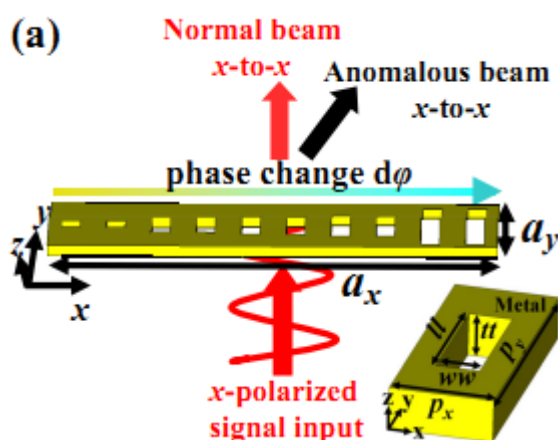


**Когерентный контроль (продолжение).**

**Jinhui Shi, Xu Fang, Edward T. F. Rogers, Eric Plum, Kevin F. MacDonald, and Nikolay I. Zheludev. Coherent control of Snell's law at metasurfaces // Optics Express. 2014. V.22. No.17. P.21051-21060. (продолжение)**



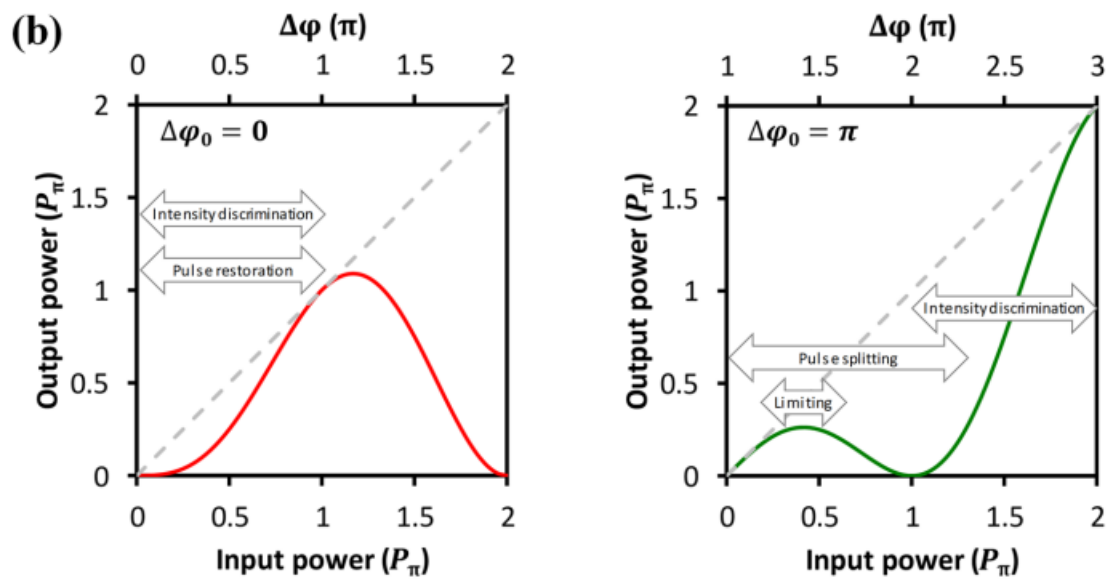
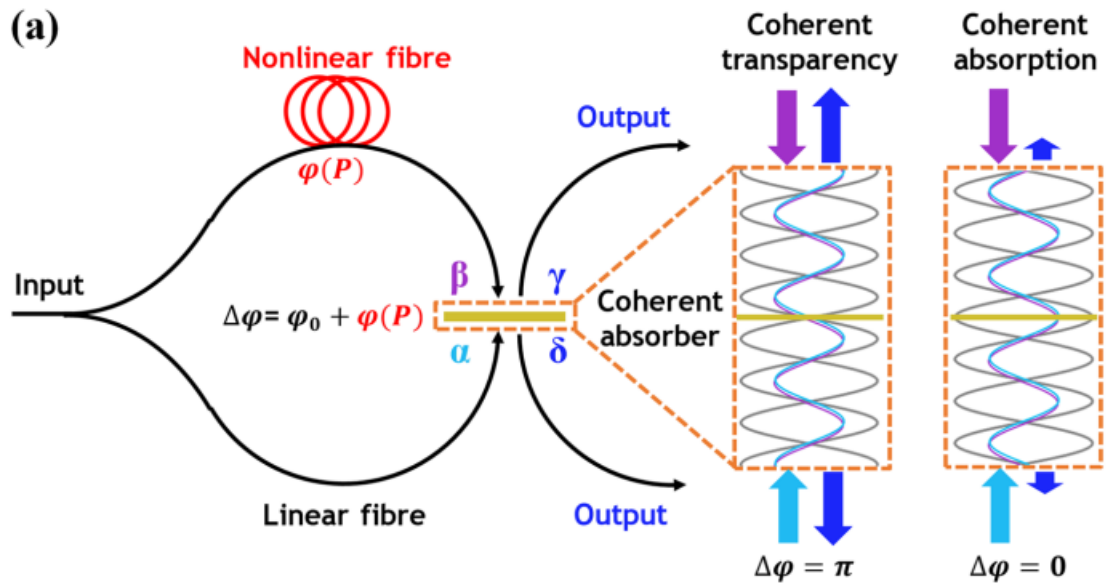
**Angelos Xomalis, Yongmin Jung, Iosif Demirtzioglou, Cosimo Lacava, Eric Plum, David J. Richardson, Periklis Petropoulos, and Nikolay I. Zheludev. Nonlinear control of coherent absorption and its optical signal processing applications // APL Photonics. 2019. V.4. Paper 106109.**

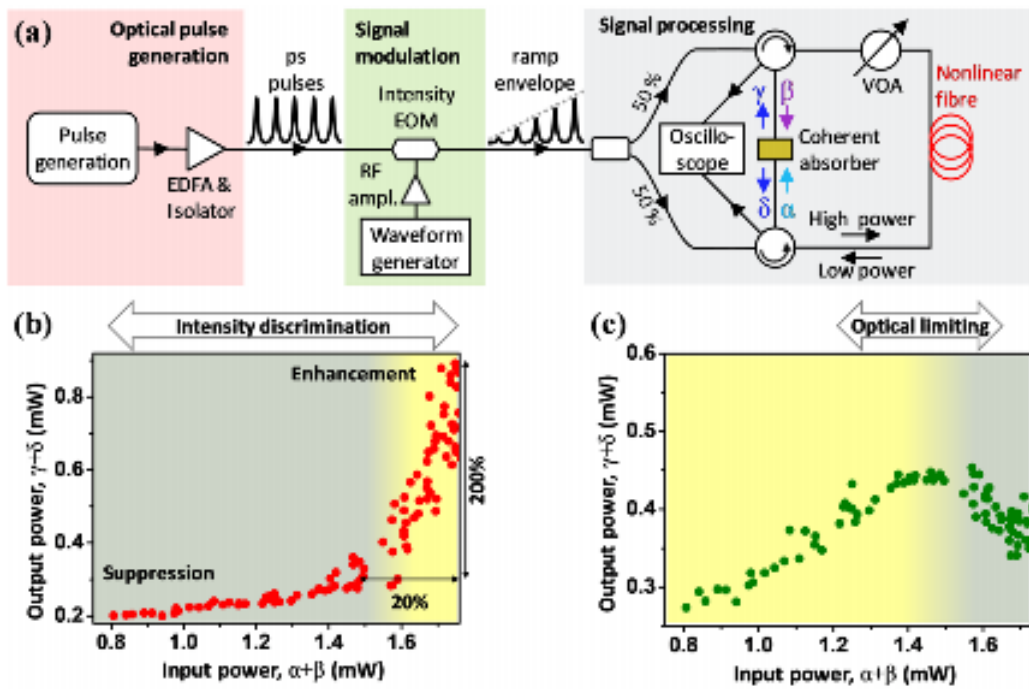
**<https://doi.org/10.1063/1.5123547>**

Nanostructured plasmonic metamaterial as the thin absorber.

Предельно тонкий поглотитель, взаимодействующий только с электрическим полем световой волны может поглотить не более 0.5 мощности бегущей волны. В пучности стоячей волны такой поглотитель может поглотить всю мощность встречных волн (когерентное поглощение).

Актуально для чисто оптического управления амплитудами световых импульсов для оптических компьютеров.

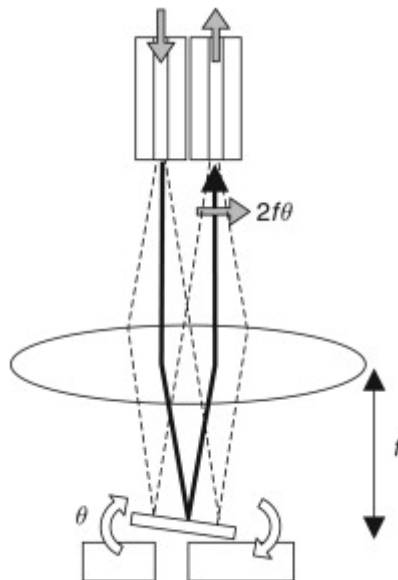




EDFA — Erbium Doped Fiber Amplifier. Isolator, например, на основе поляризатора и ячейки Фарадея.

EOM — Electro-Optic Modulator, например, на основе ячейки Погкельса и скрещенного поляризатора.

VOA — Variable Optical Attenuator:



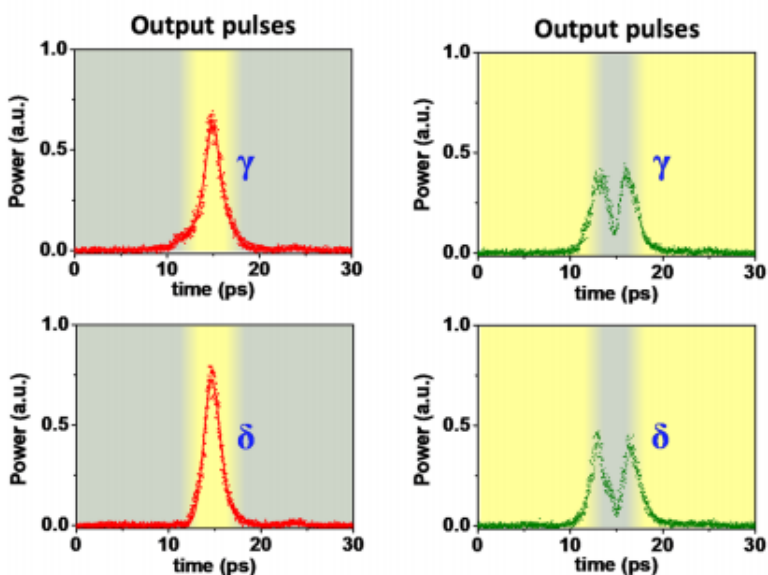
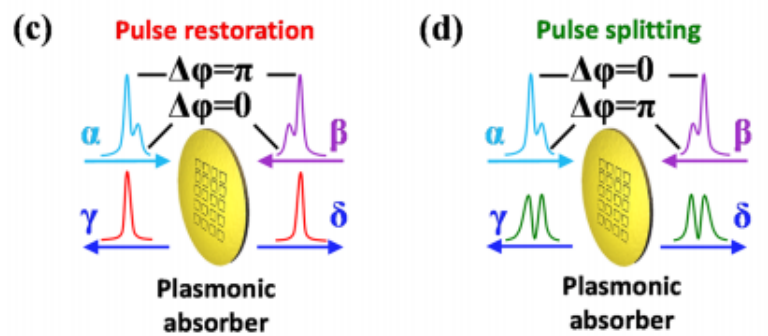
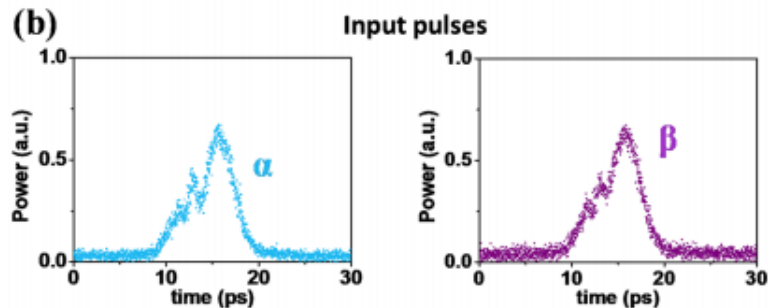
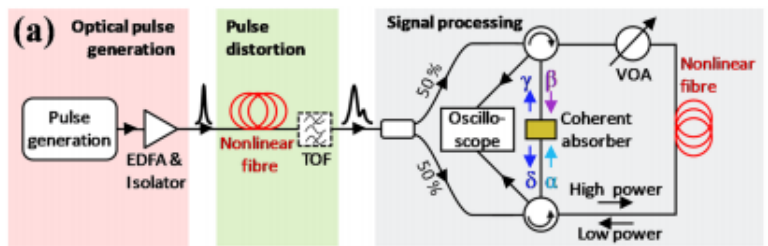


FIG. 3. Pulse restoration and pulse splitting. (a) Experimental setup where nonlinear coherent absorption arises from self-phase modulation of distorted optical pulses of 1550 nm wavelength interacting on a plasmonic metamaterial coherent absorber. EDFA—Erbium Doped Fiber Amplifier, TOF—Tunable Optical Filter, and VOA—Variable Optical Attenuator. [(b)–(d)] Amplitude profiles of (b) input pulses  $\alpha$  (left) and  $\beta$  (right) entering the coherent absorber device and [(c) and (d)] output pulses  $\gamma$  (top) and  $\delta$  (bottom) leaving the device. In channel  $\beta$ , the low and high power pulse components accumulate different nonlinear phase shifts through interaction with the nonlinear fiber. When a pulse in channel  $\beta$  interacts on the coherent absorber with a pulse in channel  $\alpha$  (that does not undergo nonlinear transformation), the high and low intensity components of the pulses experience different levels of absorption. Tuning the initial phase shift between the channels and the amount of intensity-dependent phase shift in the fiber, one can realize two limiting cases: (c) preferential absorption of low-power pulse components resulting in pulse narrowing/restoration and (d) preferential absorption of high-power pulse components resulting in pulse splitting. Coherent absorption (gray) occurs for pulse components interacting on the coherent absorber with a phase difference of  $\Delta\phi \approx 0$ , while coherent transmission (yellow) occurs for  $\Delta\phi \approx \pi$ .

Подавление шумов и выравнивание амплитуды импульсов.

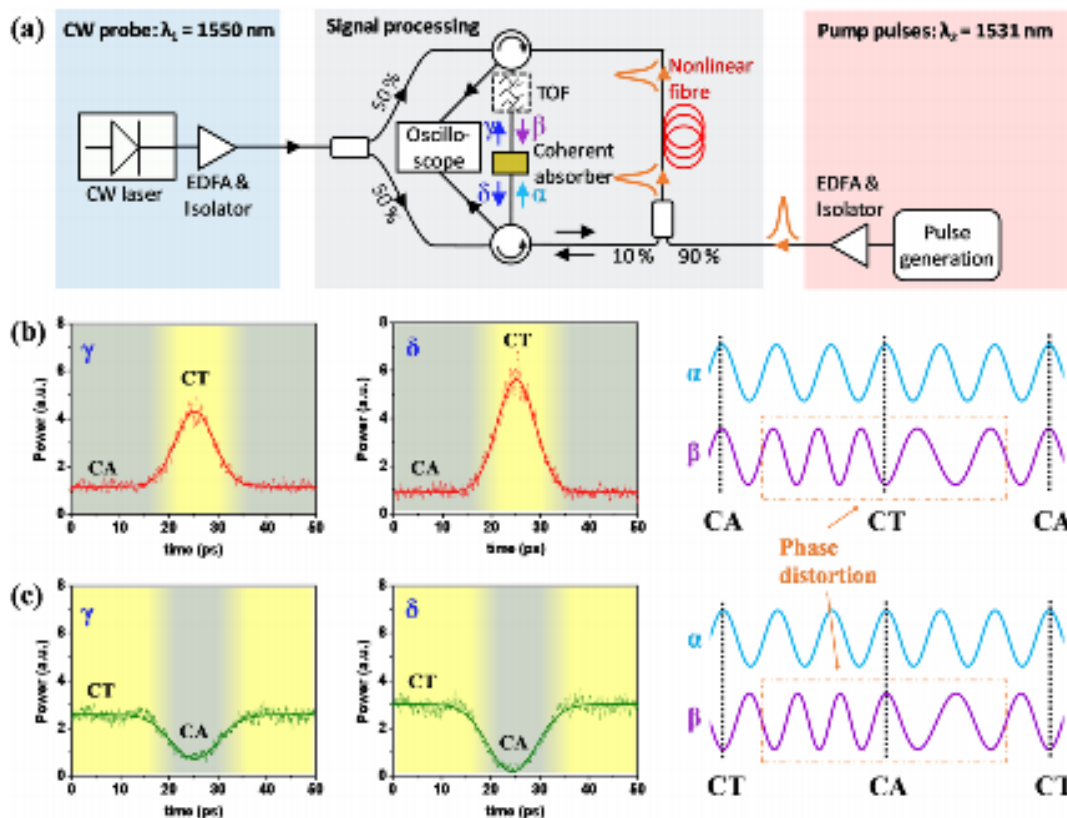


FIG. 4. Signal transfer between wavelengths. (a) Experimental setup where nonlinear coherent absorption of 1550 nm CW probe light on a plasmonic metamaterial absorber is controlled by cross-phase modulation in a nonlinear fiber caused by 1531 nm wavelength laser pulses. EDFA—Erbium Doped Fiber Amplifier; TOF—Tunable Optical Filter. (b) and (c) Time traces of the probe output channels ( $\gamma$  and  $\delta$ ) where a pump-induced nonlinear phase distortion of probe input wave  $\beta$  leads to (b) increased transmission (yellow) and (c) increased absorption (gray) on the metamaterial absorber. The schematics illustrate how the nonlinear phase distortion affects the interference of the probe input waves  $\alpha$  and  $\beta$  on the metamaterial absorber. Constructive interference results in coherent absorption (CA), while destructive interference results in coherent transmission (CT).

Передача сигнала между несущими частотами (длинами волн). Модуляция амплитуды одного сигнала превращается в модуляцию амплитуды сигнала на другой частоте. Излучение с длиной волны 1550 нм постоянно по амплитуде. Импульс излучения с длиной волны 1531 нм. Лазерный импульс изменяет показатель преломления в нелинейном волокне и изменяет когерентное поглощение или просветление в пленке метаматериала.

TOF — Tunable Optical Filter.

### PT-симметрия.

Следующие сведения взяты из кандидатской диссертации

Шубин Н. М. Исследование резонансов и антирезонансов в квантовых проводниках и элементах молекулярной наноэлектроники на их основе. 2019.

В изолированных квантовых системах энергия сохраняется. В открытых квантовых системах конечное время жизни состояния  $\Delta t$  можно описать комплексной энергией  $E$  с мнимой частью  $\Delta E$  такой, что  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$ .

Соответственно операторы Гамильтона перестают быть эрмитовыми. Квантовая система вместе с внешней средой описывается эрмитовым гамильтонианом. Возникновение комплексных величин энергии и неэрмитовых операторов — это результат квантового описания части общей квантовой системы с учетом открытости этой части.

Действительность энергии и эрмитовость гамильтониана обеспечивают унитарную эволюцию волновой функции системы, то есть обеспечивают сохранение нормы (числа частиц). Однако, оказалось, что действительность собственных значений может иметь место и для некоторых классов неэрмитовых операторов, например, гамильтониана обладающего симметрией по отношению к одновременной инверсии координат (P) и времени (T), но не симметричного относительно каждой из них по отдельности.

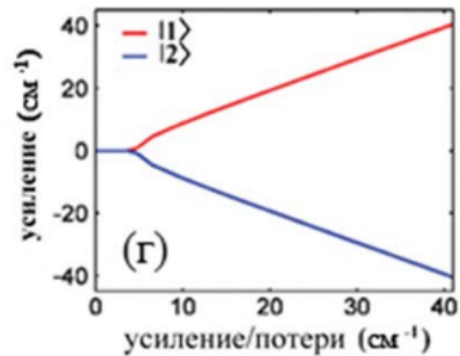
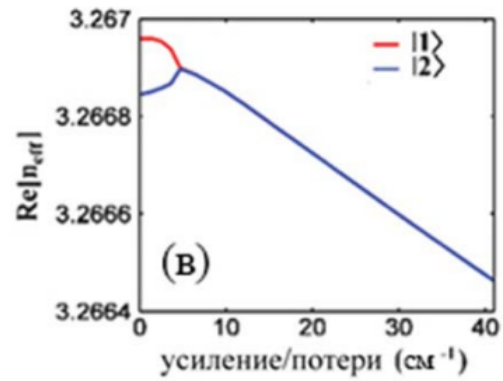
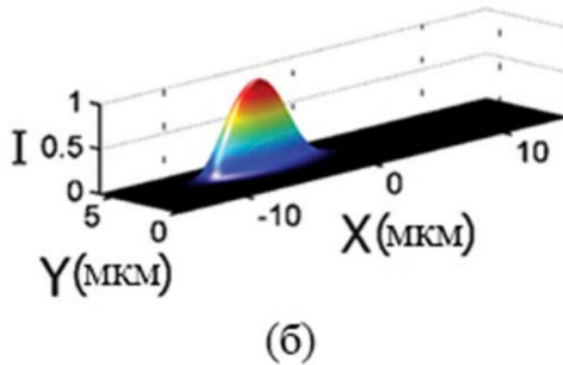
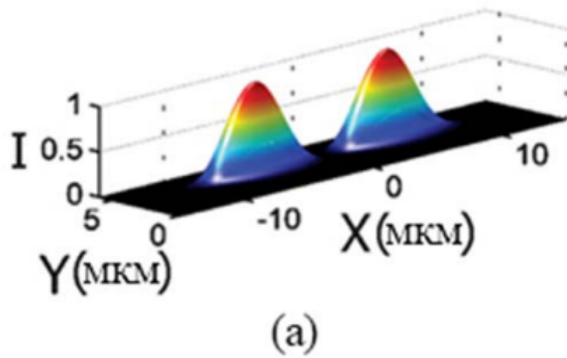
Системы с PT симметрией интересны тем, что при изменении некоторого параметра системы (tuning parameter) есть особая точка (exceptional point), в которой происходит нарушение PT симметрии.

Открытая система с несохранением числа частиц крайне проблематична для фермионов, поэтому в основном нарушение PT симметрии находит применение в оптике. PT-симметричность может быть реализована как зеркально-симметричное распределение областей рождения и уничтожения бозе-частиц. Волновое уравнение, описывающее распространение электромагнитных волн в параксиальном приближении, математически эквивалентно квантово-механическому уравнению Шредингера, поэтому PT-симметричные системы можно реализовывать в оптических структурах.

Мнимые части диэлектрической проницаемости описывают процессы поглощения и усиления сигнала. Поглощение, обращенное во времени, — это усиление. То есть PT-симметричные оптические системы — это системы, в которых при инверсии поглощение заменяется усилением и наоборот.

Активно исследуются PT-симметричные системы на примере оптических волокон с симметрично расположенными сердцевинами с затуханием и усилением. Интересно, что параметром нарушения PT-симметрии такого волокна может служить продольное скручивание волокна. Дело в том, что правая спираль при инверсии превращается в левую спираль.

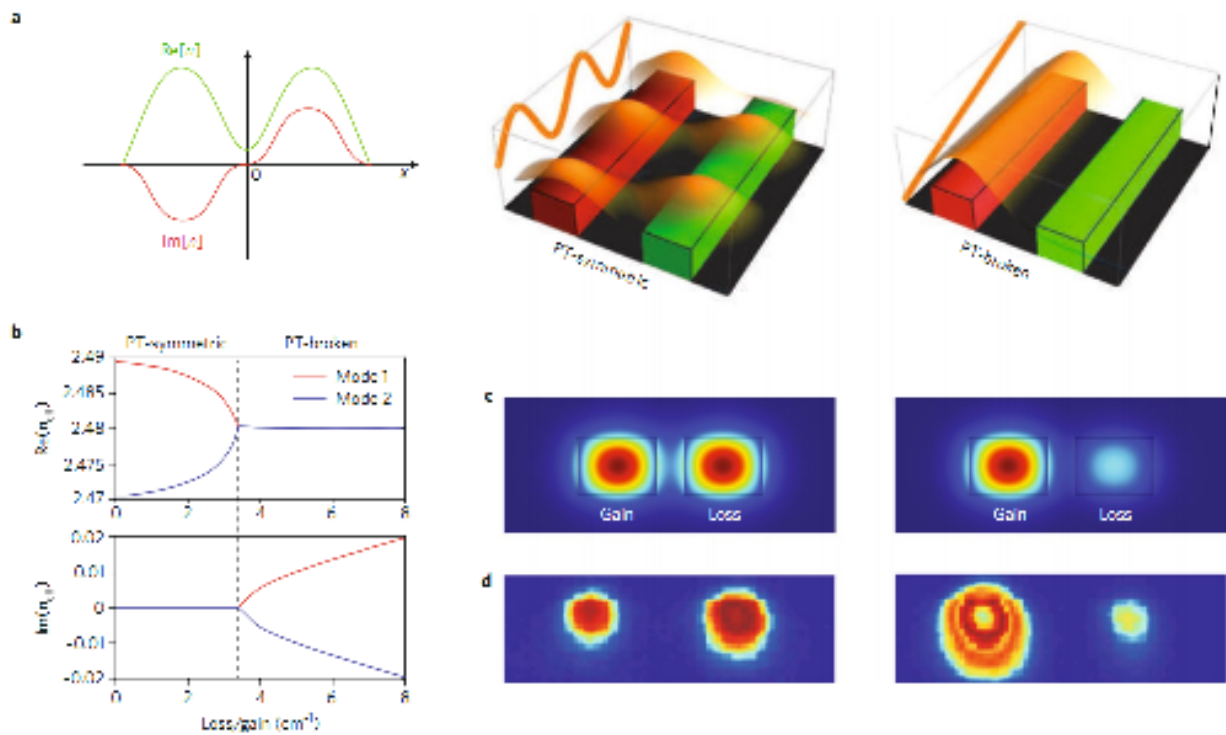
Обычно параметром нарушения PT-симметрии пары волокон с усилением и поглощением служит модуль усиления/потерь в паре.



Guo A. and others. Observation of PT-Symmetry Breaking in Complex Optical Potentials // Phys. Rev. Lett. 2009. T.103. №9. С. 93902.

В особой точке происходит фазовый переход, в результате которого наблюдается бесконечная чувствительность к изменению параметра системы. Именно этой чувствительностью и определяется интерес к РТ-симметрии в оптике.

Как следствие дисперсионных соотношений Крамерса — Кронига среда с ненулевой мнимой частью диэлектрической проницаемости должна обладать дисперсией. В результате этого условие РТ-симметричности может быть выполнено только для дискретного набора частот.



**Fig. 1 | PT symmetry and phase transition in photonics.** **a**, Schematics of the optical potential and its realization using two coupled waveguides<sup>1</sup>, where  $\text{Re}[n]$  and  $\text{Im}[n]$  represent the real and imaginary parts of the refractive index variation  $n$ , respectively. The wave patterns show the contrasting behaviours of wave dynamics in the two phases: PT-symmetric phase (middle) and PT-broken phase (right), for an initial wave injected in the gain waveguide from the front (left). **b**, Real and imaginary parts of the effective modal index for two supermodes, that is, the waveguide modes formed in the coupled waveguide system in **a**, displaying a PT transition. **c, d**, Numerically calculated spatial profiles of PT-symmetric (left) and PT-broken (right) supermodes in the coupled waveguide system (**c**), together with their experimental verification<sup>2</sup> (**d**). Figure adapted from: **a**, middle and right, ref. <sup>1</sup>, Macmillan Publishers Ltd; **d**, ref. <sup>2</sup>, Macmillan Publishers Ltd.

Liang Feng, Ramy El-Ganainy and Li Ge. Non-Hermitian photonics based on parity–time symmetry // Nature Photonics. 2017. V.11. P.752–762.

### ENZ epsilon-near-zero.

Вещественная часть диэлектрической проницаемости обращается в ноль примерно на плазменной частоте  $\omega_p$  материала ( $\omega_p^2 \equiv 4\pi N \frac{e^2}{m_e}$ , в системе СИ

$$\omega_p^2 \equiv N \frac{e^2}{m_e \epsilon_0}$$

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{n}^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + 2i\gamma)} \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}.$$

При падении света под любым углом на пластинку с нулевым показателем преломления происходит полное внутреннее отражение света, но плоская неоднородная волна при удалении от границы раздела почти не затухает  $E \sim e^{-i|k_z|z}$  при почти нормальном падении света  $\alpha \approx 0$

$$k_z^{(t)} = -ik \sqrt{\sin^2 \alpha - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}, \text{ где } n_2 \approx 0.$$



При отражении от плоскопараллельной пластинки толщиной  $h$  и очень малым показателем преломления  $n$

$$r_{\perp} = \frac{1-n}{1+n} \frac{2}{1+n} \cdot \frac{e^{ik_0nh}}{1 - \left(\frac{1-n}{1+n}\right)^2 e^{2ik_0nh}} \cdot \frac{1-n}{1+n} \cdot \frac{2n}{1+n} \approx \frac{-ik_0h}{2 - ik_0h},$$

где  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ .

Эффект суперсвязи волноводов.

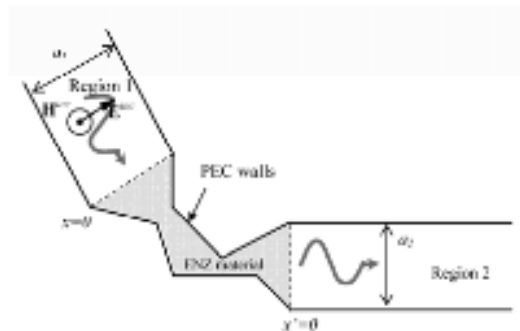


Fig. 1. (From reference [4]) Two parallel-plate waveguides are connected by an intermediate narrow channel filled with an ENZ material. The incoming wave is the fundamental TEM waveguide mode.

M. Silveirinha, N. Engheta, "Tunneling of Electromagnetic Energy through Subwavelength Channels and Bends using  $\epsilon$ -Near-Zero Materials" // Phys. Rev. Lett. 97, 157403, 2006.

PEC — perfect electrical conductor, идеальный проводник.

Коэффициент отражения ENZ переходника

$$r = \frac{(a_1 - a_2) + ik_0\mu S}{(a_1 + a_2) - ik_0\mu S},$$

где  $a_1$  и  $a_2$  — ширина волноводного слоя двух волноводов,  $S$  — площадь серой части рисунка,  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость

ENZ материала,  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  — волновое число в вакууме.

При условии  $a_1 = a_2$ , уменьшая  $S$ , можно неограниченно уменьшить коэффициент отражения ENZ переходника независимо от его изгибов. Дело в том, что при нулевом показателе преломления оптическая толщина ENZ переходника будет одинаково нулевой независимо от его формы. Переходник в таком случае будет эквивалентен плоскопараллельной пластинке независимо от его формы.

Интересно, что уменьшая площадь поперечного сечения ENZ переходника до крайне малых субволновых размеров можно усиливать эффекты нелинейной оптики.

ENZ материал удобен для формирования любой формы фронта волны. Если на входе в материал свет падает перпендикулярно границы материала, то на выходе форма поверхности фронта волны совпадает с формой поверхности ENZ материала.

ZIM — zero index media. Материал с одновременным  $\varepsilon = 0$  и  $\mu = 0$ .