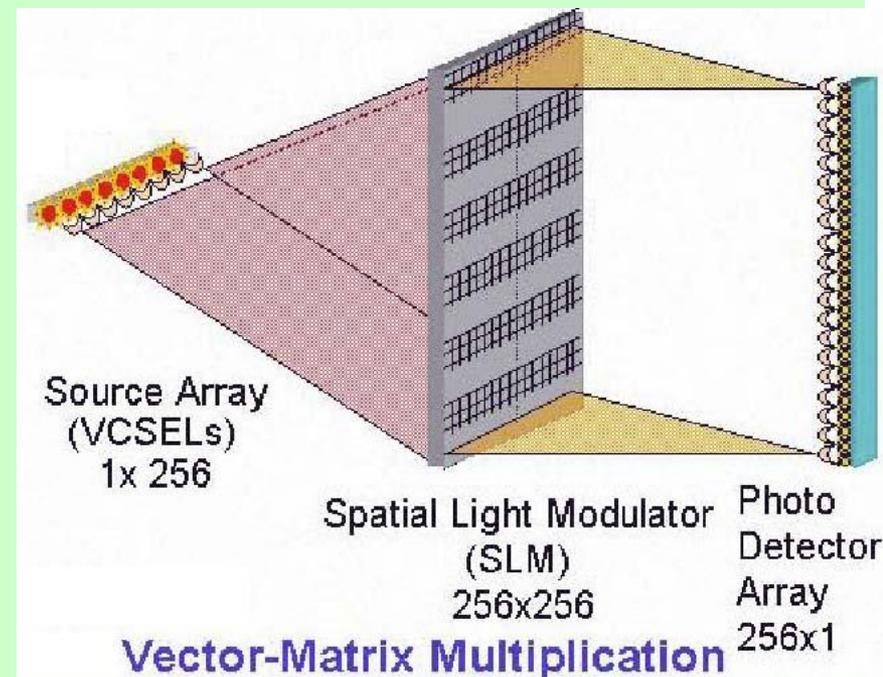


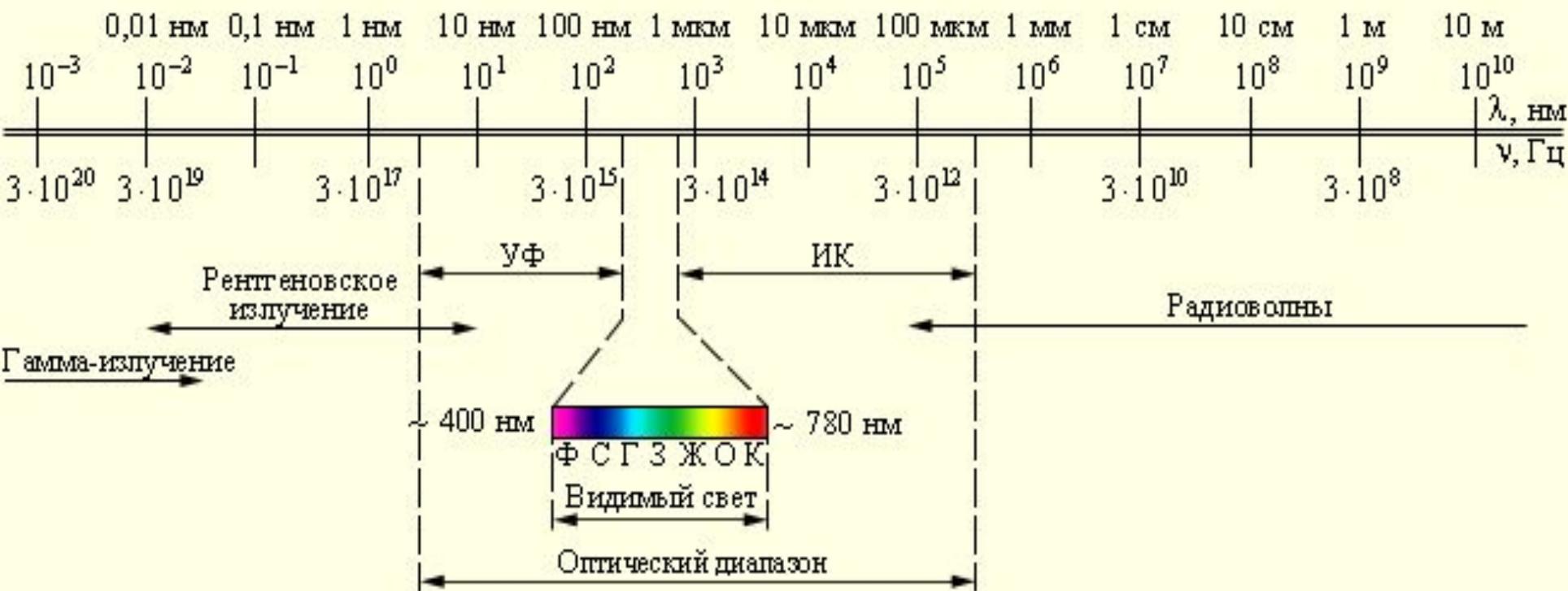
Лекция 4

Оптические и оптоэлектронные компьютеры

«В этой третьей книге я только начал анализ того, что остается открыть в отношении света и его действий в мироздании; я дал намек на некоторые предметы и оставляю эти намеки для исследования и усовершенствования дальнейшими опытами и наблюдениями тем, которые имеют охоту к исследованию.»

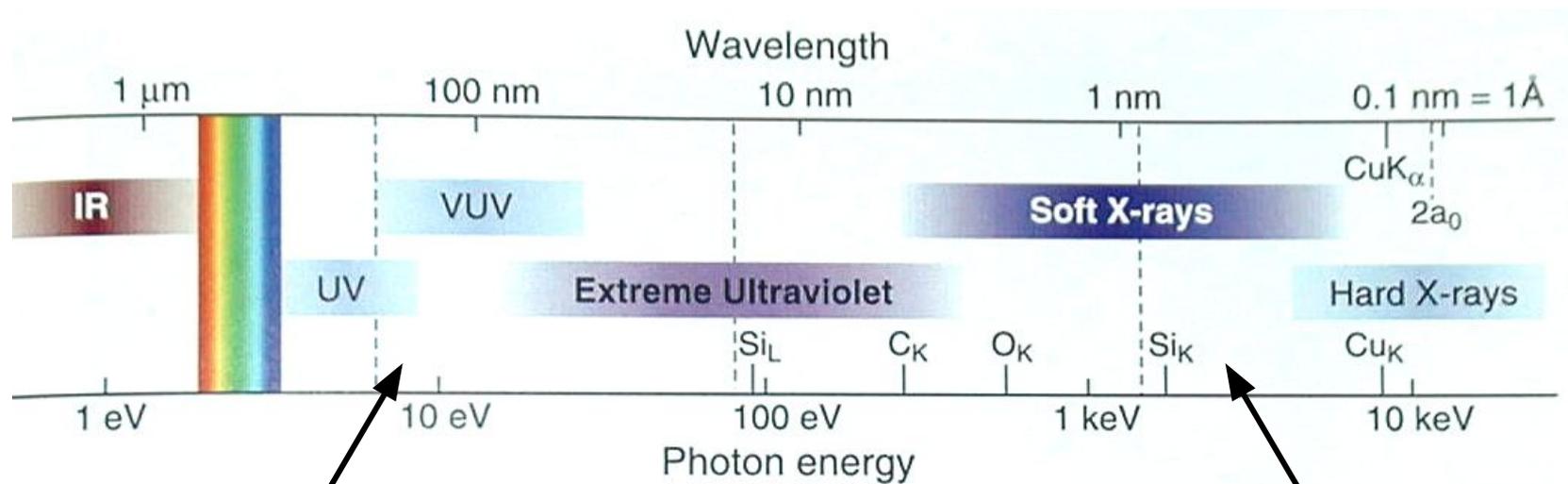
Исаак Ньютон. «Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света» (Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light), 1704 г.





Шкала электромагнитных волн.

Длины волн ВУФ - рентген



Вакуумный ультрафиолет (ВУФ)

$$180 \text{ нм} > \lambda > 50 \text{ нм}$$

Поглощается в слое воздуха $\ll 1$ мм

Мягкий рентген

$$5 \text{ нм} > \lambda > 0.5 \text{ нм}$$

Взаимодействие с ядрами атомов

Жесткий (предельный) ультрафиолет (XUV)

$$50 \text{ нм} > \lambda > 5 \text{ нм}$$

Название диапазона	Длины волн, λ	Частоты, ν	Источники	
Радио волны	Сверхдлинн.	более 10 км	менее 30 кГц	Подводная связь
	Длинные	10 км — 1 км	30 кГц — 300 кГц	Атмосферные и магнитосферные явления. Радиосвязь.
	Средние	1 км — 100 м	300 кГц — 3 МГц	
	Короткие	100 м — 10 м	3 МГц — 30 МГц	
	Ультракоротк.	10 м — 1 мм	30 МГц — 300 ГГц	
ТГц диапазон	1 мм — 780 нм	300 ГГц — 429 ТГц	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях.	
Инфракрасное излучение	780—380 нм	429 ТГц — 750 ТГц		
Видимое излучение	380 — 10 нм	7,5·10 ¹⁴ Гц — 3·10 ¹⁶ Гц	Излучение атомов под воздействием ускоренных электронов. Вакуумный ультрафиолет (ВУФ) 180 нм > λ > 50 нм Поглощается в слое воздуха <<1 мм Жесткий ультрафиолет (XUV) 50 нм > λ > 5 нм	
Ультрафиолетовое	10 нм — 5 пм	3·10 ¹⁶ — 6·10 ¹⁹ Гц		
Рентгеновские	менее 5 пм	более 6·10 ¹⁹ Гц	Атомные процессы при воздействии ускоренных заряженных частиц.	
Гамма			Ядерные и космические процессы, радиоактивный распад.	

ОПТИКА

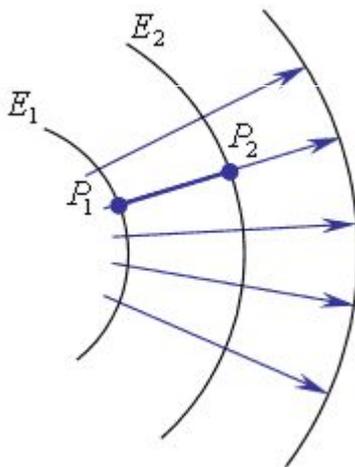
- Оптику можно определить как науку о распространении света (оптического излучения) и его взаимодействии с веществом.
- Свет есть проявление одного из фундаментальных взаимодействий — электромагнитного взаимодействия и переносится фотонами - частицами с нулевой массой покоя и нулевым электрическим зарядом.

Геометрическая оптика - это раздел оптики, в котором считается, что длина волны пренебрежимо мала

5 законов геометрической оптики

- а) Закон прямолинейного распространения света.
- б) Закон независимости световых лучей.
- в) Закон отражения света.
- г) Закон преломления света
- д) Закон обратимости светового луча

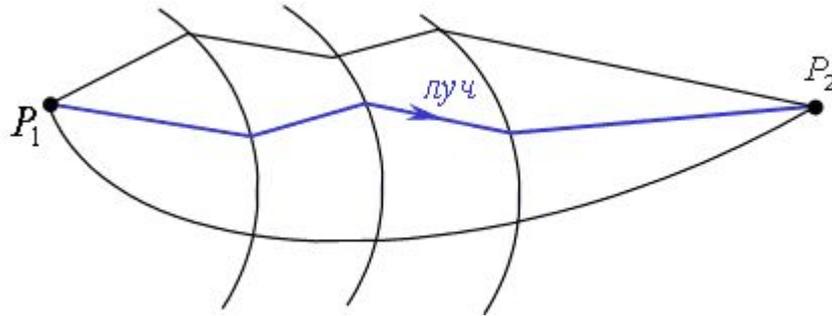
Принцип таутохронизма



Рассмотрим распространение света, как распространение волновых фронтов. Оптическая длина любого луча между двумя волновыми фронтами одна и та же:

$$[P_1 P_2] = E_2 - E_1 = \text{const}$$

Принцип Ферма



Оптическая длина луча между двумя точками минимальна по сравнению со всеми другими линиями, соединяющими эти две точки:

$$[P_1 P_2] = \min$$

лучи представляют собой траектории с наименьшей суммарной оптической длиной

[Родионов С. А. Основы оптики. Конспект лекций.- СПб: СПб ГИТМО \(ТУ\), 2000. — 167 с. Глава 4. Основные законы геометрической оптики](#)

уравнение эйконала (уравнение Гамильтона – Якоби):

$$\left(\frac{\partial \Psi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z}\right)^2 = n^2(x, y, z).$$

Эйконал -- фаза светового поля, выраженная как оптическая длина хода лучей данного пучка.

Формула Шеннона

$$C = \Delta F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_C}{P_{\text{ш}}} \right)$$

C - Максимальная скорость передачи информации

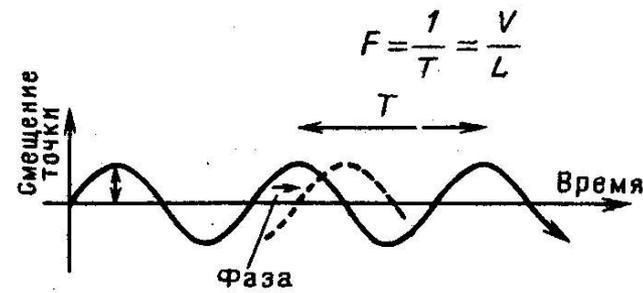
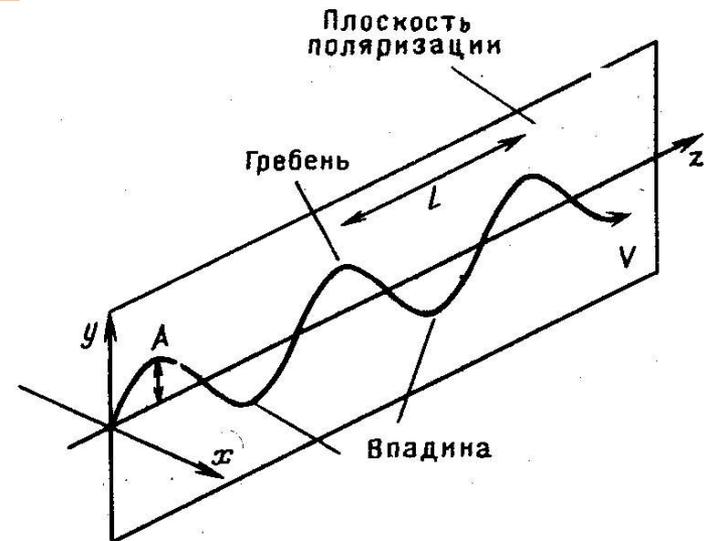
ΔF - Полоса частот оптического излучения – 300 ГГц - $3 \cdot 10^{16}$ Гц

Что может оптика?

- частота оптического излучения составляет $10^{11} \dots 10^{16}$ Гц, что позволяет создать 10^4 информационных каналов с полосой частот 100 ГГц;
- передача информации происходит действительно со скоростью света $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с;
- большое число световых пучков могут свободно проходить по одной и той же области пространства, пересекаться и не влиять друг на друга;
- использование двумерного (изображения) и трехмерного (голограммы) характера световых полей;
- параллельная передача и обработка информации с одновременной работой на различных длинах волн;
- когерентная обработка оптической информации с использованием фазовых соотношений;
- два состояния поляризации (горизонтальная и вертикальная или круговая, по левому или правому кругу) увеличивают вдвое объем переносимой информации;
- оптическая система ничего не излучает во внешнюю среду, обеспечивая защиту от перехвата информации и нечувствительна к электромагнитным помехам.

Основные параметры светового когерентного излучения

- Амплитуда (мин. 1000 фот.)
- Фаза (как в электр.)
- Частота (10^{15} Гц)
- Поляризация (2 сост.)
- Число разрешаемых элементов в изображении (пикселов) (порядка длины волны)



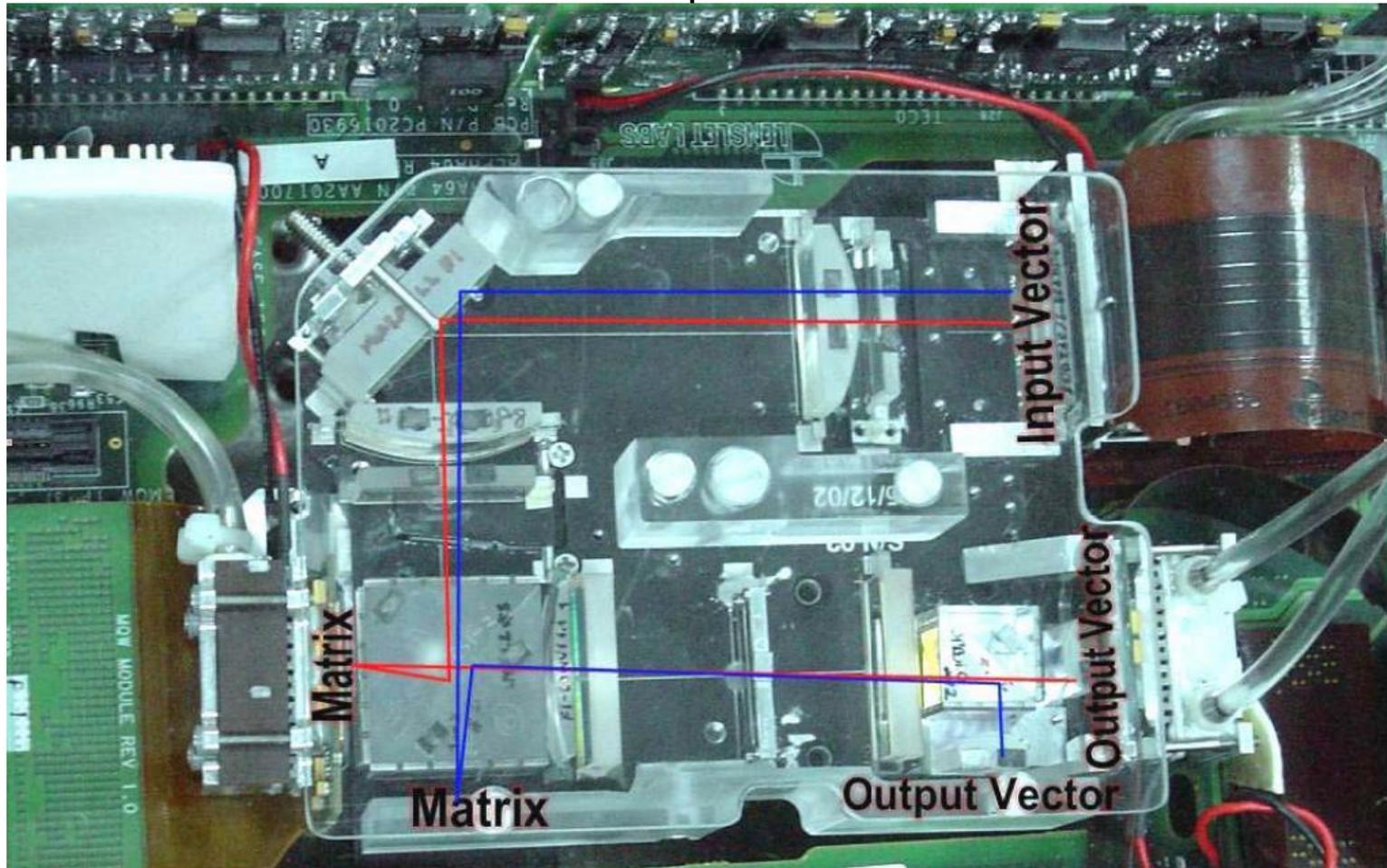
Структурная схема компьютера



Устройства ввода информации соответствуют органам чувств человека, долговременная (например, жесткий диск) и кратковременная (оперативная в процессоре) запись информации в компьютере соответствует человеческой памяти, процессор соответствует мозгу, обрабатывающему поступающий поток информации, магистраль соответствует нейронной сети мозга.

Что такое оптический компьютер?

Устройство обработки информации с использованием квантов света или фотонов.



Что есть оптическое в современном электронном компьютере

Устройства ввода информации – оптический сканер, оптическая
мышь

Обмен информацией - инфракрасный порт, волокно

Устройства вывода информации – лазерный принтер, дисплей,
голографический (объемный) дисплей

Память – долговременная память на перезаписываемых
оптических дисках, магнитооптические диски, голографические диски

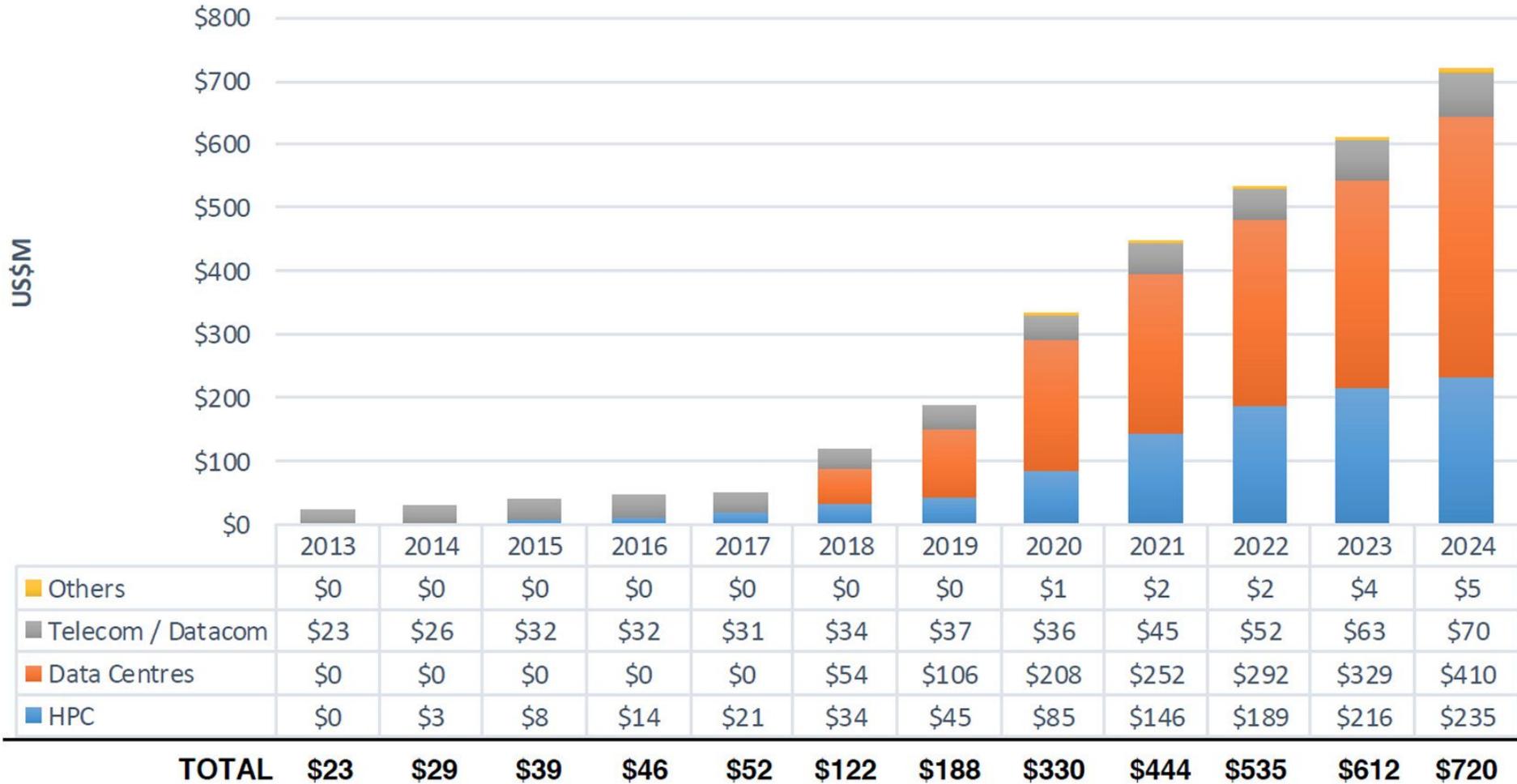
В октябре 2003 г., фирмой “Lenslet” (Израиль) был представлен первый коммерческий оптический процессор “Enlight 256”, способный производить 8 Тера операций с 8-ми битными числами в секунду (www.lenslet.com)

В октябре 2003 г., фирмой “Lenslet” (Израиль) был представлен первый коммерческий оптический процессор “Enlight 256”, способный производить 8 Тера операций с 8-ми битными числами в секунду.

Типы оптических процессоров

- Электронный процессор с оптическими межсоединениями
- Аналоговый оптический процессор
- Цифровой оптический процессор
- Полностью оптический процессор

Si Photonics 2013-2024 in US\$M



Silicon photonics 2013–2024 market forecast. Source: Silicon Photonics Report—Yole Développement; Yole: ‘Emerging optical data centers from big Internet companies (Google, Facebook, K) will be triggering the market growth in 2018 K.’ HPC - high-performance computing

2013 Intel Silicon Photonics Link: канал с пропускной способностью 50 Гб/с

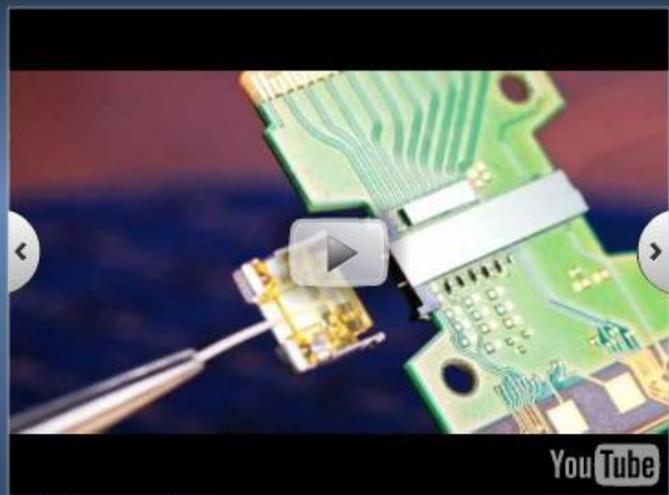
Intel Milestone Confirms Light Beams Can Replace Electronic Signals for Future Computers

Intel Creates World's First End-to-End Silicon Photonics Connection with Integrated Lasers; Could Revolutionize Computer Design, Dramatically Increase Performance, Save Energy

- ▶ Intel Labs has created the world's first silicon-based optical data connection with integrated lasers using Hybrid Silicon Laser technology.
- ▶ The experimental chip can move data at 50 billion bits per second (50Gbps). Researchers are now pressing on to demonstrate even faster speeds.
- ▶ The availability of low-cost, high-speed fiber-optics based on this technology could allow computer makers to completely rethink traditional system design from netbooks to supercomputers.
- ▶ Businesses with server farms or datacenters could eliminate performance bottlenecks while saving significant operational costs in space and energy, replacing many cables with one optical fiber.

Multimedia

[back to top ^](#)

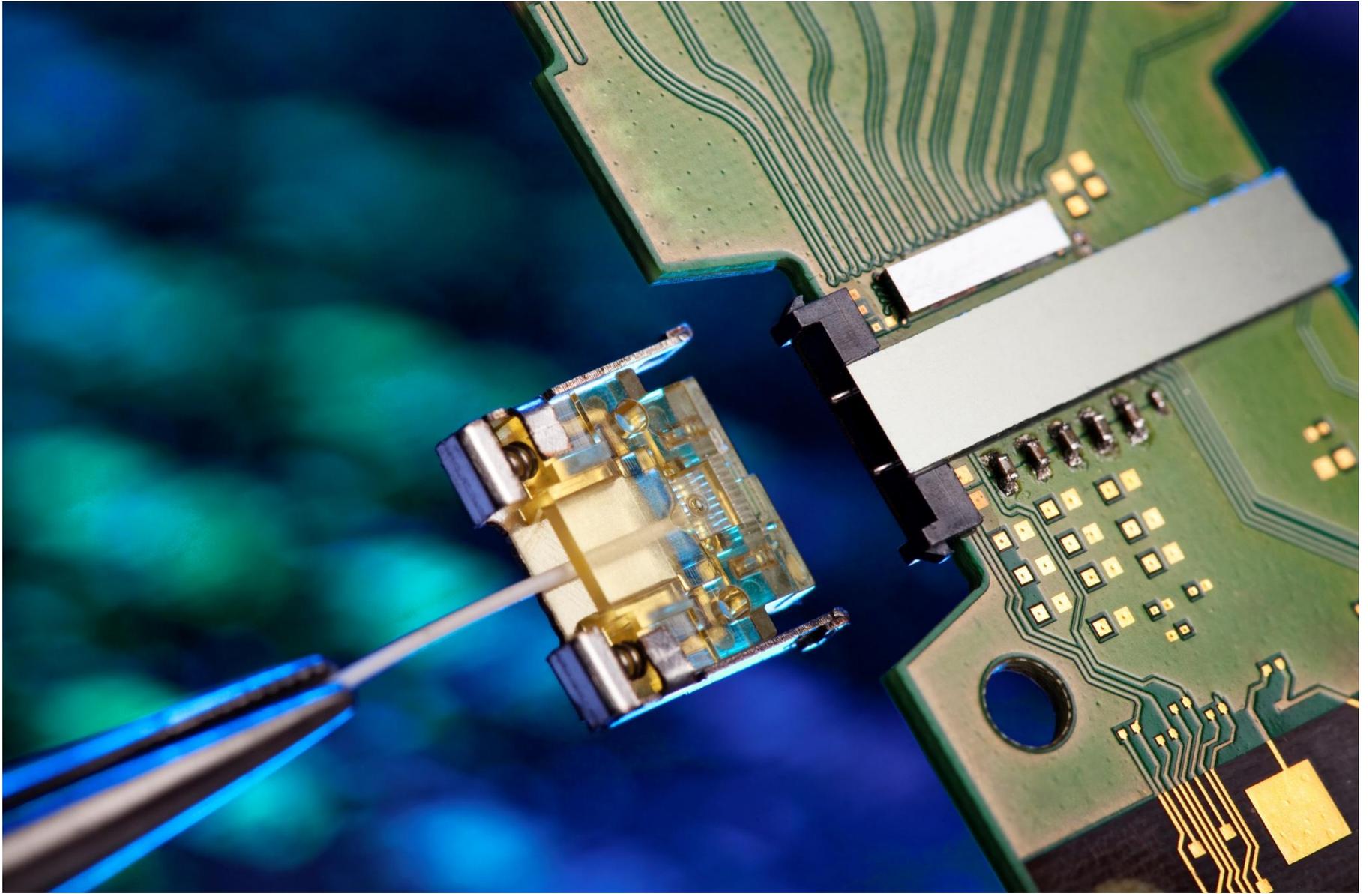


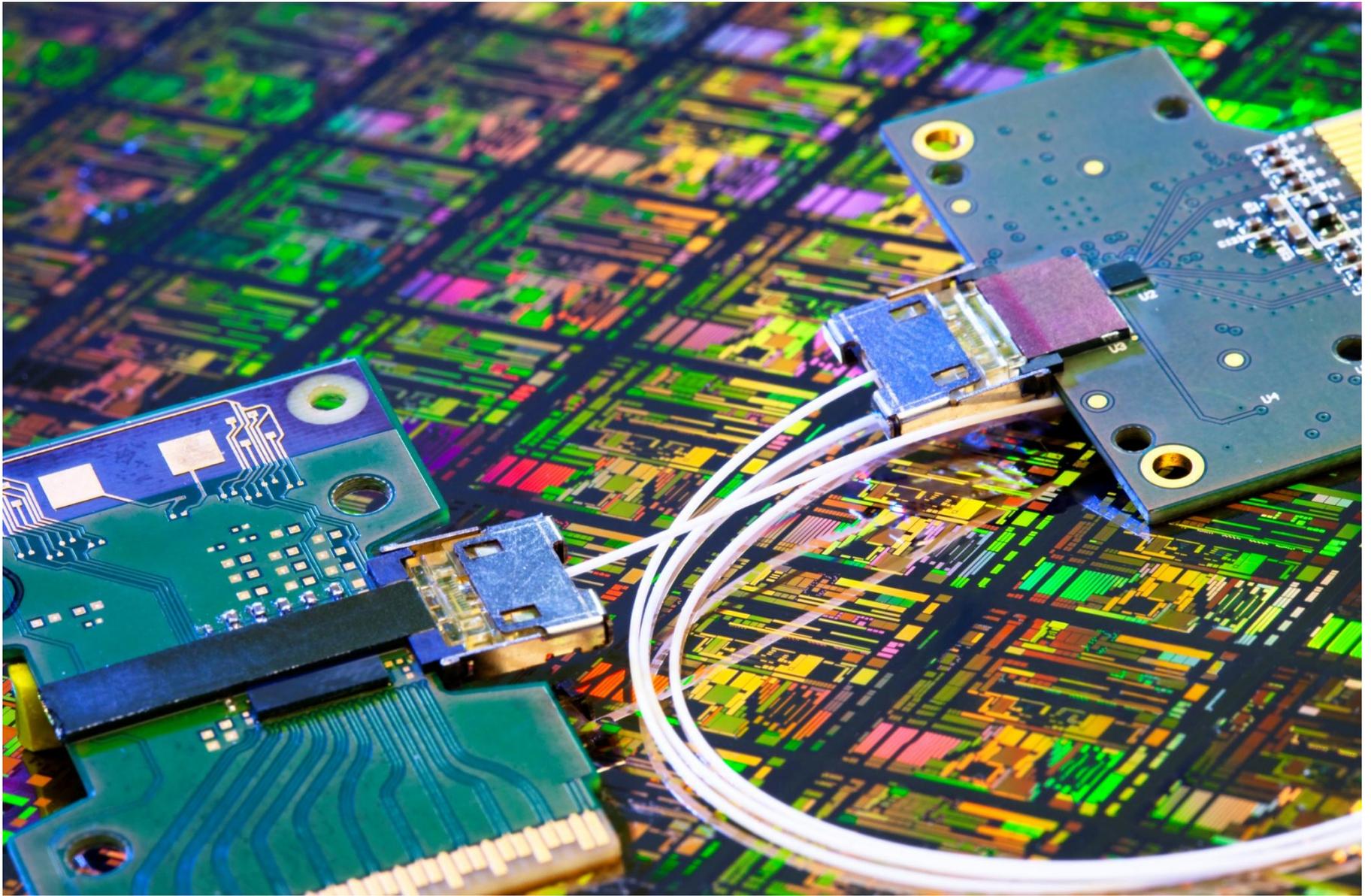
The main video player shows a close-up of a green silicon chip with intricate circuitry. A pair of tweezers is holding a small, gold-colored component, likely a laser or detector, and positioning it on the chip. The video player interface includes a play button, a progress bar at the bottom showing 0:00 / 1:38, and the YouTube logo.

<http://www.youtube.com/user/intelnewsroom>

1-3 of 3

-  1:38
-  3:48
-  1:32





100G Parallel Single Mode Data Center Connectivity



Bringing together the power of optics and the scalability of silicon for a high-speed, integrated optical connectivity solution

Description

The Intel® Silicon Photonics 100G PSM4 (Parallel Single Mode fiber 4-lane) QSFP28 Optical Transceiver is a small form-factor, high speed, and low power consumption product, targeted for use in optical interconnects for data communications applications. The high bandwidth module supports 100GbE optical links over single-mode fiber.

2017 июнь

<https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/silicon-photonics/optical-transceiver-100g-psm4-qsfp28-brief.html>

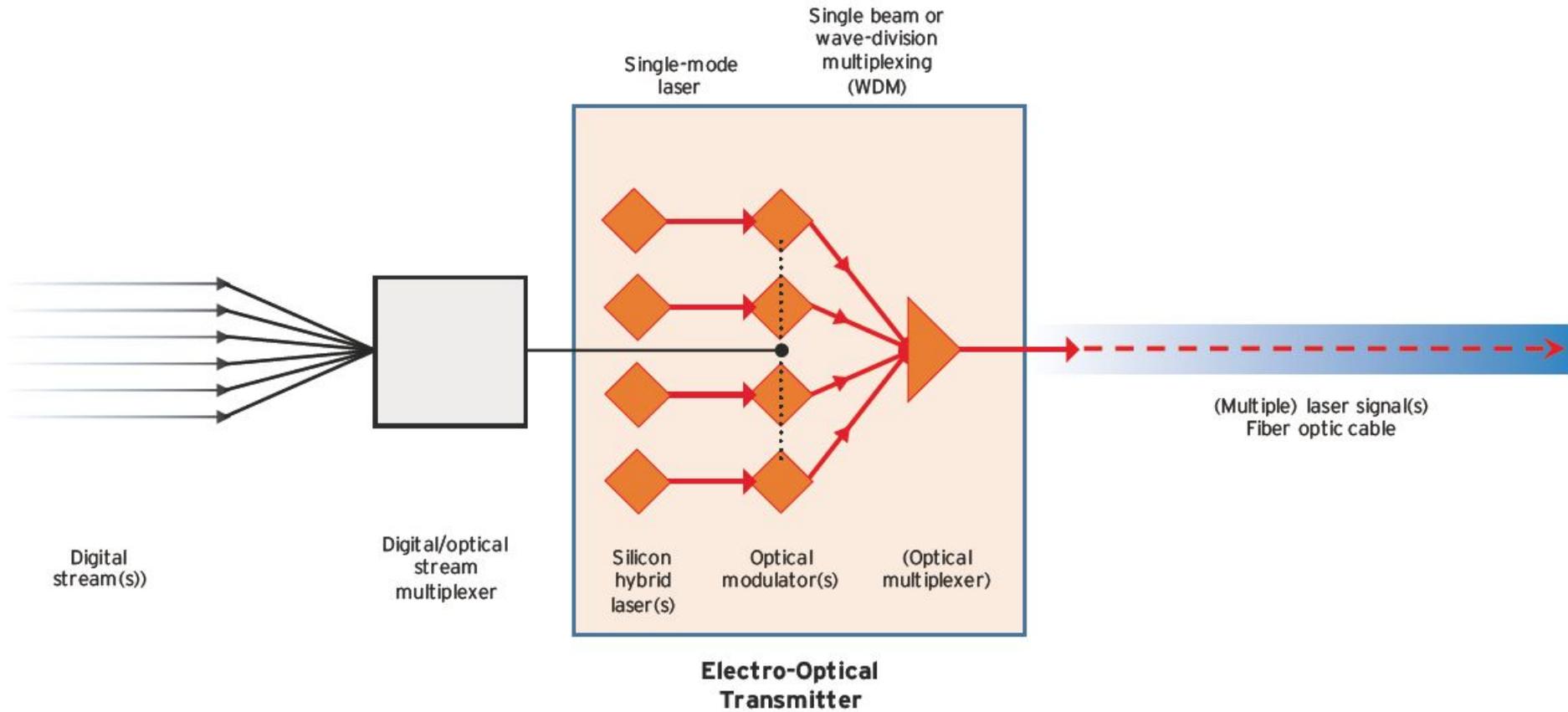
Figure 1: Basics of Electro-Optical Integrated Circuits

Source: 451 Research, 2016

	SILICON INTEGRATED CIRCUIT	SILICON ELECTRO-OPTICAL INTEGRATED CIRCUIT	
Base Material	Silicon wafer	(Same)	
Basic Process	Photolithography and lithographically-defined etching and deposition	(Same)	
Basic Component	Transistor		
Specialized Process/ Component		External laser stimulation light source	Silicon hybrid laser
		Embedded silicon laser structure	
		Germanium photo detector	Adaptation of existing germanium tool
		Connection to external optical fiber	
Interconnection	Deposited metal wire	Etched light pipe	
Minimum feature size	~.010 um	~1 um	

Figure 2: Electro-Optical Transmission and Reception

Source: 451 Research, 2016



IBM announces silicon photonics breakthrough, set to break 100Gb/s barrier

Using copper wires to transmit the digital information becomes the limiting factor.

Making a big step forward in silicon photonics, **IBM Research** said it has designed and tested a fully integrated wavelength multiplexed silicon photonics chip, which fully enables the use of pulses of light instead of electrical signals over wires to move data. This step will lead to the eventual manufacturing of 100Gbps optical transceivers for commercial use.

IBM says its chips use four distinct colors of light traveling within an optical fiber, each acting as an independent 25Gbps optical channel, for 100 Gbps bandwidth over a duplex single-mode fiber.

$$\ln 2kT \approx 10^{-21} \text{ Дж}$$

	2013	2016	2019	2022
Flops	20 P	160 P	1.28 E	10.2 E
Aggregate BW	80 Pbps	640 Pbps	5.12 Ebps	40.8 Ebps
Energy/bit	75 pJ/bit	11 pJ/bit	1.7 pJ/bit	250 fJ/bit
Size	< 2400 mm ³ / Gbps	< 120 mm ³ / Gbps	< 6 mm ³ / Gbps	< 50 mm ³ / Tbps
Cost	6 \$/Gbps	1 \$/Gbps	0.16 \$/Gbps	< 0.02 \$/Gbps

Информация, существующая в реальном мире, например звук, свет, электрическая волна, обычно изменяется непрерывно. Способ представления числового значения в виде непрерывно изменяющейся величины называется **аналоговым представлением**.

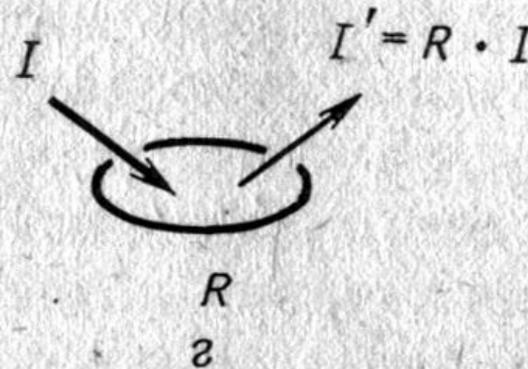
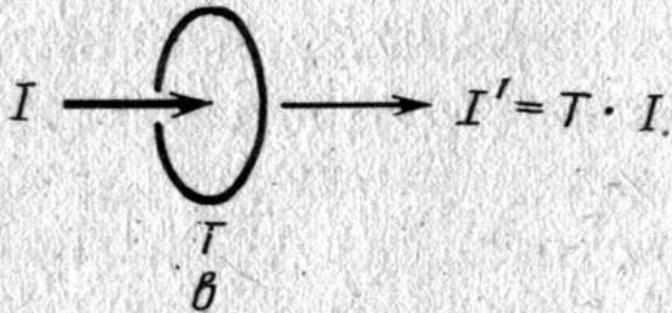
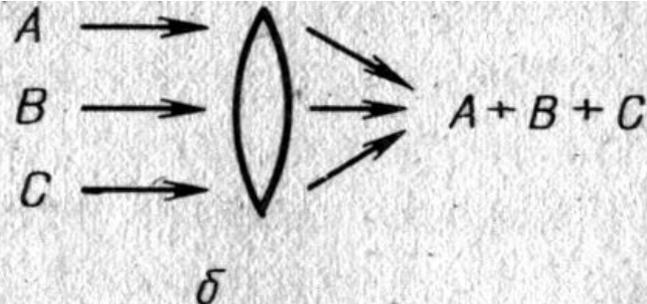
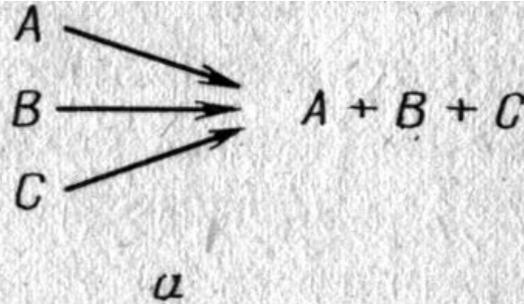
В том случае, когда речь идет об аналоговых оптических компьютерах, часто термин «аналоговый» употребляется в двух смыслах.

Во-первых, он означает непрерывную величину, характеризующую каждую точку в окружающем пространстве (например, интенсивность света). Другими словами, какую бы точку в пространстве мы ни взяли, интенсивность света в этой точке изменяется непрерывно.

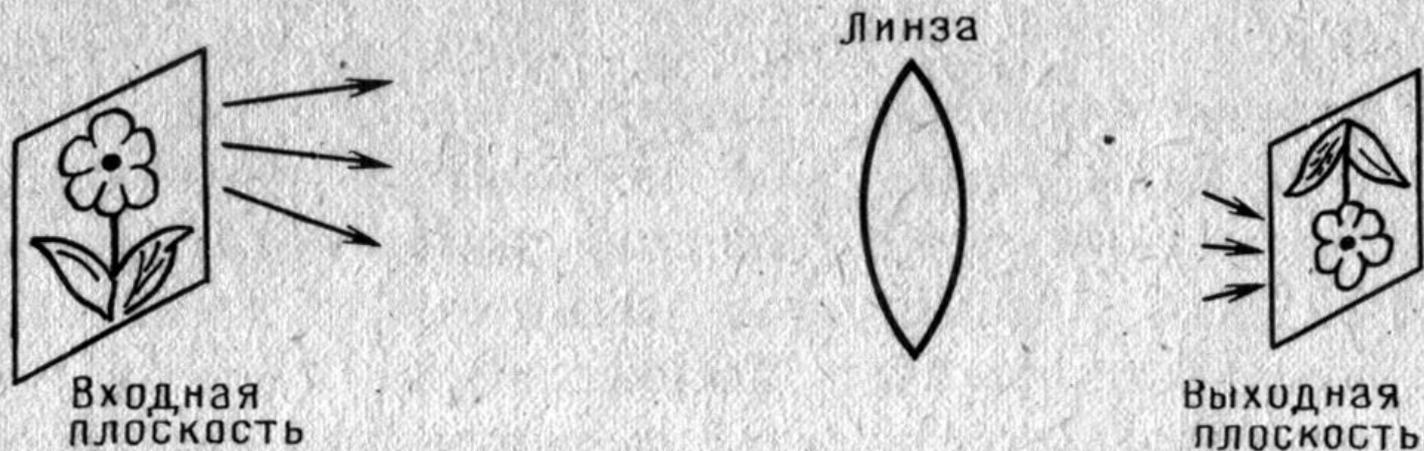
Во-вторых, термин «аналоговый» означает, что объектом являются все точки непрерывных координат, а не дискретное (точечное) представление всей информации в окружающем пространстве, как это делается при обработке изображений в современных компьютерах. Если информация, являющаяся объектом обработки, медленно изменяется в пространстве, то обработку можно осуществлять в дискретных координатах; однако если взять способ одновременной обработки по всем точкам, не прибегая к подобной дискретизации, то степень пространственного изменения информации не будет играть роли. Можно сказать, что в этом смысле свет вполне соответствует термину «аналоговый».

Аналоговый оптический процессор

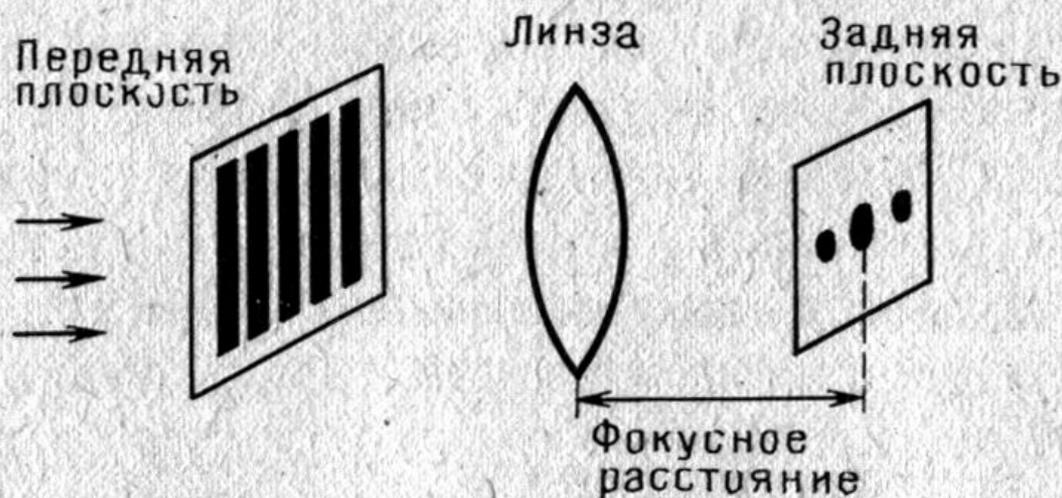
Аналоговые операции



Основные аналоговые оптические операции: *a*—сложение; *б*—сложение с помощью линзы; *в*—умножение на основе эффекта пропускания света; *г*—умножение на основе эффекта отражения света



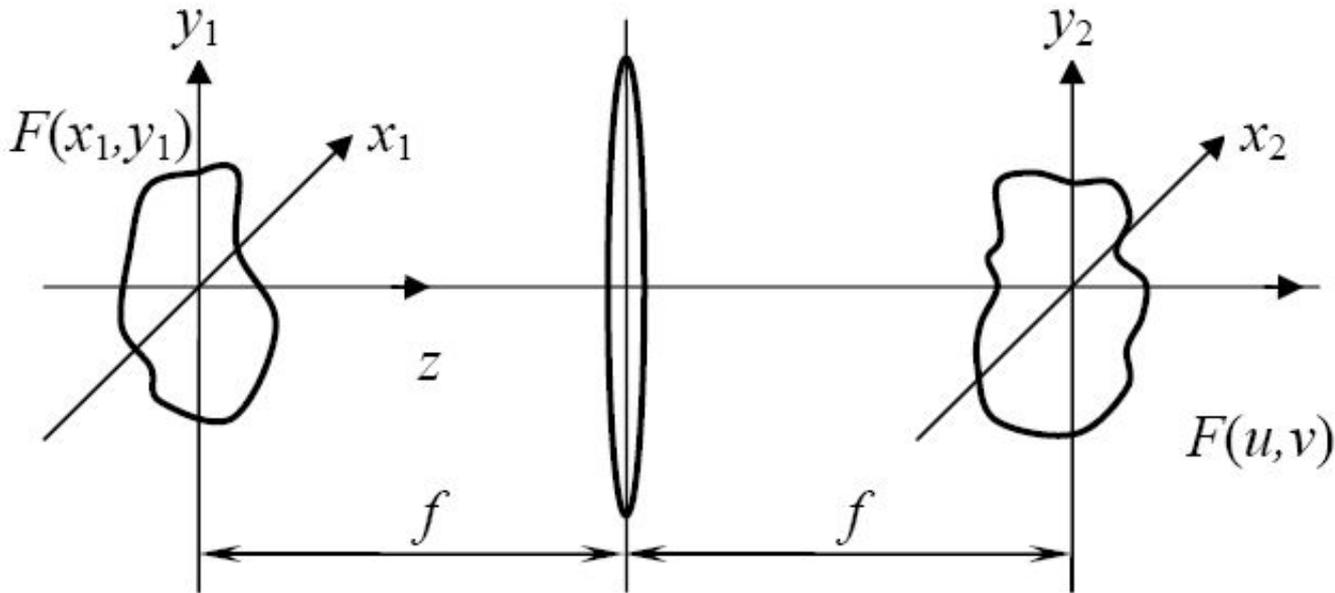
а



б

Аналоговые оптические операции, выполняемые с помощью линз.
 а—построение изображения; б—преобразование Фурье

Линзы как элементы, выполняющие преобразование Фурье

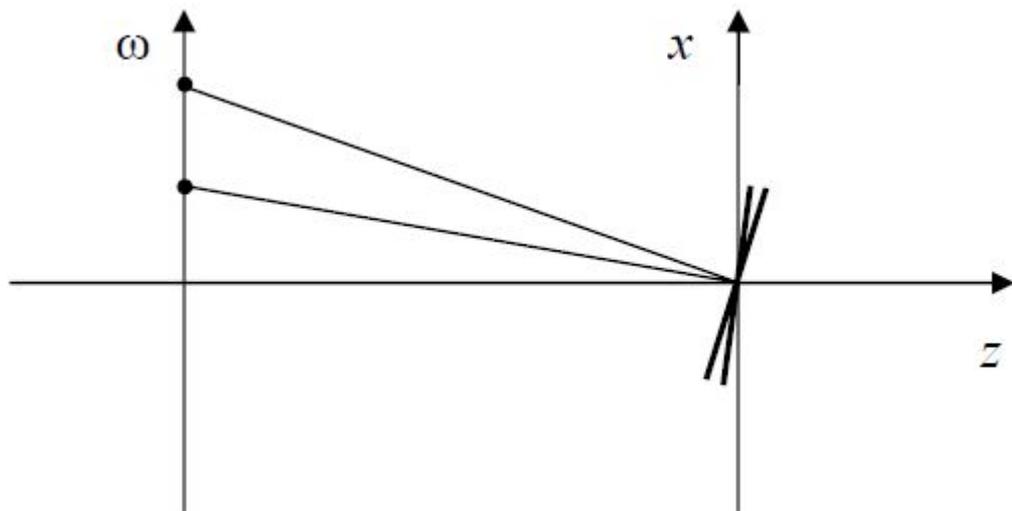


Преобразование оптического сигнала тонкой положительной линзой

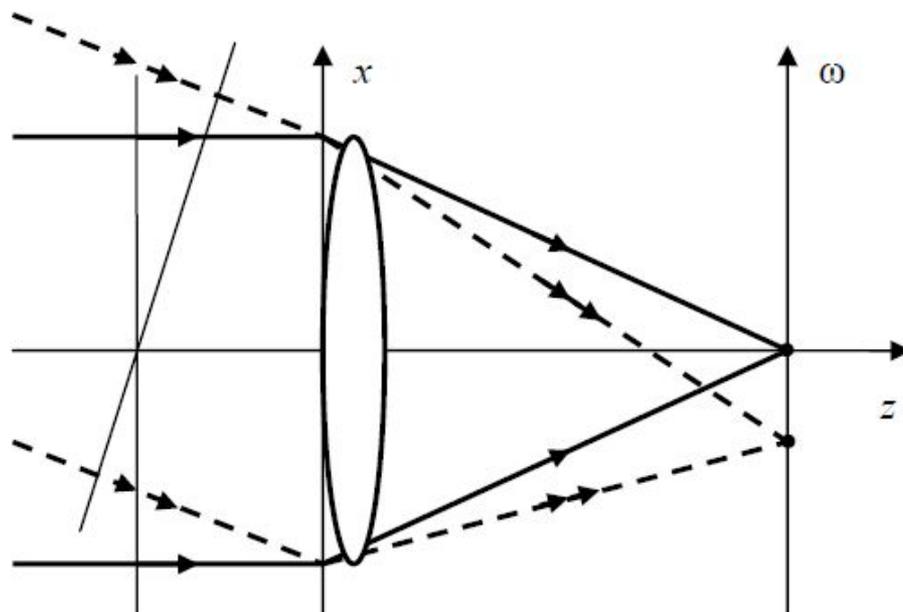
При приближенном представлении дифракционного интеграла Френеля-Кирхгофа в дальней зоне (Фраунгофера) интегралом Фурье, выражение описывающее взаимосвязь распределений поля во входной и выходной плоскостях имеет вид:

$$F(u, v) = \frac{1}{j\lambda f} F[f(x_1, y_1)] = \\ = \frac{1}{j\lambda f} \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x_1, y_1) e^{-j2\pi(x_1 u + y_1 v)} dx_1 dy_1$$

где $u = x_2 / \lambda f$, $v = y_2 / \lambda f$; λ – длина волны света, f – фокусное расстояние линзы;
 $f(x_1, y_1)$ – комплексная амплитуда световой волны в передней (входной) фокальной плоскости линзы P_1 ,
 $F(u, v)$ – комплексная амплитуда световой волны в задней (выходной, спектральной) фокальной плоскости линзы P_2 .

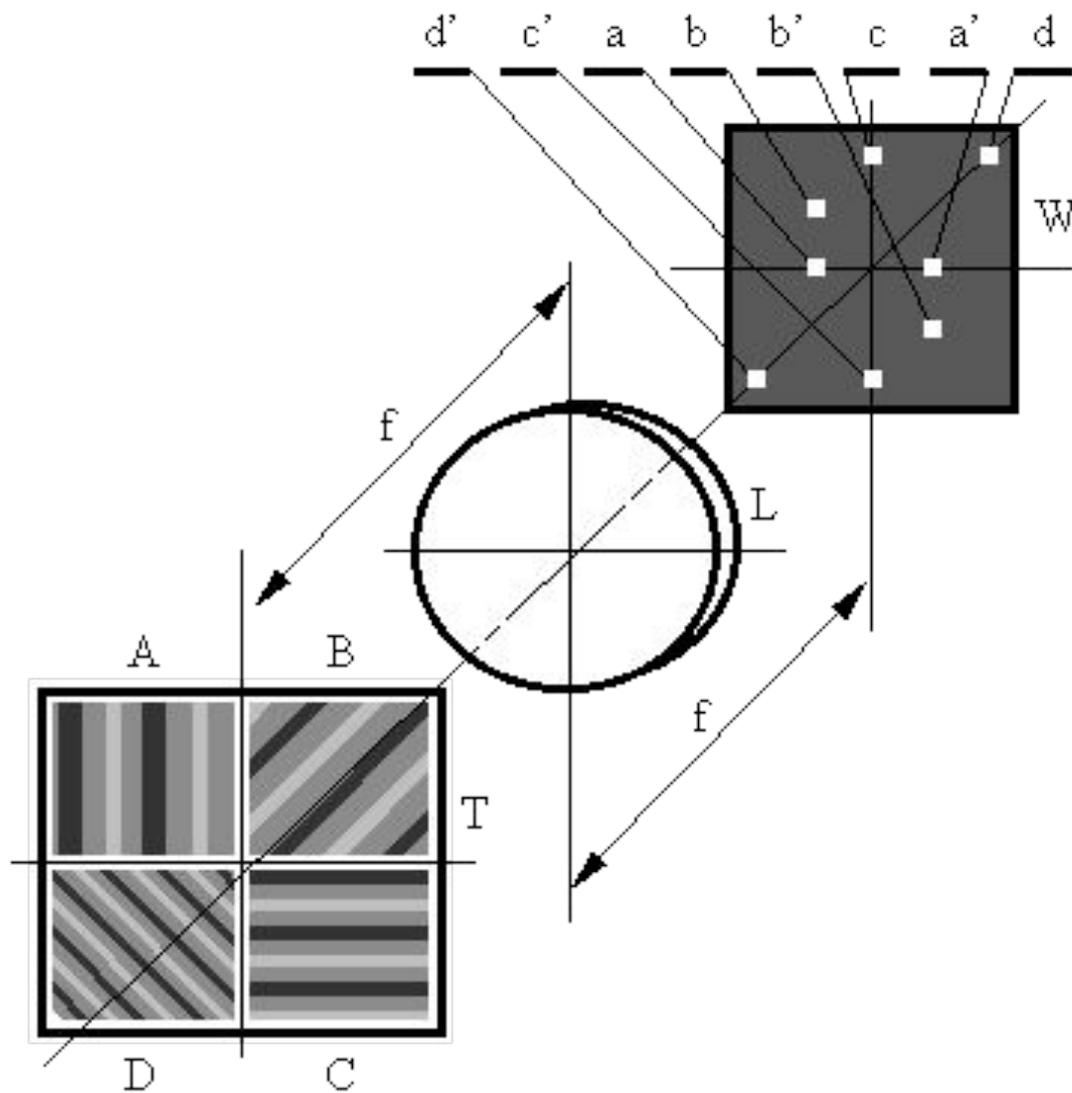


Прямое преобразование Фурье, осуществляемое линзой



Обратное преобразование Фурье, осуществляемое линзой

Оптическая система, осуществляющая двумерное фурье-преобразование



$$U_H(x_H, y_H) = \frac{1}{i\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda f} (x_H * x_1 + y_H * y_1)\right] dx_1 dy_1 = \kappa_{1H} U_1\left(\frac{x_H}{\lambda f}, \frac{y_H}{\lambda f}\right)$$

Отметим следующие свойства устройства:

- каждой пространственной частоте изображений в Фурье-плоскости (частотной плоскости) соответствует две точки (действительная и мнимая), например для А это точки a и a' (вертикальные полосы – точки по горизонтали) или для В это точки b и b' (полосы под углом 45° - точки по диагонали, перпендикулярной направлению полос);
- чем выше пространственная частота (меньше расстояние между полосами), тем на большем расстоянии от центра располагаются точки (сравни А и С);
- расположение точек в частотной области отражает ориентацию полос, но не место этих полос в плоскости изображения.

Поскольку фурье-образы двумерных оптических сигналов реализуются в виде реальных физических сигналов с помощью простейшей оптической системы, над ними можно производить различные математические операции методами пространственной фильтрации. Оптическая система обработки информации методами пространственной фильтрации состоит из следующих компонентов: источника света, двух последовательно расположенных простейших систем преобразования Фурье, устройства ввода информации, пространственного операционного фильтра и детектора выходных сигналов. Устройство ввода информации, операционный фильтр и детектор выходных сигналов располагаются соответственно во входной (x_1, y_1) , спектральной (x_n, y_n) и выходной (x_d, y_d) плоскостях системы. Плоскости имеют одинаковые масштабы.

$$U_H(\xi, \eta) = \frac{k_1 A}{i\lambda f} U_1(\xi, \eta)$$

$$U_H(\xi, \eta) = \frac{k_1 k_H A}{i\lambda f} U_1(\xi, \eta) H(\xi, \eta)$$

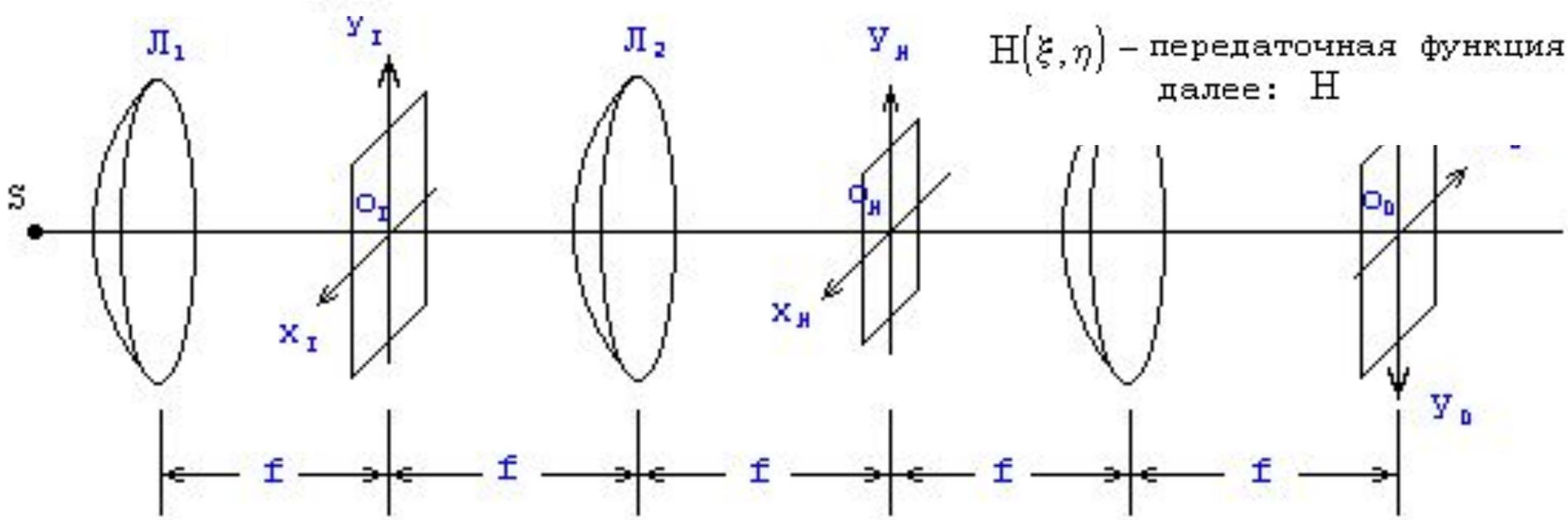


Схема когерентной оптической системы пространственной фильтрации

(x_1, y_1) - транспарант, формирующий изображение

(x_H, y_H) - фильтр

(x_0, y_0) - выходная плоскость

<http://dfe.karelia.ru/koi/posob/optproc/filtrs.html>

$$t_H = k_H H(\xi, \eta)$$

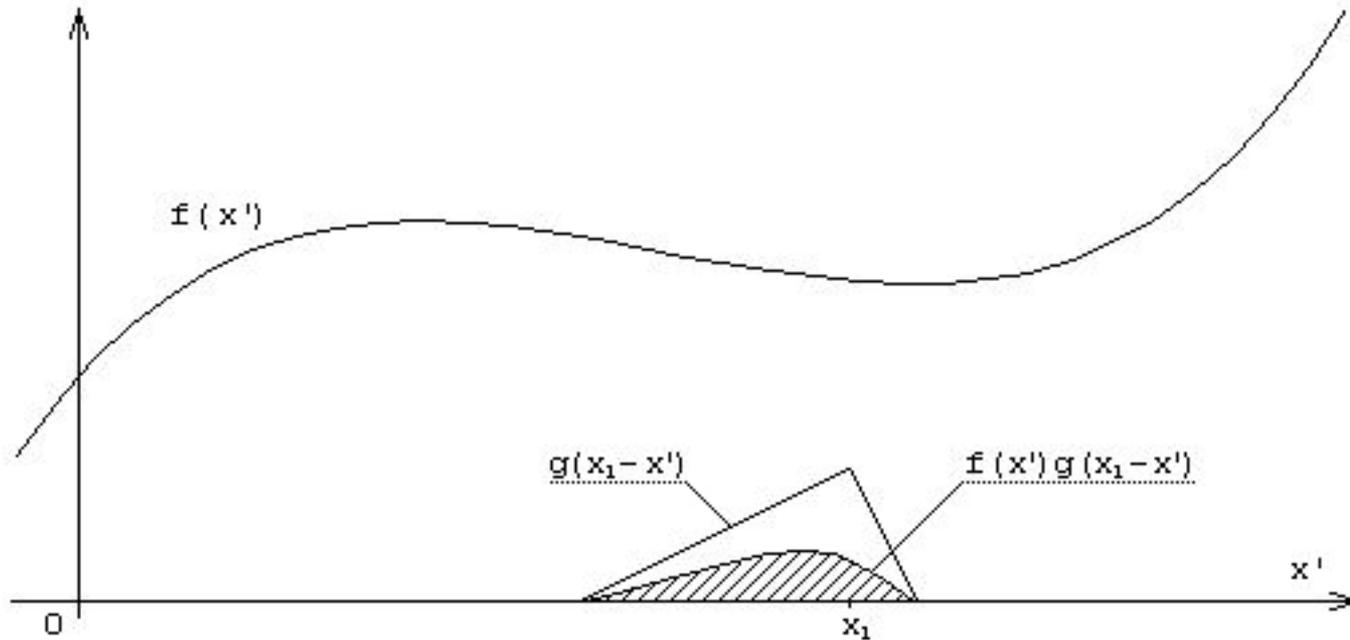
где k_H - комплексная константа

$$U_d(x_d, y_d) = k U_1(x_1, y_1) * h(x, y) = k \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) h(x_1 - x_d, y_1 - y_d) dx_1 dy_1$$

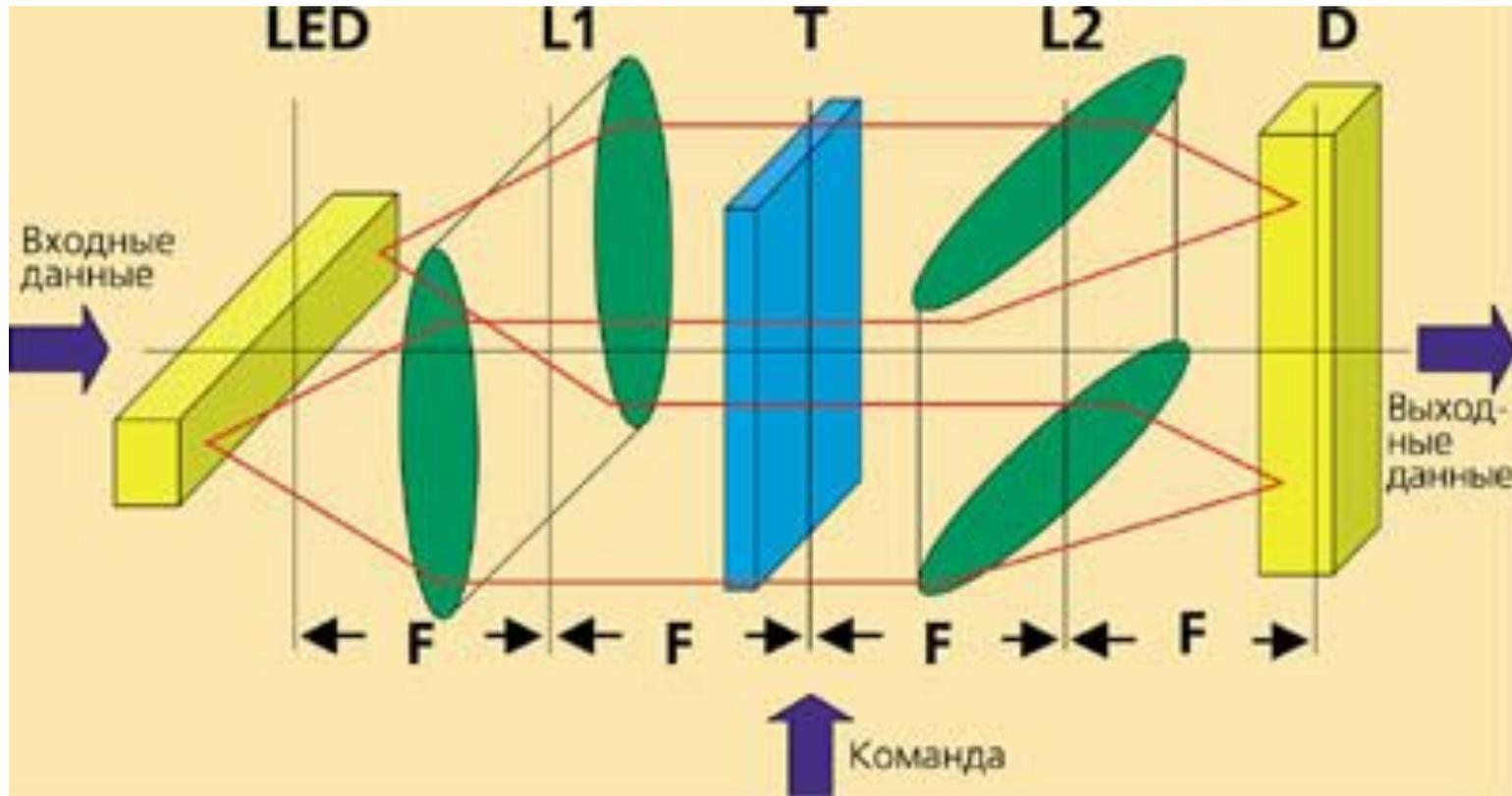
Когерентная оптическая система фильтрации способна выполнять линейные интегральные преобразования типа свертки

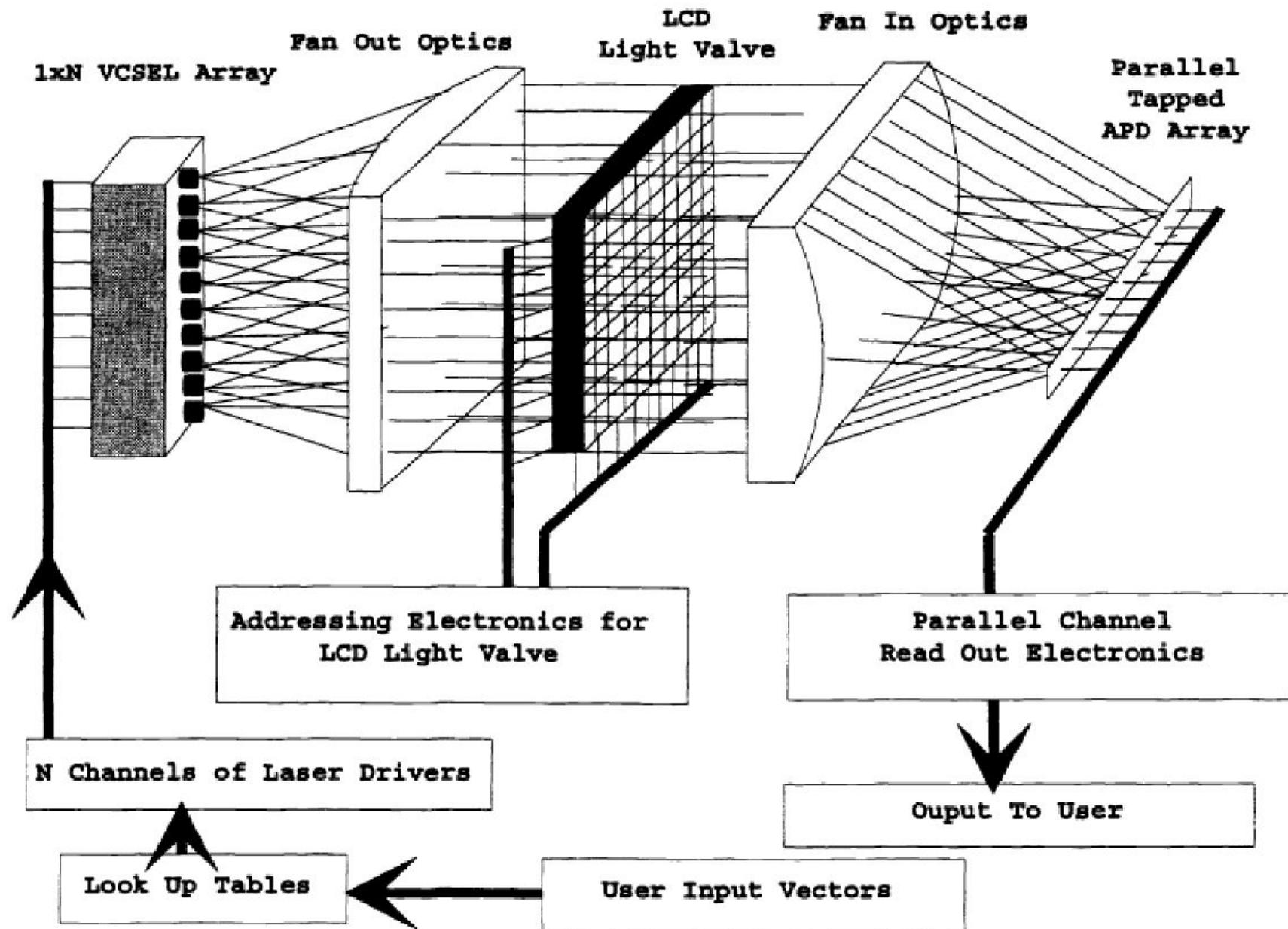
$$h(x) = \int_{x'=-\infty}^{x'+\infty} f(x')g(x-x')dx'$$

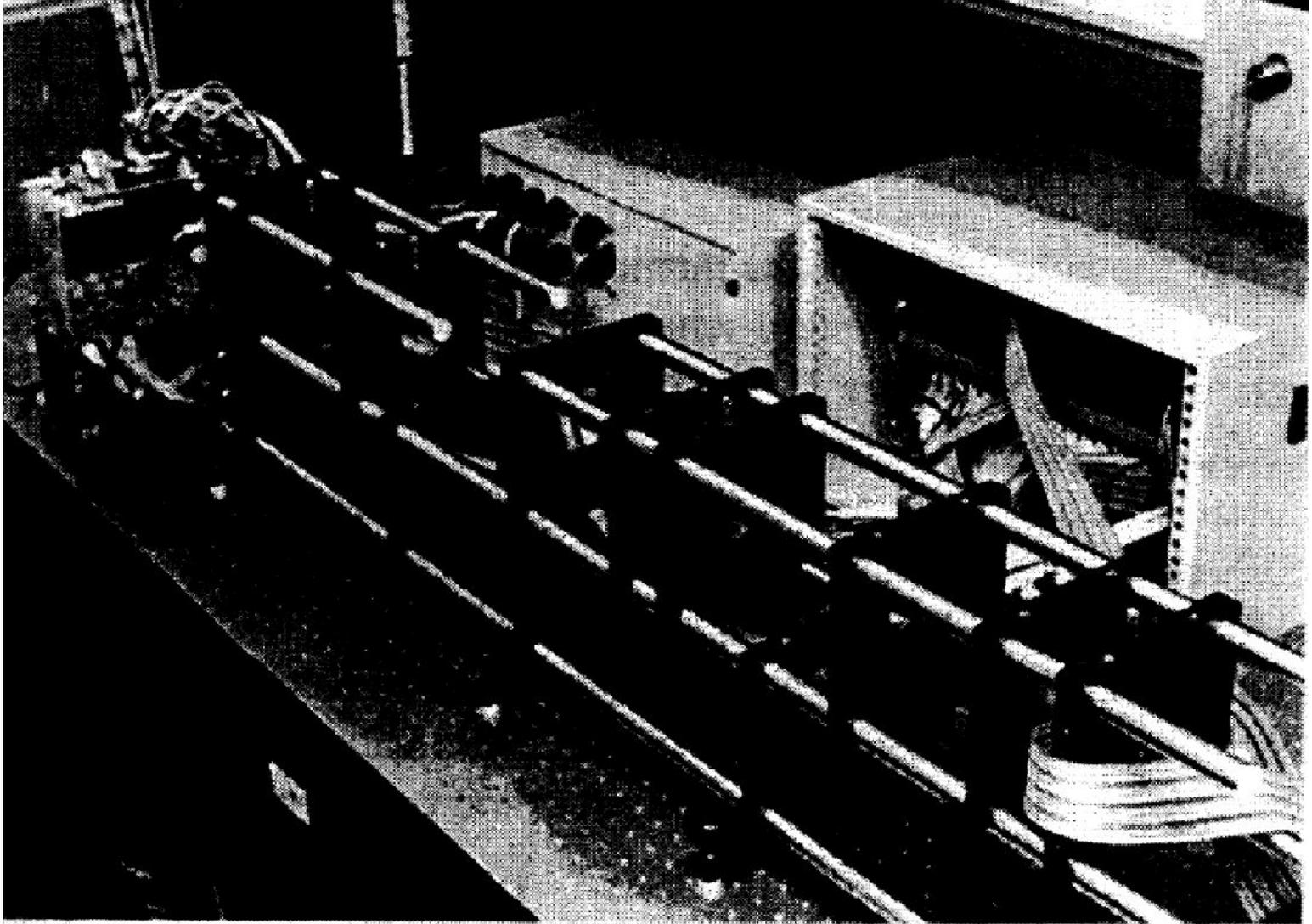
Примером может служить свертка функций $f(x)$ и $g(x)$:



Когерентный аналоговый астигматический процессор, реализующий произвольное матричное преобразование входного вектора-строки в выходной вектор-столбец



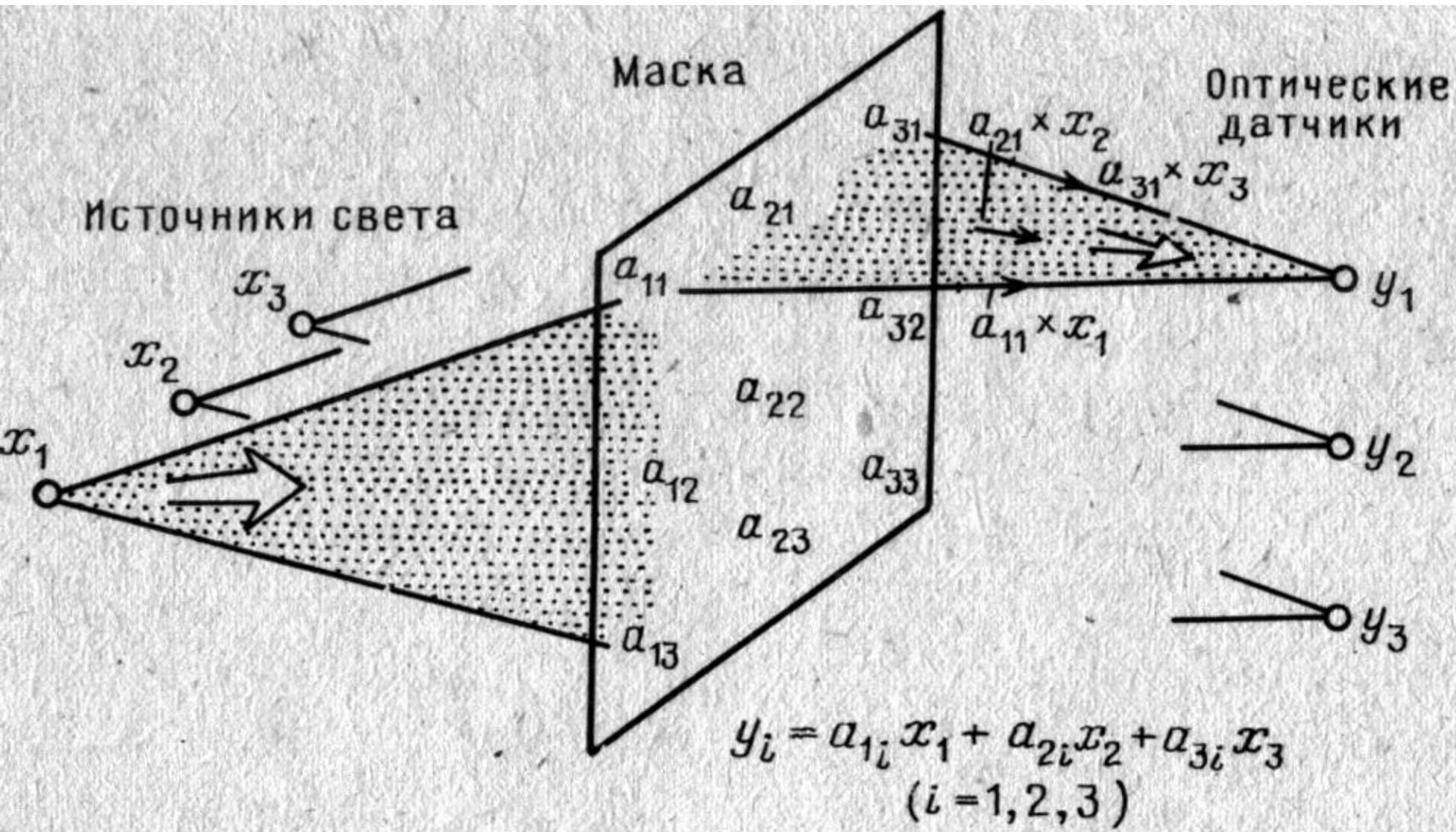




Analog Vector Matrix Processor System.

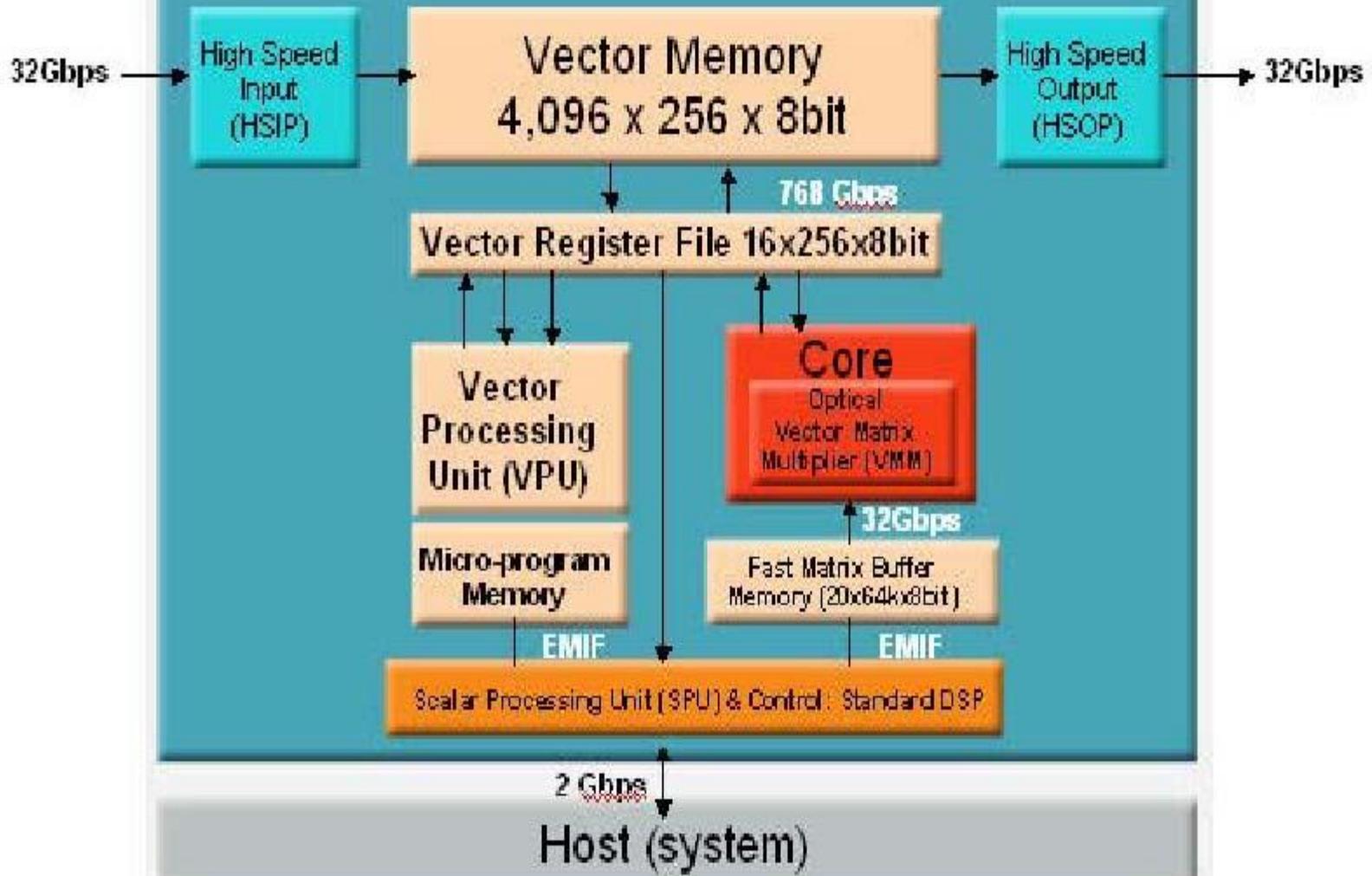
SPIE Vol. 3003 • 0277-786X1971

<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=918667>

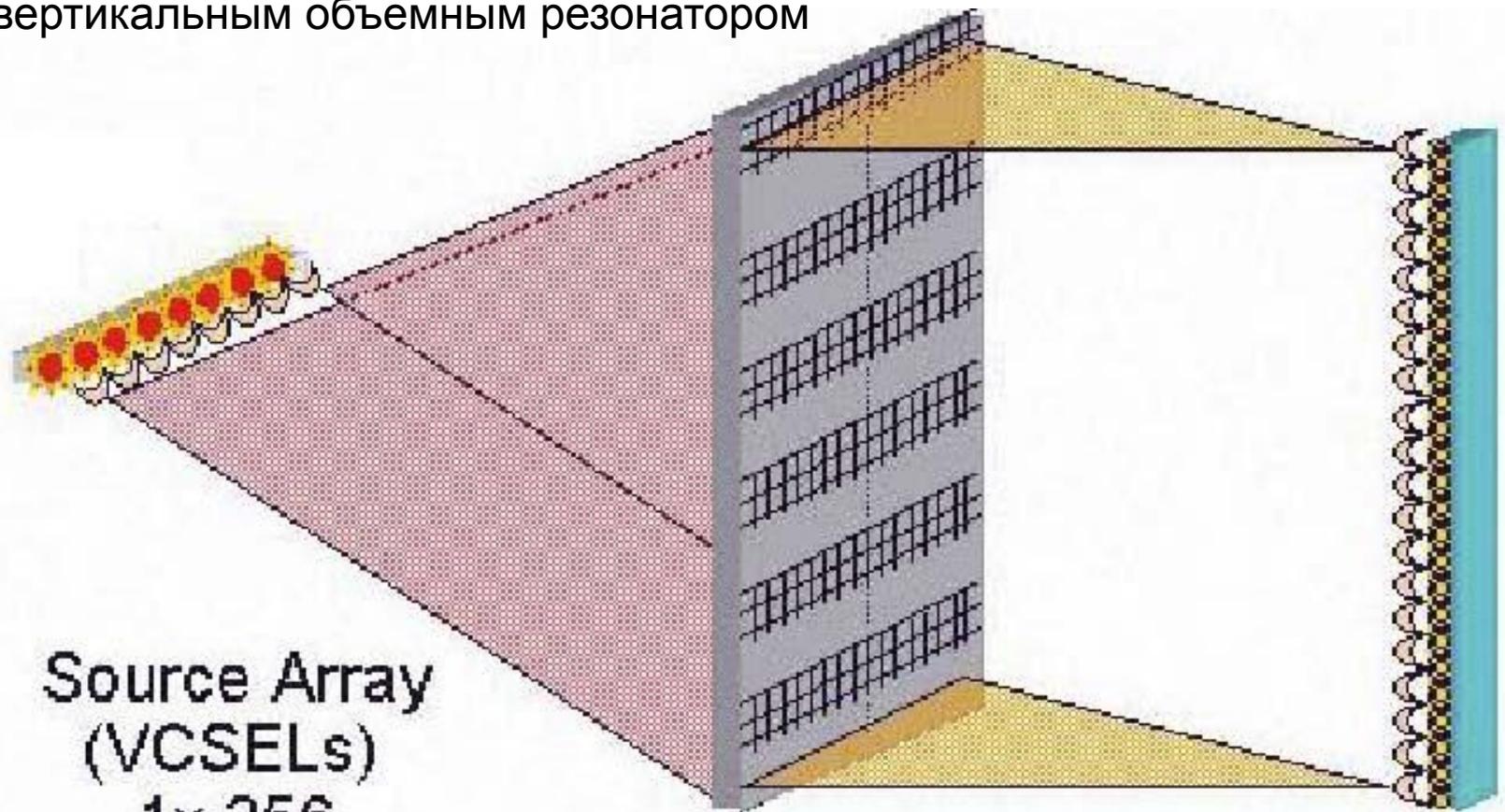


Принцип действия оптического операционного устройства, выполняющего умножение вектора на матрицу

EnLight 256



VCSEL - Vertical Cavity Surface-Emitting Laser – лазер поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором



Source Array
(VCSELs)
1x 256

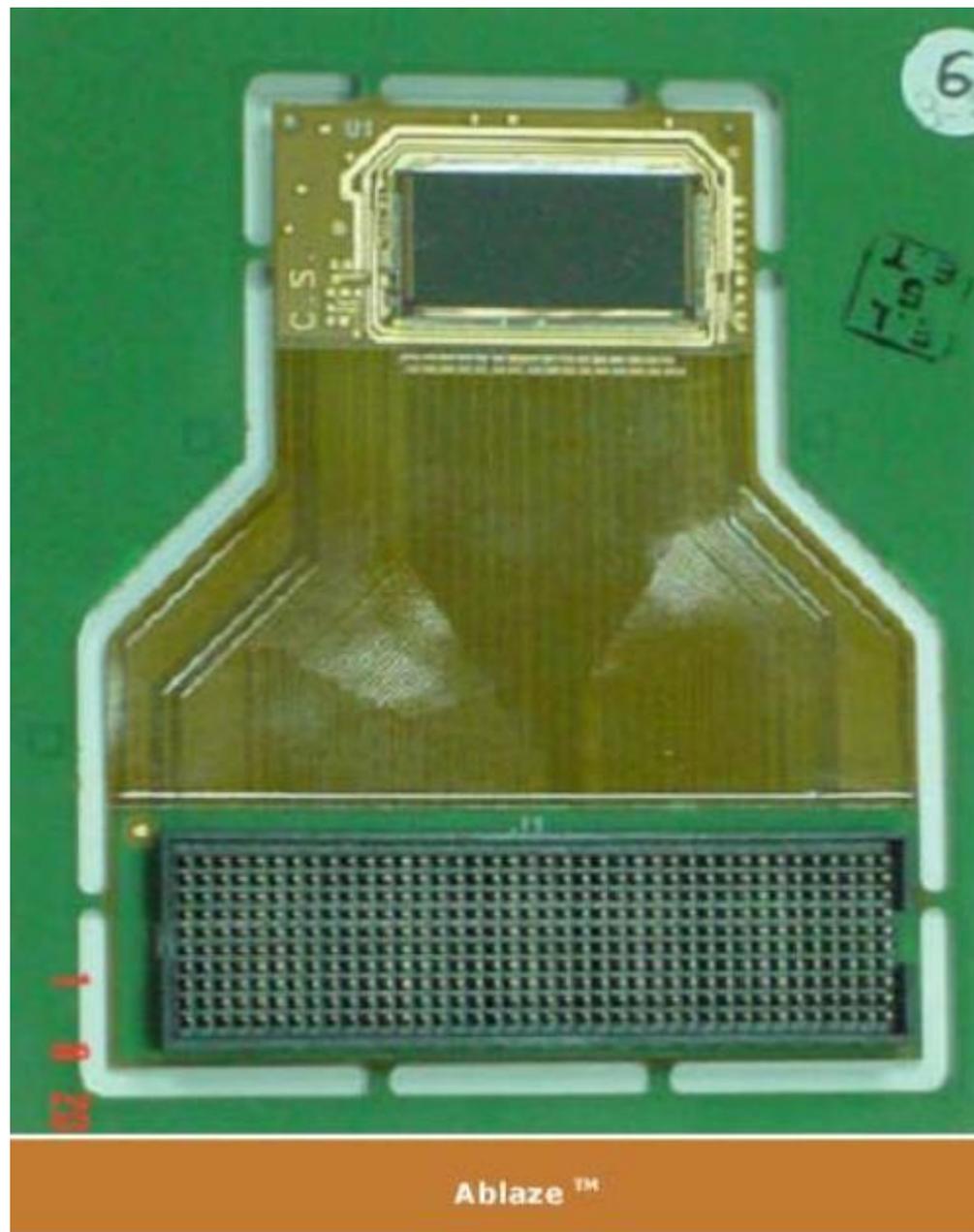
Spatial Light Modulator
(SLM)
256x256

Photo
Detector
Array
256x1

Vector-Matrix Multiplication

VMM (Vector-Matrix Multiplication) состоит из трех основных элементов:

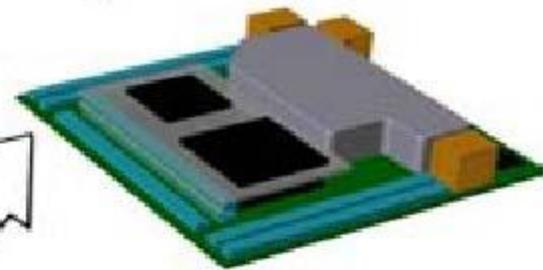
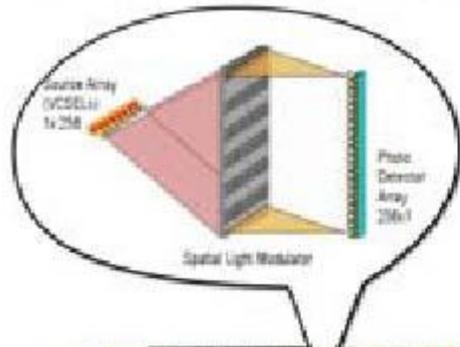
1. Линейки из 256 полупроводниковых VCSEL лазеров, которые представляются как вектор, состоящий из 256 элементов и являются одним из "регистров" оптического АЛУ, каждый элемент которого - это число разрядностью 8 бит.
2. Управляющее световым потоком интегрально-оптическое устройство на основе GaAs/GaAlAs полупроводниковых структур с квантовыми ямами (Multiple Quantum Well), состоящего из матрицы 256x256 пространственных модуляторов работающих на отражение.
3. Линейки из 256 фотоприемников излучения, которые интегрированы в массив аналогово-светового преобразования (Analog to Digital Converters, ADC).



Пространственный модулятор Multiple Quantum Well

Optical Vector-Matrix Multiplier

EnLight 256, Q2/2004



EnLight Alpha System POC, March 2003

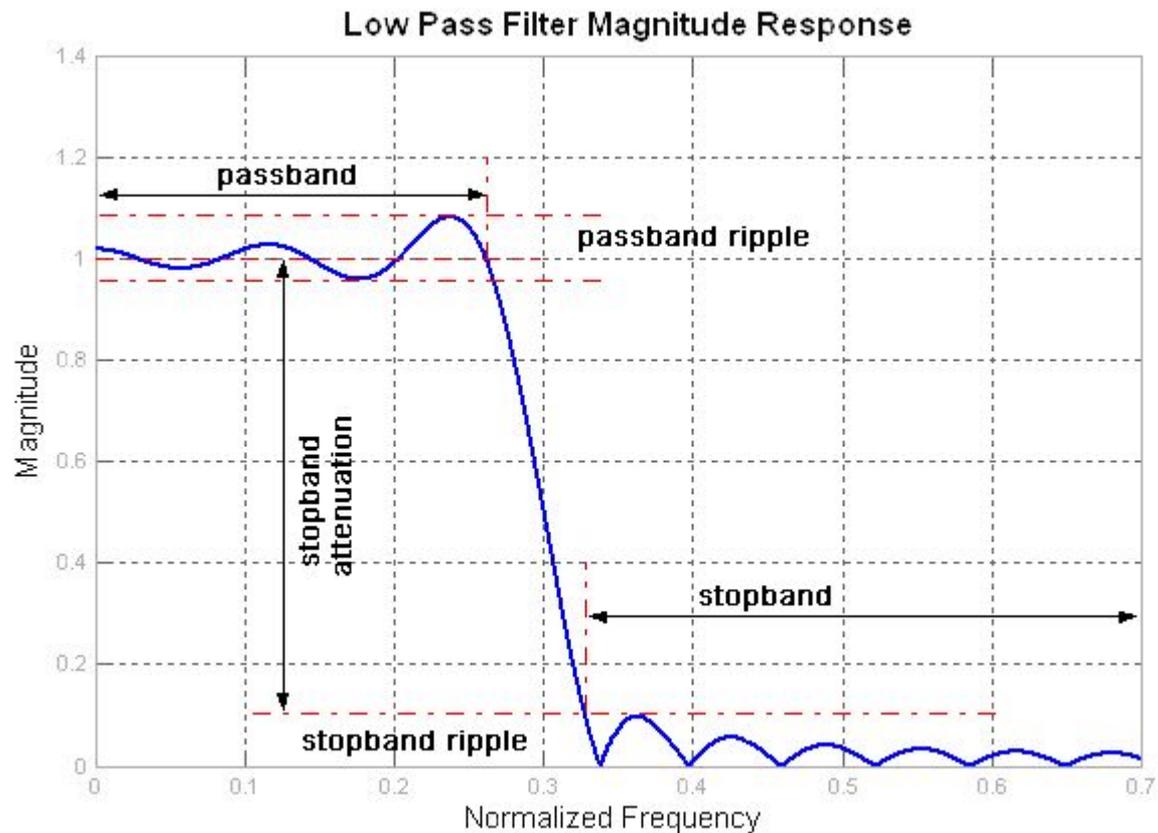
The EnLight256® will serve best any application that can utilize Tera operations per second. For example, in one second the EnLight256® can perform:

- 125,000,000 correlations (each 128 complex 8-bit, 128 length),
- 125,000 parallel FIR filters (1000 samples, 256 filters each of length 256);
- 125,000,000 complex DFT of 128 points;
- 500,000 complex DFT's of 16K points each, etc.

DFT -discrete Fourier transform , FIR - finite impulse response filter

EnLight256 уже сейчас используется для задач требующих высокой производительности, в частности один процессор такого типа способен в реальном времени обрабатывать до 15 видеоканалов стандарта HDTV, может использоваться для распознавания голоса, человеческих лиц, обработки изображений, MUD (Multi User Detection) и т.д. EnLight256 идеально подходит для применения в военных радарх высокого разрешения, так как способен обрабатывать данные от массивов антенн. Кроме того, размеры EnLight256 позволяют размещать его на транспортных средствах.

FIR (finite impulse response filter) фильтр с импульсной характеристикой конечной длительности



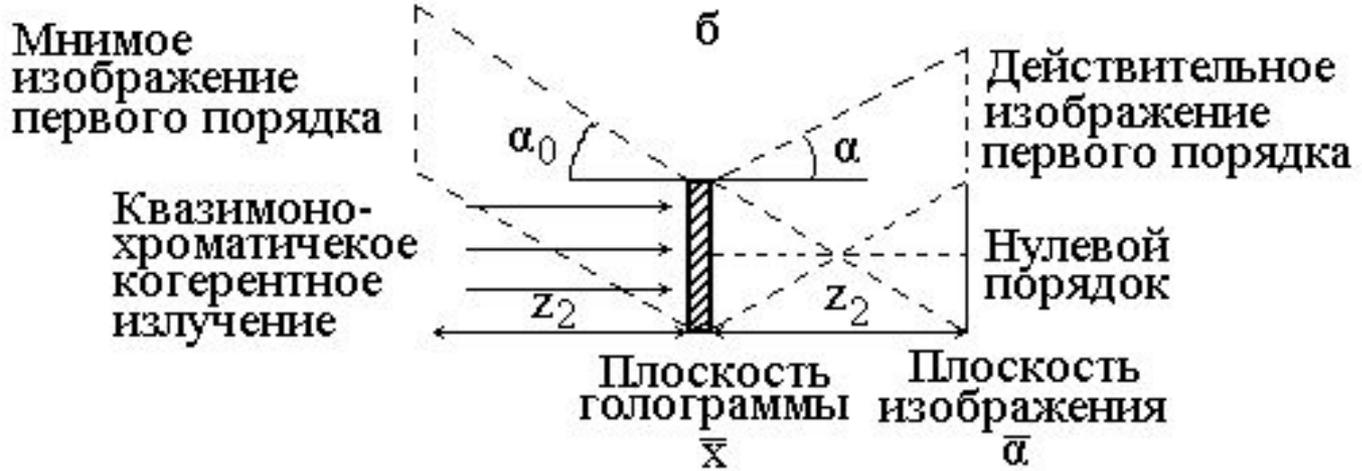
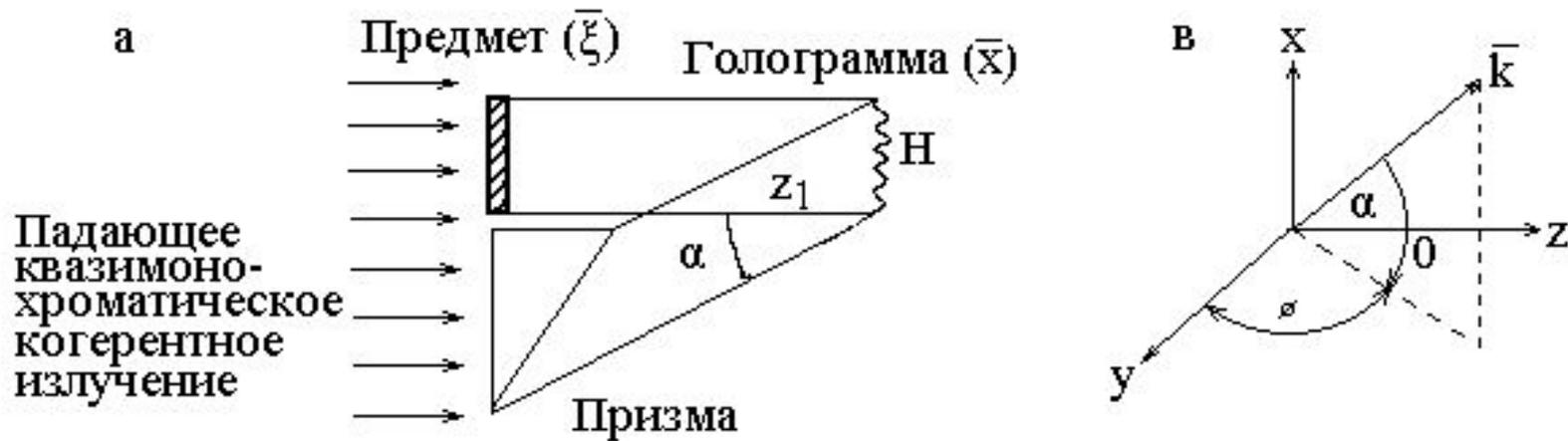
ЛЕКЦИЯ 5

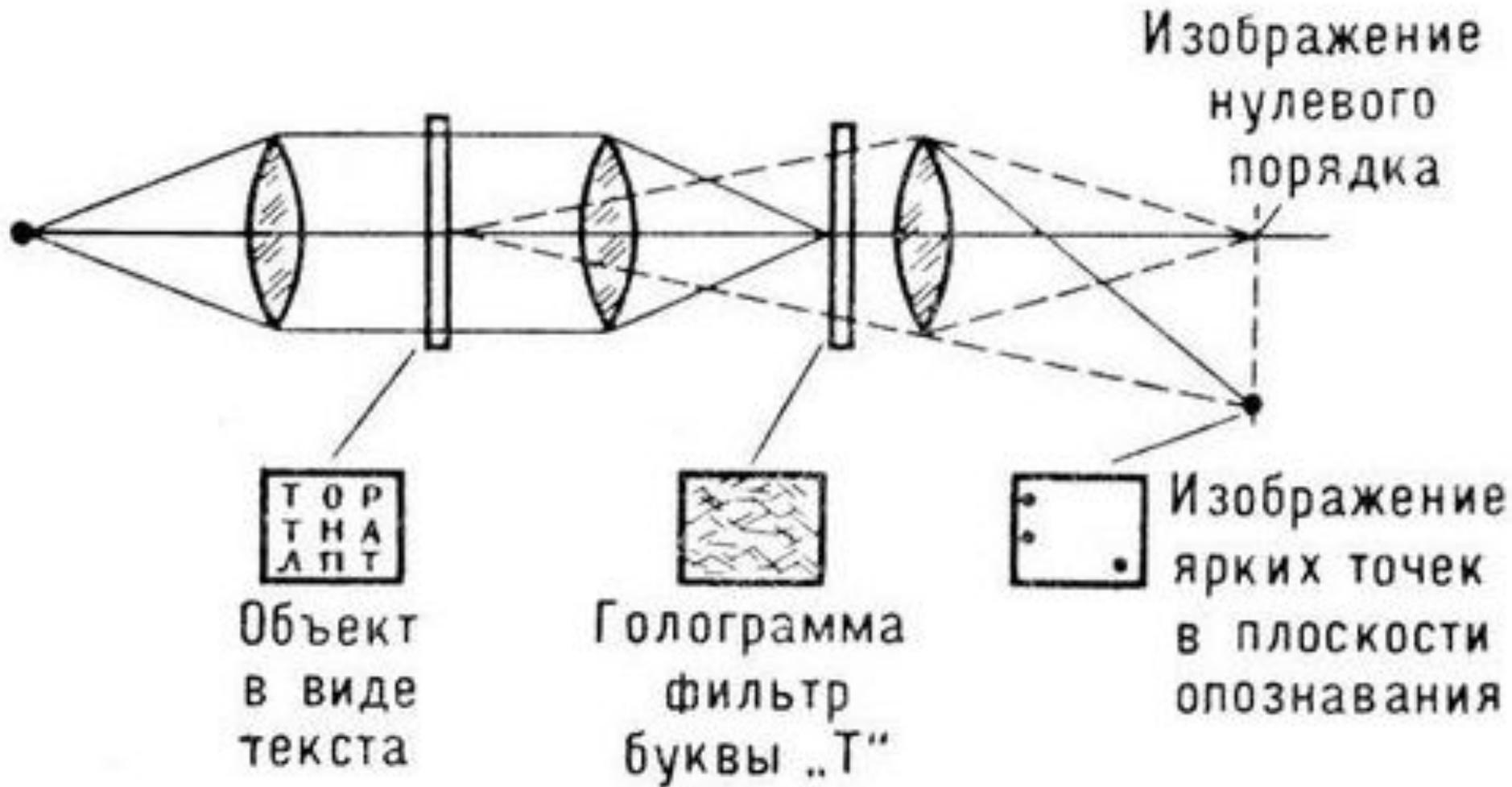
Оптическая обработка информации: голографические системы распознавания образов, оптическая би- и мультистабильность, цифровая оптическая обработка сигналов; технологии создания и перспективы применения.

«Над отливающей синью плитой ископаемой смолы встал откуда-то из ее черной глубины гигантский зелено-серый призрак. Громадный динозавр замер неподвижно в воздухе, над верхним краем обрыва, вздыбившись на десять метров над головами остолбеневших людей.»

Иван Ефремов. Тень минувшего. 1944

Голография





Оптическая схема голографического коррелятора

Двумерное преобразование Меллина описывается формулой:

$$M(u, v) = M[f(x, y)] = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} f(x, y) x^{-j2\pi u-1} y^{-j2\pi v-1} dx dy.$$

Преобразование Меллина обладает свойством инвариантности к изменению масштаба исходной функции,

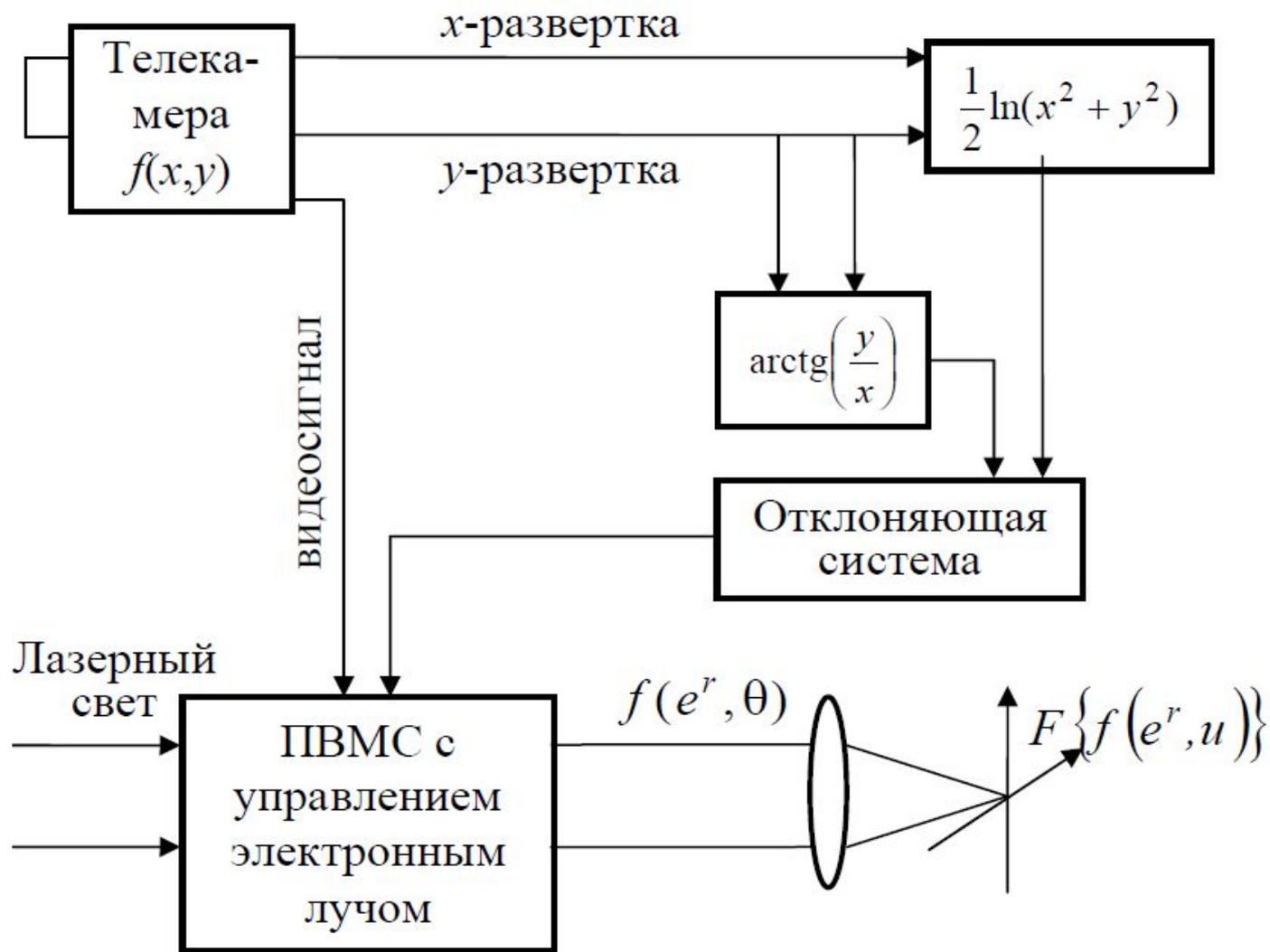
$$M[f(ax)] = \frac{1}{a^{j\omega}} M[f(x)],$$

$$M(u, v) = M[f(x, y)] = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} f(e^\xi, e^\eta) e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} d\xi d\eta$$

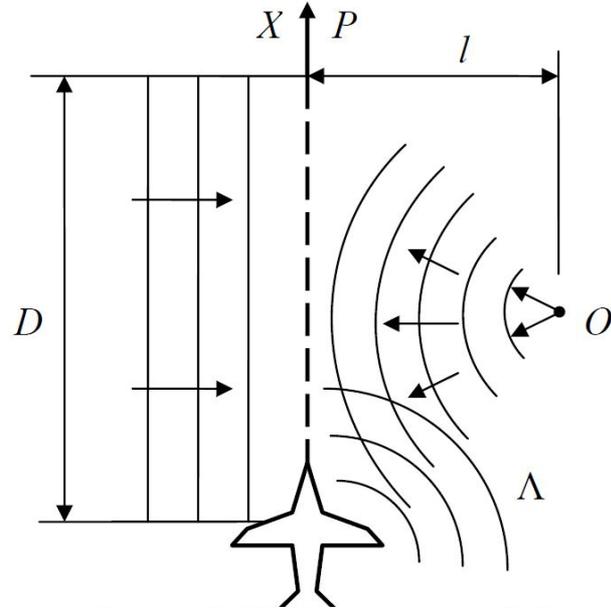
и тесно связано с преобразованиями Лапласа и Фурье,

$$M[f(x)] = F[f(e^\xi)].$$

Оптическое преобразование Меллина



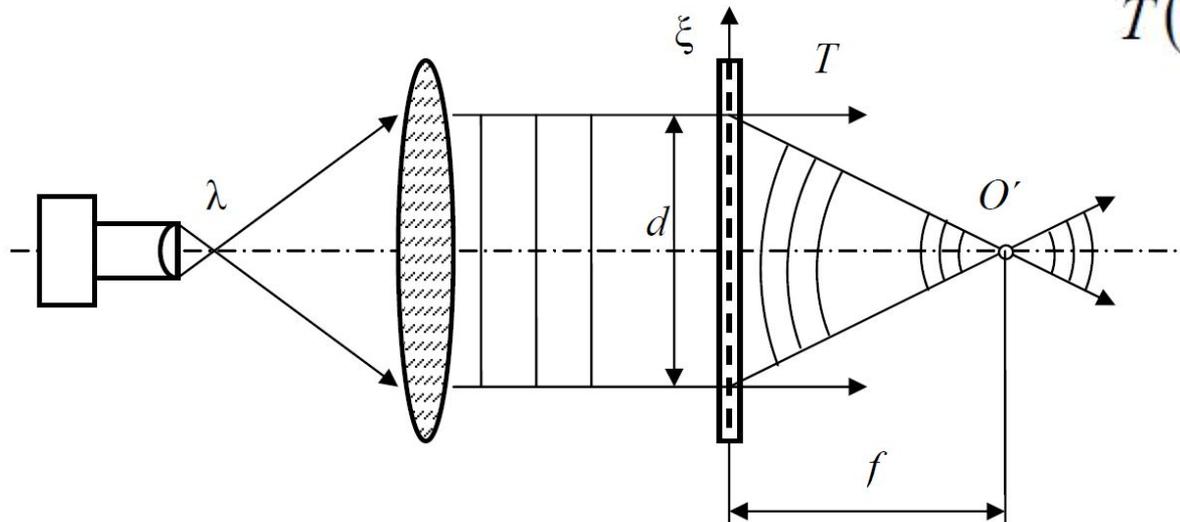
Гибридная система распознавания
инвариантная к масштабу и повороту



Амплитуда радиосигнала от точечного источника O соответствует пропусканию синусоидальной зонной пластинки Френеля,

$$t(x) \propto \cos \frac{2\pi}{\Lambda L} (x - x_1)^2,$$

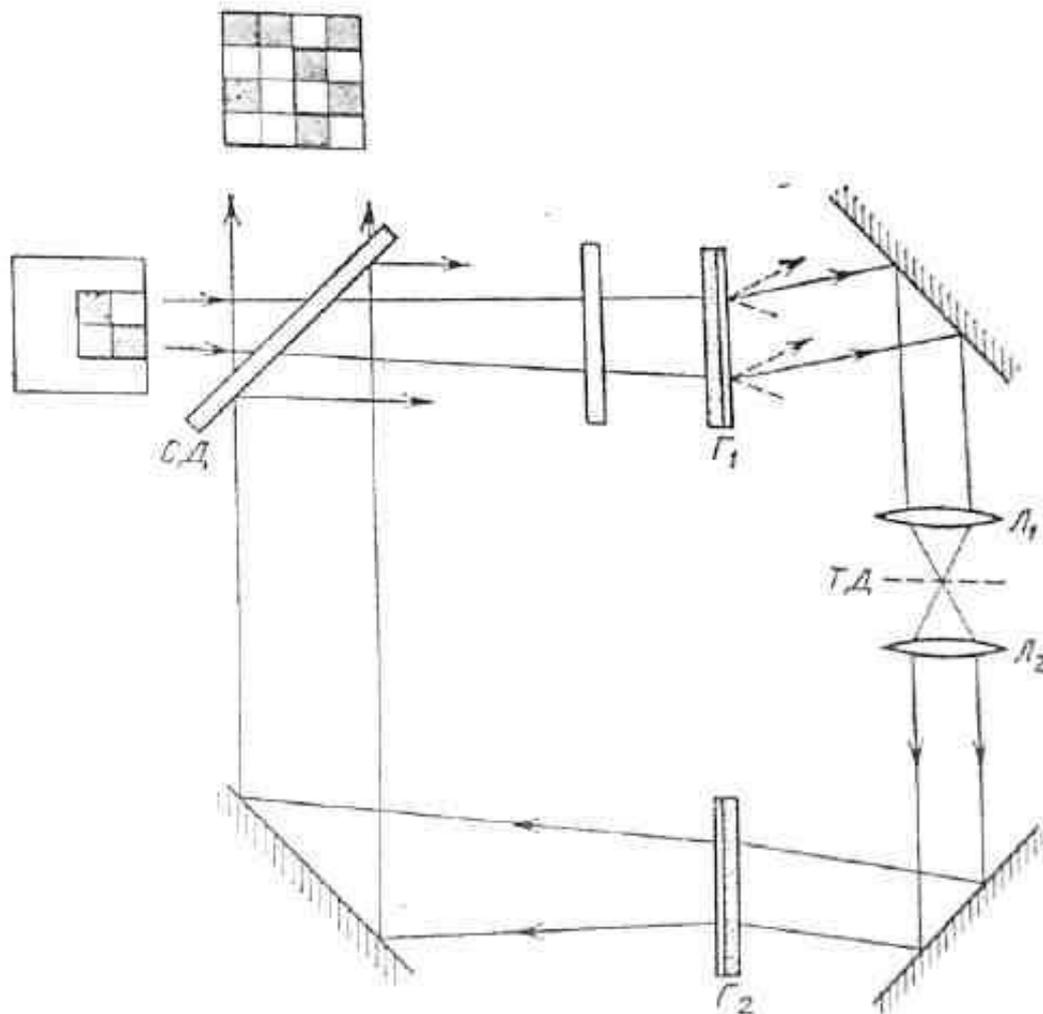
где x_1 – координата центра линии движения самолета.



$$T(\xi) \propto \cos \frac{2\pi}{\lambda f} (\xi - \xi_1)^2$$

Восстановление изображения в РЛС бокового обзора

Схема ассоциативного ЗУ, основанного на принципах голографии



Г₁ – голограмма
информационные массивы

ТД - маска точечных
диафрагм(фильтр)

Г₂ - голограмма
(Г₂= Г₁)

СД - светоделитель

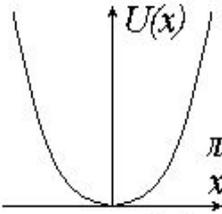
МЕХАНИЗМЫ ОПТИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

- **Нелинейная оптика** изучает процессы взаимодействия света и вещества, параметры протекания которых зависят от интенсивности света.
- Для нелинейнооптических эффектов характерно **нарушение принципа суперпозиции** световых волн: могут возникать новые спектральные компоненты поля, различные световые волны взаимодействуют между собой вплоть до полного преобразования энергии одной волны в другую.
- **Модель нелинейного осциллятора** основана на общем уравнении колебаний одномерного осциллятора, где $U(x)$ – потенциальная энергия связанного заряда, γ – коэффициент затухания колебаний.
- Конкретный вид нелинейности определяется типом осциллятора: если в среде центра симметрии нет (например, анизотропные кристаллы) - в разложении $U(x)$ может появиться кубический член – возникает **квадратичное нелинейное уравнение** колебаний; если $U(x)$ – четная функция (система имеет центр симметрии – газы, жидкости, стекла) – уравнение осциллятора имеет **кубическую нелинейность**. Очевидно, что влияние нелинейных слагаемых усиливается с ростом напряженности E .

$$\ddot{x} + \gamma \dot{x} + \frac{1}{m} \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{e}{m} E$$

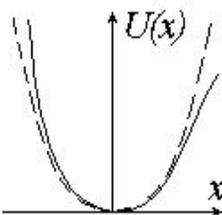
уравнение колебаний одномерного осциллятора

$$U(x) = \frac{x^2}{2!} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}(0) + \frac{x^3}{3!} \frac{\partial^3 U}{\partial x^3}(0) + \frac{x^4}{4!} \frac{\partial^4 U}{\partial x^4}(0) + \dots$$

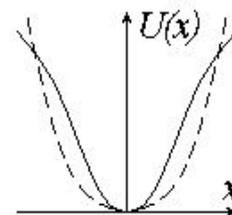


линейный осциллятор

$$\ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{e}{m} E$$



$\ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 x + \beta_2 x^2 = \frac{e}{m} E$



$\ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 x - \beta_3 x^3 = \frac{e}{m} E$

нелинейные осцилляторы

- Физическими причинами, определяющими появление **нелинейных восприимчивостей** $\chi^{(n)}$ могут быть: нелинейный отклик свободного или связанного электрона, нелинейные колебания многоатомных молекул и кристаллической решетки, возбуждение светом дрейфа и диффузии зарядов в кристаллах, индуцированная светом ориентация анизотропных молекул, электрострикция, тепловые эффекты и т.п. Все они обладают существенно различным **временем установления нелинейного отклика** $\tau_{нл}$.



$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi \vec{P}; \quad \vec{P} = \vec{P}(\vec{E}); \quad P = \chi E + \chi^{(2)} EE + \chi^{(3)} EEE + \dots; \quad P = Np = Ne x = Ne(x_{л} + x_{нл}) = P_{л} + P_{нл}$$

$P = \chi E + \chi^{(2)} E^2$

квадратичная нелинейность

$P = \chi E + \chi^{(3)} E^3$

кубичная нелинейность

$\frac{P_{нл}^{(2)}}{P_{л}} = \frac{E}{E_{ам}}$

$\frac{E_{ам}}{10^8 \dots 10^9 \frac{B}{cm}}$

$\frac{P_{нл}^{(3)}}{P_{л}} = \left(\frac{E}{E_{ам}}\right)^2$

$n = n_0 + \frac{2\pi}{n_0} \chi^{(3)} E^2$

$n_0 = \sqrt{1 + 4\pi\chi}$

$n = n_0 + n_2 I$

$P_{нл}^{(2)} = P_{2\omega_1} + P_{2\omega_2} + P_{\omega_1 \pm \omega_2} + P_0$

$\omega = \omega_i \pm \omega_j$, где $i, j = 1, 2$

Световое поле, осциллирующее на частоте вызывает поляризацию среды.

$$E(x, t) = E_0 \exp[i(\omega t - kx)]$$

При взаимодействии интенсивного светового поля с прозрачной нелинейной средой колебания атомного осциллятора (электрона, связанного с атомным остовом) ангармоничны и поляризация становится нелинейной функцией электрического поля. Ее можно представить в виде степенного ряда

Индукцированная поляризация

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 (\chi^1 \mathbf{E} + \chi^2 : \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^3 \vdots \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, χ^j ($j = 1, 2, \dots$) – восприимчивость j -го порядка, χ^j – тензор ранга $j + 1$, вводимый для учета поляризационных эффектов.

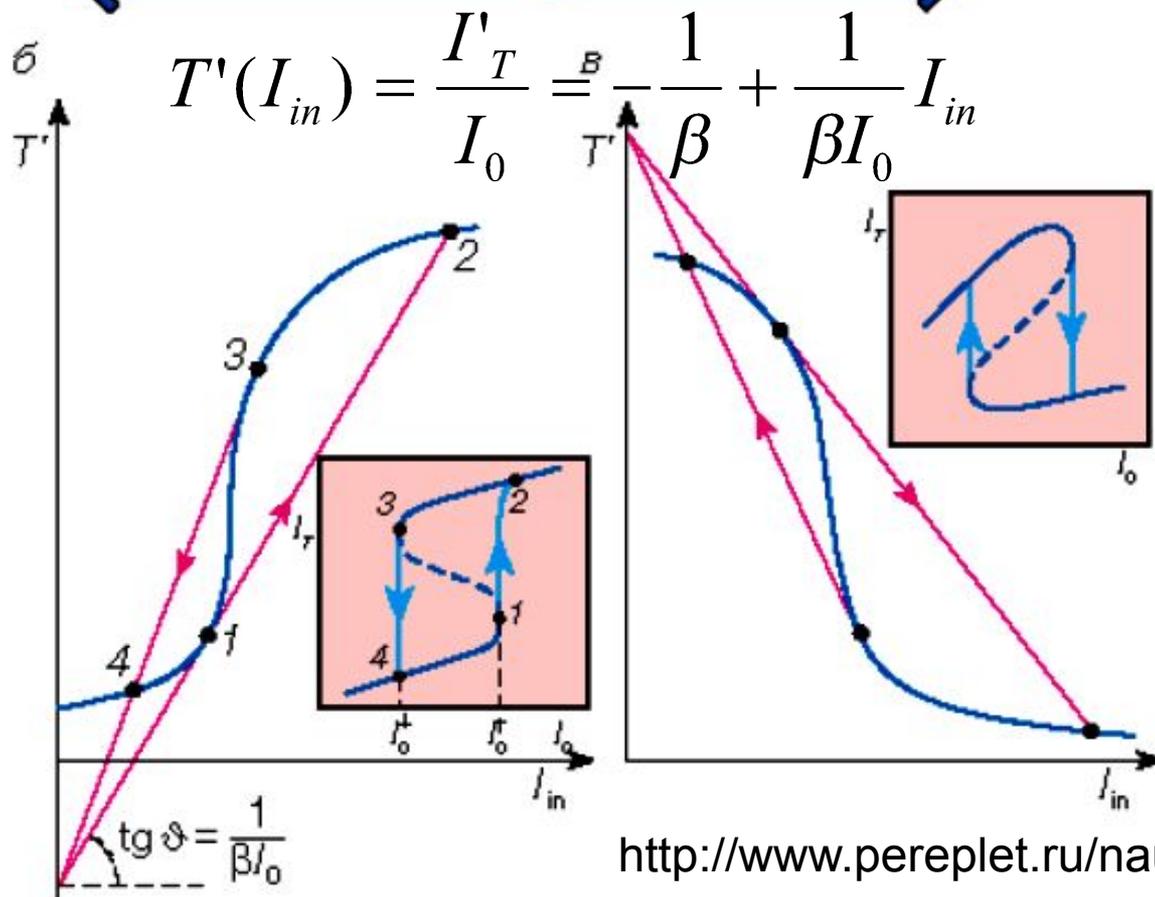
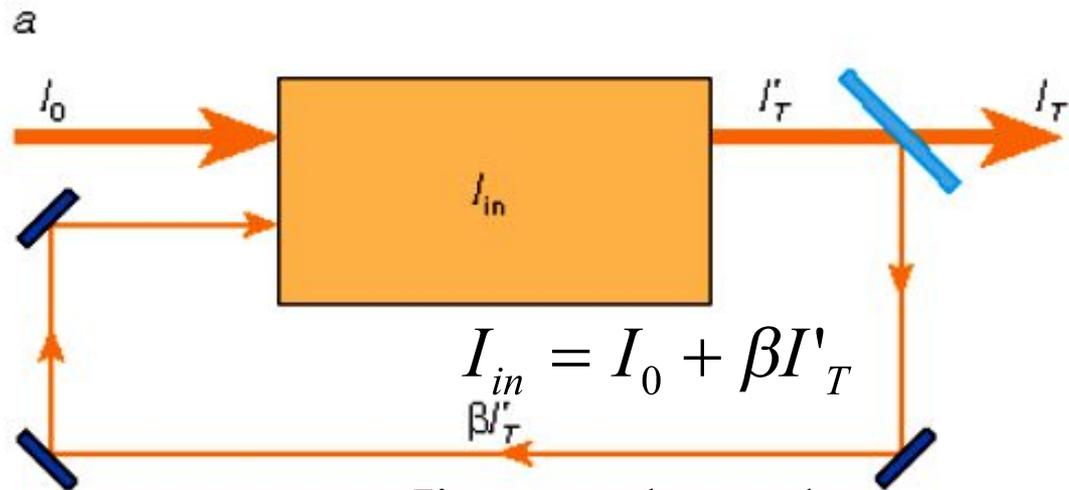
Фазовая самомодуляция

$$\bar{n}(\omega, |E|^2) = n(\omega) + n_2 |E|^2$$

$$n_2 = \frac{3}{8n} \chi_{xxxx}^{(3)}$$

Фаза оптического поля

$$\phi = \bar{n} k_0 L = (n + n_2 |E|^2) k_0 L,$$

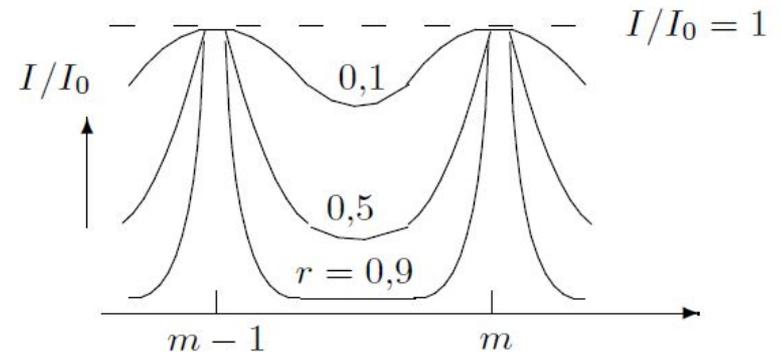
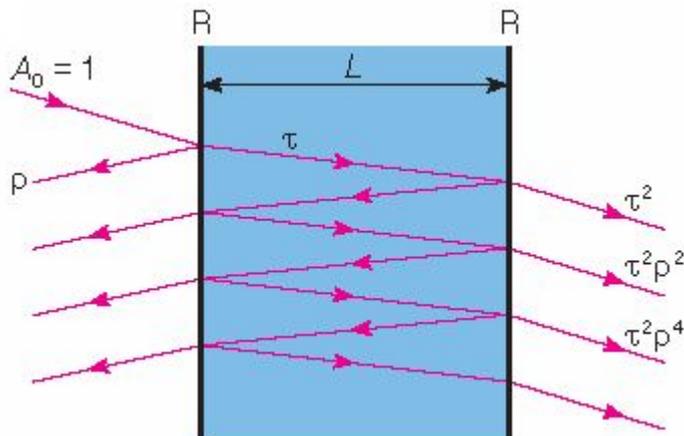


а- схема нелинейной оптической системы с обратной связью; б, в – зависимости пропускания системы от интенсивности внутри элемента и на вставках зависимости интенсивности на выходе от интенсивности на входе для систем S (б) и N (в) типа.

Полностью оптическая логическая ячейка. Нелинейный резонатор Фабри-Перо.

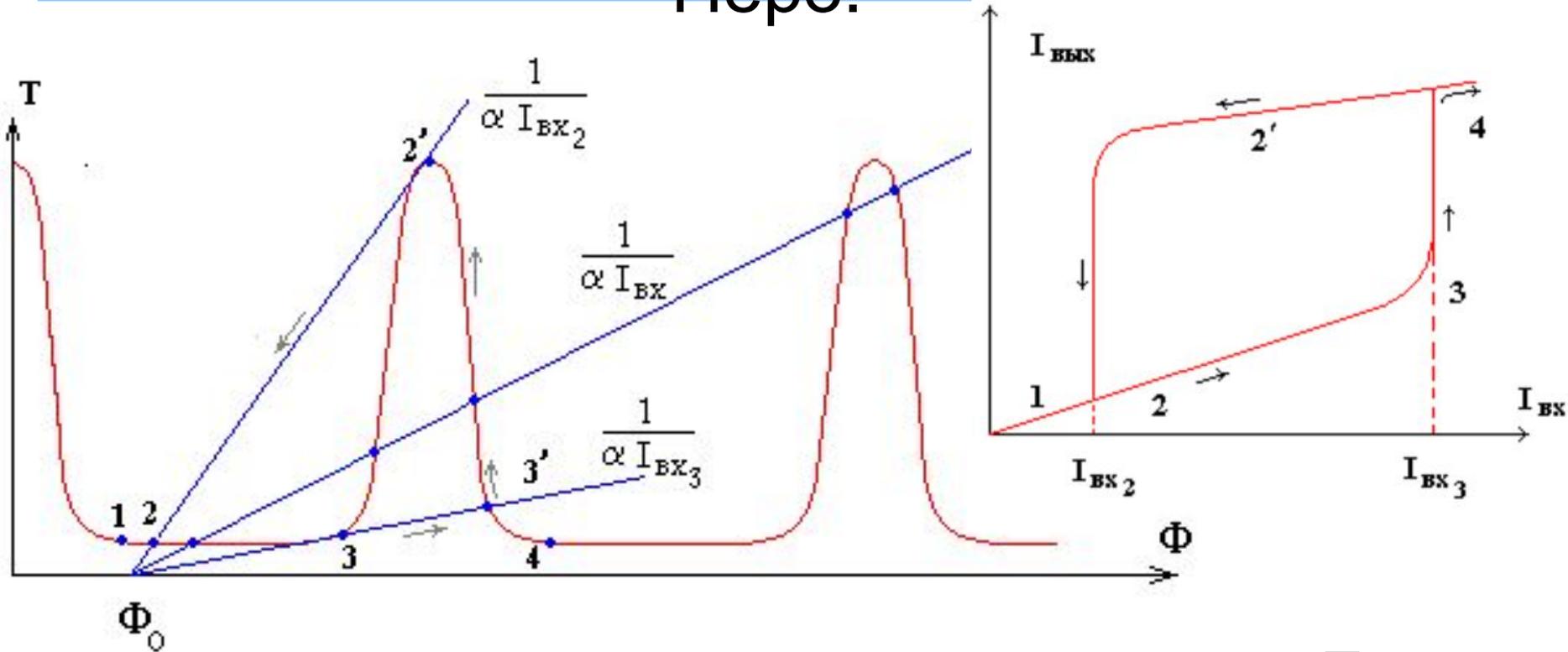


$R1, R2 \sim 90 \dots 95\%$

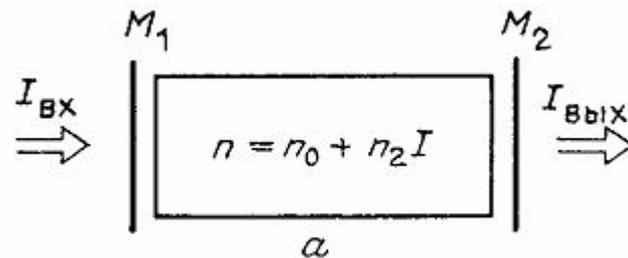


Распределение интенсивности в проходящем свете в зависимости от порядка интерференции Δ/λ

Полностью оптическая логическая ячейка. Нелинейный резонатор Фабри-Перо.



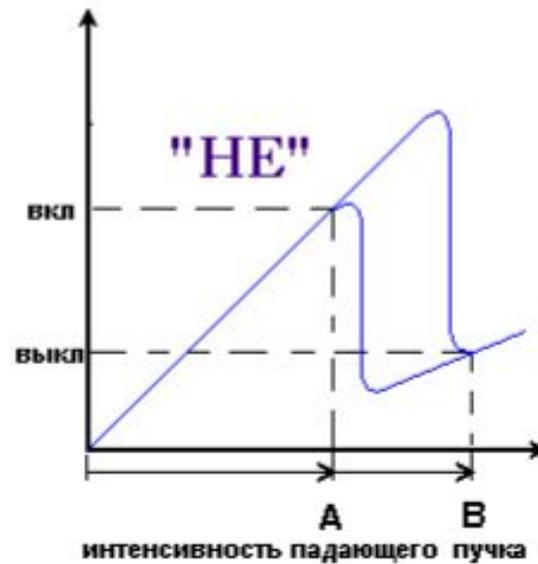
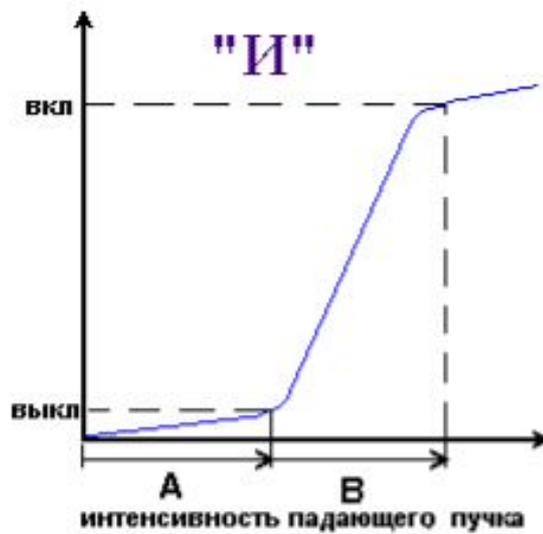
$$\Phi = \Phi_0 + \alpha I_{\text{вх}} T$$

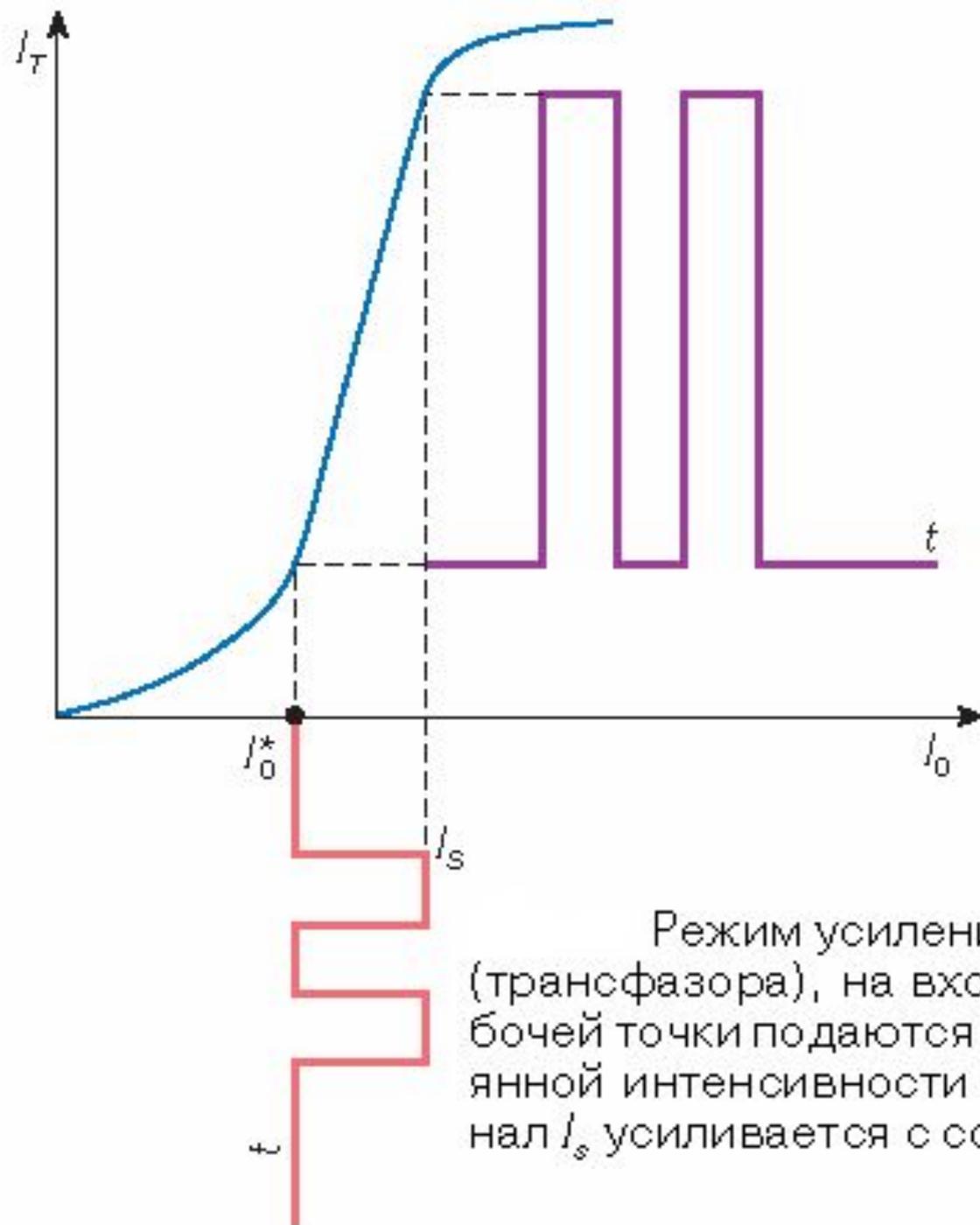


$$T = \frac{T_0}{1 + F \sin^2(\Phi / 2)}$$

Полученный результат можно объяснить следующим образом. При увеличении интенсивности света нелинейное изменение показателя преломления смещает систему к резонансу. Происходит нарастание интенсивности света внутри резонатора. Вблизи резонанса положительная обратная связь вызывает лавинное нарастание пропускания, система проходит через резонанс в стабильное состояние (точка 2'). В этом состоянии большого значения пропускания (выходной интенсивности света) система находится при меньших значениях I из-за усиления интенсивности света внутри резонатора при конструктивной интерференции. При плавном уменьшении входной интенсивности света пропускание Фабри-Перо резонатора не уменьшается до первоначально низкого уровня (верхняя часть гистерезисной кривой), так как интенсивность света в резонаторе достаточна, чтобы удерживать значение показателя преломления вещества (оптической длины резонатора) на уровне, при котором пропускание большое. В окрестности точки 2 в результате положительной обратной связи показатель преломления и интенсивность света начинают взаимно ослаблять друг друга и небольшое изменение I приводит к резкому падению пропускания.

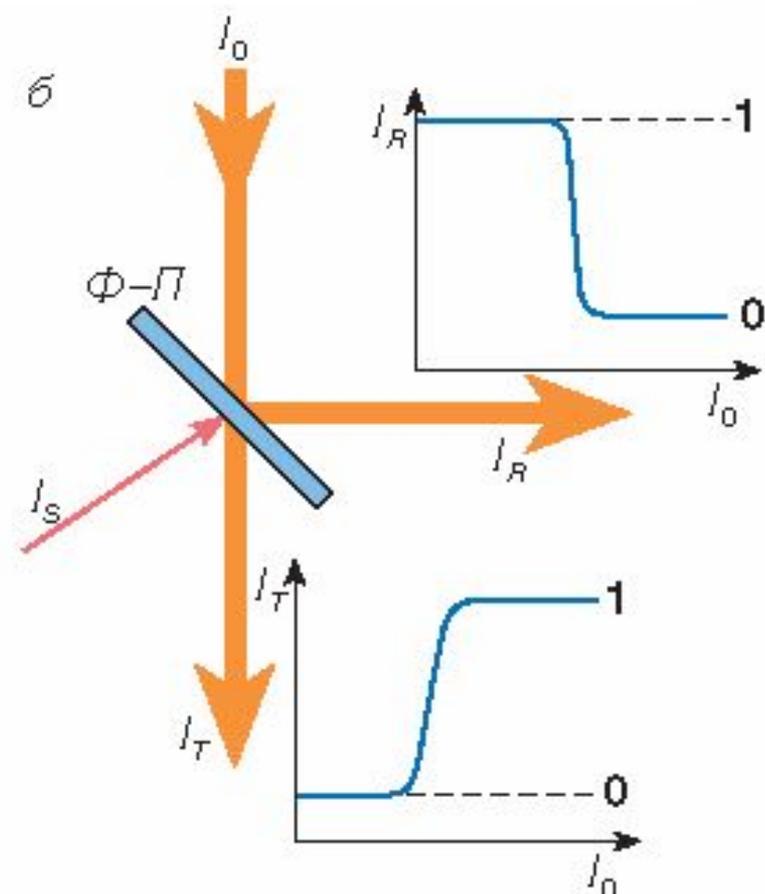
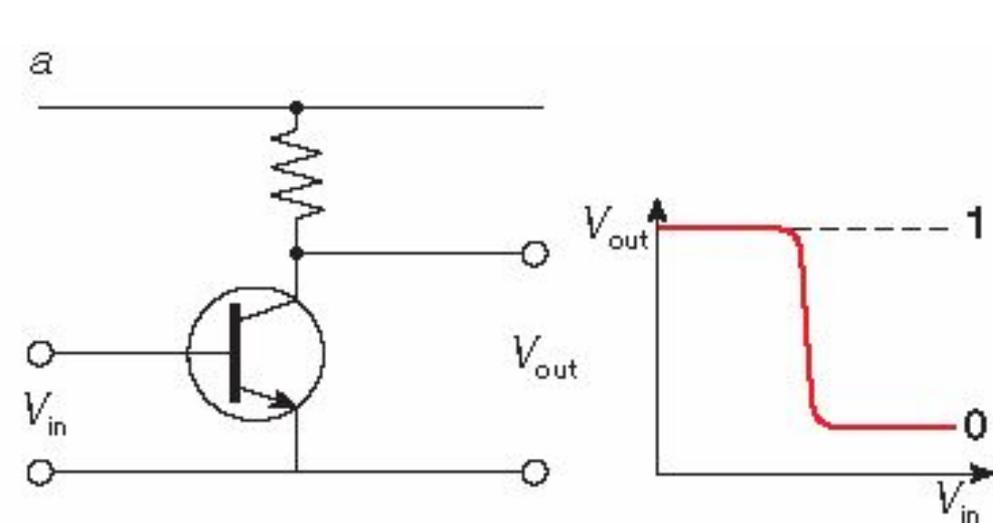
Оптические логические элементы





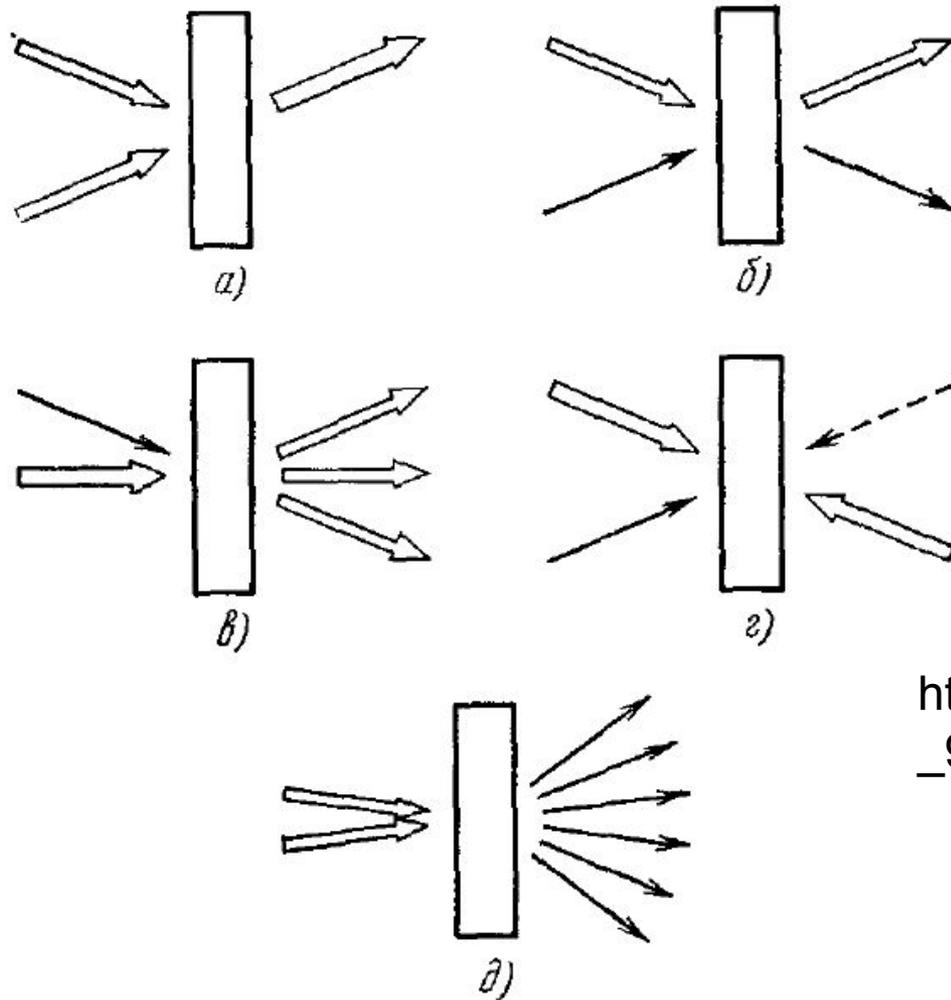
Режим усиления оптического транзистора (трансфазора), на вход которого для выбора рабочей точки подаются опорный пучок света постоянной интенсивности I_0^* и сигнал I_s . Слабый сигнал I_s усиливается с сохранением его формы

Схема электронного (а) транзистора и оптического (б) транзистора (трансфазора), используемых в качестве переключателей. **0** и **1** – логический ноль и логическая единица. Φ - Π – резонатор Фабри-Перо, заполненный нелинейной средой. V – напряжение, I_R – интенсивность отраженного света.



Значения коэффициента n_2





http://ufn.ru/ufn79/ufn79_9/Russian/r799d.pdf

Схемы динамической самодифракции в нелинейной среде.

а) Брэгговская самодифракция двух пучков в средах с нелокальным откликом; **б)** нестационарная брэгговская самодифракция в средах с локальным откликом; **в)** самодифракция трех пучков в среде с локальным откликом в условиях пространственного синхронизма; **г)** самодифракция четырех попарно коллинеарных встречных пучков.

Простейшая схема динамической голограммы (Д.г.) - двухволновая: 2 когерентных пучка пересекаются в нелинейной среде, падая с одной или разных сторон под одинаковыми углами к её поверхности. Создаваемая ими интерференционная картина записывается в среде в виде периодич. структуры (решётки), на к-рой эти же пучки дифрагируют (самодифракция).

Это приводит к изменениям параметров пучков, поэтому записываемая решётка также изменяется по глубине регистрирующей среды. Для Д. г. важны среды с изменяющимся под действием света показателем преломления n .

Самодифракция 2 стационарных пучков в такой среде при совпадении экстремумов записываемой решётки (показателя преломления) и записывающего интерференционного поля не приводит к изменениям их амплитуд, т. е. к перераспределению интенсивностей пучков, но изменяет их разность фаз (среда с локальным откликом). Если решётка сдвинута по фазе относительно интерференционного поля на угол, не кратный π , то изменяются амплитуды, т. е. интенсивности волн (среда с нелокальным откликом). При этом происходит "перекачка" энергии между волнами.

Макс. перекачка соответствует рассогласованию решёток показателя преломления и интенсивности интерференционного поля на угол $\pi/4$ (сдвиговая четвертьволновая голограмма). Одноврем. преобразование амплитуд и фаз при самодифракции 2 волн в среде с локальным откликом возникает либо в нестационарном режиме, либо в случае тонкой решётки в результате появления высших порядков дифракции.

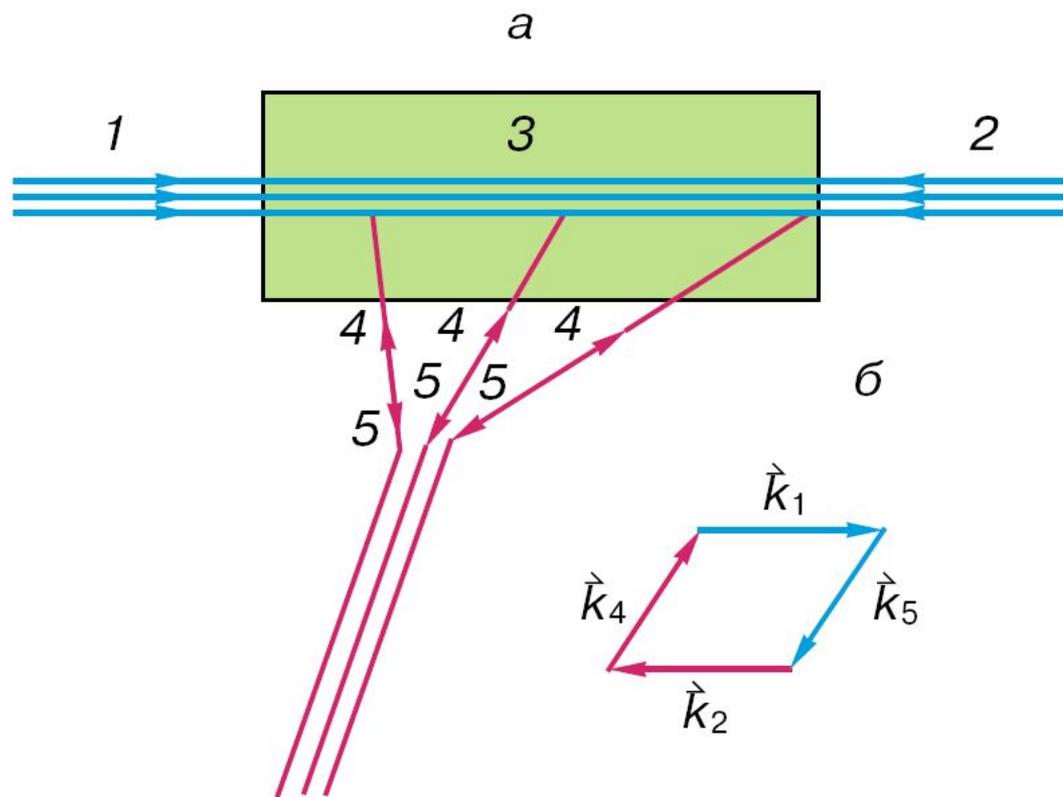
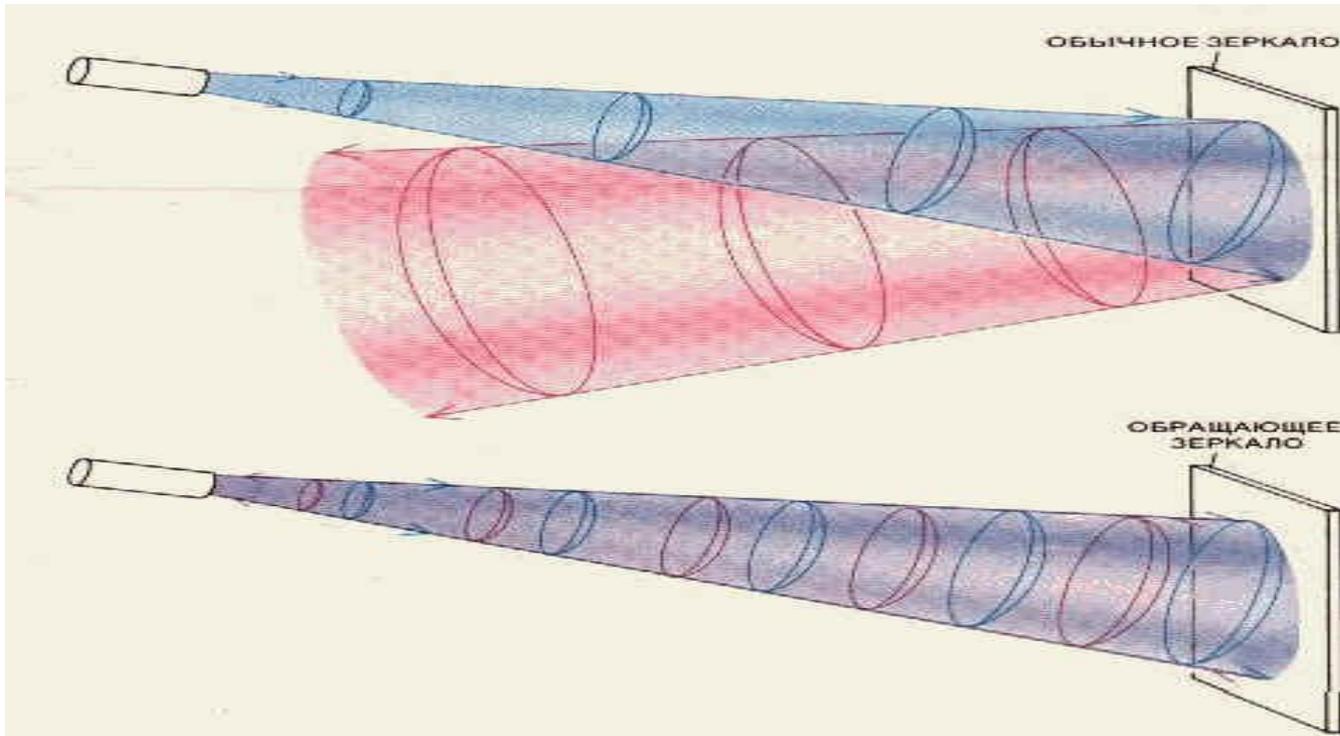
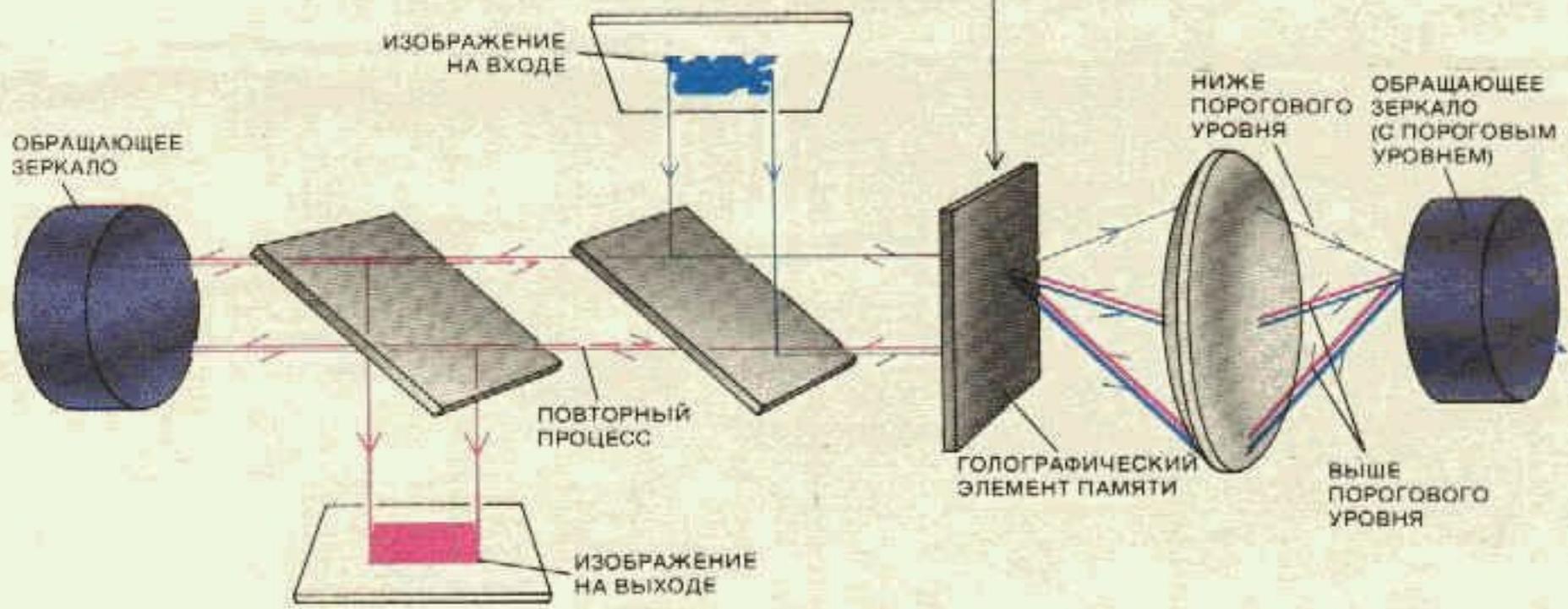
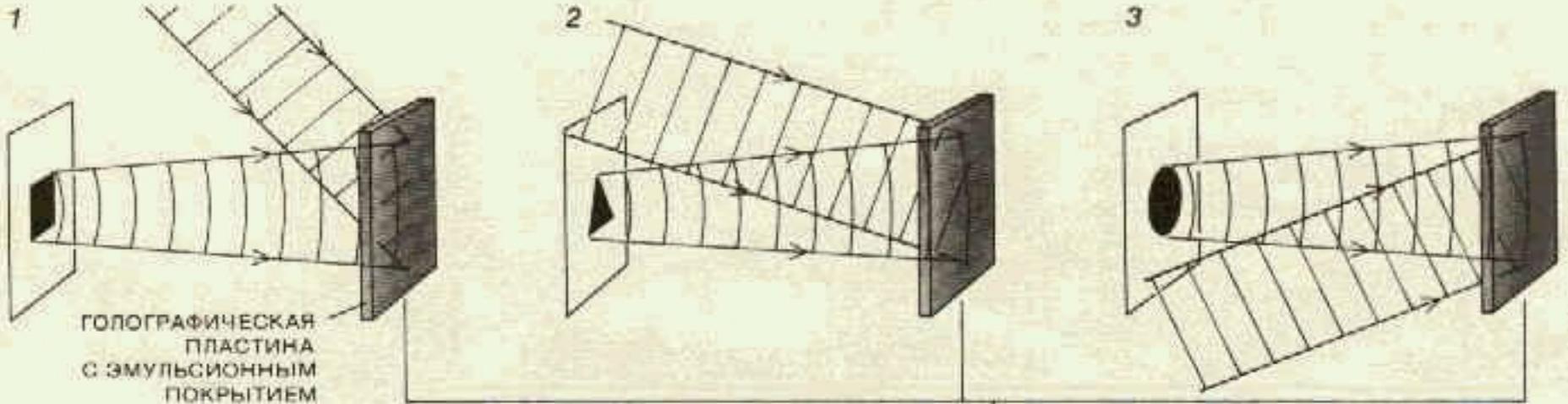
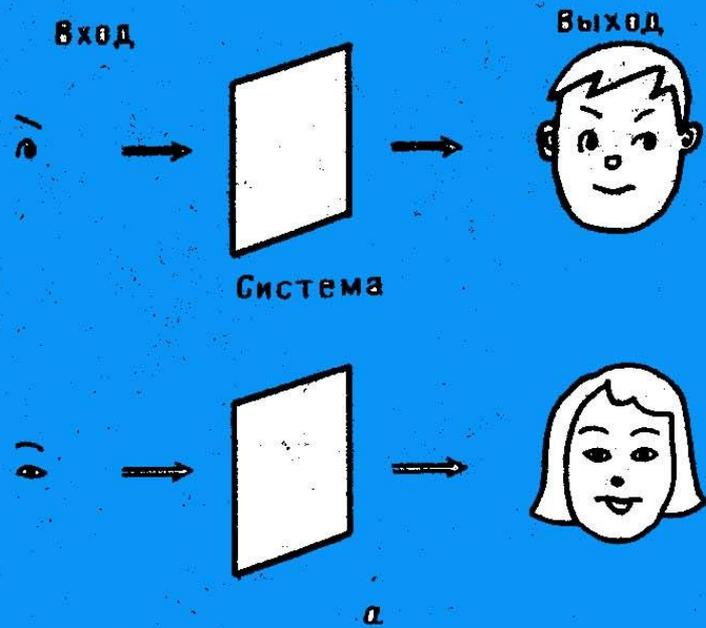


Схема обращения волнового фронта (а) и закон сохранения импульса (б): 1, 2 – волны накачки, 4 – искаженная волна, 5 – сопряженная волна, 3 – нелинейная среда

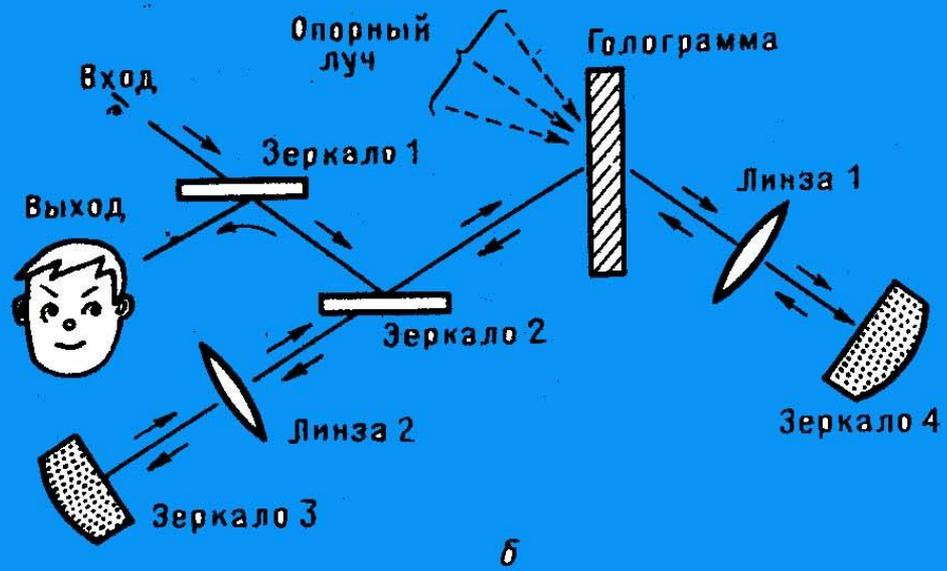
Если на обычное зеркало и на
обращающее волновой фронт зеркало
направить световой пучок, то обычное
зеркало просто отразит его, а обращающее
зеркало независимо от угла падения
сформирует сходящийся, «обращенный во
времени» пучок.







Распознавание образов с помощью голографии



Зеркало 3 и 4 – устройства обращения волнового фронта

Ассоциативная система, использующая голограмму:
 а – концептуальная схема; б – экспериментальная система

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P}; \quad \vec{P} = \vec{P}(\vec{E}); \quad P = \chi E + \chi^{(2)} EE + \chi^{(3)} EEE + \dots; \quad P = Np = Nex = Ne(x_l + x_{nl}) = P_l + P_{nl}$$

$$P = \chi E + \chi^{(2)} E^2 \text{ квадратичная нелинейность} \quad \parallel \quad P = \chi E + \chi^{(3)} E^3 \text{ кубичная нелинейность}$$

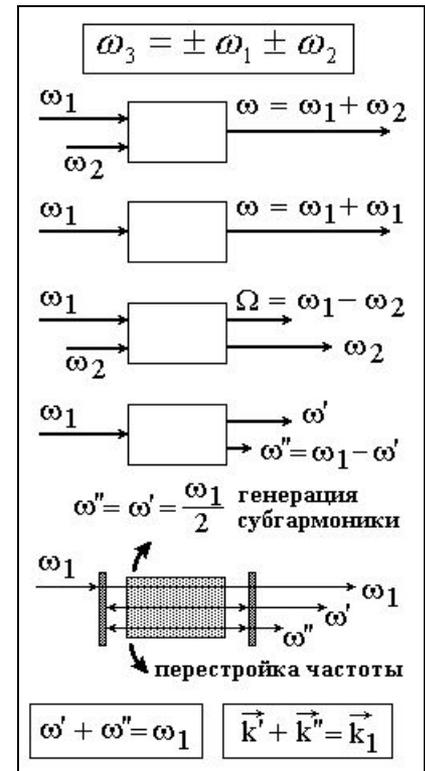
$$P_{nl}^{(2)} = P_{2\omega_1} + P_{2\omega_2} + P_{\omega_1 \pm \omega_2} + P_0 \quad \frac{P_{nl}^{(2)}}{P_l} = \frac{E}{E_{am}} \quad \frac{E_{am}}{10^8 \dots 10^9 \frac{B}{cm}} \quad \frac{P_{nl}^{(3)}}{P_l} = \left(\frac{E}{E_{am}} \right)^2 \quad n = n_0 + \frac{2\pi}{n_0} \chi^{(3)} E^2 \quad \boxed{n = n_0 + n_2 I}$$

$$\omega = \omega_i \pm \omega_j, \text{ где } i, j = 1, 2 \quad n_0 = \sqrt{1 + 4\pi\chi}$$

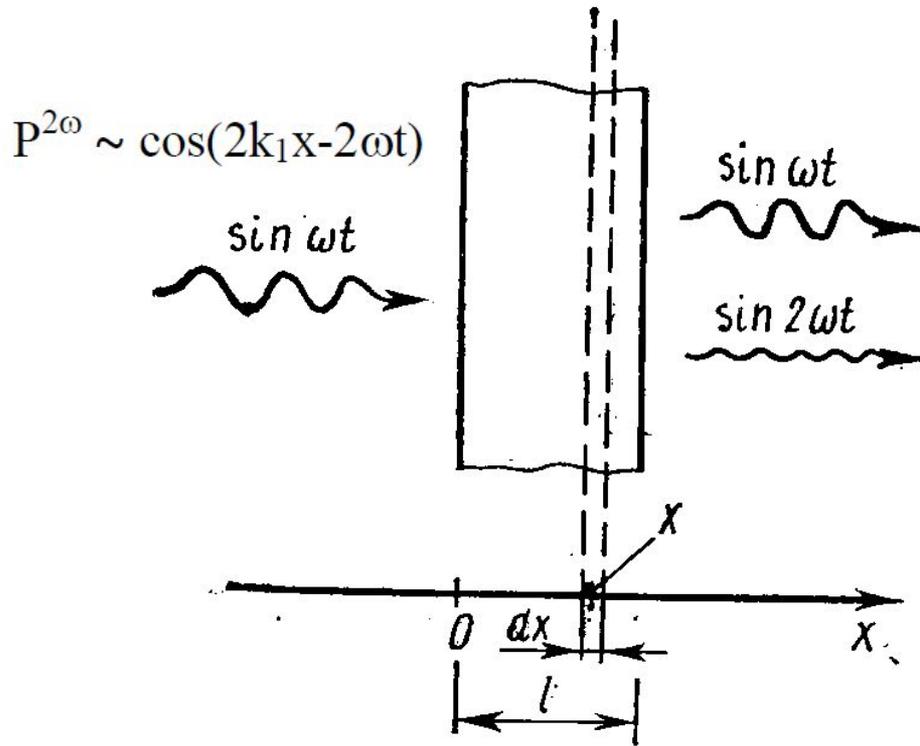
Для генерации второй гармоники пригодны вещества, не обладающие центром инверсии. Действительно, когда вещество изотропно или имеет центр инверсии, при изменении направления приложенного электрического поля E поляризация P должна менять знак. Чтобы удовлетворить этому требованию, члены, содержащие четные степени в уравнении для нелинейной поляризации, должны отсутствовать.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ СВЕТА

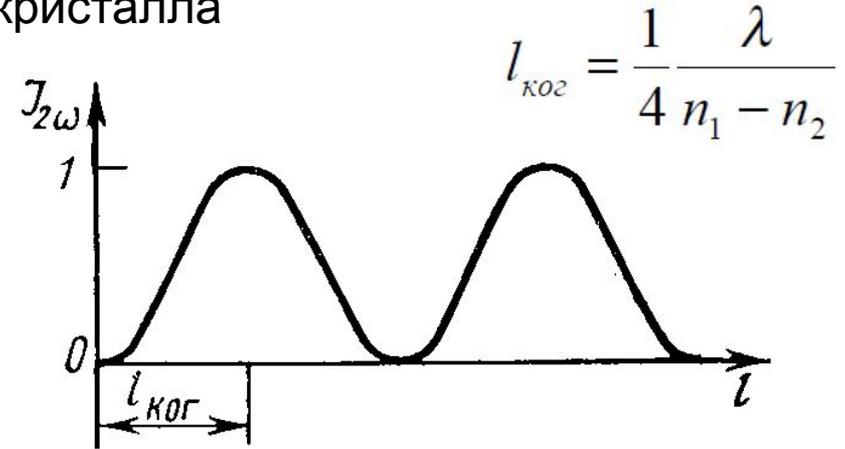
- В общем случае для сред с *квадратичной нелинейностью* характерны *трехволновые* (трехчастотные, трехфотонные) *взаимодействия* световых волн. Поляризации среды на удвоенной частоте или на суммарной (разностной) частоте при определенных условиях могут приводить к переизлучению световой волны на соответствующих частотах. Так, для *возбуждения поля на суммарной частоте*, необходимо выполнить условие волнового синхронизма вида $k_3 = k_1 + k_2$.
- Процесс *генерации второй гармоники* относится к случаю вырожденного трехчастотного взаимодействия. С нелинейной поляризацией $P_{\omega_1-\omega_2}$ связаны процессы *генерации разностной частоты Ω* и *параметрического усиления* волны ω_2 . Более интенсивная волна накачки ω_1 модулирует в пространстве и во времени диэлектрическую проницаемость среды, приводя к параметрическому усилению на частотах ω_2 и Ω , которое по-сути обусловлено работой нестационарной среды.
- *Параметрический генератор света* - источник когерентного оптического излучения, в котором мощная световая волна частоты накачки ω_1 преобразуется в волны меньших частот. У входной грани анизотропного нелинейного кристалла из шумов возбуждаются электромагнитные колебания частот ω' и ω'' . Если для них выполняются условия фазового синхронизма, то возникают условия для генерации. Перестройка частот производится поворотом нелинейного кристалла, а открытый резонатор увеличивает эффективную длину взаимодействия.



$P = \chi E + \chi^{(2)} E^2$ квадратичная нелинейность



Зависимость интенсивности второй гармоники от координаты внутри кристалла



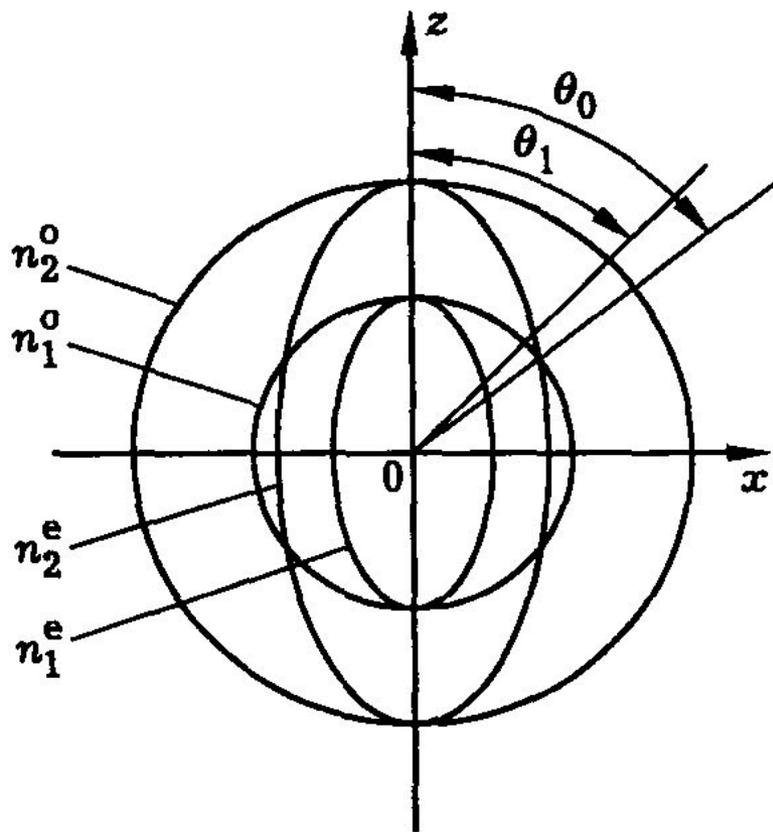
К расчету электрического поля второй гармоники

$$dE^{2\omega} \sim dx \cos[2k_1x - 2\omega t + k_2(l - x)]$$

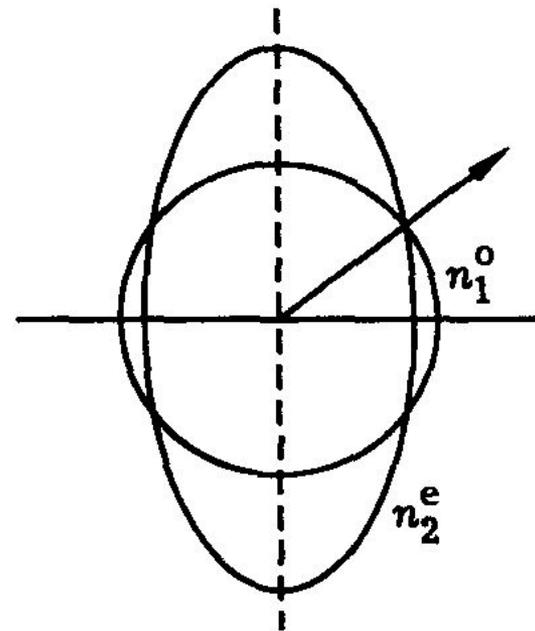
$$\int_0^l dE^{2\omega} \approx \frac{1}{2k_1 - k_2} \sin\left[\frac{l}{2}(2k_1 - k_2)\right] \cos\left[lk_1 + \frac{lk_2}{2} - 2\omega t\right]$$

соответственно пропорциональна

$$I^{2\omega} \approx \left\{ \frac{\sin[l(2k_1 - k_2)/2]}{(2k_1 - k_2)/2} \right\}^2 \approx \left\{ \frac{\sin[(n_1 - n_2)2\pi l / \lambda]}{(n_1 - n_2)2\pi / \lambda} \right\}^2$$



а)



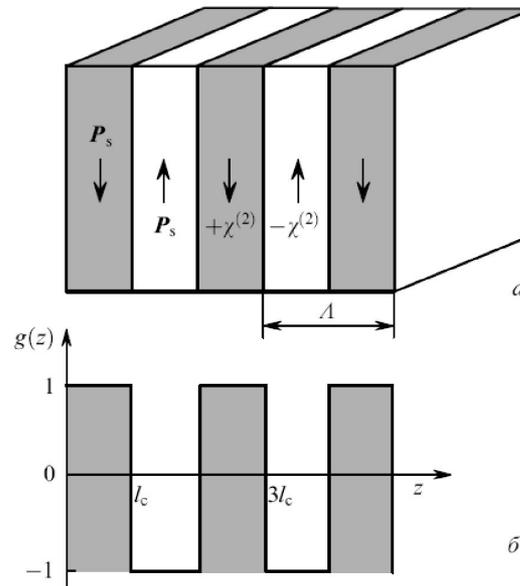
б)

Волновой синхронизм в кристалле KDP. Слева изображены сечения поверхностей показателей преломления; сферы для обыкновенной волны (n^o) и эллипсоида для необыкновенной волны (n^e) в кристалле KDP для частоты рубинового лазера (индекс "1") и его второй гармоники (индекс "2"). Под углом θ_0 к оптической оси кристалла окружность n_1^o пересекается с эллипсом n_2^e . Справа показано направление волнового синхронизма для процесса генерации второй оптической гармоники в отрицательном одноосном анизотропном кристалле (б)

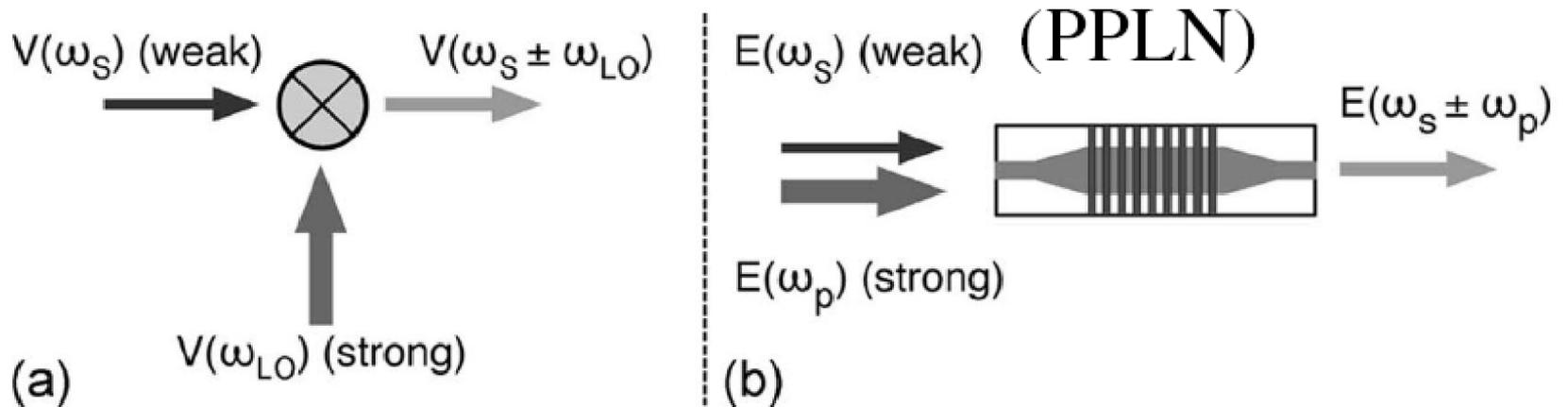
$$\frac{dA_2}{dz} = -i\beta' A_{10}^2 \exp(i\Delta k_2 z)$$

где β' – коэффициент нелинейной связи волн; A_{10} – комплексная амплитуда основной волны с частотой ω . Из (3) получаем

$$A_2(z) = -i\beta' A_{10}^2 \frac{\sin(\Delta k_2 z/2)}{\Delta k_2/2} \exp(-i\Delta k_2 z/2).$$



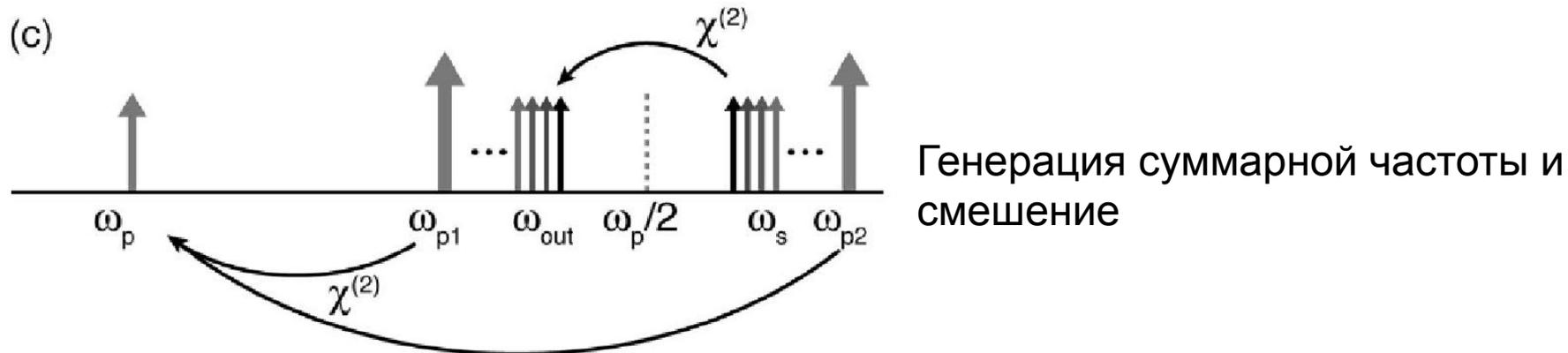
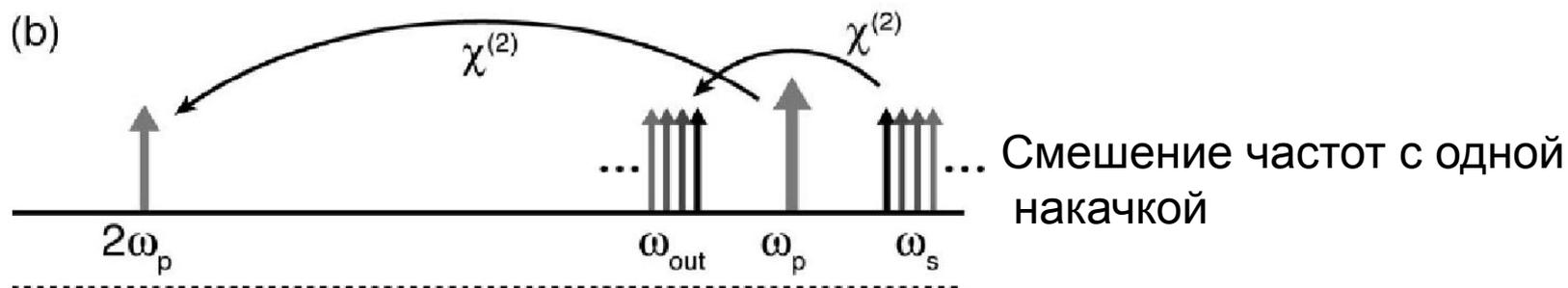
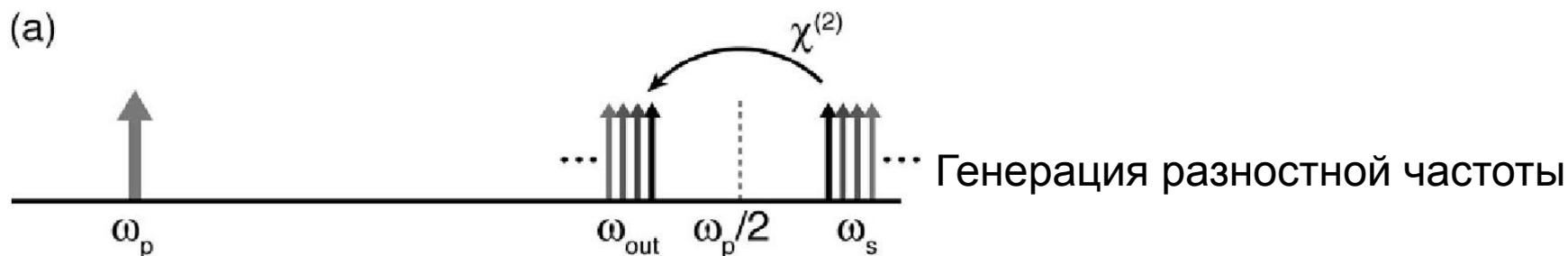
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ СМЕШЕНИЕ ЧАСТОТ
В РАДИОФИЗИКЕ И ОПТИКЕ



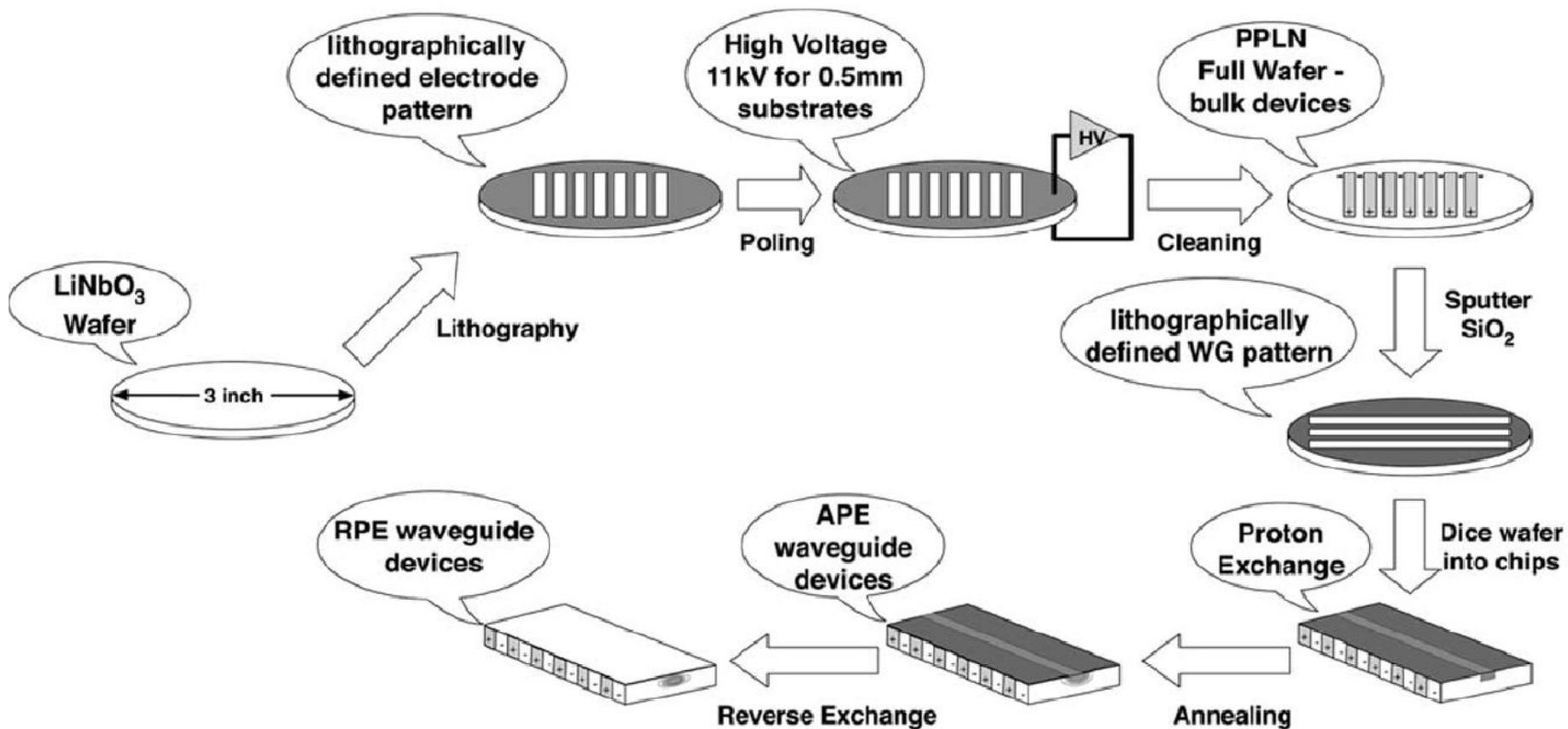
$$V_{\text{out}} \propto V_{LO} V_s^*$$

$$E_{\text{out}} \propto E_p E_s^*$$

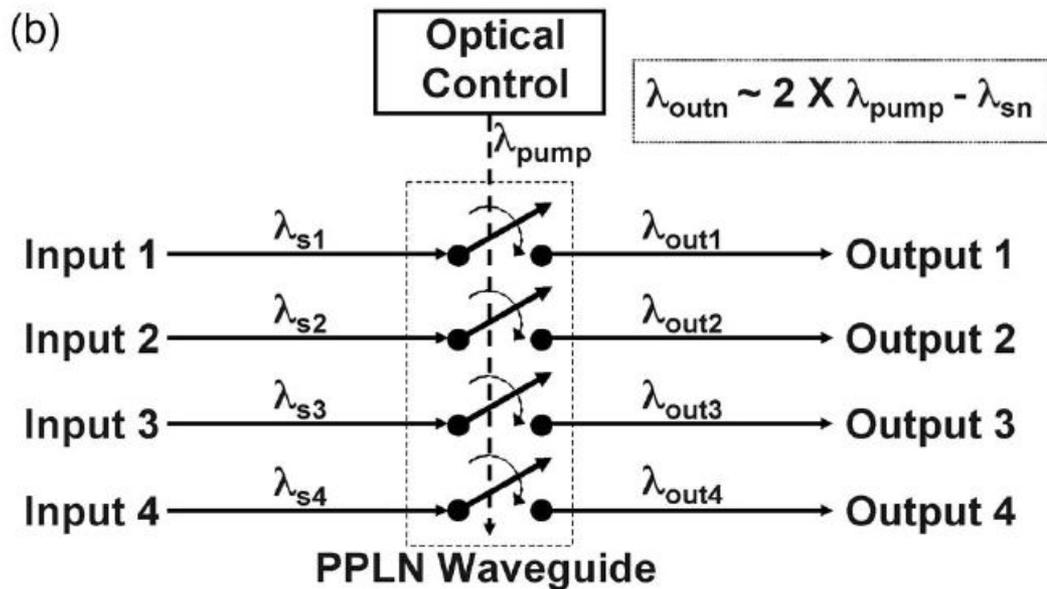
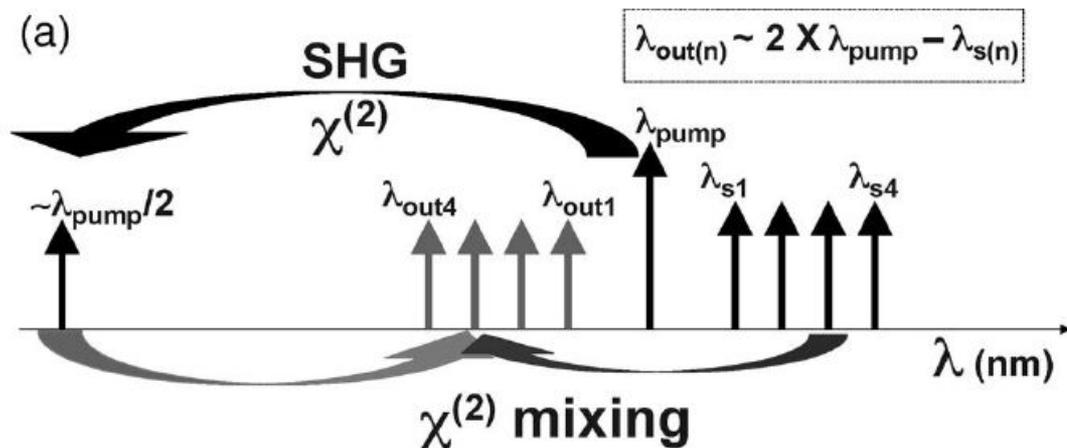
PPLN - PERIODICALLY-POLED LITHIUM NIOBATE



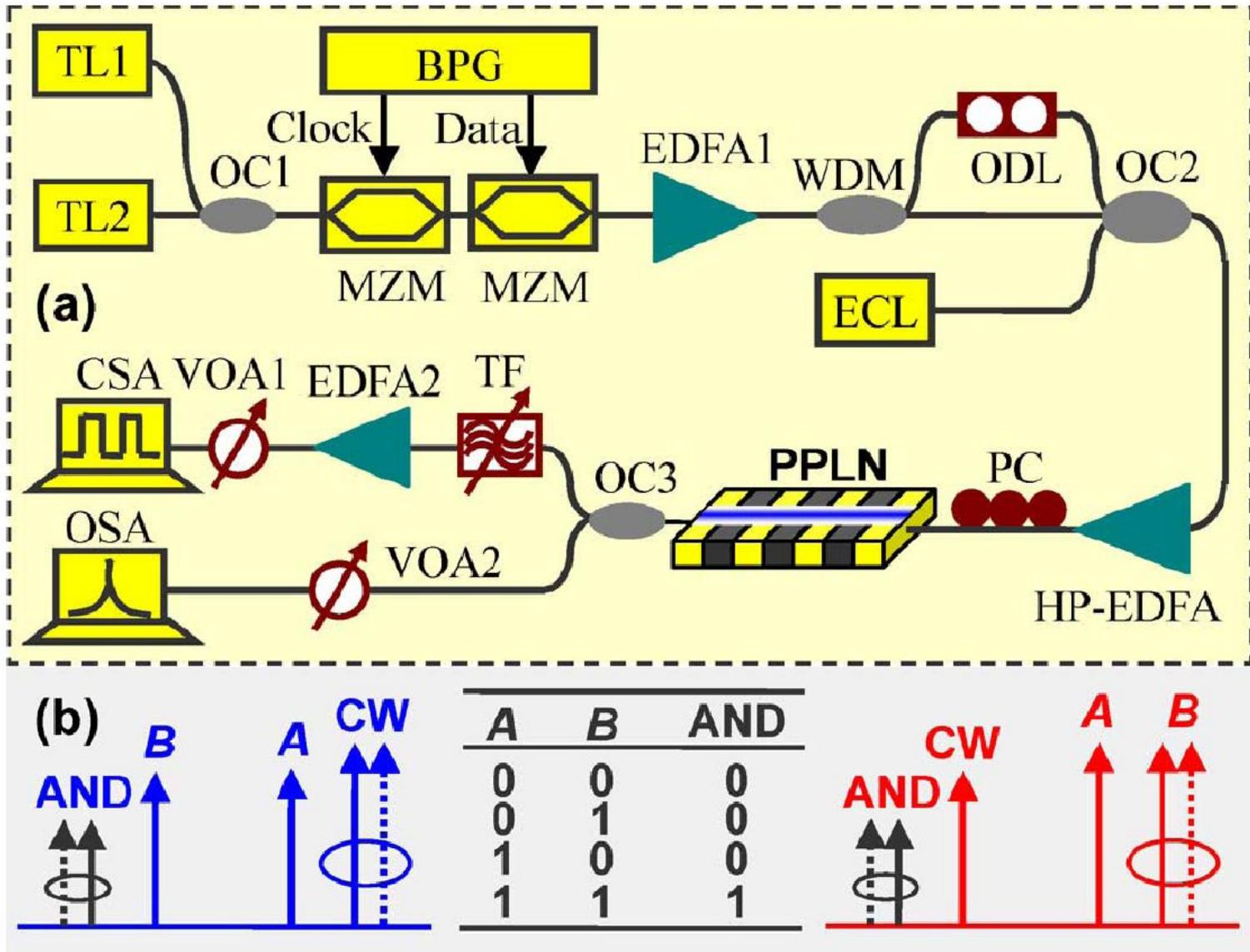
Процессы изготовления периодически-полевого ниобата лития

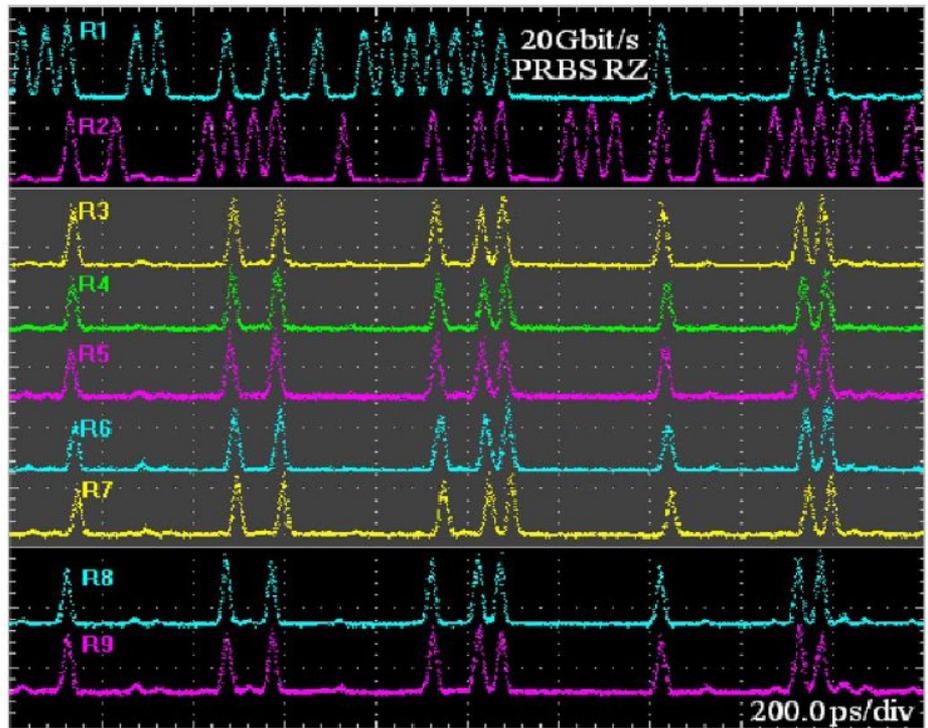
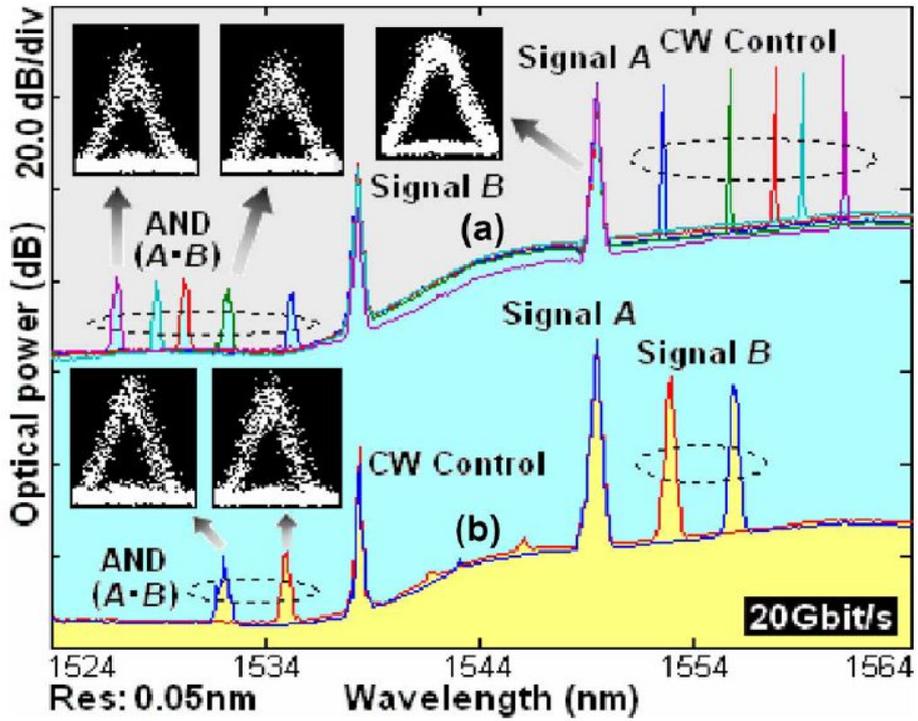


Управление с помощью накачки

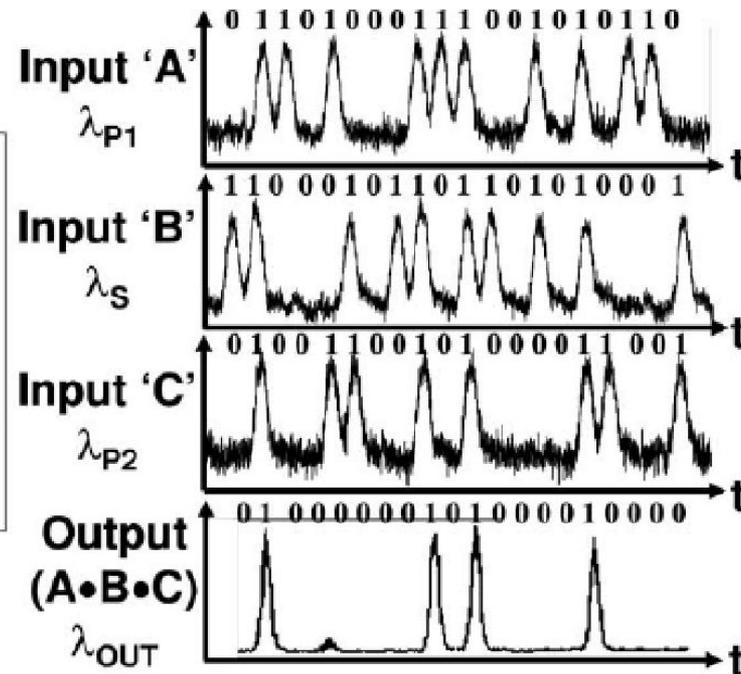
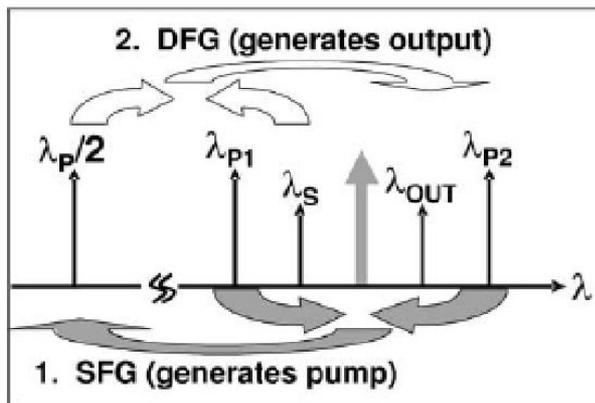


Реализация операции логического умножения



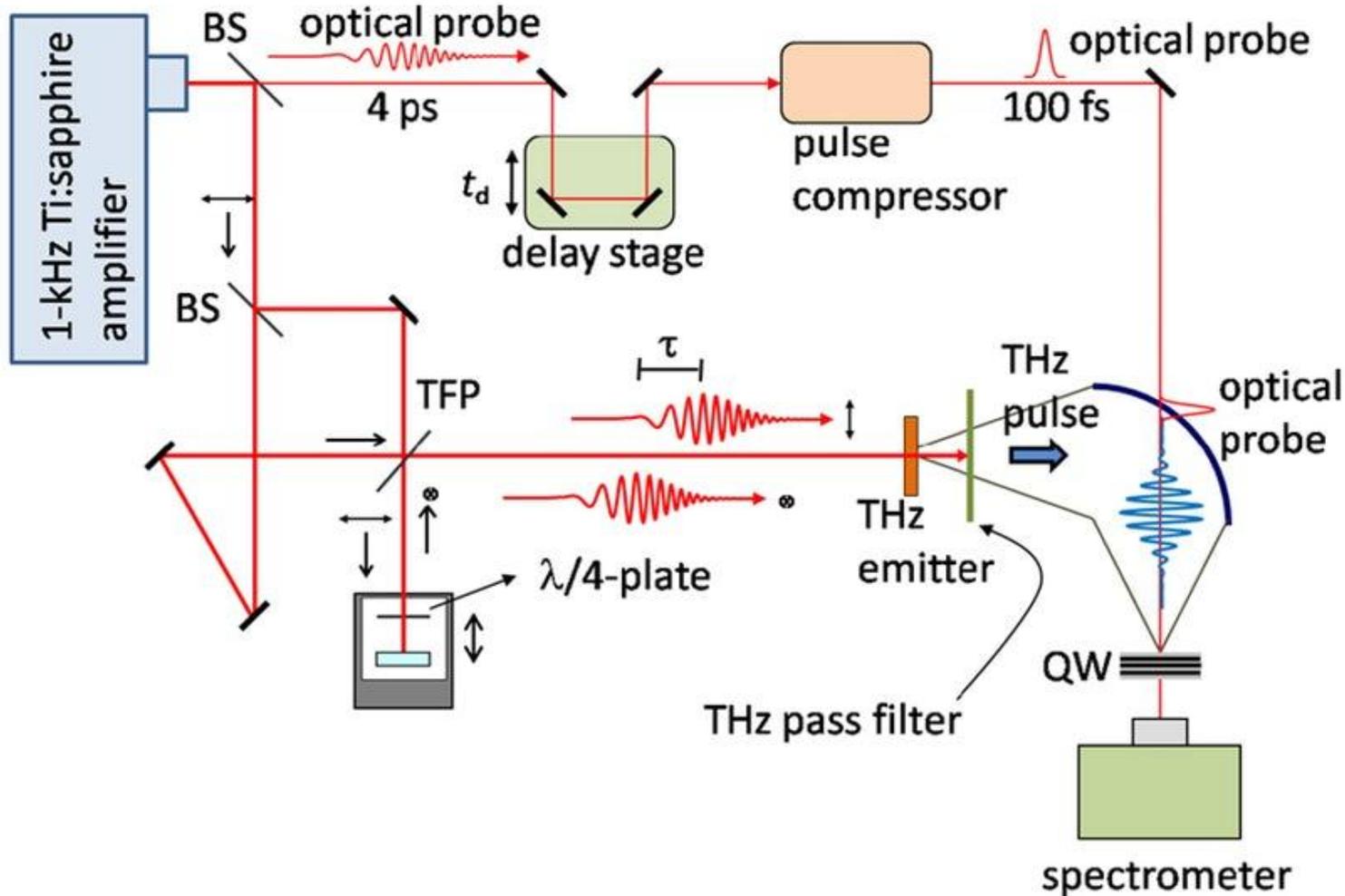


Реализация операции логического умножения



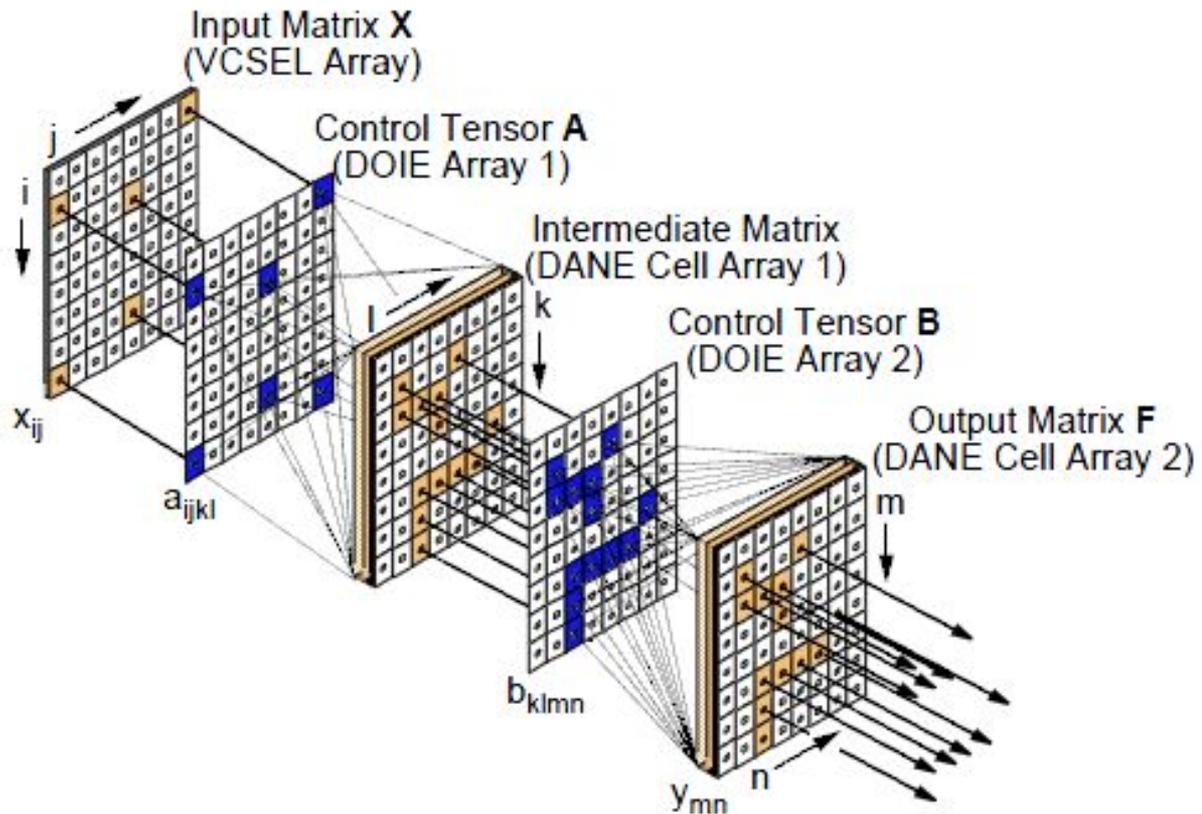
[Carsten Langrock, Saurabh Kumar, John E. McGeehan, Alan Willner, M. M. Fejer, "All optical signal processing using \$\chi^2\$ nonlinearities in guided-wave devices", *Journal of Lightwave Technology*, No. 7 Vol. 24 pp.2579-2592 \(July 2006\)](#)

Terahertz' speed signal processor an important step for optical computing



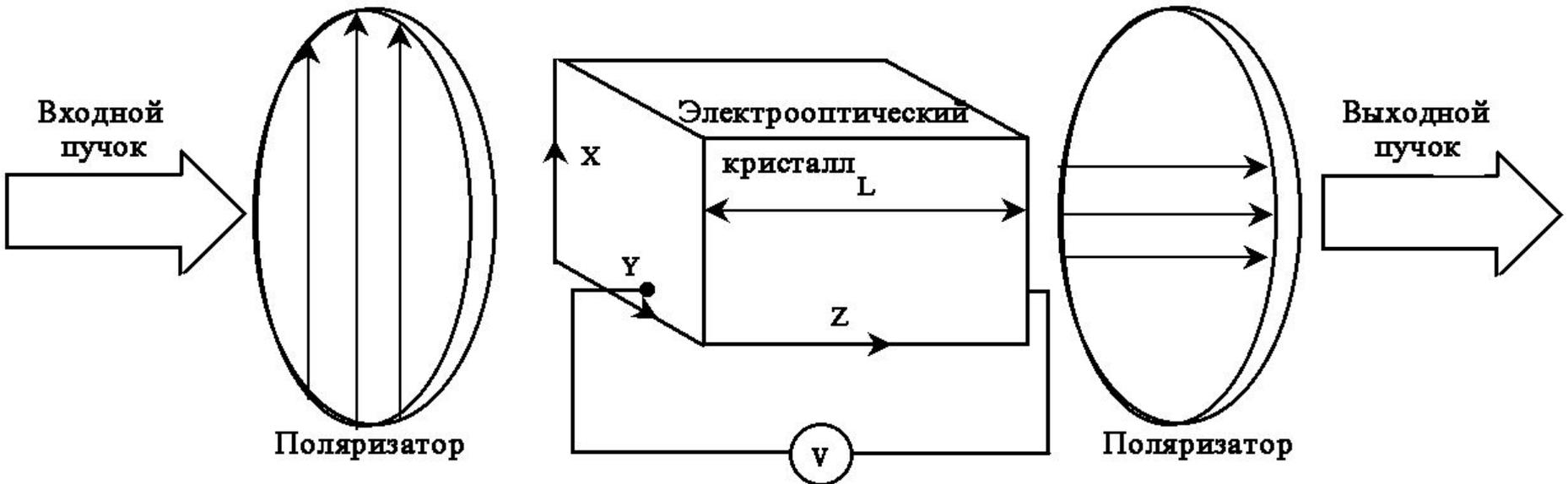
Лекция 6

Оптоэлектронные процессоры



Электрооптические модуляторы света

Ячейка Погкельса



$$\Delta n_X = -\frac{1}{2} r_{13} n_0^3 E_Z$$

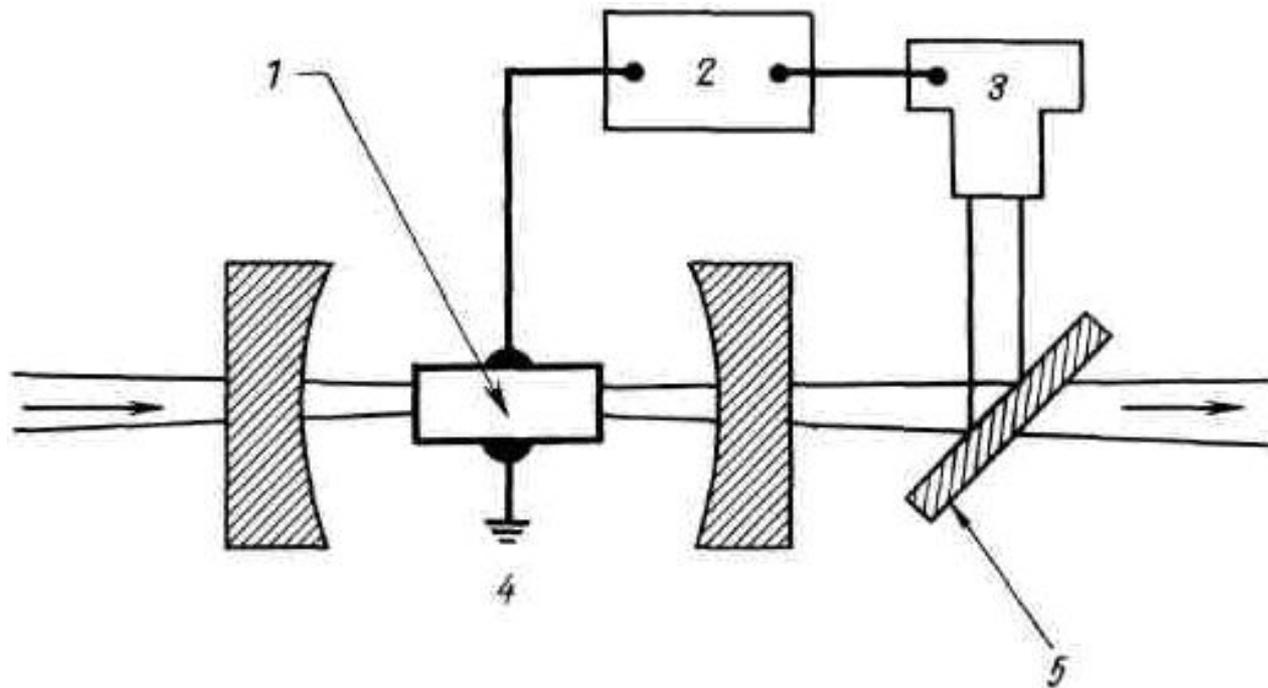
$$\delta\varphi = 2\pi (\Delta n_X - \Delta n_Y) \frac{L}{\lambda}$$

$$\Delta n_Y = -\frac{1}{2} r_{33} n_e^3 E_Z$$

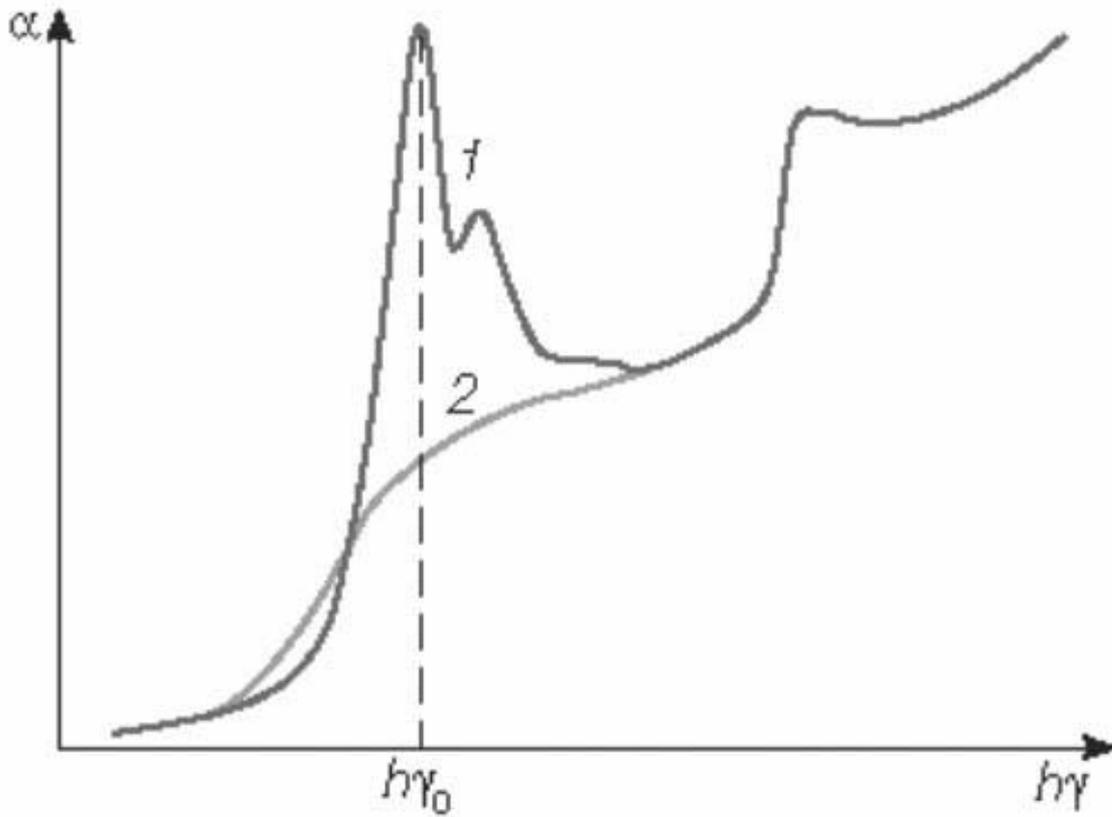
Минимальное время переключения ~ 1 пс

$$r_{13} n^3 \sim 10^{-8} \text{ см/В}$$

Схема гибридного оптоэлектронного бистабильного устройства на основе резонатора Фабри – Перо (П. Смит Е. Тернер 1977 г.)

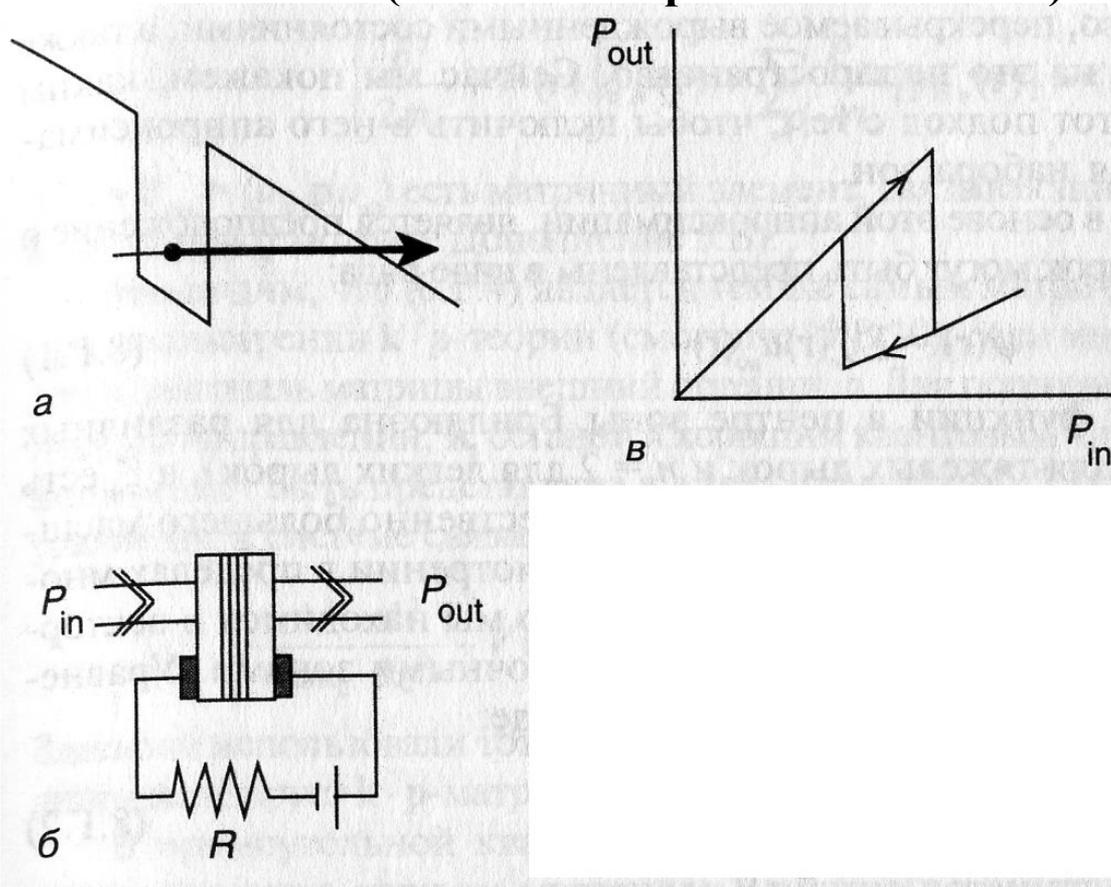


На вход посылается излучение одночастотного He - Ne-лазера на длине волны 632,8 нм, конфокальный резонатор длиной 10 см содержит электрооптический модулятор на основе KDP с полуволновым напряжением 1200 В, пропускание зеркал резонатора 20%. Добротность всей системы ~ 7 . 1 — Электрооптический кристалл; 2 - усилитель; 3 - детектор; 4 - резонатор Фабри - Перо; 5 - светодели-тельная пластинка.



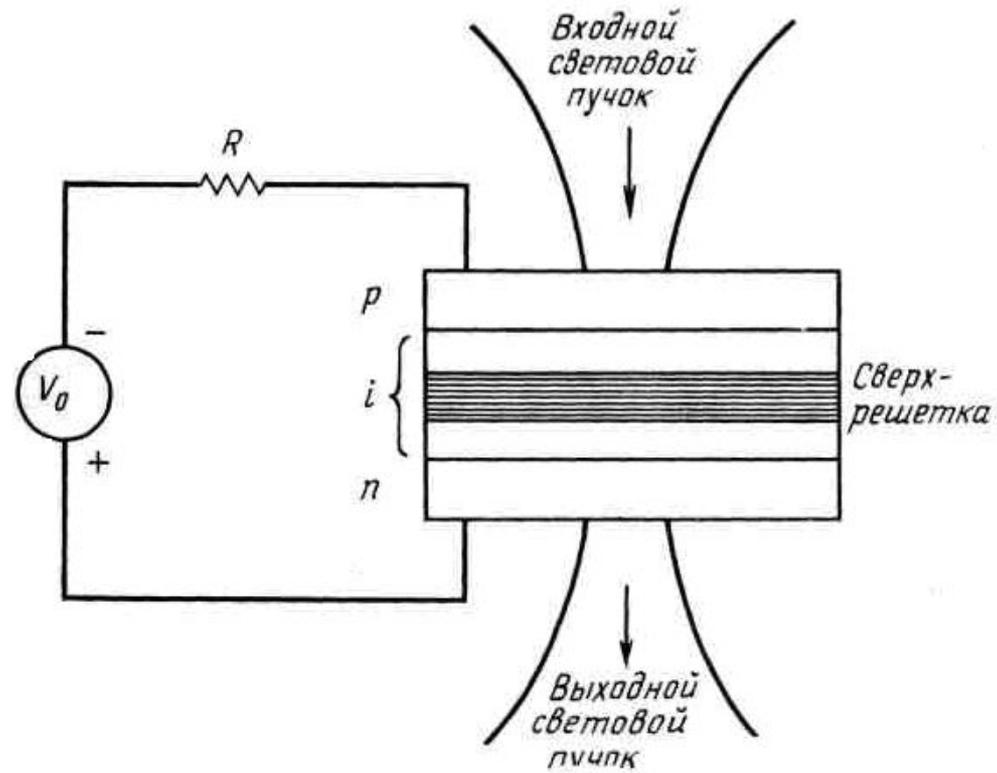
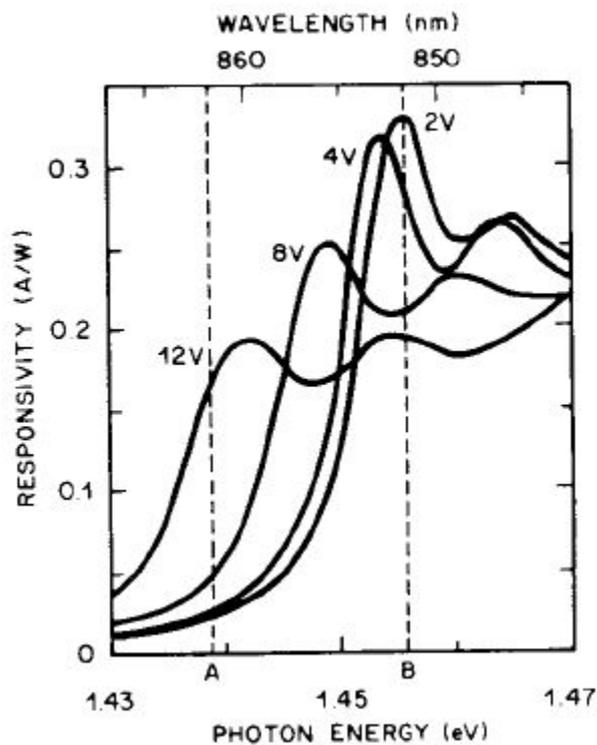
Спектр поглощения полупроводниковой структуры с квантовыми ямами при отсутствии возбуждения (1) и при возбуждении экситонов и носителей заряда большой плотности. $h\nu_0$ – энергия экситонного перехода.

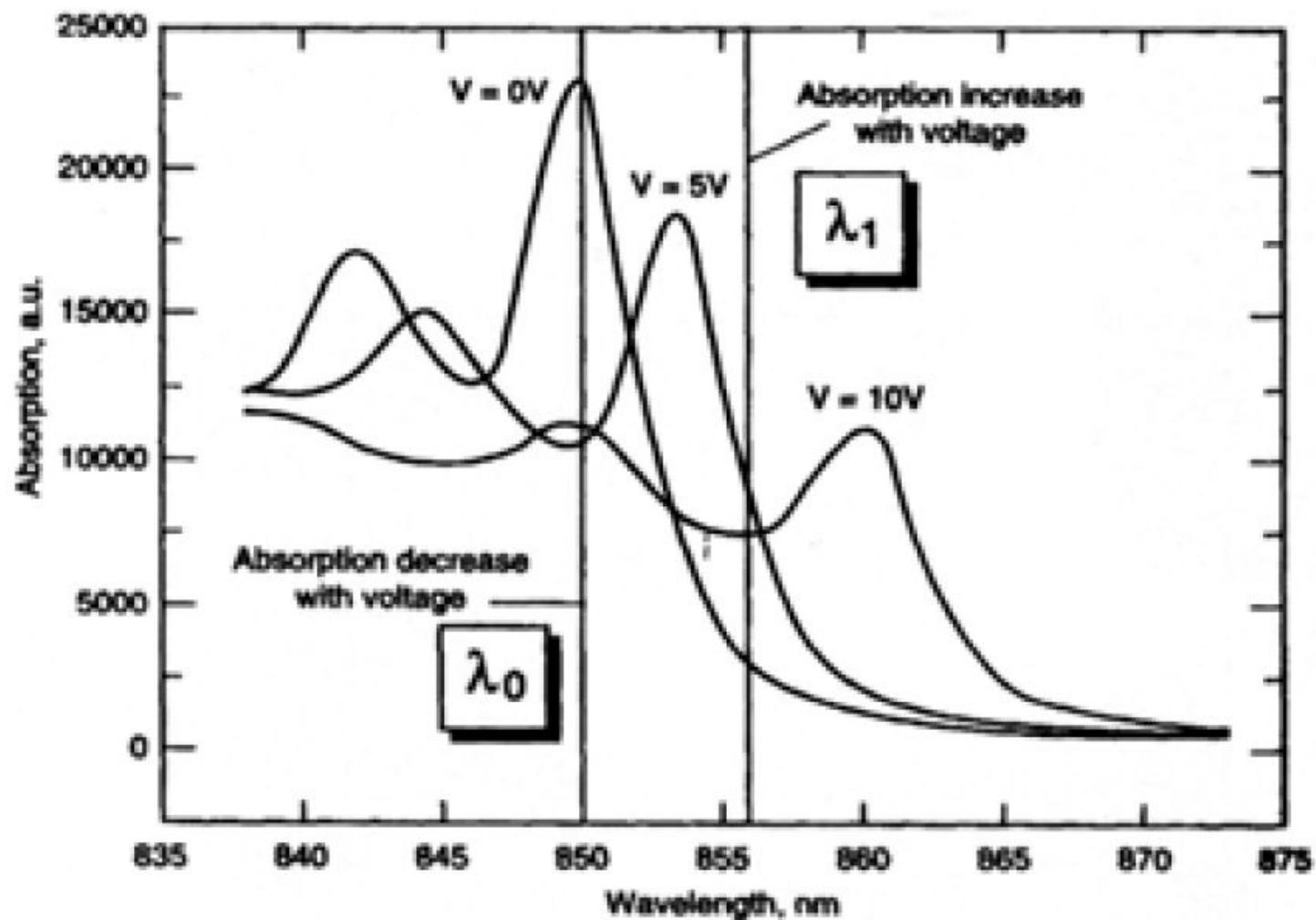
Принцип действия гибридного автоэлектрооптического элемента SEED (self-electro-optical-effect device)



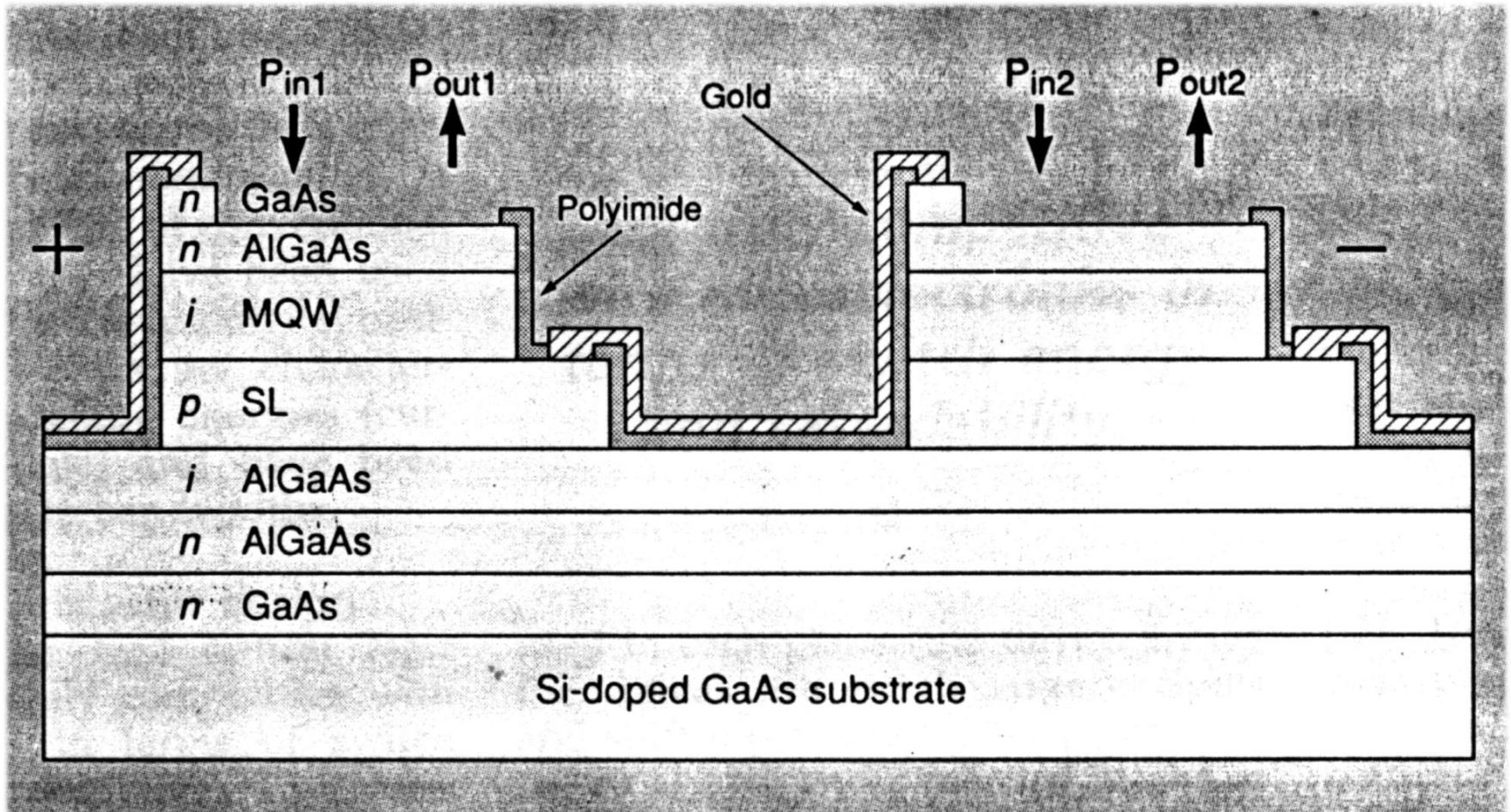
Под влиянием электрического поля носители освобождаются из квантовой ямы, например, за счет туннелирования (а). Структура, содержащая квантовые ямы, электрически смещается цепью с последовательным сопротивлением R (б). Реакция структуры на действие электрической цепи заключается в резком уменьшении выходного сигнала, когда мощность входного излучения превышает определенное пороговое значение (в).

Принцип действия гибридного автоэлектрооптического элемента SEED (self-electro-optical-effect device)

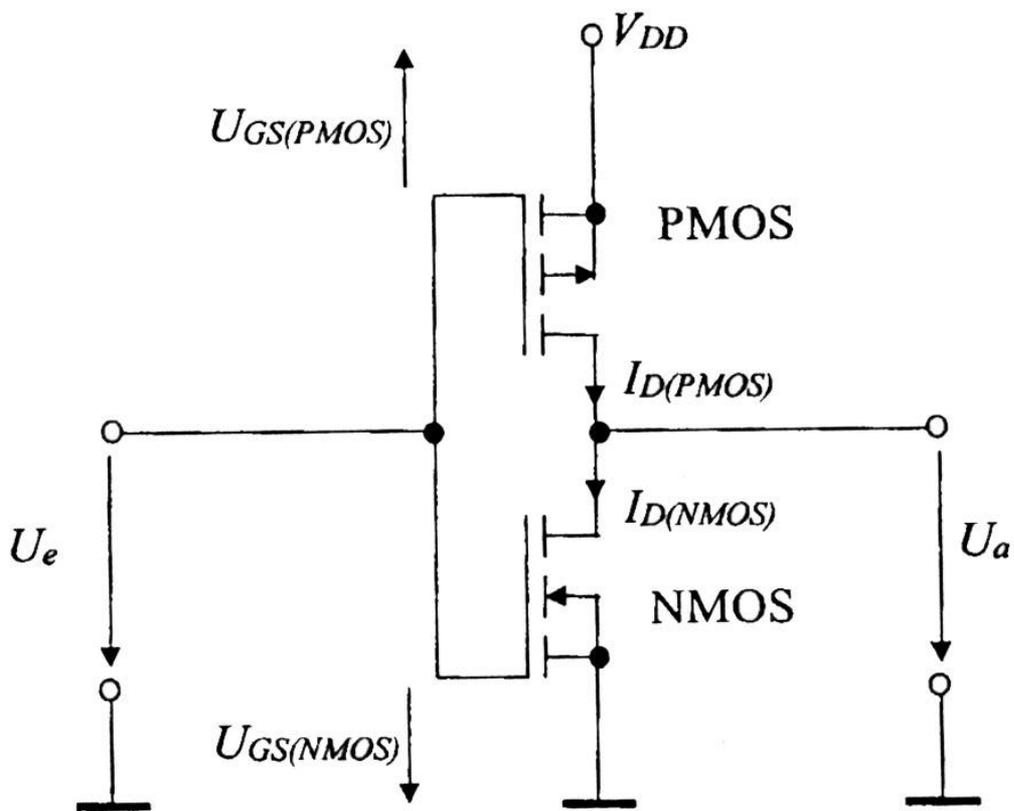




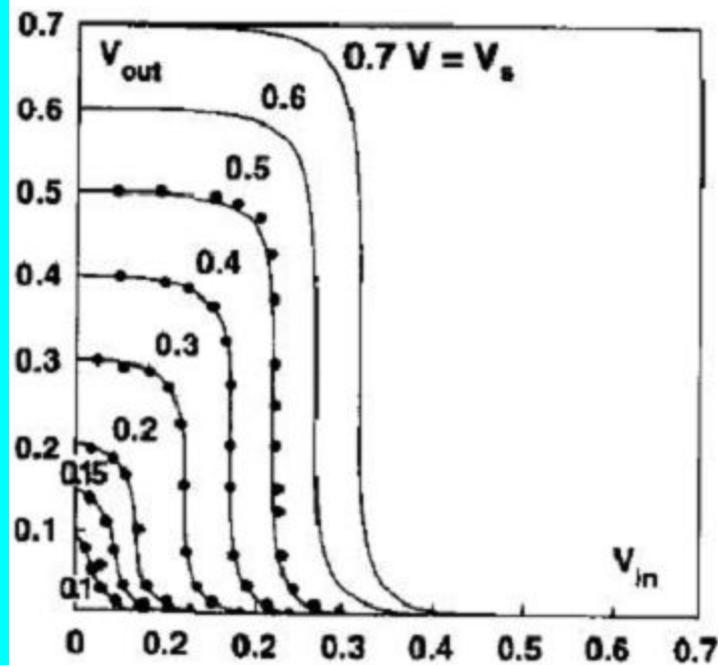
Цифровые оптические процессоры
Оптический инвертор (1986 г.)
Symmetrical self-electro-optical-effect device (S-SEED)



Структурная схема и передаточная характеристика КМОП инвертора



Выходное напряжение (В)



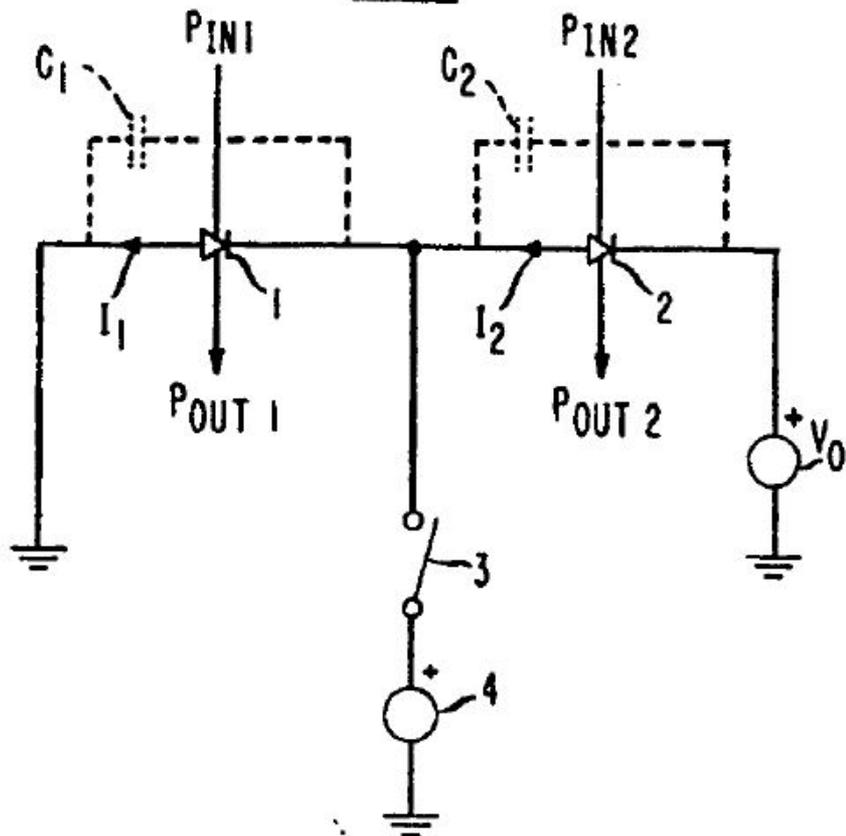
Входное напряжение (В)

Method and apparatus for increasing the processing capacity of optical digital processing systems having optically bistable devices.

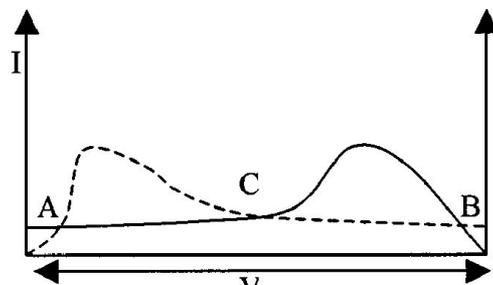
EUROPEAN PATENT APPLICATION

FIG. 1

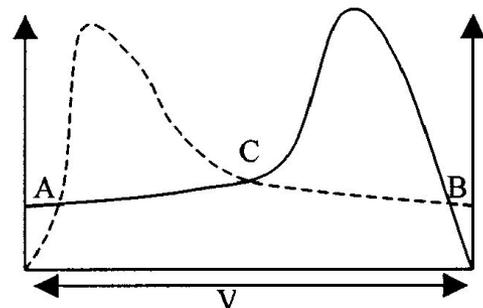
S-SEED



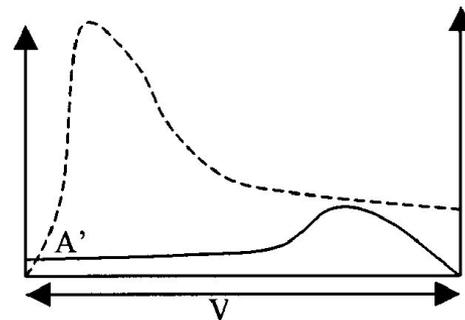
Вольт-амперная хар-ка



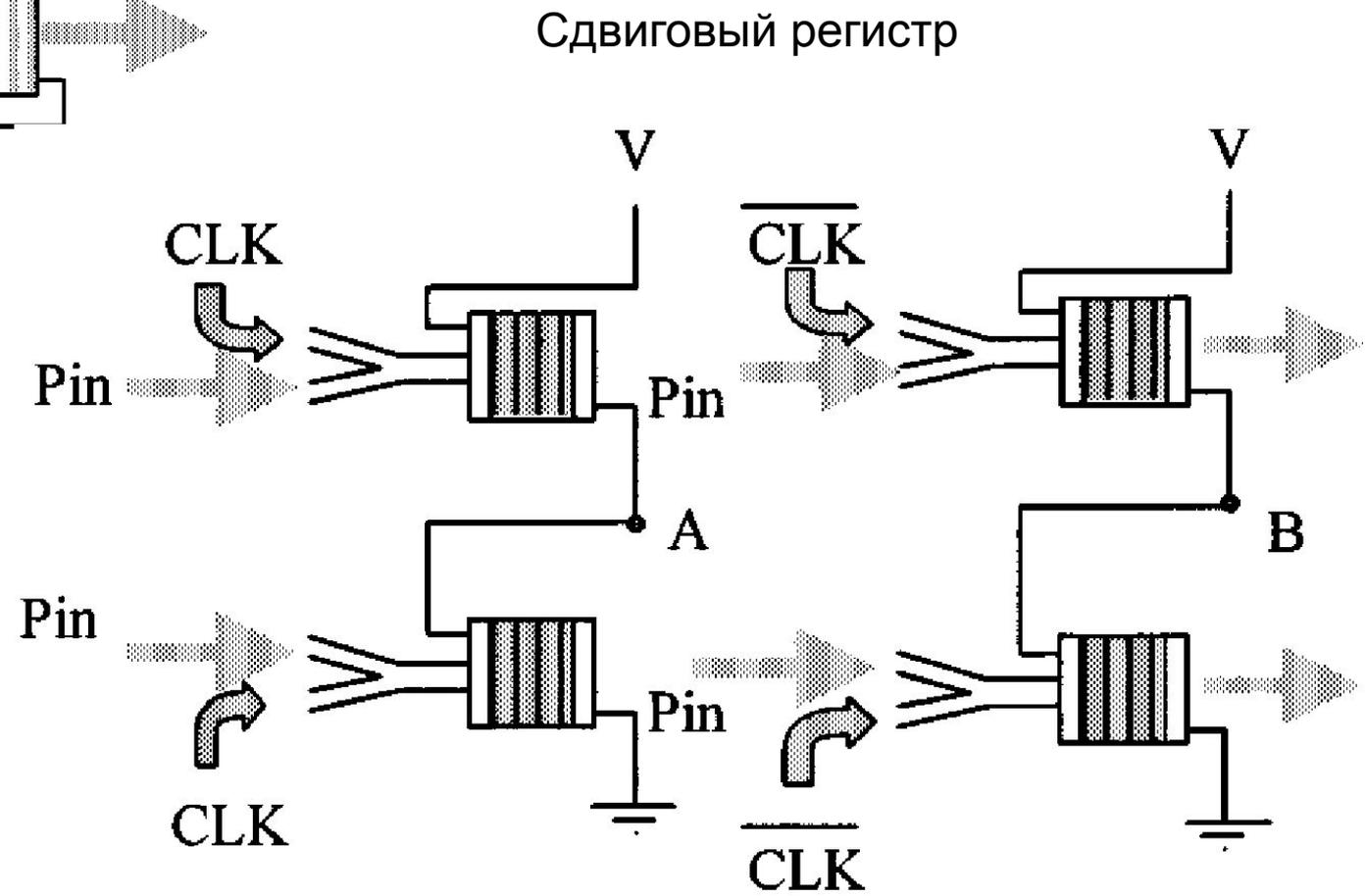
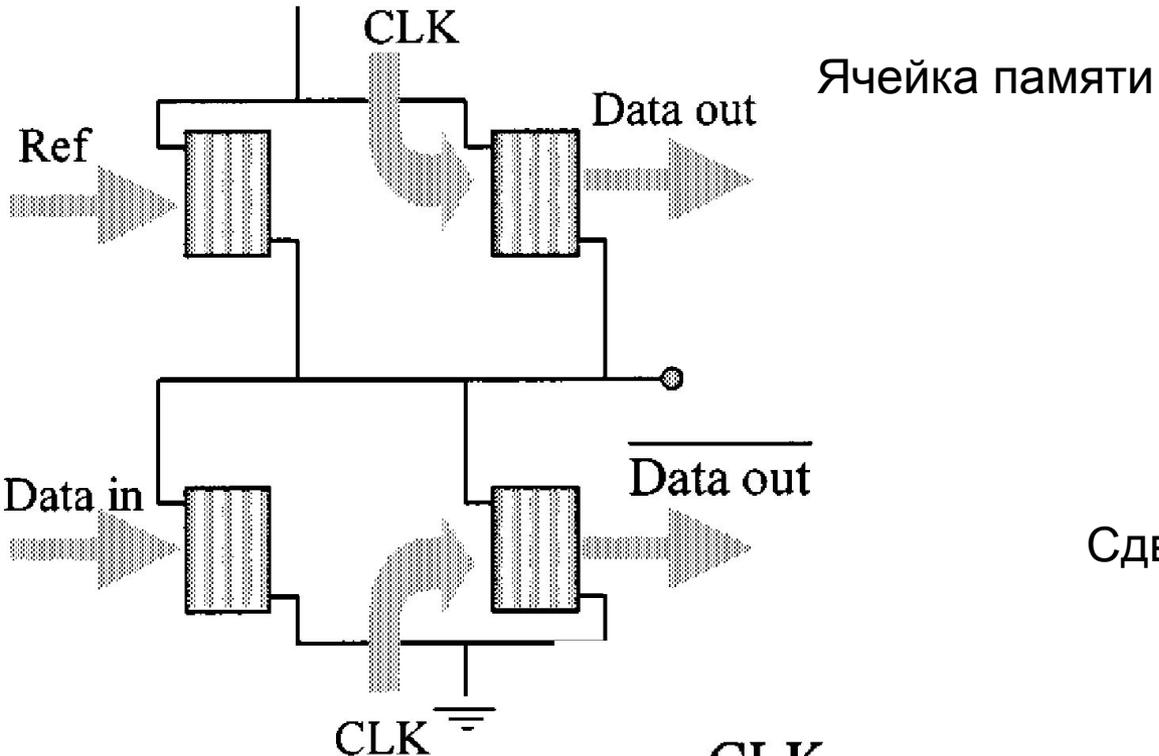
(a)

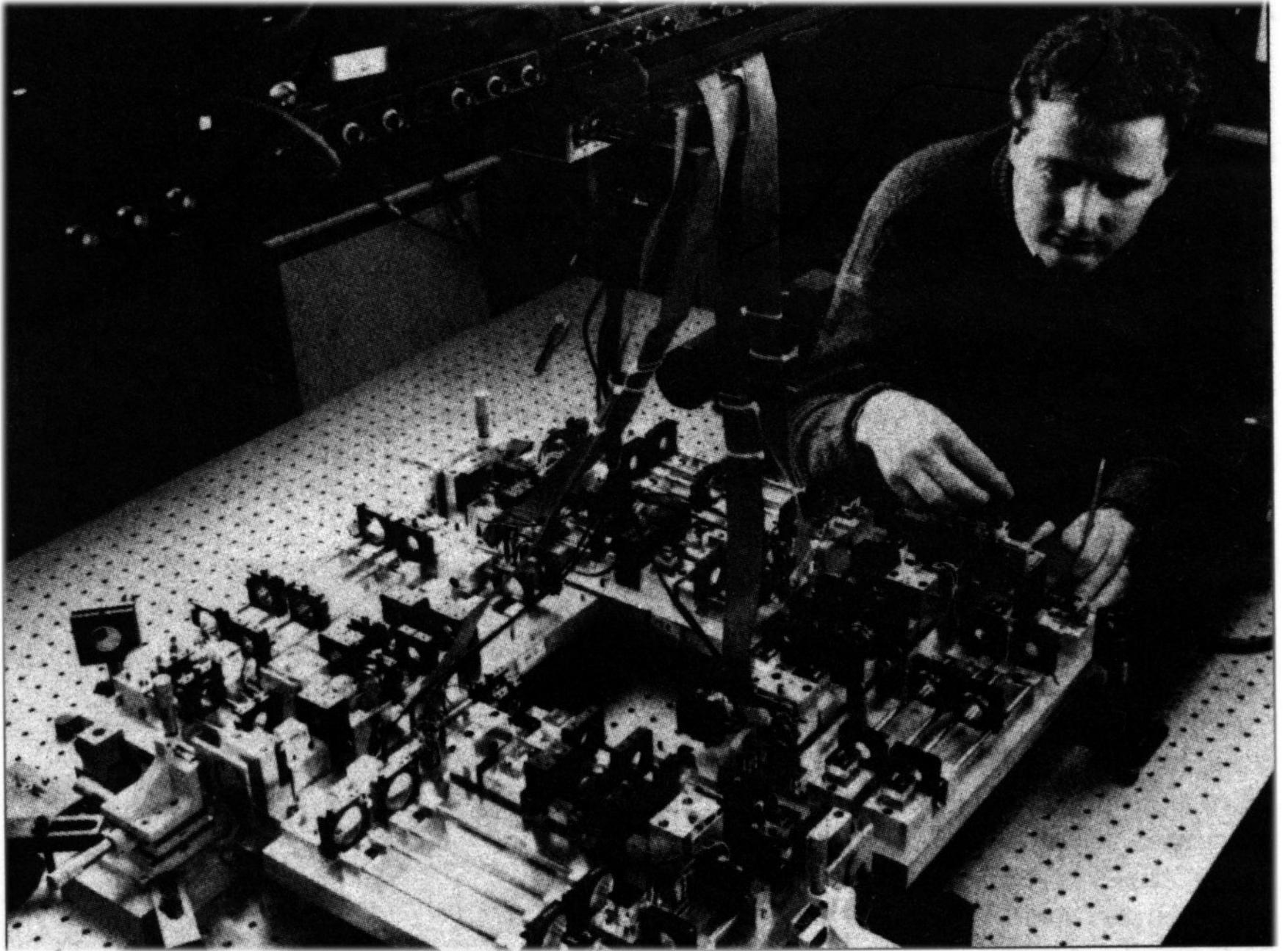


(b)

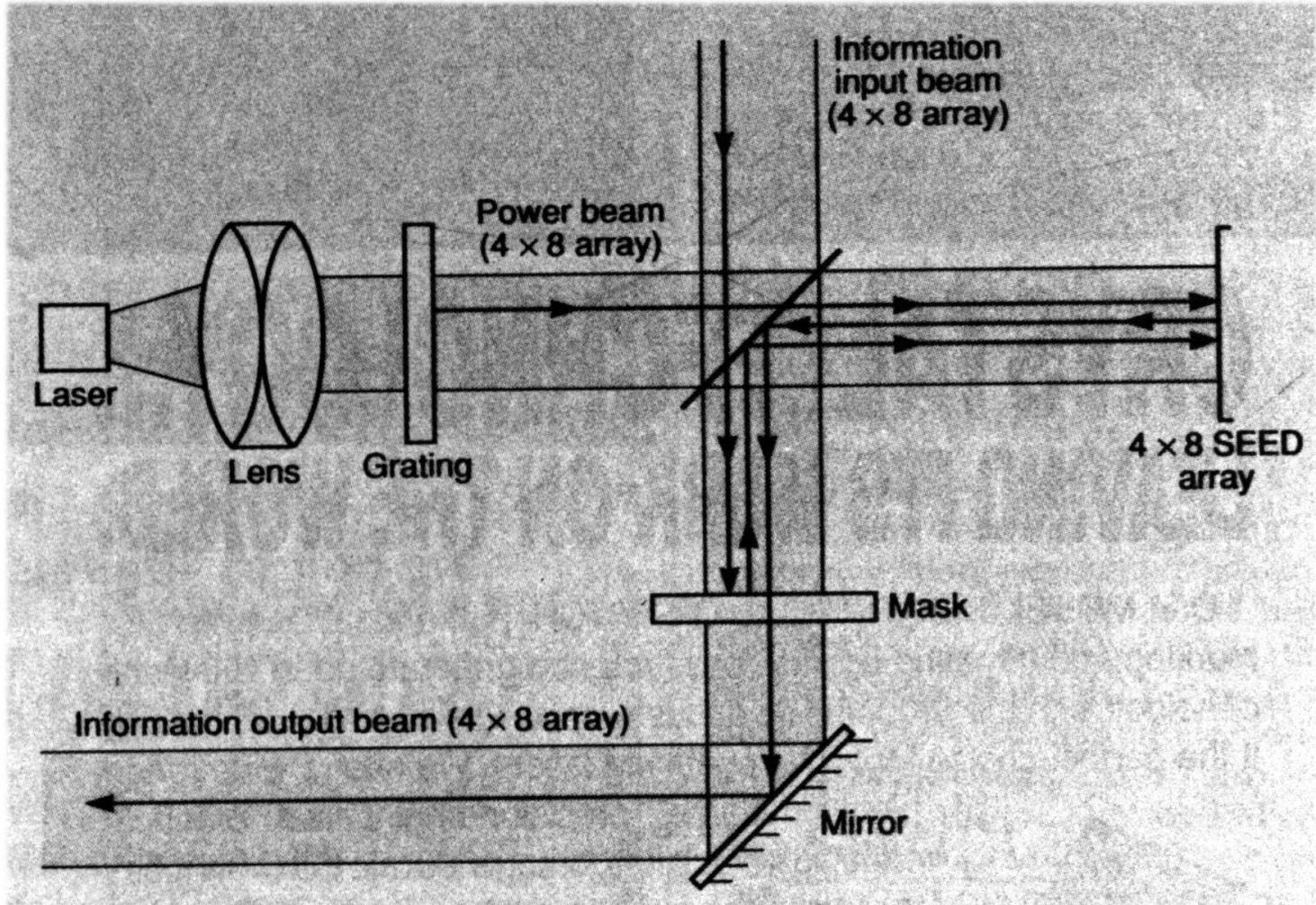


(c)





Один каскад оптического цифрового процессора



Параметры первого оптического процессора

Разрядность – 32 бита (массив 4x8)

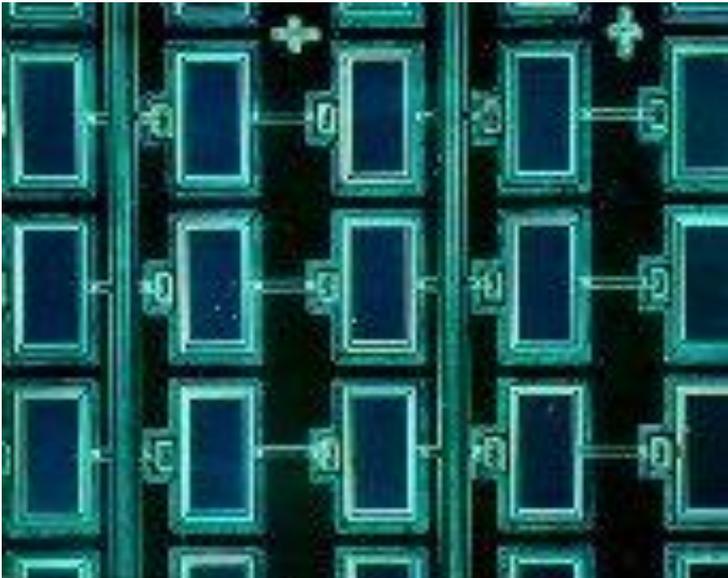
Логика - бинарная

Тактовая частота – 1,1 МГц

Число переключений в секунду – 40 Мб/с.

Энергия на одно переключение – 20 фДж

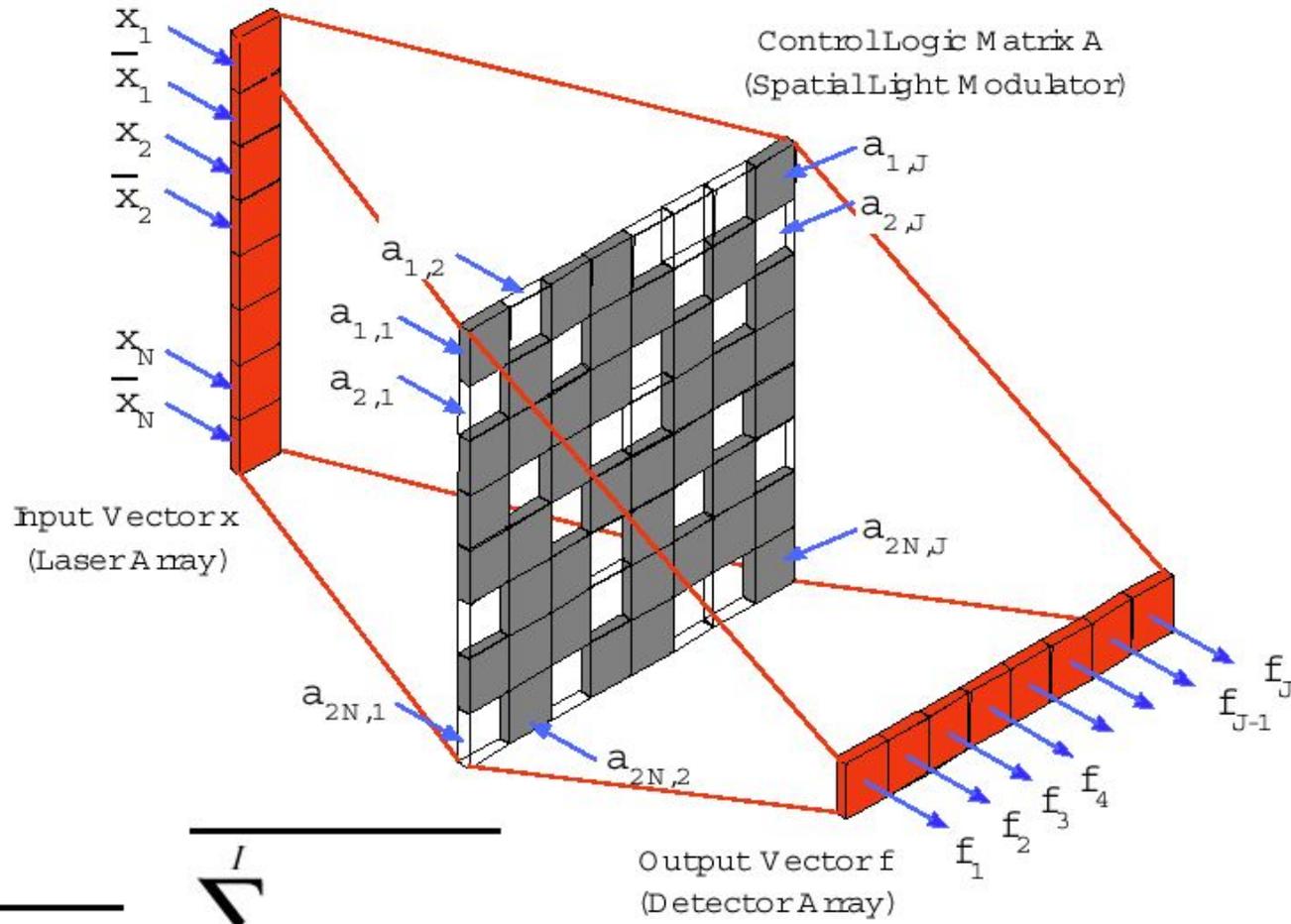
Photograph of 16X8 S-SEED array



Microscopic view of 2kbit S-SEED array



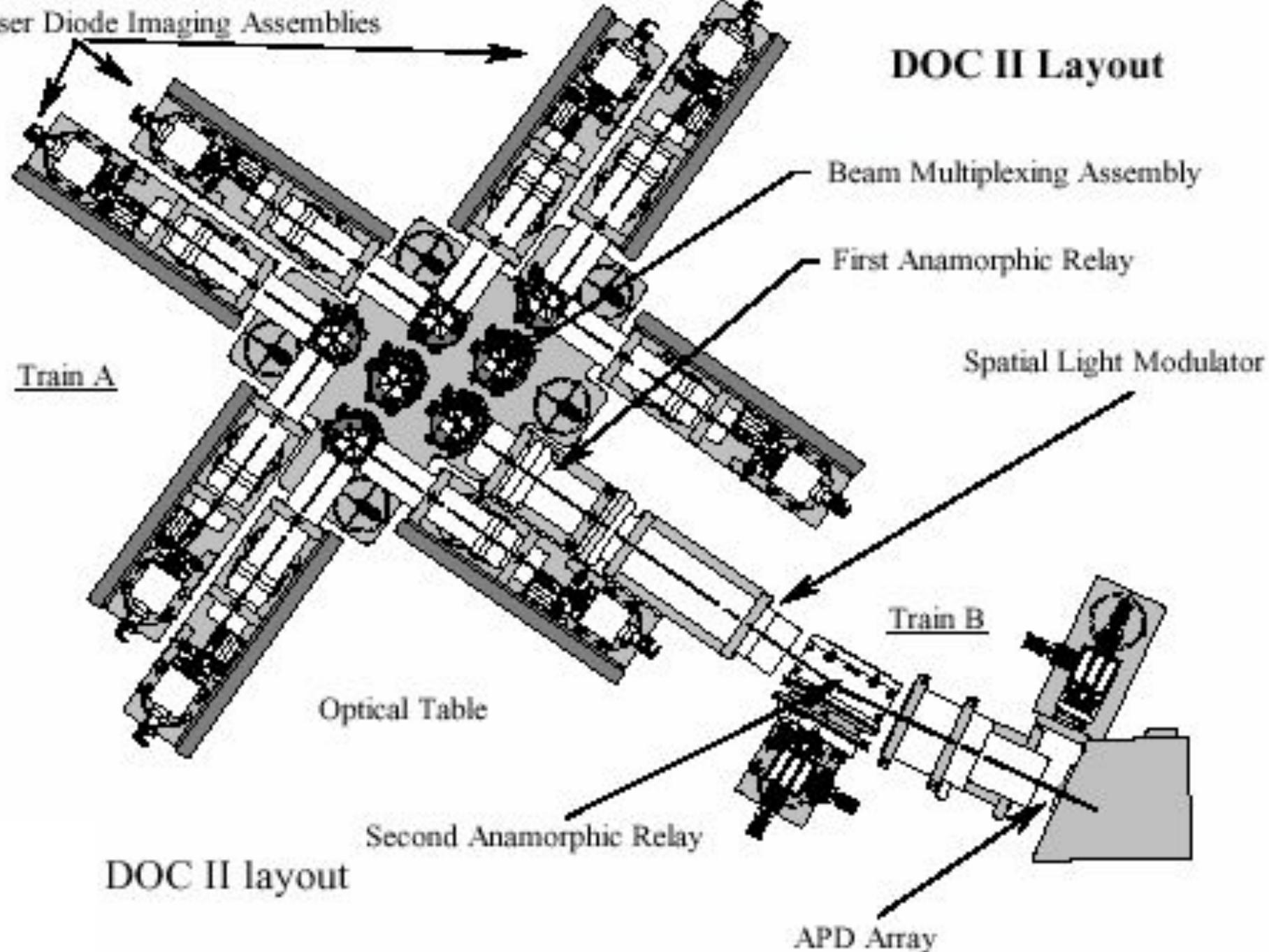
Оптическая реализация булевого умножения вектора на матрицу



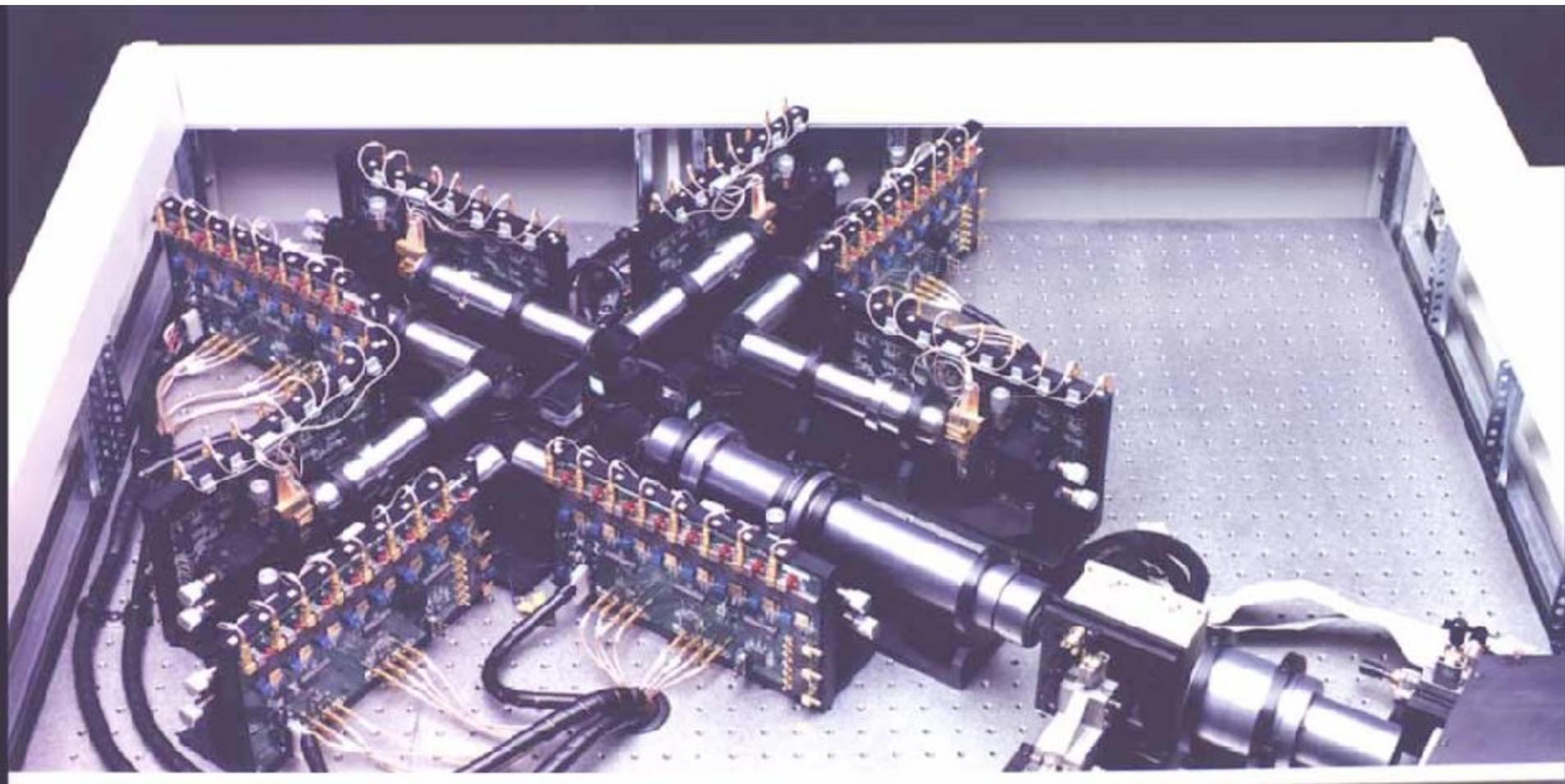
$$f_j = \prod_{i=1}^{2N} \overline{a_{ij} x_i} = \sum_{i=1}^I \overline{a_{ij} x_i} .$$

Laser Diode Imaging Assemblies

DOC II Layout



Внешний вид оптического процессора ДОС II



Размер 48 x 36 см

Параметры DDC II

Разрядность – 64 бита (массив 1x64)

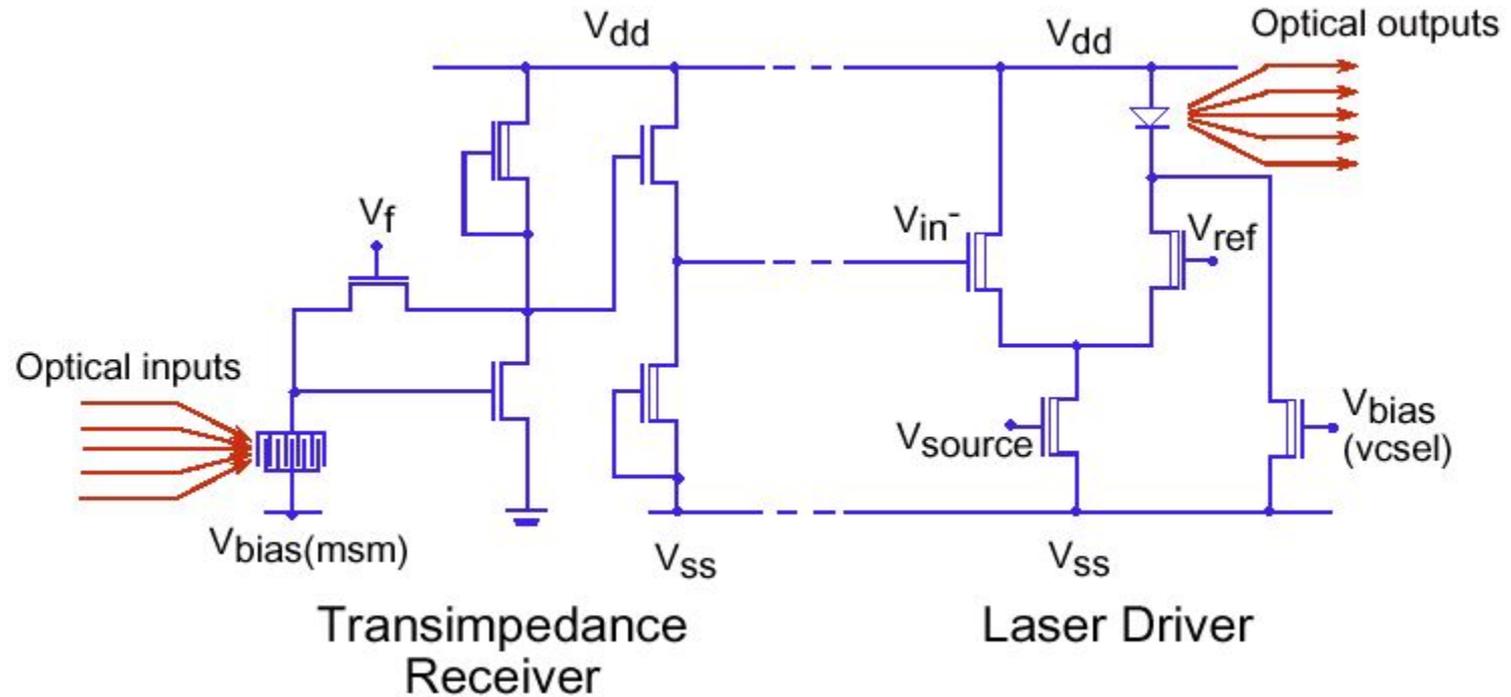
Логика - бинарная, булевская матрично-векторная

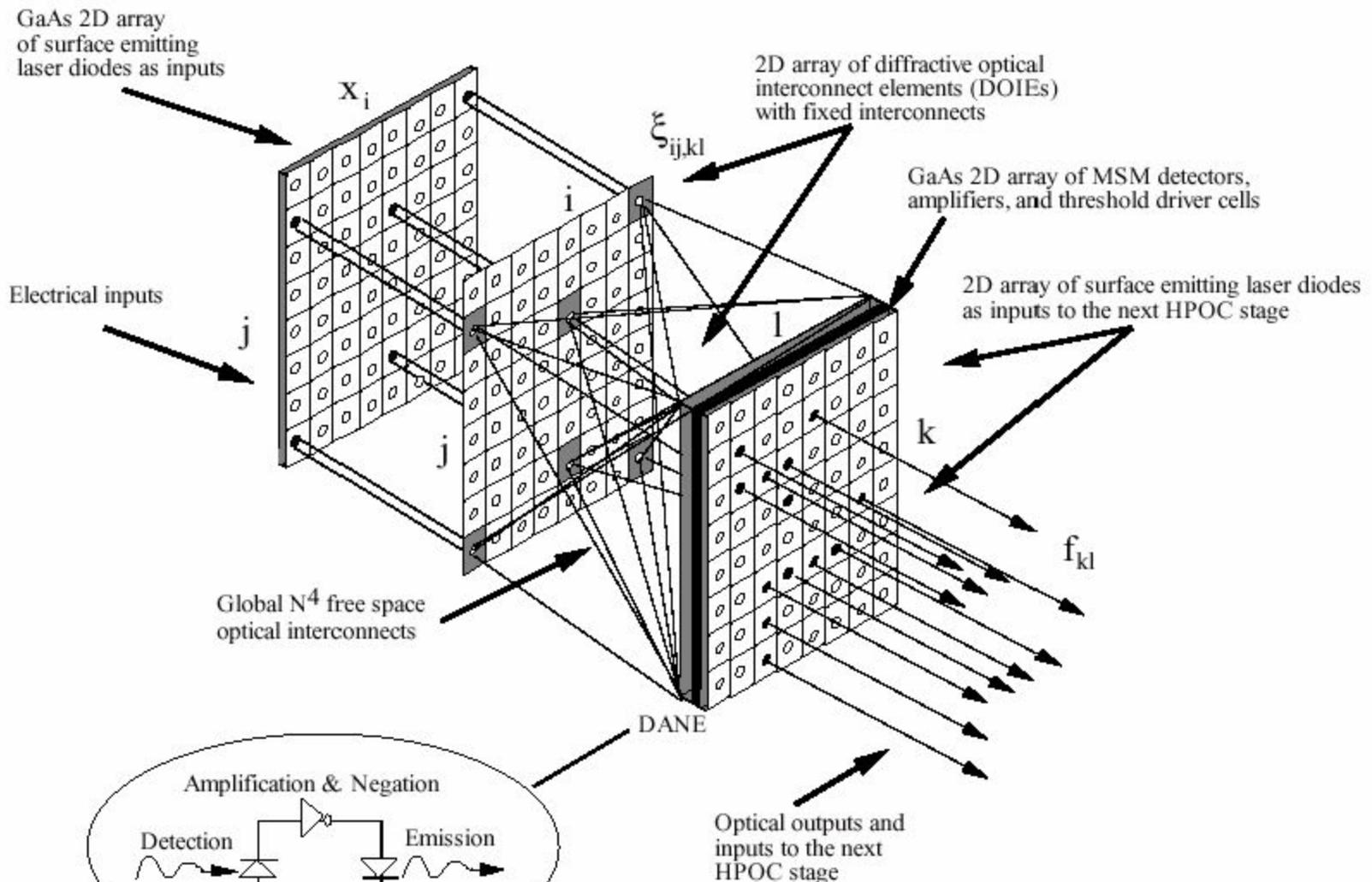
Тактовая частота – 100 МГц

Число переключений в секунду – 12,8 Гб/с.

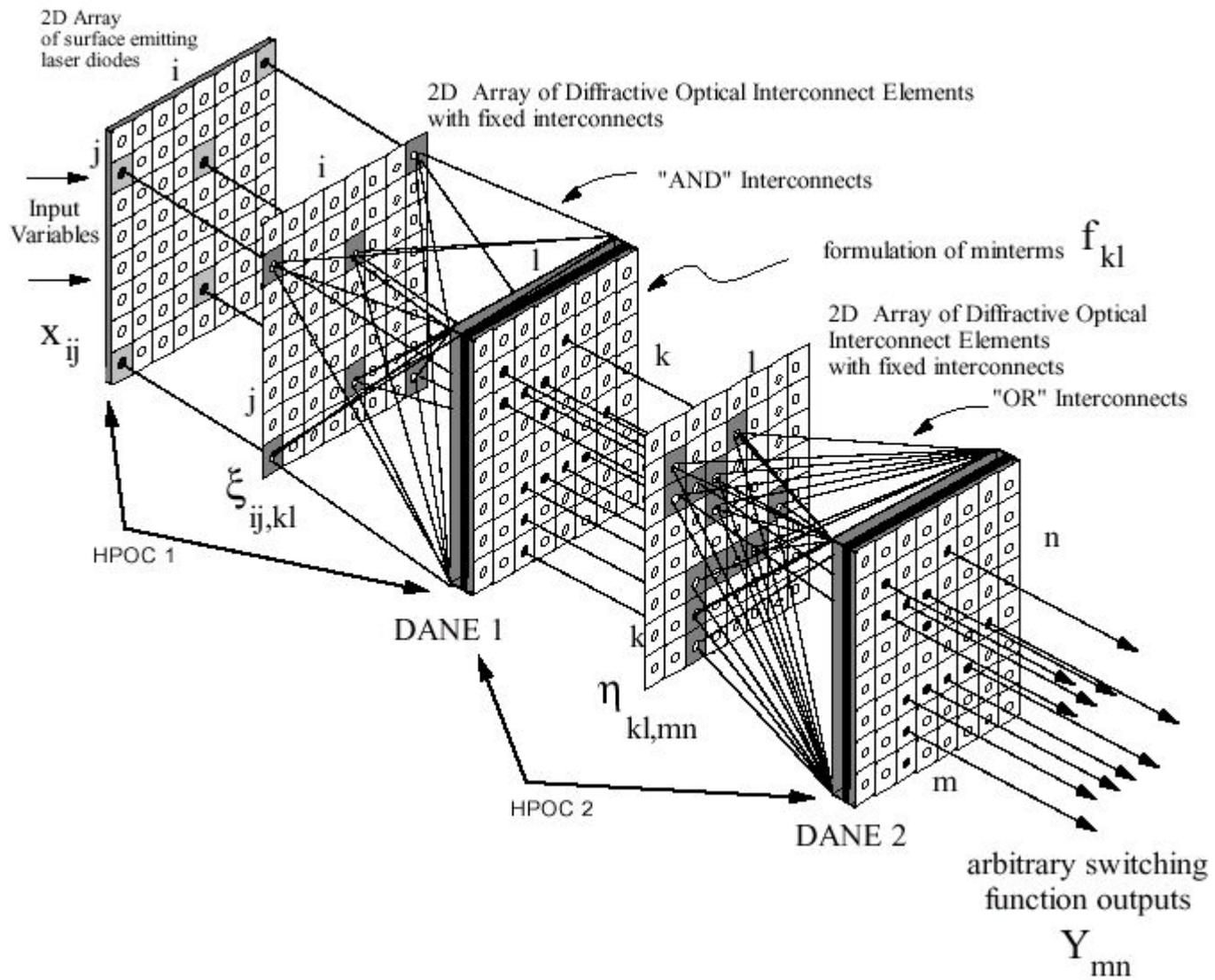
Энергия на одно переключение – 4 фДж

Оптоэлектронное устройство NOR

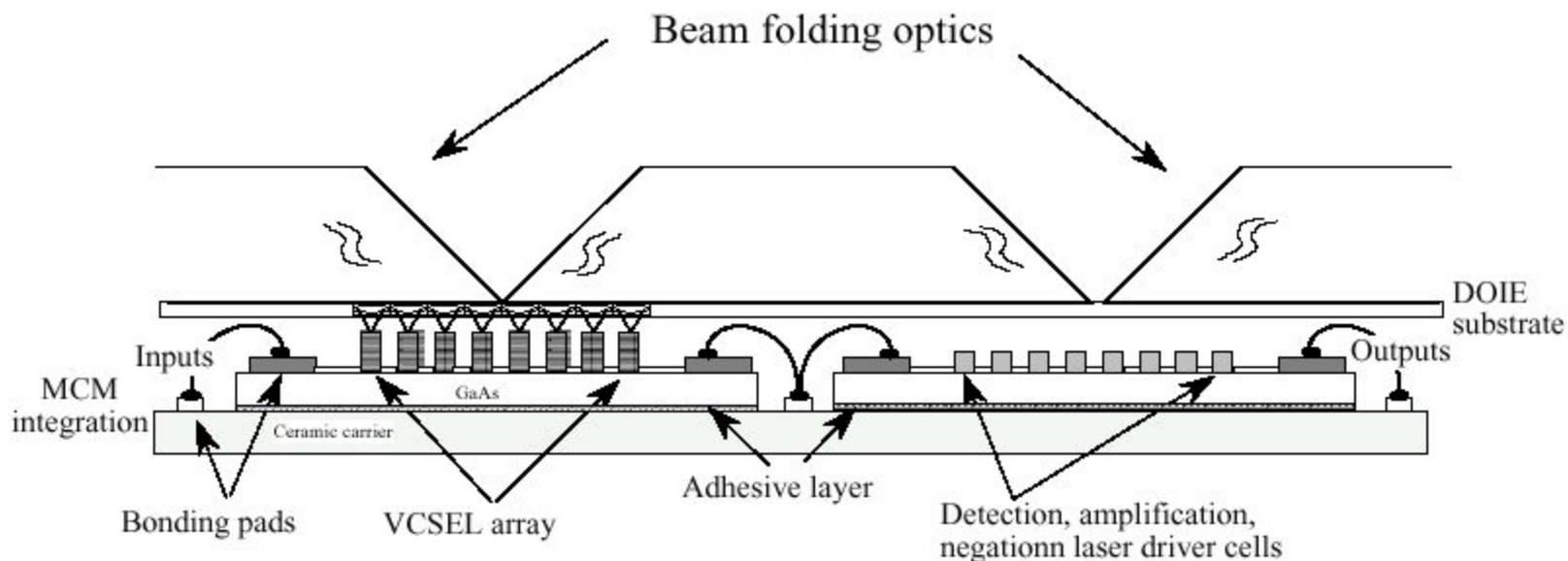




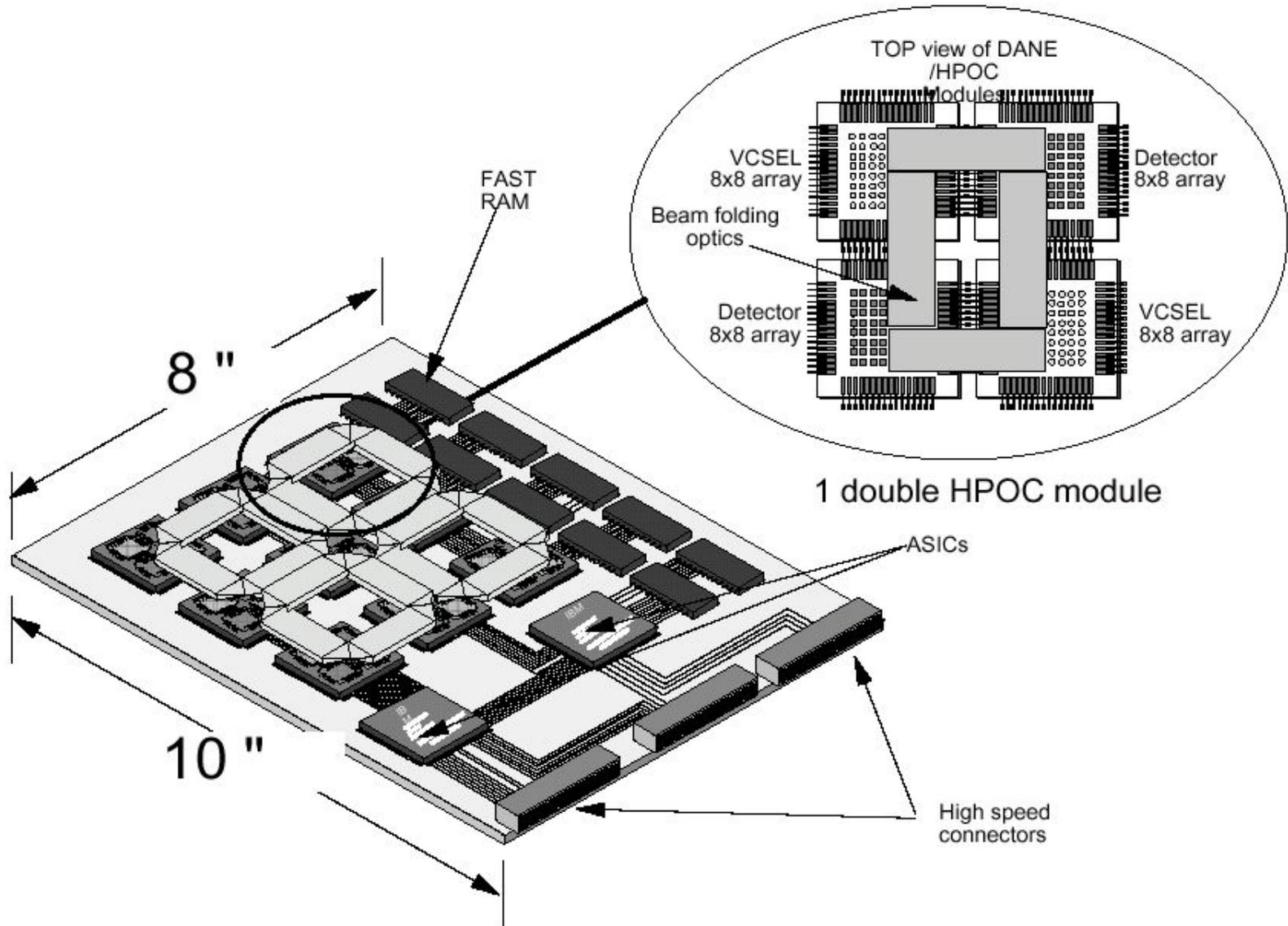
Single stage HPOC module.



Поперечный разрез модуля высокопроизводительного оптоэлектронного компьютера (НРОС)



Внешний вид многокаскадного НРОС



Параметры НРОС

Разрядность – 64 бита (массив 8x8)

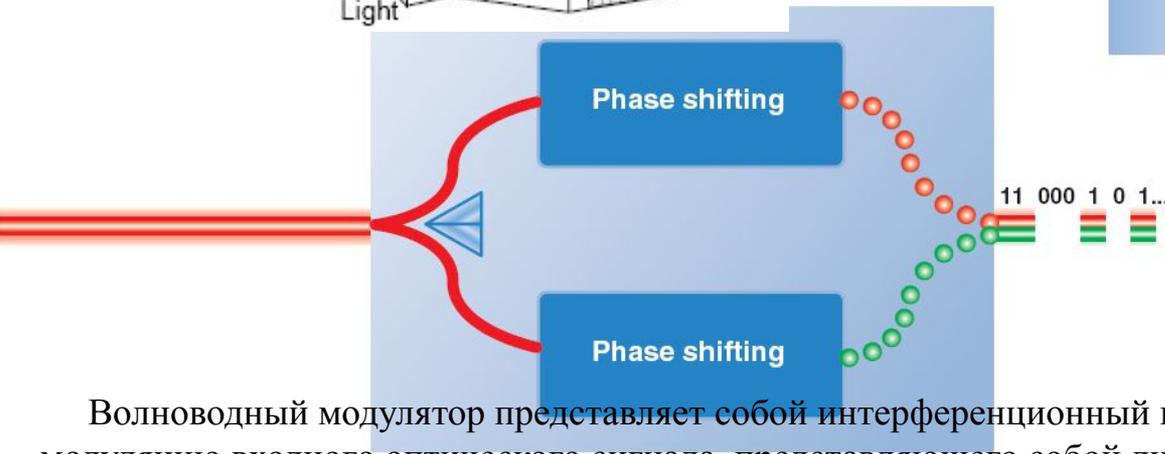
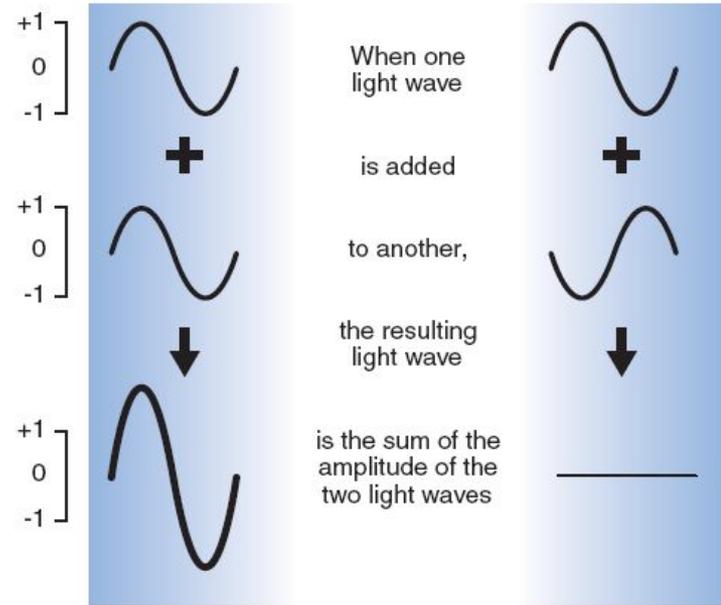
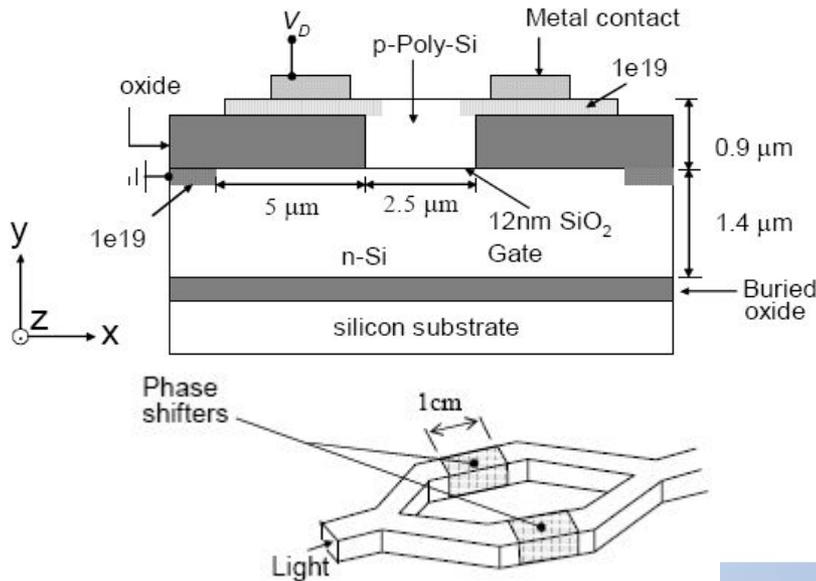
Логика - бинарная, булевская тензорно-матричная

Тактовая частота – 1,2 ГГц

Число переключений в секунду – 100 Тб/с.

Энергия на одно переключение – 2,4 фДж

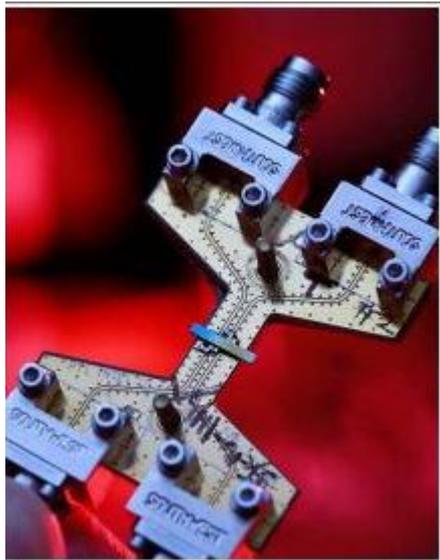
Принцип волноводных электрооптических логических элементов на основе интерферометра Маха-Цандера



Волноводный модулятор представляет собой интерференционный прибор, осуществляющий амплитудную модуляцию входного оптического сигнала, представляющего собой линейно поляризованное световое излучение лазера. Входной волновод модулятора разветвляется на два параллельных канала, которые затем снова сливаются, образуя выходной волновод. Волновод изготавливается из материала, обладающего электрооптическим эффектом. Обе ветви волновода симметричны, поэтому входной световой сигнал на разветвлении делится на две равные по амплитуде волны, которые далее распространяются по параллельным каналам с относительным сдвигом фаз.

silicon photonics

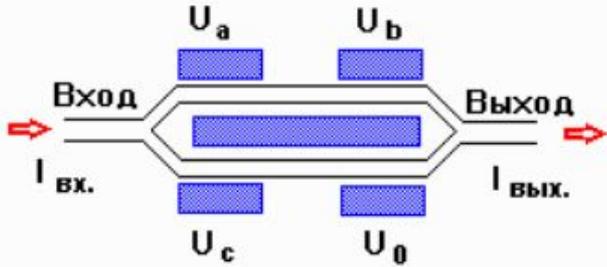
40 Гб/с модулятор



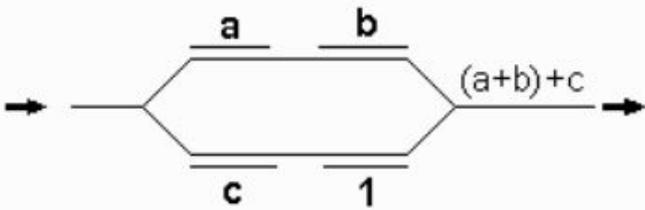
200 Гб/с модулятор



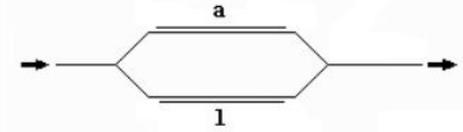
Волноводный модулятор:



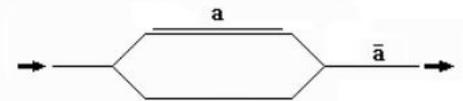
условное обозначение:



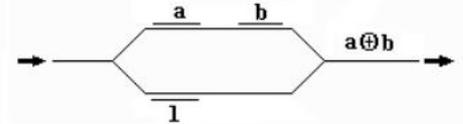
повторитель :



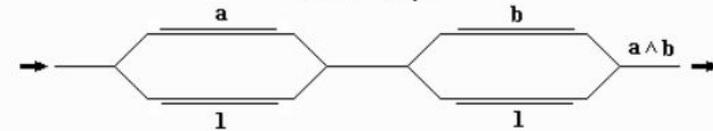
инвертор :



сложение по модулю два :



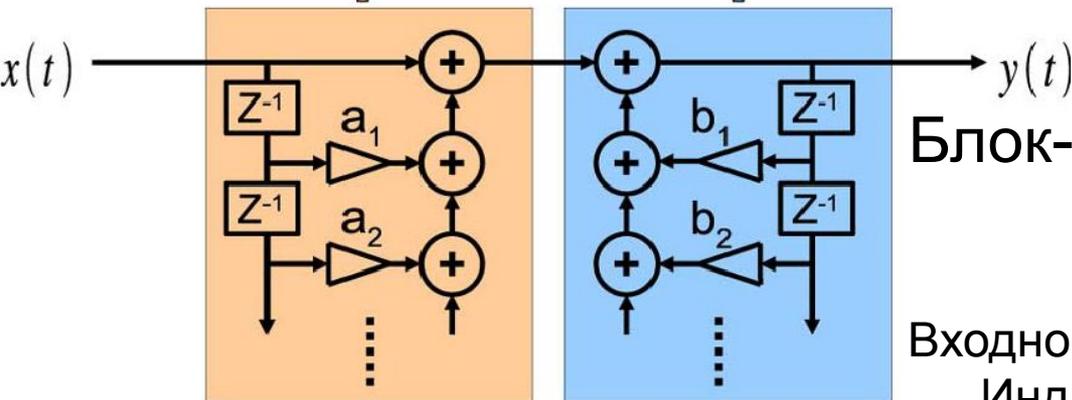
конъюнктор :



Разность фаз этих волн определяется электрическим напряжением, приложенным к управляющим электродам. Логическая "1" отождествляется со значением напряжения U_0 , а двоичный "0"- с нулевым потенциалом. Таким образом, если напряжение U_0 приложено к четному числу управляющих электродов, то волны, сходящиеся в выходном разветвлении усиливают друг друга, образуя выходной оптический сигнал с амплитудой, практически равной амплитуде входного сигнала, который принимается за единичный сигнал. В противном случае волны практически полностью гасят друг друга, образуя нулевой выходной сигнал.

$$y(t) = \sum_{k=0}^M a_k x(t-k\tau) + \sum_{k=1}^N b_k y(t-k\tau)$$

Оптоэлектронный сигнальный процессор



Блок-диаграмма

Finite Impulse Response (FIR)

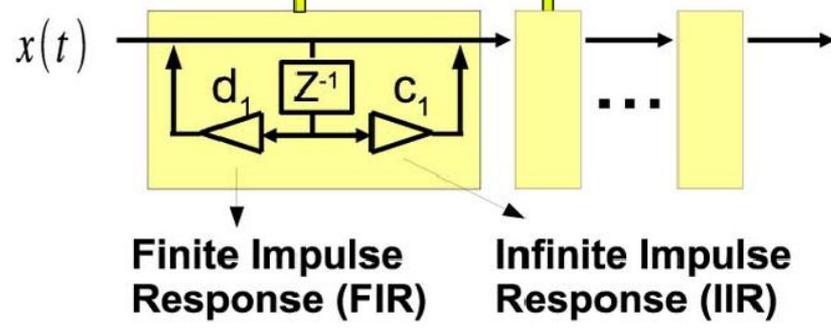
Infinite Impulse Response (IIR)

Входной сигнал разделяется волноводами. Индивидуальный оптический сигнал испытывает различные временные запаздывания обусловленные амплитудными и фазовыми изменениями.

$$\frac{Y[Z]}{X[Z]} = \left(\frac{1 - c_1 Z^{-1}}{1 - d_1 Z^{-1}} \right) \times \left(\frac{1 - c_2 Z^{-1}}{1 - d_2 Z^{-1}} \right) \times \dots$$

На выходе сигналы суммируются.

- (a) Параллельная форма.
- (b) Последовательная форма.

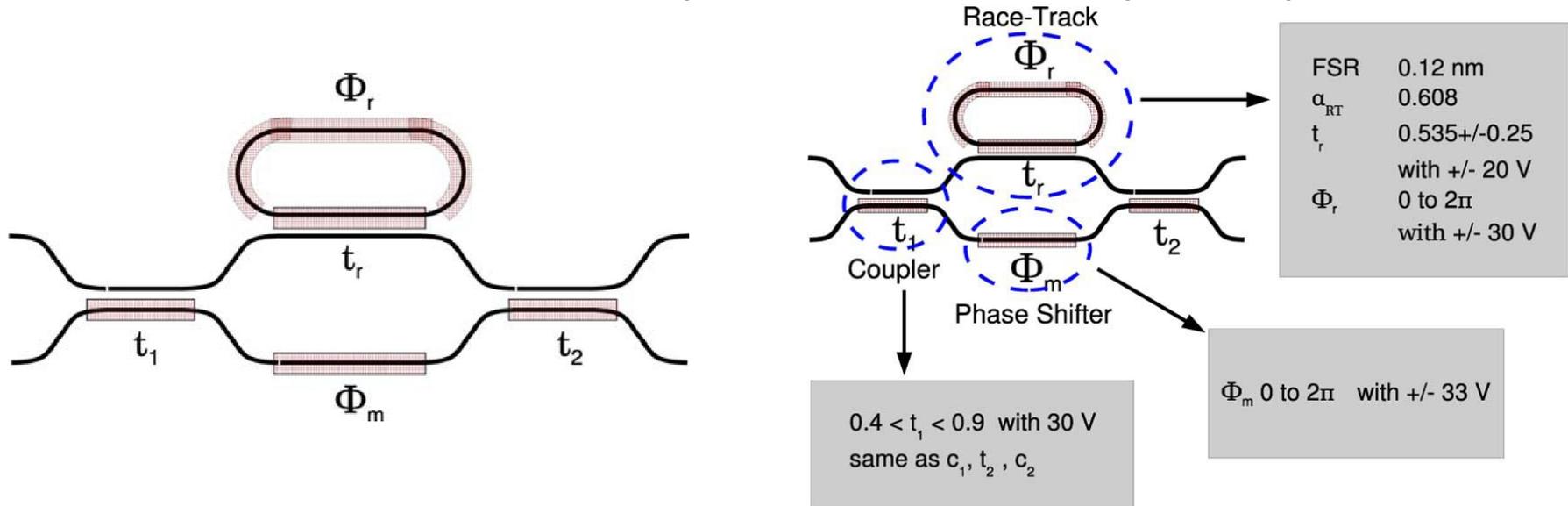


Finite Impulse Response (FIR)

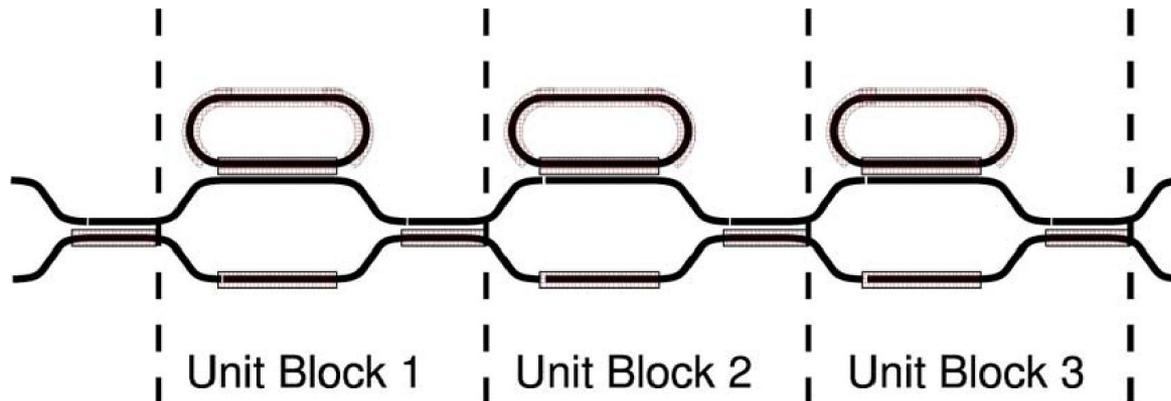
Infinite Impulse Response (IIR)

Byoung-Joon Seo; Seongku Kim; Bortnik, B.; Fetterman, H.; Optical signal processor using electro-optic polymer waveguides Journal of Lightwave Technology vol.27, no.15 : 3092-106,1 August 2009

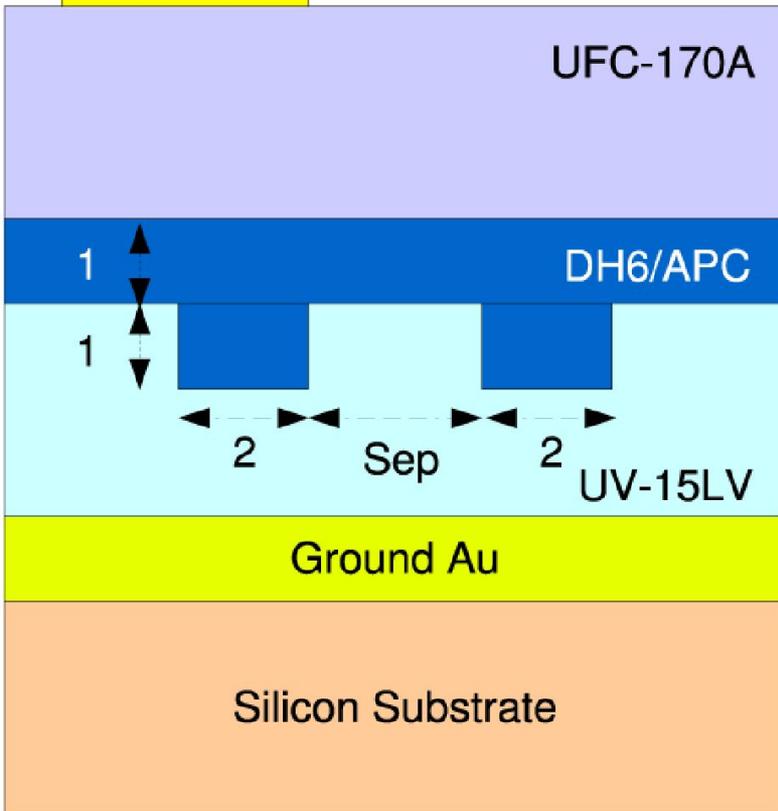
Отдельная ячейка оптоэлектронного сигнального процессора



Симметричный интерферометр Маха-Цандера, управляемый четырьмя электродами



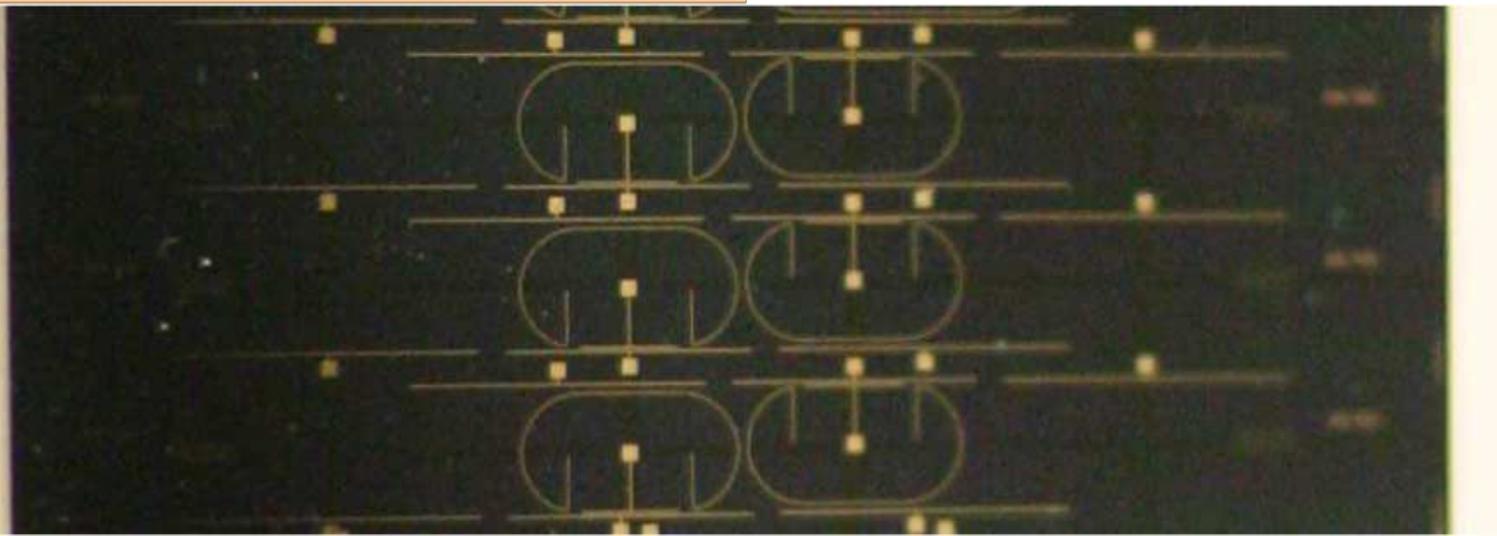
Electrode

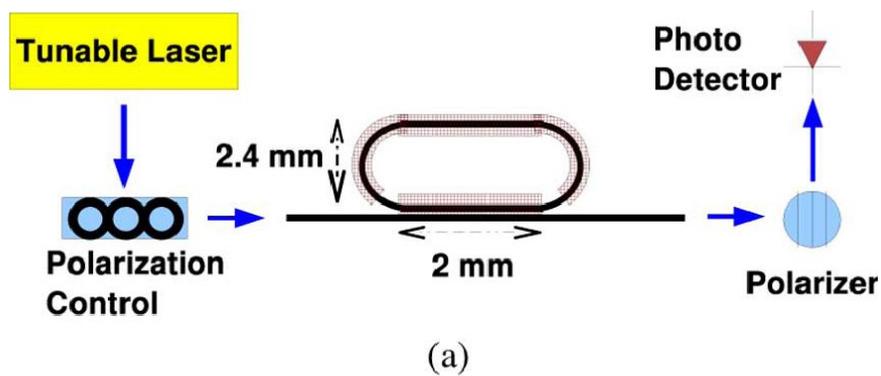


It is a single-mode waveguide

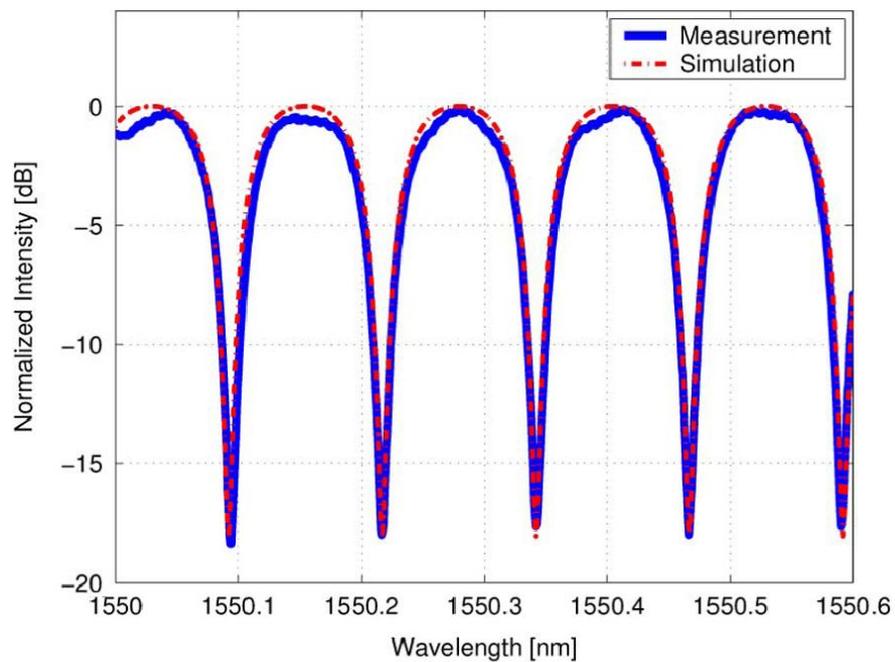
For the electrooptic polymer core material, DH6/APC (Lumera Co.) was used.

Single-layer films of DH6/APC have shown a high electrooptic coefficient of 70 pm/V at 1.31 μ m. For lower and upper cladding polymers, UV15LV (Master Bond Co.) and UFC170A (Uray Co.) are used.

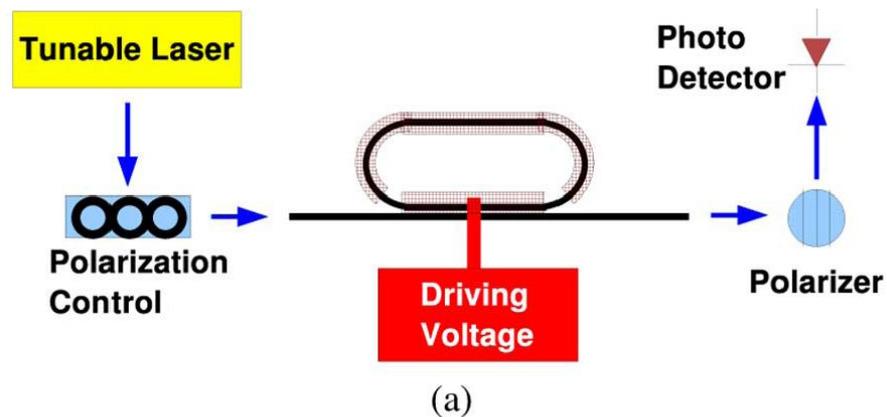




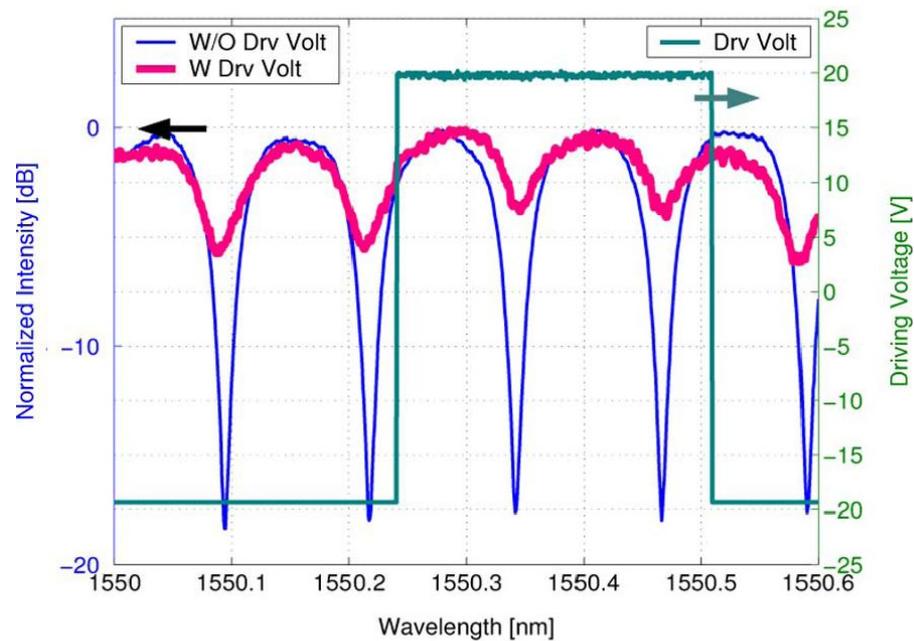
(a)



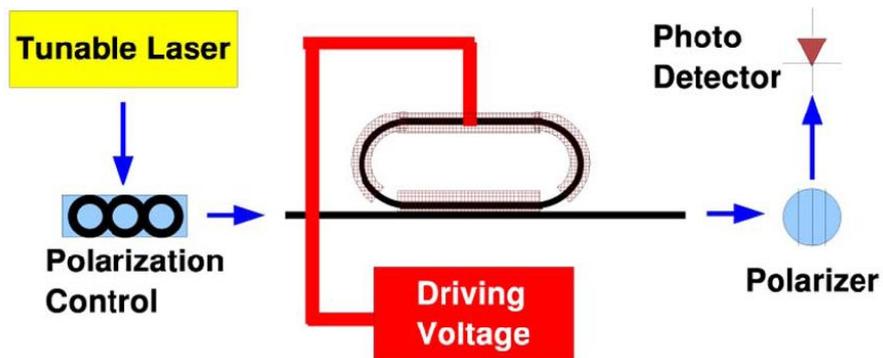
(b)



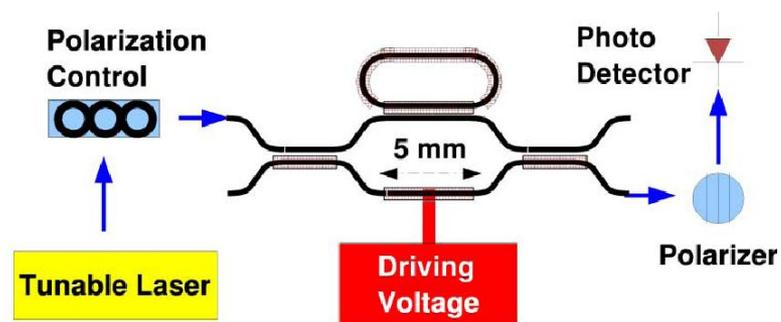
(a)



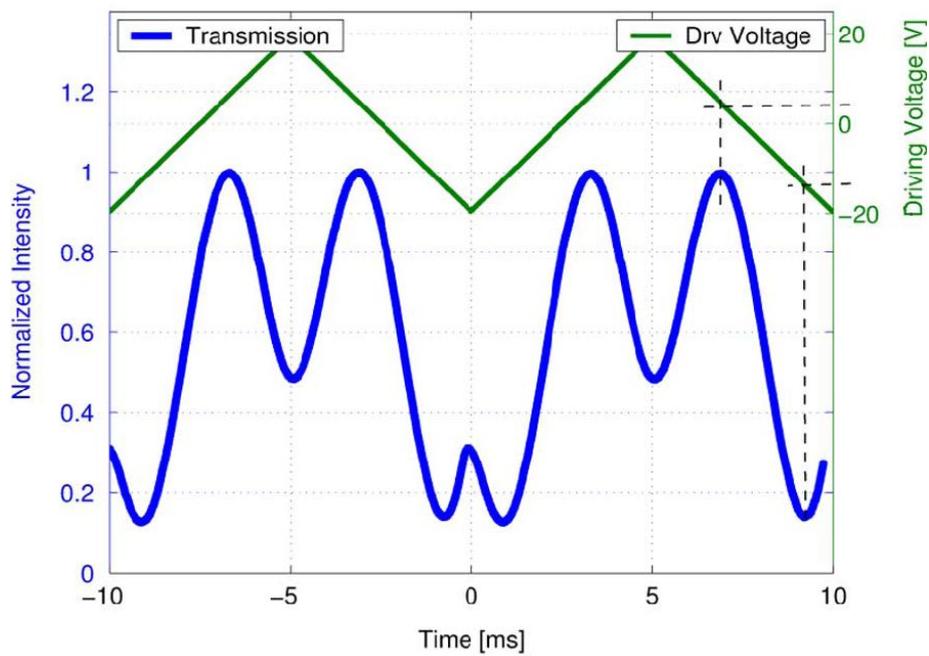
(b)



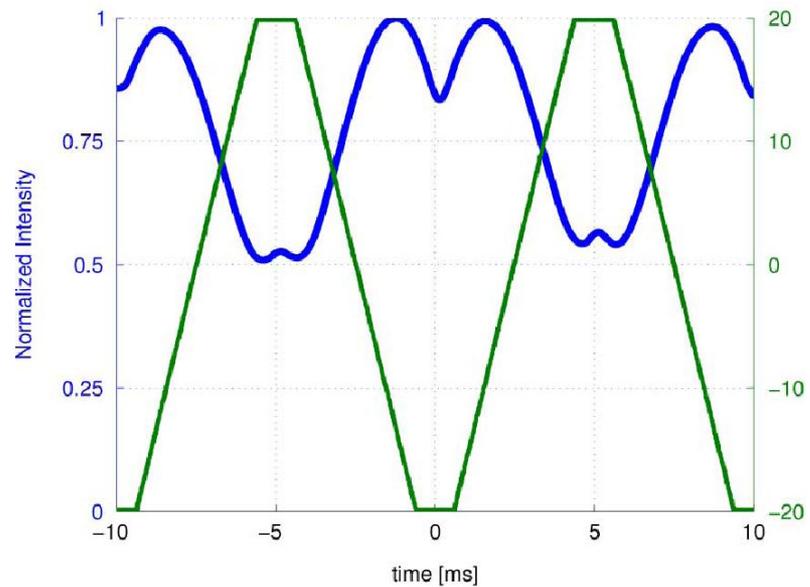
(a)



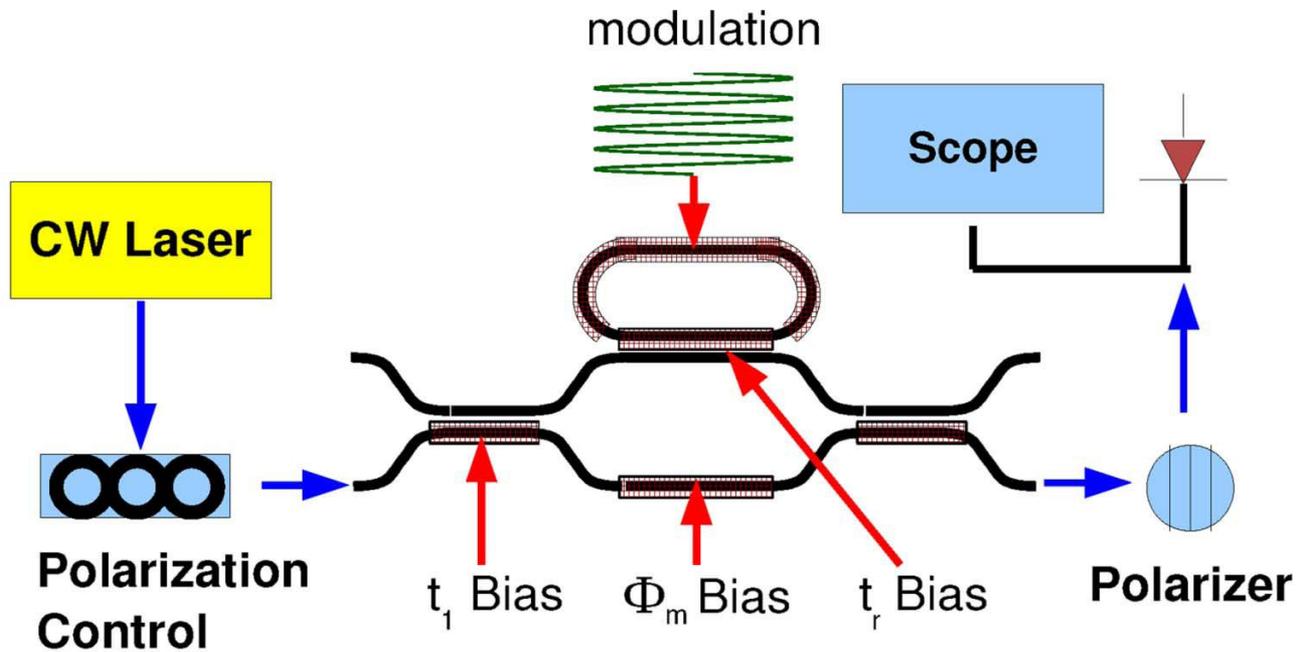
(a)



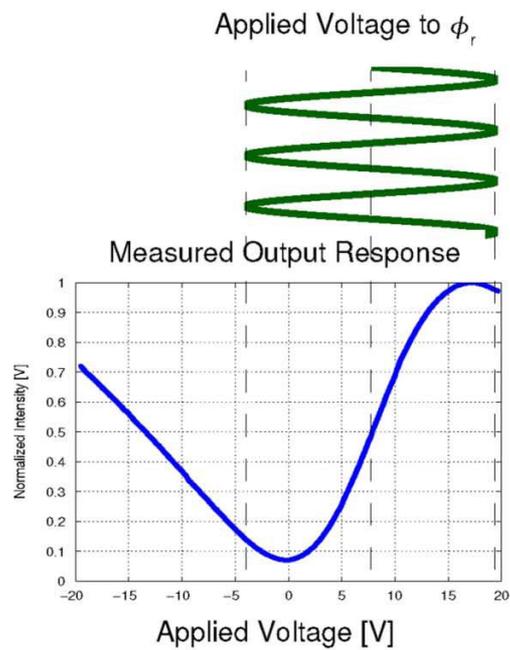
(b)



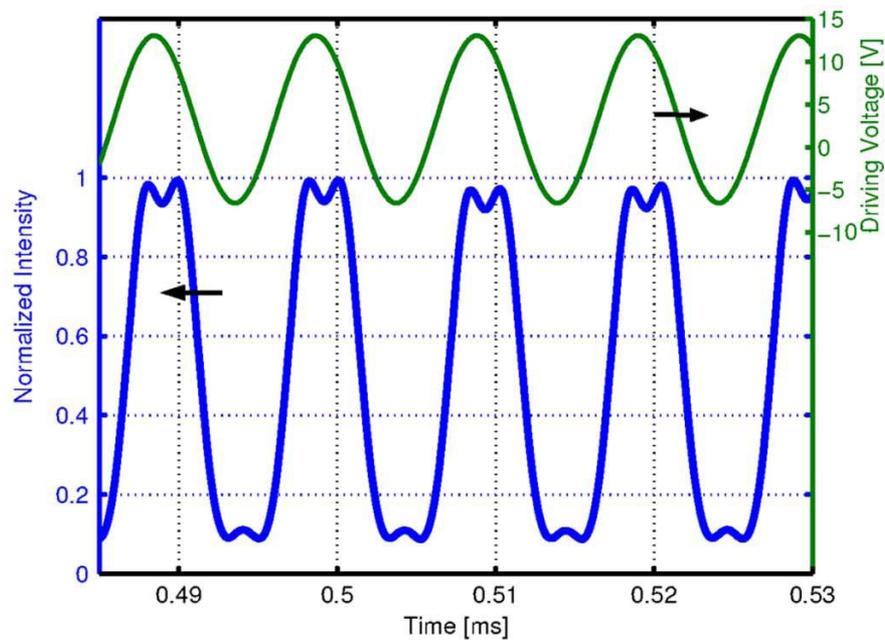
(b)



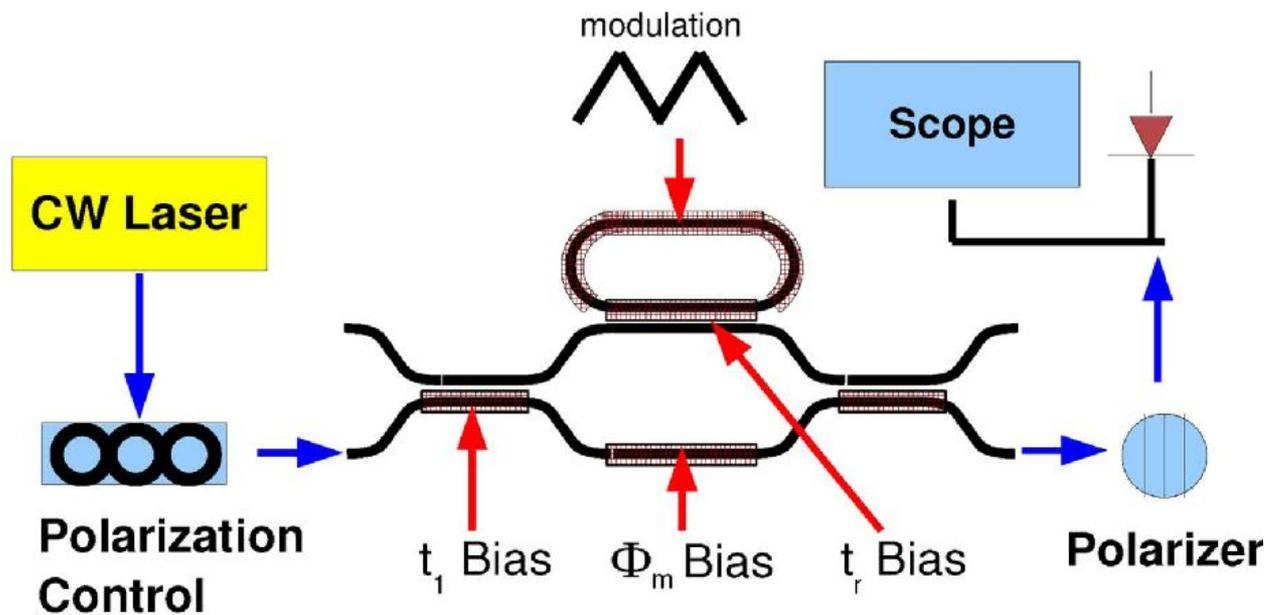
(a)



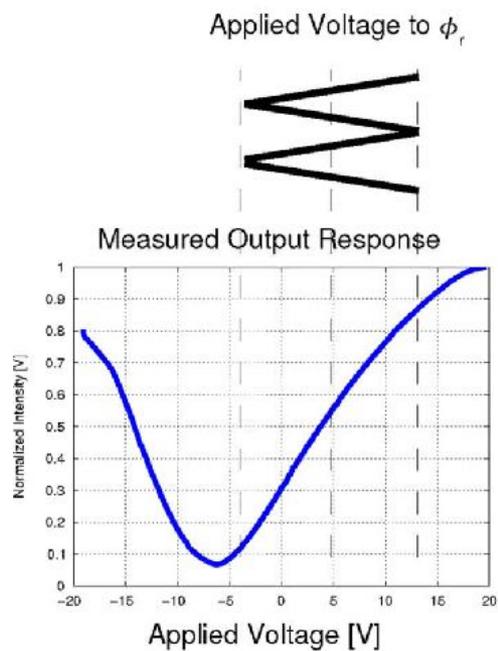
(b)



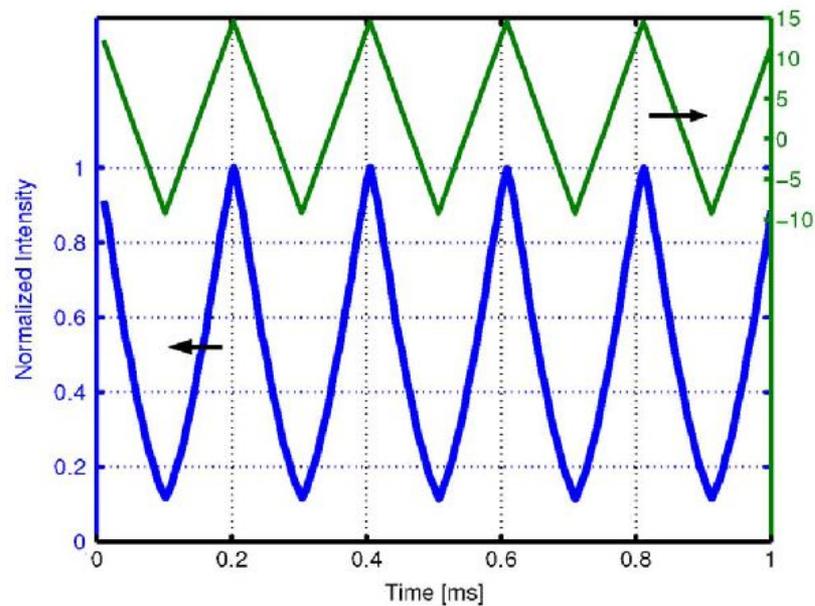
(c)



(a)



(b)



(c)

Coupler
Modulator
DC Probe

MZ1 Coplanar Probe

Phase Shifter
DC Probe

MZ2 Coplanar Probe

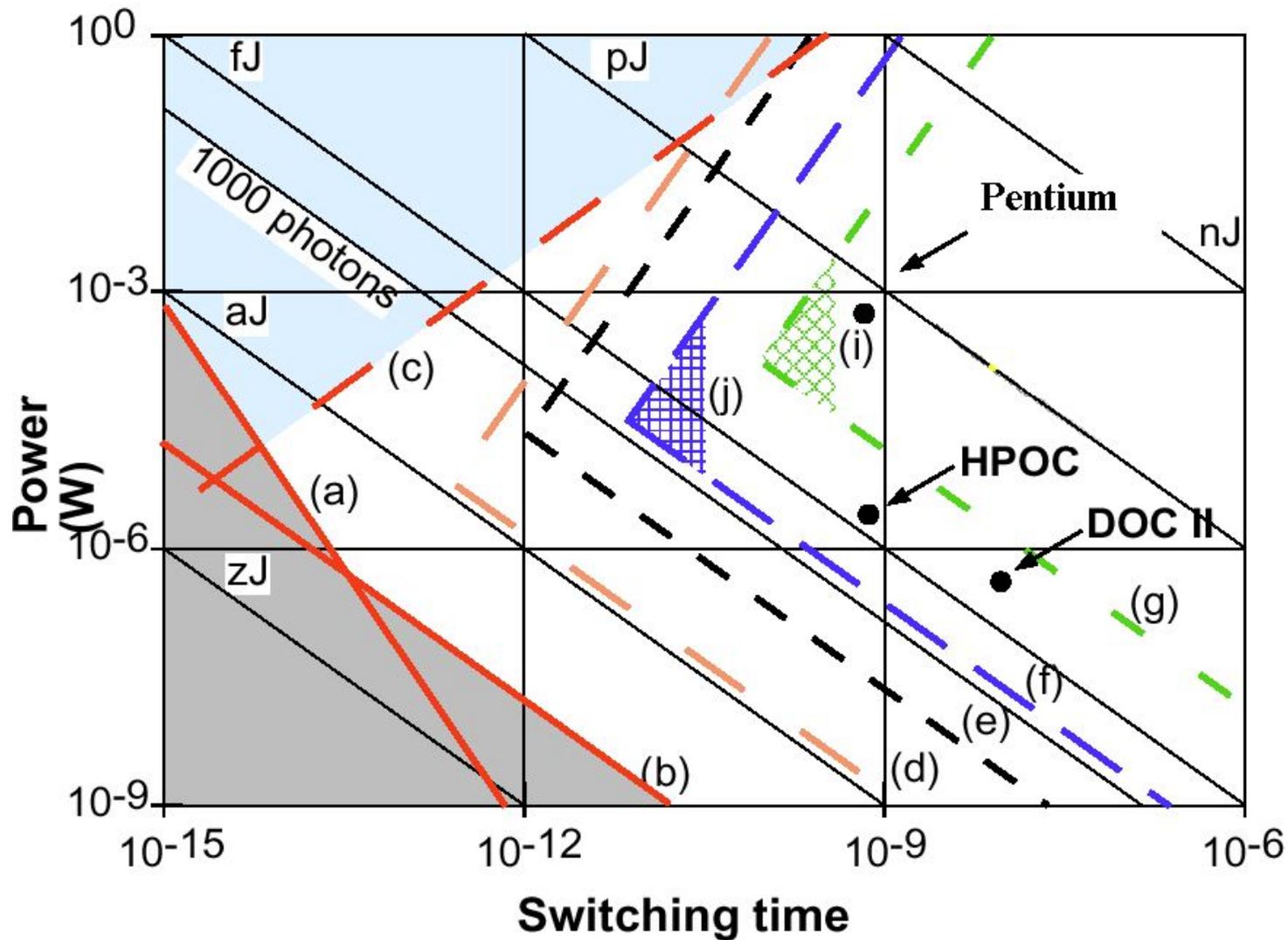
Ground
Probe

Newport
561-FH

GSG
450

GSG
450

Оптические компьютеры



Список литературы

1. Moore G.E. Progress in digital integrated electronics //IEEE IEDM Tech. Dig., 1975, P. 11-13.
2. Meindl J.D. Low power microelectronics: retrospect and prospect //Proc. IEEE, 1995, V. 83, P. 619-635.
3. McAulay A.D. Optical Computer Architectures: the Application of Optical Concepts to Next Generation Computers, John Wiley & Sons, New York, NY (1991).
4. Carts Y.A. Optical computing nears reality //Laser Focus World, 1990, V. 26, P. 53-54.
5. Craft N.C., Prise M.E. Processor does light logic //Laser Focus World, 1990, V. 26, P. 191-200.
6. McCormick F.B., Cloonan T.J., Tooley F.A.P., Lentine A.L., Saisan J.M., Brubaker J.L., Morrison R.L., Walker S.L., Crisci R.J., Novotny R.A., Hinterlong S.J., Hinton H.S., Kerbis E. Six-stage digital free-space optical switching network using symmetric self-electro-optic effect devices //Appl. Opt., 1993, V. 32, P. 5153-5171.
7. Guilfoyle P. S., Zeise F.F., Stone R.V. DOC II: 32-bit digital optical computer, opto-electronic hardware and software //Proc. SPIE, 1991, V. 1563, P. 267-278.
8. Guilfoyle P.S., Mitkas P.A., Berra P.B. Digital optoelectronic computer for textual pattern matching //Proc. SPIE, 1990, V. 1297, P.124-132.
9. Guilfoyle P.S., Rudokas R.S., Stone R.V., Roos E.V. Digital optical computer II: performance specifications //Optical Computing Technical Digest, 1991, P. 203-206.
10. Guilfoyle P.S., McCallum D.S. High-speed low-energy digital optical processors //Optical Engineering, 1996, V. 35, P. A3-A9.

Контрольные вопросы.

1. Основные свойства оптического излучения.
2. Сколько элементов разрешения (пикселей) можно получить в оптическом изображении размером $1 \times 1 \text{ см}^2$.
3. Какой информационный объем (бит) можно получить оптическими методами при использовании регистрирующей среды 1 см^3 .
4. Сколько спектральных каналов по 100 ГГц можно создать в диапазоне длин волн $0.4 \dots 1.7 \text{ мкм}$.
5. Концептуальная схема компьютера, основные элементы.
6. Оптические компоненты в современном электронном компьютере, их характеристика.
7. Типы оптических процессоров.
8. Аналоговый оптический процессор. Аналоговые операции
9. Принцип действия оптического аналогового устройства, реализующего умножение вектора на матрицу.
10. Получение голограммы. Сохранение информации с помощью голографии.
11. Распознавание образов с помощью голографии.
12. Оптический транзистор на основе SEED, основная задача.
13. Параметры первого оптического цифрового процессора и их анализ.
14. Второе поколение оптических цифровых процессоров, основные параметры.
15. Реализация оптического цифрового процессора – Enlight 256.
16. Полностью оптическая логическая ячейка. Нелинейный резонатор Фабри-Перо.