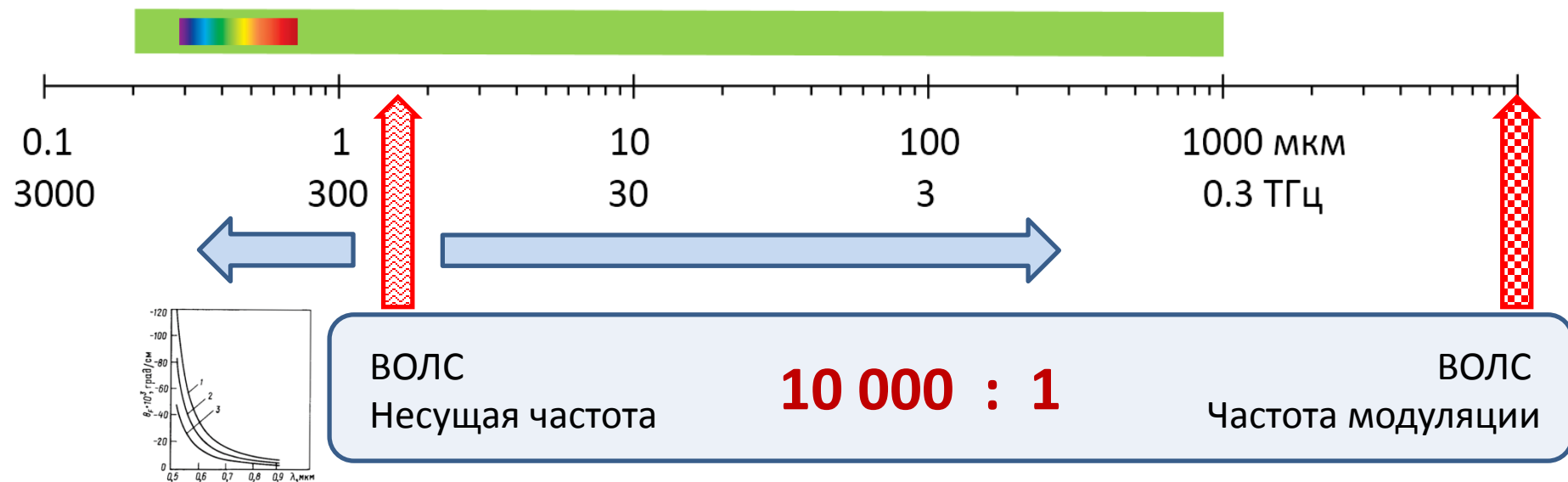
Диапазон несущих частот для оптики-на-кристалле



Диапазон несущих частот для оптики-на-кристалле

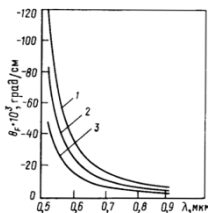
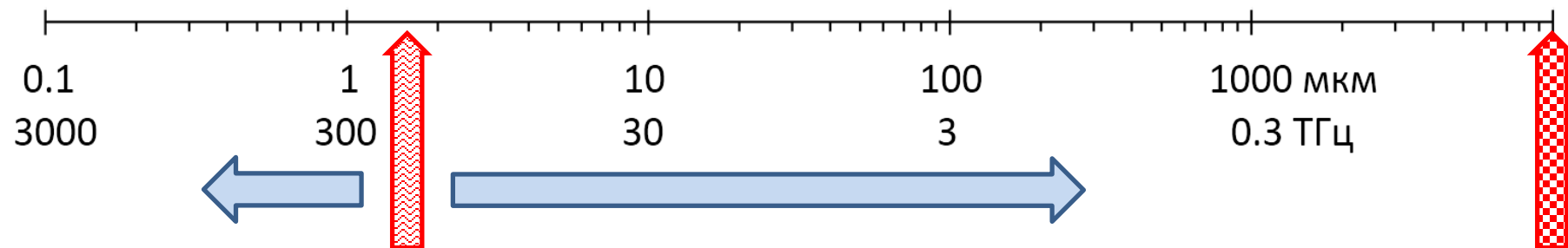
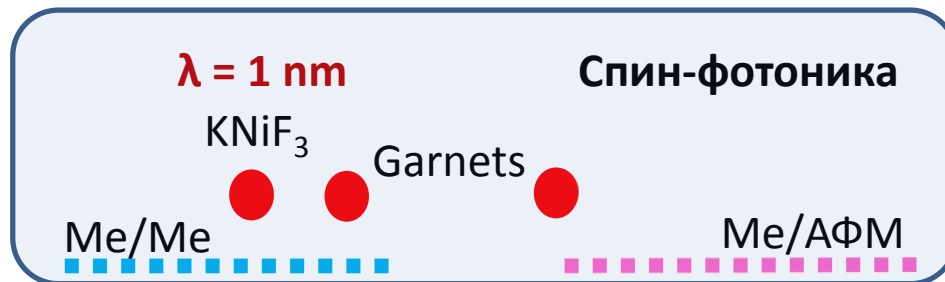


Диапазон несущих частот для оптики-на-кристалле



Диапазон несущих частот для оптики-на-кристалле

D. Bossini et al., Nature Comm. 7:10645 (2016)



ВОЛС
Несущая частота

10 000 : 1

ВОЛС
Частота модуляции

Заключение

- Оптика-на-кристалле как вариант межсоединений верхнего уровня больших интегральных схем развивается более 20 лет и находится на уровне разработки и реализации экспериментальных макетов.
- Идет поиск способов построения оптики-на-кристалле как на платформе Si-фотоники, так и совместно с элементами спин-фотоники.
- Магнитооптические невзаимные элементы могут быть монолитно интегрированными частями оптики-на-кристалле.
- Необходима разработка новых термостабильных материалов с высокими магнитооптическими эффектами и создание устройств, совместимых с УБИС как по технологиям, так и по размерам.

Заключение

- Оптика-на-кристалле как вариант межсоединений верхнего уровня больших интегральных схем развивается более 20 лет и находится на уровне разработки и реализации экспериментальных макетов.
- Идет поиск способов построения оптики-на-кристалле как на платформе Si-фотоники, так и совместно с элементами спин-фотоники.
- Магнитооптические невзаимные элементы могут быть монолитно интегрированными частями оптики-на-кристалле.
- Необходима разработка новых термостабильных материалов с высокими магнитооптическими эффектами и создание устройств, совместимых с УБИС как по технологиям, так и по размерам.

Спасибо за внимание