

<http://ysa.ifmo.ru/data/publications/BOOK008/paper1-001.doc>

## ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССОРЫ: ДОСТИЖЕНИЯ И НОВЫЕ ИДЕИ

П.А. Белов, В.Г. Беспалов, В.Н. Васильев, С.А. Козлов,  
А.В. Павлов, К.Р. Симовский, Ю.А. Шполянский

Обзор посвящен достижениям, новым идеям и проблемам, связанным с созданием оптического процессора. В обзоре рассмотрены аналоговые и цифровые оптические процессоры, оптические процессоры нечеткой логики, а также перспективные материалы и технологии для создания элементной базы будущих оптических компьютеров.

### Введение

Приходит время, когда электронные технологии, используемые для создания кремниевых процессоров, приближаются к теоретическому пределу своих возможностей. Эти фундаментальные ограничения определяются прежде всего квантово-механическими эффектами при уменьшении размеров транзистора до 10 нм, ростом рассеиваемой мощности, связанным со все более быстрым переключением полупроводниковых вентилях, а также физическими пределами скорости распространения электрического сигнала по чипу. Однако развитие науки и техники идет по пути быстрого и постоянно увеличивающегося роста потока информации, подлежащего переработке и использованию, и решение данной проблемы многим исследователям видится в привлечении оптических технологий.

Идея использования света (фотонов) в принципиальных узлах вычислительных машин появилась одновременно с изобретением лазеров - оптических квантовых генераторов - и уже несколько десятилетий исследователи и конструкторы успешно создают отдельные узлы электронно-вычислительных систем с использованием оптических технологий. Фотоны, являющиеся основными носителями информации в оптическом компьютере, по своим физическим характеристикам принципиально отличаются от электронов. Полевая природа света обуславливает многочисленные преимущества оптических технологий для задач передачи, записи, обработки и хранения информации:

- частота оптического излучения составляет  $10^{12} \dots 10^{16}$  Гц, что позволяет создать до  $10^5$  информационных каналов со спектральной шириной 100 ГГц;
- передача информации фотонами происходит действительно со скоростью света  $c_0 = 3 \cdot 10^{10}$  см/с, в то время как скорость распространения электрического импульса по чипу определяется временем перезарядки цепи и реально составляет величину в 20-30 раз меньше  $c_0$ ;
- большое число световых пучков могут свободно проходить по одной и той же области пространства, пересекаться и из-за отсутствия у фотонов электрического заряда не влиять друг на друга;
- использование двумерного (изображения) и трехмерного (голограммы) характера световых полей позволяет значительно увеличить плотность и скорость передачи информации;

- возможна когерентная обработка 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 практически не излучает во внешнюю среду, обеспечивая защиту от перехвата информации и нечувствительна к электромагнитным помехам.

В современном электронном компьютере можно отметить следующие оптические узлы и элементы: устройства ввода информации – оптический сканер, оптическая мышь; устройства обмена информацией – инфракрасный порт, оптоволоконно; устройства вывода информации – лазерный принтер, дисплей, голографический (объемный) дисплей; устройства памяти – долговременная память на перезаписываемых оптических дисках, магнитооптические диски, голографические диски. В 2003 г. появился коммерческий оптический процессор – Enlight 256, предназначенный для увеличения вычислительной мощности электронных процессоров. Компания Intel в 2004 г. анонсировала программу Silicon Photonics ориентированную на создание оптических узлов, встраиваемых в процессор, – лазеров, модуляторов, мультиплексоров и демультимплексоров с использованием интегральной кремниевой технологии.

Таким образом, идет постепенный переход от электронных технологий к оптическим в системах обработки информации, и данный обзор посвящен достижениям, новым идеям и проблемам, связанным с созданием полностью оптического процессора, в котором свет управляет светом, а информацию переносит бы фотон вместо электрона.

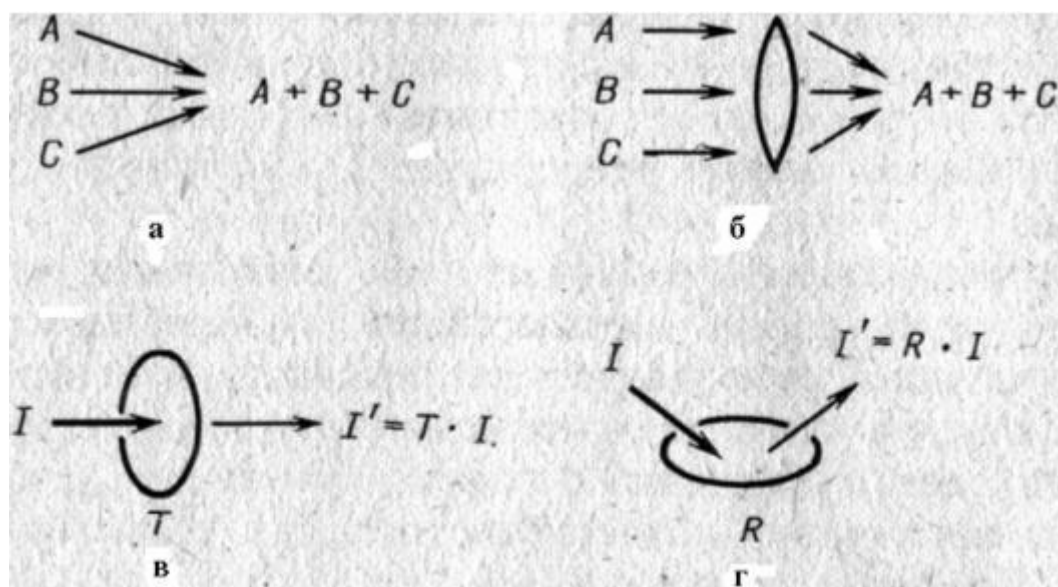
В первой части будут рассмотрены основы аналоговых оптических вычислений, аналоговые оптические процессоры и цифровые оптические процессоры, а также оптические процессоры нечеткой логики; во второй части будут рассмотрены перспективные материалы и технологии для создания элементной базы будущих оптических компьютеров.

## **1. Оптические процессоры**

### **1.1. Аналоговые оптические вычисления и процессоры**

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.

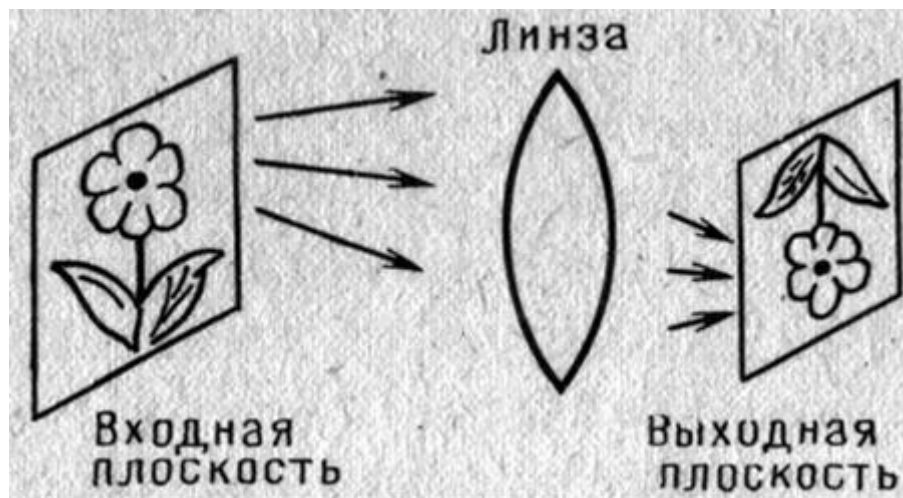
Обсудим основные методы аналоговых вычислений, производимых в аналоговых оптических компьютерах, с использованием законов оптики. Прежде всего, обратимся к рис. 1, поясняющему, как с помощью светового луча можно выполнять хорошо знакомые всем операции сложения и умножения [1]. Следует



**Рис. 1.** Основные аналоговые оптические операции: а — сложение; б — сложение с помощью линзы; в — умножение на основе эффекта пропускания света; г — умножение на основе эффекта отражения света.

отметить, что указанные на рисунке простейшие операции сложения возможны лишь при использовании частично-когерентных световых пучков, сложение когерентных происходит с учетом фазовых характеристик — поскольку складываются не интенсивности, а амплитуды падающих волн.

Основными операциями аналогового оптического компьютера являются только две операции - сложение и умножение, однако одни лишь эти операции не позволяют выполнять сложные вычисления. Как уже упоминалось ранее, отличительным свойством светового излучения является способность к параллельной (одновременной) обработке больших объемов информации, однако для этого недостаточно использовать лишь свойство прямолинейного распространения света. Необходимо воспользоваться другими свойствами света, такими как преломление (рефракция) и дифракция, лежащими в основе работы линз и дифракционных элементов (решеток, голограмм). Как показано на рис.2, если перед линзой, например, с левой стороны (входная плоскость), поместить некоторый предмет, то с противоположной стороны мы получим перевернутое и уменьшенное изображение того же предмета. Аналоговая операция инвертирования и масштабирования произведена со скоростью света. Попробуйте провести такую же операцию с данным оптическим изображением (имеющим размер 6х12 см, обладающим 60000х120000 элементами разрешения, что соответствует минимально 7,2 Гб, используя программу, например, Adobe Photoshop).



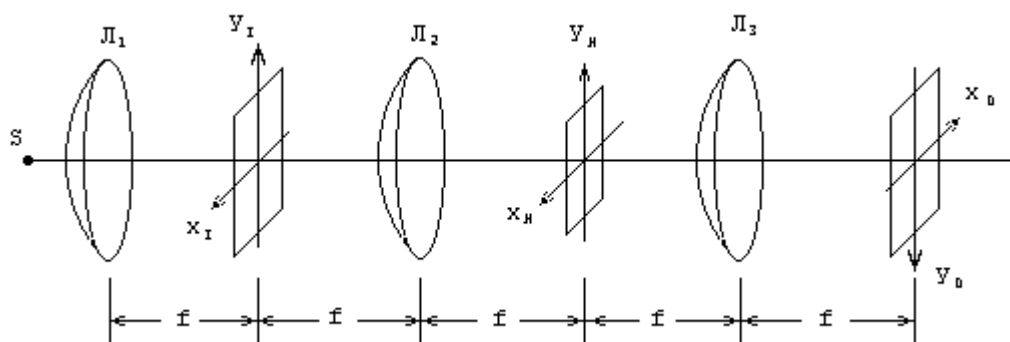
**Рис. 2.** Операция инвертирования и масштабирования, выполняемая линзой при построении изображения.

Если входная и выходная плоскости оптической системы совпадают с передней и задней фокальной плоскостями сферической линзы и на вход такой системы поступает оптический сигнал  $U_1(x_1, y_1)$ , то на выходе появляется сигнал, связанный со входным сигналом следующим соотношением:

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

где  $f$  – фокусное расстояние оптической системы,  $\lambda$  – длина волны оптического сигнала,  $x_H, y_H$  – координаты в выходной плоскости системы. Таким образом, выходной сигнал рассматриваемой простейшей оптической системы с точностью до постоянного множителя совпадает с фурье-образом входного сигнала. Следует отметить, что фурье-образ входного оптического сигнала существует в виде физически реального пространственного распределения комплексных амплитуд света. Благодаря этому когерентные оптические системы могут быть эффективно использованы для решения широкого круга задач, связанных с получением, преобразованием и обработкой фурье-спектров, корреляционных функций и свертков [1-3].

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 (рис. 3) состоит из следующих компонентов: из источника света  $S$ , 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 Фурье-плоскости  $(x_H, y_H)$  и выходной  $(x_D, y_D)$  плоскостях системы.



**Рис. 3.** Схема оптической системы обработки информации методами пространственной фильтрации.  $S$  – источник оптического излучения.

Линза  $L_2$  осуществляет преобразование Фурье сигнала  $U_1(x_1, y_1)$ , созданного транспарантом, поэтому в спектральной плоскости системы непосредственно перед операционным фильтром распределение комплексных амплитуд света пропорционально фурье-образу входного сигнала. Амплитудно-фазовый коэффициент пропускания операционного фильтра определяется выражением:

$$t_H = C \cdot H(\xi, \eta), \quad (2)$$

где  $C$  – комплексная константа, а функция  $H(\xi, \eta)$  соответствует математической операции, которую необходимо выполнить над входным сигналом, ее называют передаточной функцией фильтра. После пространственной фильтрации оптический двумерный сигнал подвергается повторному преобразованию Фурье с помощью линзы  $L_3$ . В результате в выходной плоскости системы оптическое поле будет иметь распределение:

$$U_D(x_D, y_D) = -\frac{C_1}{(\lambda f)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(\xi, \eta) \cdot H(\xi, \eta) \exp[2\pi i(x_D \cdot \xi + y_D \cdot \eta)] d\xi d\eta, \quad (3)$$

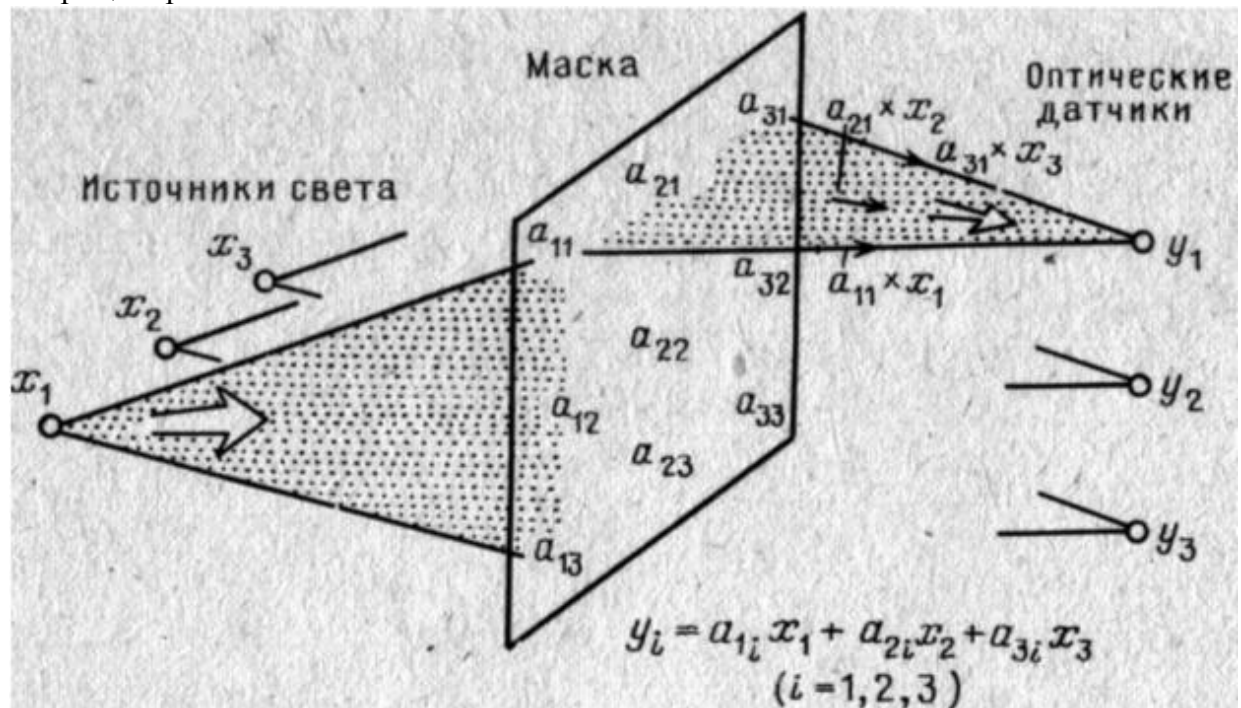
где  $C_1$  – комплексная константа. Направления координатных осей в выходной плоскости системы выбраны противоположно направлениям осей координат во входной плоскости для того, чтобы учесть инверсию, которая получается в результате двух последовательных преобразований Фурье и выражается соотношением  $F\{F[U(x, y)]\} = U(-x, -y)$ .

Таким образом, оптическая система, представленная на рис. 3, способна выполнять линейные интегральные преобразования типа свертки, описываемые уравнением (3). В частном случае, когда  $H = 1$ , искомая система превращается в систему, создающую изображение входного сигнала. Так как входной сигнал оптической системы является финитным, ее фурье-образ имеет неограниченную протяженность. Поэтому ошибка в выходном сигнале оптической системы, обусловленная потерей части фурье-образа, соответствующей высоким пространственным частотам, неизбежна.

В качестве практического использования аналоговых вычислений с использованием оптического Фурье-преобразования отметим следующие модели компьютерных систем: оптоэлектронный процессор фирмы Global Holonetics, первым вышедший на рынок, предназначен, в частности, для распознавания упаковок в супермаркетах, в нем используется формирователь изображения, содержащий приблизительно 65000 жидкокристаллических элементов с электронным управлением и он распознает до 30 изображений в секунду и стоит вчетверо меньше обычных компьютеров технического зрения; оптический коррелятор компании Litton Data

Systems на базе магнитооптики выполняет более 1000 корреляций в секунду по изображениям формата 128x128 пикселей, при объеме 10 дм<sup>3</sup> он высоконадежно распознает бронетехнику на многокилометровой дистанции.

В качестве другого примера практического использования аналоговых оптических компьютеров рассмотрим операционные устройства, выполняющие операции со множеством аналоговых числовых данных [1, 4]. Объектом операций, или данными, будем считать вектор, состоящий из  $n$  чисел, и двумерную матрицу размерностью  $n \times n$ . На рис. 4 показан пример структуры базового оптического арифметического устройства, выполняющего умножение вектора и матрицы при  $n = 3$ .



**Рис. 4.** Принцип действия оптического операционного устройства, выполняющего умножение вектора на матрицу.

Слева показаны три источника света, расположенные горизонтально. В центре расположен оптический транспарант размером 3x3, а справа — вертикально три фотодетектора. Кроме того, создадим оптическую систему таким образом, чтобы свет, излучаемый одним из источников, например  $x_1$  распространялся веерообразно по вертикали, как показано на рисунке, и падал только на часть маски  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{13}$  (в данной схеме оптическая система не показана). Свет от соседнего с  $x_1$  источника  $x_2$  распространяется также вертикально веерообразно и падает на соседние участки маски  $a_{21}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{23}$  и до других участков не доходит. Интенсивность света, прошедшего через транспарант, определяется произведением интенсивности входного луча  $x_i$  на коэффициент пропускания  $a_{ij}$  данного участка транспаранта.

Далее, свет, прошедший через транспарант, фокусируется с помощью другой оптической системы (также не показанной на рисунке), но только по горизонтали. Световые лучи, прошедшие через элементы  $a_{11}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{31}$  в верхней части транспаранта, достигают только самого верхнего оптического датчика  $y_1$ . Аналогично световые лучи, прошедшие через второй ряд ячеек

транспаранта  $a_{12}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{32}$  достигают только датчика  $y_2$ . В конечном итоге интенсивность света в  $i$ -м оптическом датчике будет определяться суммой трех произведений  $a_{ij}$ , и  $x_i$  (см. формулу, приведенную на рис. 4), которая по определению представляет собой произведение вектора  $x$  на матрицу  $a$ .

Разумеется, число элементов  $n$  вектора и матрицы не обязательно может равняться трем, оно может быть любым. Возможность параллельной (одновременной) обработки множества данных можно назвать классической отличительной чертой аналогового оптического компьютера. Этот принцип впервые был предложен в 1975 г. в Станфордском университете (США) и лег в основу многих оптических информационных устройств, разработанных впоследствии, в частности, в основу первого коммерческого цифрового оптического компьютера Enlight256, представленного компанией "Lenslet" в октябре 2003 г [5].

## 1.2. Оптический процессор Enlight256

Компания "Lenslet" [6], разработавшая оптический процессор, создана в 1999 году и насчитывает около 30 сотрудников, среди которых более 20 высококвалифицированных физиков и специалистов по оптике и электрооптике. Компания специализируется на управлении, миниатюризации и интеграции электронно-оптического оборудования, а также на высокоскоростных аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразованиях.

Оптический процессор Enlight256 является по принципу действия аналоговым оптическим вычислительным устройством, и аппаратно представляет собой развитую гибридную цифроаналоговую систему, содержащую как оптические узлы, так и необходимые в инженерной практике компьютерные узлы (например, популярную в цифровой технике для встраиваемых применений реализацию внутрисистемной отладки). Внутри "вычислительного ядра" Enlight, находится параллельная счетная машина со специализированной архитектурой, оптимальной для выполнения задачи умножения матрицы на вектор, - каноническая операция в вычислительной математике, основной типовой "кирпичик", из множества которых можно организовать сколь угодно сложные вычисления. За один такт, длительностью 8 нс, процессор Enlight256 способен перемножить вектор из 256 элементов на матрицу размерностью 256 x 256. Разработчики Lenslet ограничили диапазон значений элементов вектора и матрицы числом 256, соответствующим традиционным 8-битным целым числам. И именно поэтому им пришлось реализовать уникальную систему динамической калибровки, для того чтобы устранить возможную потерю точности в ходе работы. Таким образом, производительность процессора Enlight256 составляет  $8 \cdot 10^{12}$  операций в секунду: за один такт (8 нс) процессор умножает 256-байтный вектор на 256x256 - байтную матрицу.

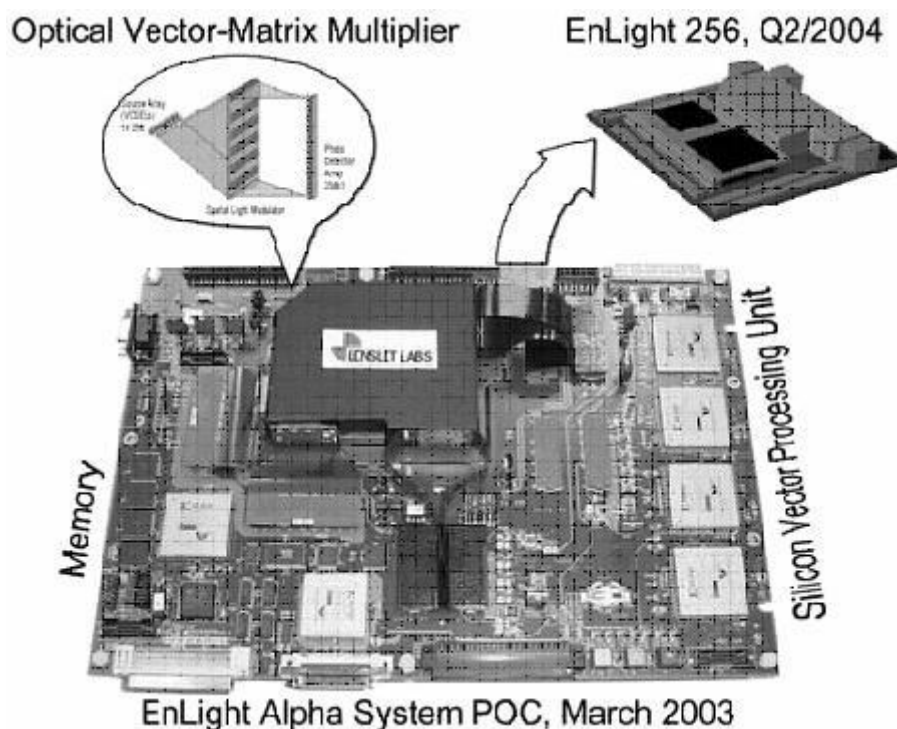


Рис.5. Внешний вид процессора Enlight256 [7].

Ядро процессора Enlight256 - оптическое, а входная и выходная информация представляется в электронном виде. Ядро состоит из 256-ти VCSEL-лазеров<sup>1</sup>, пространственного модулятора света, набора линз и приемников излучения, образующие оптическую матрицу VMM (Vector-Matrix Multiplication), которая конвертирует электрическую информацию в свет, затем производит необходимые преобразования этой информации, направляя свет через программируемую внутреннюю оптику. Выходное излучение регистрируется приемниками и преобразуется снова в электрический сигнал.

VMM 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 арифметического логического устройства, 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).

Принцип умножения вектора на матрицу с использованием данного устройства детально рассказан в предыдущем разделе (рис.4). Каждый элемент входного вектора проектируется на столбец матрицы, а каждый ряд матрицы проектируется на один детектор в векторе результата (вывода).

<sup>1</sup> VCSEL - Vertical Cavity Surface-Emitting Laser – лазер поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором.



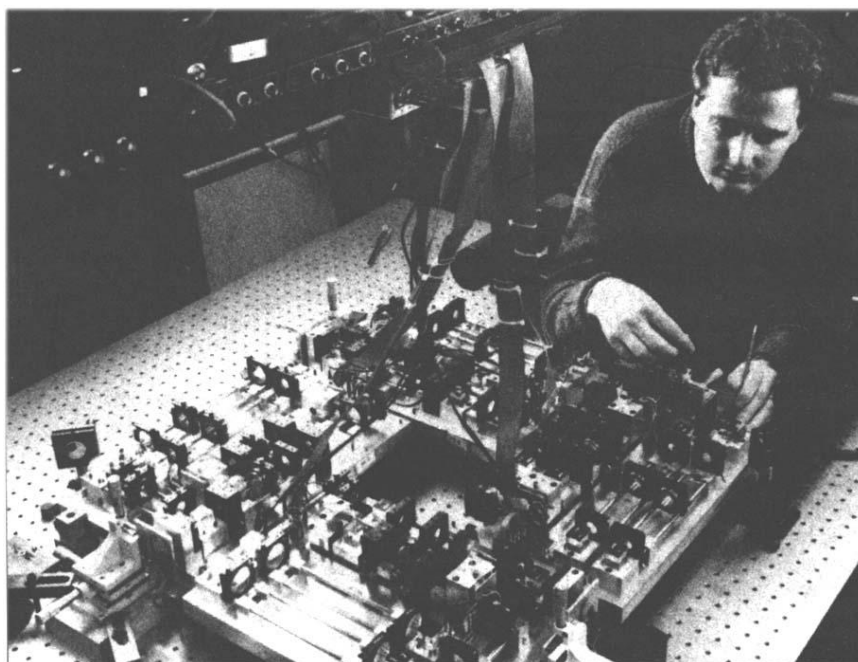
Программирование оптического цифрового сигнального процессора заключается в изменении значений пропускания ячеек пространственного модулятора. Загрузка приложения (или данных внутри отдельного приложения) осуществляется путем замены значений матрицы в пространственном модуляторе. Пространственный модулятор может поставляться как отдельный продукт, так что ничто не мешает потенциальному разработчику создать свой оптический процессор. Этот модулятор называется Ablaze, и о нем можно прочитать на сайте компании Lenslet.

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 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 (15x15x7 см<sup>3</sup>) позволяют размещать его на транспортных средствах.

### 1.3. Цифровые оптические процессоры

В 1984 году Б. Дженкинс из Университета Южной Калифорнии продемонстрировал первый цифровой оптический компьютер, выполнявший достаточно сложную последовательность команд. Основным элементом компьютера являлся жидкокристаллический пространственный модулятор, на заднюю поверхность которого был нанесен фотопроводник. При падении света на фотопроводник локально изменяется потенциал, воздействующий на жидкий кристалл и приводящий к изменению пропускания элемента. Используя управляющий луч с одной стороны устройства и считывающий луч с другой стороны, возможно создание бистабильного логического элемента и реализация булевской логики. Следует отметить, что быстродействие данного устройства определялось инерционностью жидкого кристалла, и граничная частота следования импульсов составляла ~ 1 МГц.

В 80-е годы прошлого века интенсивно работали над созданием полностью оптических компьютеров нового поколения. Значительные усилия, направленные на создание оптического компьютера, привели к определенным успехам. Так, в 1990 г. в лаборатории американской фирмы "Белл" был создан макет цифрового оптического устройства (рис. 6) [8]. С



**Рис. 6.** Макет цифрового оптического устройства фирмы Bell [8].

его помощью была продемонстрирована возможность выполнения цифровых и логических операций с высокими параметрами быстродействия и потребления энергии. Основу процессора разработанного оптического компьютера составляли двумерные матрицы бистабильных элементов (размерностью  $4 \times 8$ ) на основе квантоворазмерных полупроводниковых структур, обладающих нелинейными электро-оптическими свойствами (self-electro-optic-effect devices - SEED). SEED был разработан в 1986 г. и представляет собой  $\text{PIN}^2$  фотодиод из GaAlAs p-области и n-области, слаболегированная i-область состоит из 100 чередующихся слоев GaAs и GaAlAs толщиной по 95 нм, образуя структуру множественных квантовых ям. В элементе SEED обратная связь осуществляется за счет приложения электрического поля к квантоворазмерной структуре, причем само поле возникает при прохождении через структуру светового излучения. Нелинейное пропускание элемента SEED связано с уменьшением экситонного поглощения вследствие смещения пика экситонного поглощения из-за квантового эффекта Штарка. SEED обладает двумя стабильными состояниями при заданном уровне мощности падающего излучения, включение которых определяется предысторией ранее проводившейся засветки и является оптическим бистабильным устройством. В симметричном SEED'e (S-SEED рис. 7), состоящем из двух PIN фотодиодов, которые включены последовательно в питающую цепь, при освещении одного из диодов в цепи возникал ток, который вызывал падение напряжения на структуре сверхрешетки и приводил к увеличению пропускания света через вторую структуру. Таким образом, возникала положительная обратная связь, и совокупность этих элементов могла

<sup>2</sup> PIN – диод со структурой p-n перехода, в центре которого находится слаболегированная область.

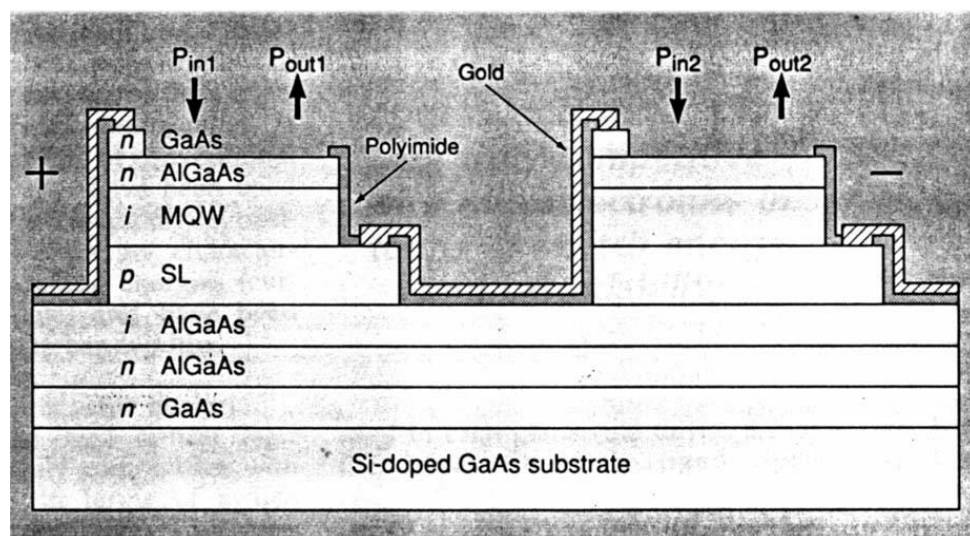
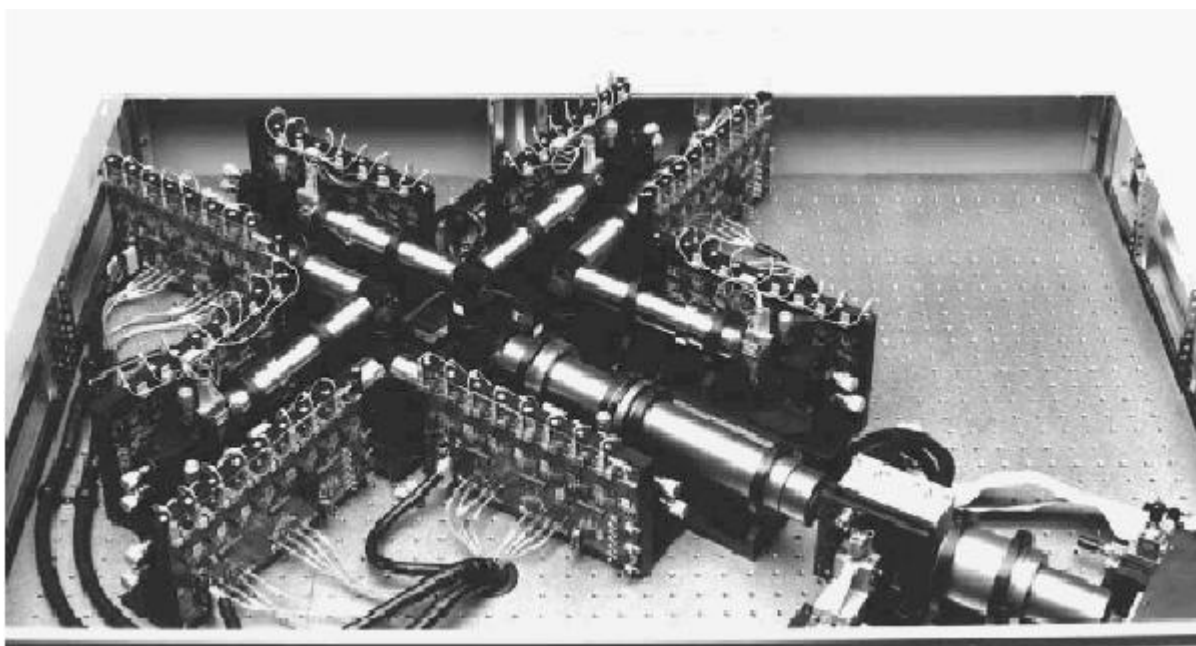


Рис.7. Оптический логический элемент S-SEED [9].

образовать логические ячейки «или – не», «или – и» и т.д.

Первый оптический компьютер состоял из 4 каскадов и располагался на оптической плите размером  $1 \times 1 \text{ м}^2$ . Пространственное распределение излучения на выходе каждого из каскадов компьютера определялось состоянием входящей в его состав жидкокристаллической маски, управляемой обычным компьютером и распределением света на его входе. Освещение элементов производилось полупроводниковым лазером через голографическую решетку Даммена. Важным достоинством первого оптического компьютера явилась возможность последовательного объединения его отдельных каскадов благодаря искусственному аналогу эффекта внутреннего усиления. Параметры системы были следующие: разрядность – 32 бита (массив  $4 \times 8$ ); логика – бинарная; тактовая частота – 1,1 МГц (определялась быстродействием ЖК маски); число переключений в секунду – 40 Мб/с. Одним из достижений данного процессора была величина энергии на одно переключение, которое составляла 20 фДж и была на 6 порядков меньше величины энергии переключения в электронных компьютерах того времени.

Второе поколение оптических цифровых компьютеров представлено компьютером DOC-II (digital optical computer), разработанного в научно-исследовательской фирме США Opticom Corporation [10]. В DOC-II использован принцип векторно-матричного умножения, однако вектор и матрица являются булевскими логическими. В данном устройстве входной поток данных образовывался излучением линейки 64 независимо модулируемых полупроводниковых лазеров. Свет от каждого лазера линейки отображался на одну строчку матричного пространственного модулятора света с размером  $64 \times 128$  элементов. Отдельный элемент матрицы представлял собой акусто-оптическую брэгговскую ячейку на основе полупроводника GaP. Свет, выходящий из рядов пространственного модулятора, попадал на линейку из 128 лавинных фотодиодов.



**Рис. 8.** Оптический компьютер DOC-II [10].

DOC-II имел  $64 \times 128 = 8192$  межсоединений и работал на частоте передачи данных  $100 \text{ Мб} \cdot \text{с}^{-1}$ , что соответствовало  $0.8192 \times 10^{12}$  переключений в секунду. Энергия на одно переключение составляла  $7.15 \text{ фДж}$  ( $\sim 30000$  фотонов). Для иллюстрации быстродействия представим, что нужно найти какое-то слово в тексте. Типичный современный персональный компьютер Dugon 1,6/256 MB/Win XP SP1 на поиск слова в документе Win Word, состоящем из 953 страниц текста, тратит чуть больше трех секунд (а именно 3,175). В то время, как оптический компьютер DOC-II просматривает за 1 секунду 80 000 страниц обычного ASCII-текста.

Принципиальным недостатком макетов первых оптических компьютеров являлась неинтегрируемость их отдельных компонентов. Исходя из этого, основной задачей следующего этапа работ по оптическому компьютеру было создание его интегрального варианта.

В конце 90-х годов прошлого века велись работы по созданию интегрального модуля оптического компьютера с логической матрично-тензорной основой, названного НРОС (High Performance Optoelectronic Communication) [11]. В устройстве планировалось использовать входную матрицу VCSEL лазеров, соединенную планарными волноводами и обычной оптикой с матрицами переключения, на основе дифракционных оптических элементов, и выходную систему, состоящую из матрицы лавинных фотодиодов, совмещенную с матрицей вертикально-излучающих диодов. Опытные образцы показали производительность  $4.096 \text{ Тб} \cdot \text{с}^{-1}$ , а оценки показывают, что данная система способна развить скорость  $10^{15}$  операций в секунду с энергией менее 1 фДж на одно переключение. Однако, в связи с мировым кризисом фотоники и рынка волоконных линий связи работы были прекращены. В настоящее время фирма Opticom Corporation разработала новый интегральный оптический элемент, состоящий из матрицы VCSEL лазеров и фотодетекторов, соединенных волноводом, и планирует использовать данные устройства как для обработки информации, так и для создания сверхбыстрых переключателей в сверхплотных волоконных линиях связи.

#### **1.4. Оптические процессоры нечеткой логики.**

В настоящее время при разработке интеллектуальных систем, в том числе, для задач контроля и управления, большое внимание уделяется реализации операций нечеткой логики (НЛ), которая рассматривается как наиболее адекватное на сегодня математическое описание присущих человеку особенностей мышления. В силу того, что НЛ предъявляет повышенные требования к вычислительной мощности и объему памяти процессора, разработчики процессоров НЛ проявляют повышенный интерес к оптическим информационным технологиям. Работы в этом направлении ведутся как в ряде университетов, так и инновационными фирмами.

Традиционно, процессоры делят на две группы: описанные выше логические процессоры, реализующие строго определенный набор логических операций, и системы логического вывода, известные также под термином «нечеткая ассоциативная память», реализующие более сложные операции, относящиеся к классу нечетких ассоциаций. Можно выделить также два подхода к созданию оптических процессоров нечеткой логики. Первый основан на использовании таких имманентных свойств оптики, как параллелизм представления и обработки информации – в рамках этого подхода часто реализуются ранее разработанные математические модели, не учитывающие специфики оптической реализации. В данном случае оптика выступает как технология, обеспечивающая выигрыш универсального вычислителя в мощности за счет параллелизма обработки двумерных массивов информации. Второй подход основан на учете в модели реальных свойств используемых фундаментальных физических явлений, определяющих как специфические особенности, так и ограничения, накладываемые на модель.

В рамках первого класса систем предложены различные архитектуры, использующие матричные источники и приемники излучения - как линейки [12-14], так и двумерные матрицы [15-18], более сложные схемы на их основе [19-23], в том числе, комбинированные с системой памяти [24], системы распознавания [25] и морфологической обработки [26] изображений. В России работы по созданию оптико-электронных процессоров ведутся, например, в ФИАН им. Лебедева [12-14] (А.Ю. Быковский) совместно в ВЦ РАН и МЭИ (А.Н. Аверкин), разработка запатентована. Эти системы, как правило, реализуют уже существующие математические модели.

Большой интерес представляют системы из второго класса, реализующие правило логического вывода «Обобщенный Modus Ponens» [27-36]. В этих системах используется, в том числе, и свойство Фурье-преобразования порождать нечеткость как свойство математической конструкции и, соответственно, методы Фурье-оптики. Например, в работе [34] используется пространственно-неинвариантный коррелятор совместного преобразования для независимого вычисления функции принадлежности ассоциаций входа с каждым из эталонных значений. В [35,36] Фурье-оптика используется для генерации набора значений функции принадлежности, соответствующих результату применения каждого логического правила к входному значению.

Отметим, что подход к разработке процессора исходя из примата физической обоснованности математической модели привел к формированию алгебры логики, основанной на Фурье-дуальности определяющих операций.

Работы в этом направлении ведутся в ряде университетов США - City University of New York, The University of Tennessee, the University of Miami, Northwestern University (Evanston, IL), Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, MA), University of Colorado (Boulder, CO) и других, а также в Китае, Японии.

В последнее время в научной периодике существенно уменьшилось количество информации о работах по оптическим процессорам нечеткой логики – пик публикаций

по этой тематике пришелся на вторую половину 80-х годов XX века. Вероятно, это связано с переходом работ в стадию инновационных разработок и, соответственно, закрытием коммерческой информации. В пользу этой версии говорит то, что в собственно научном плане вопрос был разработан достаточно глубоко и уровень научной проработки достаточен для перехода к разработке технологий. Разработки коммерческих продуктов в смежных областях (оптические логические процессоры и вентили, системы оптической памяти) ведут такие известные своими инновационными разработками фирмы как Highland Technology, Inc., Physical Optics Corp., InPhase Technologies, Digital Optical Technologies (Somerville, MA), INTEL.

Следует отметить, что, судя по доступным в научной литературе данным, в этих работах не использовались голографические методы и технологии. В то же время, в последнее время явно наметился интерес к возможностям использования в этом направлении голографических технологий, в том числе, к логическим процессорам, совмещенным с голографическими запоминающими устройствами. Перспективное направление здесь – разработка нейро-нечетких устройств, объединяющих гибкость и адекватность нечетких логик с вычислительной мощностью и способностью к самообучению искусственных нейронных сетей. В настоящее время прогресс в развитии систем искусственного интеллекта актуализировал задачу интеграции в одной модели (и одном устройстве) двух форм мышления, соответствующих функциональному разделению полушарий мозга – логического и образного. В этой связи именно оптические (голографические) технологии представляются наиболее перспективными в силу того, что обработка изображений суть обработка образов, а как логико-алгебраическое описание оптических схем, так и реализация логических операций оптическими методами, уже достигли достаточного уровня развития.

Представляет интерес также такое направление как квантовая голография, позволяющая реализовать идею квантовых вычислений [38-41]. В последнем случае важно наличие глубоких аналогий между математическими основаниями квантовых вычислений, Фурье-голографии и нечетких логик, открывающими перспективы для реализации методом Фурье-голографии как нечетких логик, так, возможно, и идеи квантовых вычислений.

## **2. Материалы для оптических процессоров.**

### **2.1. Квантовые точки и другие наночастицы.**

По прогнозам международной отраслевой ассоциации при ВТО Nano-Business Alliance к 2010 г. мировой рынок нанопродуктов и услуг вырастет до 1 трлн. долларов в год [42]. В 2000 г. федеральное правительство США признало нанотехнологию делом национальной безопасности. В итоге, в 2000 г. на исследования в этой области бюджетом США было предусмотрено 422 млн. долл., а общий объем финансирования с 2005 г. по 2008 г. составит 3,8 млрд. долларов [42]. Одним из наиболее перспективных направлений оптики нанометровых структур является нанофотоника, иначе интегральная фотоника, - область науки, главной целью которой является создание световых (фотонных) чипов, устройств с размером не более нескольких микрон, которые были бы оптическими аналогами электронных микрочипов. При этом не только размер микросхемы будет на 2-3 порядка меньше, но и быстродействие на 2 порядка выше.

Хотя значительное число продуктов нанотехнологий уже выпускается промышленностью (США и Японии), причем имеется сформировавшийся рынок сбыта, речь идет, в основном, о медицинских и микробиологических приложениях (см.,

например, [43-45]). Интегральная фотоника находится в той стадии, когда для достижения главной поставленной цели требуются дополнительные фундаментальные исследования. Развитие элементной базы (оптические ключи, оптические транзисторы, устройства для сбора, хранения и распределения информации) тормозится недостаточным уровнем теории, которая заметно отстает по сравнению с достижениями разработчиков. Разработки новых оптических затворов (ключей), фильтров, операционных усилителей и других элементов зачастую опираются на интуицию экспериментаторов [42-45], и это положение нельзя признать нормальным.

Наиболее известным и важным объектом нанофотоники считаются квантовые точки (КТ), которые являются полупроводниковыми кристаллами нанометрового размера. Под термином "квантовые точки" понимаются два вида объектов, объединенные общим для них эффектом размерного квантования электронного энергетического спектра, т.е. квантования, возникающего именно из-за нанометровых размеров полупроводникового кристалла.

Еще в 1980-1990-е годы стали известны полупроводниковые нанокристаллы, выращенные в однородной матрице [46], или спонтанно формирующиеся в процессе роста гетероструктур [47], для которых был отмечен данный эффект. Приятно отметить, что приоритет в этом вопросе принадлежит советским ученым [46]. КТ представляет собой более или менее сферический кристалл полупроводника (ядро), размер которого от 2 до 10 нм, реже 20-40 нм. Оболочка ядра, как правило, имеет 2-3 монослоя и может быть сформирована полупроводником (с достаточно большой шириной запрещенной зоны, гораздо больше, чем у ядра наночастицы) или диэлектриком. Возможно также формирование нанокристаллов с трехслойной оболочкой, причем внутренняя и внешняя оболочки КТ диэлектрические, а средняя представляет собой слой металла толщиной несколько десятых долей нанометра. Оболочка КТ часто покрыта отдельными органическими молекулами [42,43,48], которые предотвращают слипание КТ в агрегаты, ведущее к потере уникальных спектральных свойств КТ. Собственно КТ есть потенциальная яма для слабосвязанной электронно-дырочной пары или экситона, запертых в нанокристалле. Так как электронно-дырочные пары в собственно КТ заперты в объеме, размеры которого меньше соответствующего радиуса Бора, то КТ имеет дискретный энергетический спектр излучения и поглощения. Более того, если КТ помещена в фотонный кристалл, т.е. окружена искусственной диэлектрической решеткой с периодом порядка сотен нанометров, или просто помещена между двумя брэгговскими зеркалами (практически в лазерах на КТ используются оба этих метода), в ней при наличии накачки могут быть выполнены условия генерации света. Матрица со многими КТ может использоваться как активная среда в лазерах или светодиодах [42-49]. Хотя оболочка ядра КТ, имея толщину всего 1-3 монослоя, может обладать дефектами из-за действия поверхностного натяжения на нее, строгая регулярность оболочки, как кристалла, для оптических свойств КТ незначительна. Имеет значение регулярность именно кристаллического ядра, которое, благодаря оболочке, практически лишено дефектов (при отсутствии оболочки нанокристалл ядра сам подвержен действию сил поверхностного натяжения, вызывающего дислокации). С 2002-2003 гг. КТ в диэлектрических или полупроводниковых матрицах являются вполне доступным (от 10 до 300 долларов за миллиграмм) коммерческим продуктом [42-45].

Наличие оболочки у ядра КТ позволяет повысить квантовый выход люминесценции (т.е. увеличить долю электронов и дырок, рекомбинирующих путем испускания фотона), так что КТ – очень эффективный люминофор [42,43,48]. Отметим также, что квантовые точки обладают люминесценцией (а именно, флуоресценцией)

без фотовыцветания, т.е. снижения эмиссии в результате засветки, характерного для всех других люминофоров [42]. За это свойство КТ считаются перспективными для квантовой криптографии и квантовых вычислений. Кроме того, это свойство привело к тому, что КТ постепенно заменяют ранее известные люминофоры, используемые в микробиологии и медицине [42].

Лазеры на КТ обладают рядом достоинств. Это и довольно высокий КПД и наличие весьма большого числа частот в спектре излучения КТ, что позволяет эффективно управлять частотой выходного сигнала (см. ниже). Кроме того, лазеры на КТ могут иметь частоты генерации, недостижимые для обычных лазеров, а именно, лежащие в среднем и даже дальнем инфракрасном спектре [49]. Как и в обычных полупроводниковых лазерах, работающих на р-п переходе, у такого осциллятора, как КТ, метастабильных состояний нет. Преобладание индуцированного излучения над естественным оказывается возможным благодаря наличию непрерывного спектра акустических фононов в нанокристалле, которые при наличии накачки обеспечивают заполнение энергетического уровня, соответствующего генерации излучения. В отличие от естественных атомов, для которых энергетический спектр задан раз и навсегда самой природой, спектр квантовых точек можно задавать, контролируя размер наночастицы. Более того, можно управлять спектром уже изготовленной КТ, используя оптический или электрический контроль показателя преломления матрицы, в которой помещен ансамбль КТ. Управление частотой выходного сигнала лазера на КТ может осуществляться с помощью воздействия дополнительного светового потока на полупроводниковую матрицу, содержащую КТ, а также путем подведения потенциала к матрице (например, жидкокристаллической). При этом показатель преломления матрицы слегка изменяется, что приводит к существенному изменению спектра выходного излучения: матрица с активной средой представляет собой резонатор, и перестраивая этот резонатор, можно выпускать из него те или иные частоты из весьма обширного спектра излучения КТ.

Фотонный кристалл для лазера на КТ дороже пары обычных брэгговских зеркал, зато резонатор, образованный всего несколькими слоями фотонного кристалла, может иметь добротность гораздо выше (а именно порядка 10 000, т.е. не меньше добротности больших резонаторов с параболическими зеркалами, которые применяют в мощных лазерах). Соответственно, длина когерентности у таких лазеров гораздо больше, чем у лазеров, в которых активная среда с КТ находится между брэгговских зеркал. Полосы прозрачности фотонного кристалла можно перестраивать теми же путями, как указано выше.

Отметим, что накачка лазера на КТ может быть не только оптической, но и электрической. Проблема накачки решается, например, посредством захвата или туннелирования носителей заряда (электронов и дырок) из квантовой ямы в квантовую точку. Это способ наиболее практичен, так как не требует дополнительных источников света. Оптическая накачка осуществляется за счет поглощения ядром КТ фотонов, испущенных квантовой ямой. Квантовые ямы в таких лазерах обычно представляют собой слои полупроводника нанометровой толщины в многослойной матрице, разделенные двумерными решетками КТ, размещенными на этих слоях как на подложках. Такая матрица есть не что иное, как фотонный кристалл с периодическим включением КТ, и в таких лазерах используется оптическая накачка. Недавно проблема накачки была решена изящным путем [48], а именно за счет взаимодействия квантовой ямы с квантовой точкой, как двух связанных дипольных осцилляторов. В итоге, оптическая накачка лазеров на КТ оказывается более эффективной. Однако то, что для возбуждения соответствующих энергетических уровней квантовой ямы пока что



требуется источник света, ограничивает использование данного механизма на практике. Изготовители лазеров на КТ пока склоняются в пользу электрической накачки, ввиду ее относительной простоты, надежности и дешевизны.

Из сказанного ясны преимущества лазеров на КТ с матрицей в виде фотонного кристалла над полупроводниковыми лазерами с теми же габаритами и потребляемой мощностью. Основная нерешенная проблема в настоящий момент связана с технологическим разбросом размеров отдельных КТ (порядка 5%), отчего имеется неоднородное уширение их спектров, и уровень выходного сигнала оказывается не очень высоким, а значит и КПД не так велик. Если проблема технологического разброса размеров КТ будет решена с приемлемой себестоимостью активной среды, то КПД таких лазеров будет повышено. Так что будущее компактных лазеров, по нашему мнению, связано именно с КТ.

Основное применение КТ в нанофотонике – устройства управления световыми потоками, например оптические ключи. Оптический ключ на квантовых точках использует такое их свойство, как малоинерционная нелинейность, порог которой неизмеримо ниже, чем в сплошной среде из того же полупроводника, что и КТ [49,50]. Если система из многих КТ помещена в резонатор Фабри-Перо, например, находится между брэгговскими зеркалами, то при отсутствии управляющего сигнала, центральная частота которого соответствует резонансному поглощению в КТ, сигнал той частоты, на которую настроен резонатор, полностью проходит через брэгговские зеркала. При подаче управляющего светового сигнала он полностью поглощается квантовыми точками. Если бы КТ не было, управляющий сигнал проходил бы через матрицу без взаимодействия с ней и не оказывал нелинейного воздействия на резонатор. Роль КТ состоит в том, чтобы обеспечить достаточный уровень взаимодействия управляющего сигнала с матрицей, и тем самым, нелинейное изменение показателя преломления матрицы. При этом сравнительно слабый управляющий сигнал обеспечивает достаточное изменение показателя преломления матрицы, и резонатор Фабри-Перо перестраивается на другую частоту. Таким образом, при наличии управляющего сигнала управляемый сигнал не проходит через резонатор, т.е. оптический ключ размыкается. Можно аналогичным способом сделать ключ, работающий, наоборот, на пропускание. Быстродействие таких ключей не менее  $10^{-13}$  с, т.е. на 3 порядка лучше, чем у фарадеевских или керровских ключей [49-51].

Очевидно, что оптический ключ на КТ структурно подобен лазеру на КТ. Основное отличие состоит в том, что в ключе не выполнено условие генерации на частоте управляющего сигнала, так как целью является изменение свойств пассивной матрицы. Таким образом, для дискретного (цифрового) управления сигналами, главным свойством КТ оказывается способность быть высокоэффективным осциллятором. Но этой же способностью обладает и любой резонансный осциллятор. Здесь мы переходим к значительно менее известным, но, на наш взгляд, не менее перспективным металлическим наночастицам (серебро или золото). Такие наночастицы, получают обычно химическим путем, они имеют, как правило, сферическую или эллипсоидальную форму. Они обладают индивидуальным резонансом поляризуемости в области видимого света, частота которого зависит от размера и формы частицы. На резонансе вещественная часть диэлектрической проницаемости металла, которая в видимом и в ближнем ИК диапазонах отрицательна и очень сильно зависит от частоты, обращается в (-2). Этот резонанс связан с возбуждением на поверхности частицы локализованного плазмона. Такие плазмоны – суть собственные коллективные колебания электронов проводимости, что связано с плазменной природой проводимости металла на оптических частотах. Плазмон в

металлической наночастице (МНЧ) может играть роль экситона в полупроводниковой КТ.

Основная часть исследователей МНЧ пытается на их основе создать так называемые оптические метаматериалы, т.е. среды с резонансными магнитными свойствами на оптических частотах. В этом разделе мы данного вопроса не касаемся, так как не очень ясны перспективы использования метаматериалов в информационно-коммуникационных технологиях, даже если они будут получены. На самом деле все метаматериалы, которые разрабатываются в настоящее время, предназначены для сугубо исследовательских целей (например, преодоление дифракционного предела разрешения при волновых расстояниях от изображения до источника). Четко просматривается только одно информационное приложение метаматериалов - увеличение емкости компакт-дисков, где размер ячейки действительно ограничен дифракционным пределом. Однако МНЧ можно использовать не только для метаматериалов. В 1994 г. было предложено использовать их для резкого снижения порога нелинейных свойств полупроводниковой среды. При облучении сигналом соответствующей частоты (частоты плазмонного резонанса металла), поле вокруг такой частицы имеет квазистатический характер и значительно (на порядок) превосходит поле падающей волны [52]. Поэтому ее можно использовать для создания полупроводникового оптического ключа на резонаторе Фабри-Перо, аналогичного уже созданным ключам на КТ. В таком затворе МНЧ заключены в полупроводниковую оболочку [53-55], причем уровень поля в оболочке, достаточный для проявления ее нелинейных свойств, теоретически может соответствовать очень низкой плотности светового потока в управляющем сигнале. За счет эффекта ближнепольной интерференции полей, переизлученных соседними частицами, можно достичь эффекта локального усиления светового поля на 1-2 порядка. Поэтому существенная модификация показателя преломления оболочки МНЧ, достаточная для того, чтобы сделать резонатор Фабри-Перо непрозрачным для входного сигнала, достигается при очень малой плотности потока, соответствующей падению отдельных фотонов на МНЧ. Таким образом, оптический ключ на МНЧ получается менее энергоемким, и притом гораздо более дешевым в изготовлении, чем аналогичное устройство на КТ, рассмотренное выше. Недостатком оптических ключей на МНЧ является не очень высокое быстродействие, такое же, как у керровских и фарадеевских затворов. Дело в том, что полупроводниковая оболочка МНЧ имеет поликристаллическую структуру, вырастить ее в виде монокристалла не удастся. Поэтому для модификации показателя преломления используется не механизм решеточной нелинейности, как в случае КТ, а электрон-электронная (зарядовая) нелинейность. Эта нелинейность инерционна, и время срабатывания затвора составляет 0.2-0.3 наносекунды. Конечно, такой ключ срабатывает от очень слабого управляющего сигнала, но зато он все-таки дороже, чем фарадеевская ячейка. Если бы удалось поднять его быстродействие хотя бы в 3-4 раза, это сделало бы такой ключ привлекательным для рынка. С этой целью авторы данного обзора предлагают использовать вместо МНЧ в полупроводниковой оболочке полупроводниковую наночастицу размером несколько десятков нанометров в металлической (серебряной) оболочке. Такая частица, как и ядро КТ, может быть выполнена в виде монокристалла. Ее отличие от КТ определяется иными свойствами металлической оболочки по сравнению с полупроводниковой или диэлектрической оболочкой КТ, так что глубокой потенциальной ямы для электронно-дырочной пары или для экситона не образуется. В данном случае используются нелинейные свойства полупроводникового ядра и резонансные свойства металла оболочки на частоте управляющего сигнала.

Эффект локального усиления светового поля нанометровой металлической оболочкой не так силен, как металлическим шариком нанометрового размера, однако может достигать, по крайней мере, одного порядка за счет использования ближнепольной интерференции полей, переизлученных соседними наночастицами. Поэтому высокое быстродействие такого затвора может сочетаться с довольно низким, по сравнению с обычными оптическими затворами, уровнем управляющего сигнала.

Однако, МНЧ перспективны не только в нелинейном режиме, и не только нелинейный режим требуется для оптико-информационных устройств. Рассмотрим вопрос согласования входа или выхода интегрального (пленочного) оптического волновода. Использование МНЧ, расположенной на поверхности волновода, на наш взгляд, позволило бы эффективно ввести (или вывести) световое поле плоской волны в волновод, причем МНЧ играла бы роль ретранслятора. В литературе имеется достаточное количество работ, посвященных волноводным свойствам МНЧ, например [56-60]. Волноводы на МНЧ представляют собой частный случай так называемых нанопроводов, т.е. линий связи между отдельными четырехполюсниками нанометрового размера. Разумеется, нанометровые провода тоже необходимы для создания оптических чипов. Однако ключевую роль для нанофотоники играют не только и не столько световые нанопровода, сколько устройства, позволяющие осуществить частотную селекцию сигналов, например, мультиплексоры и демultipлексоры, а также устройства, позволяющие осуществить хранение сигнала на время его детектирования. На возможные перспективы построения таких нанометровых устройств на базе серебряных сферических частиц указано в наших последних работах [61-64]. Мультиплексоры и демultipлексоры могут быть получены на основе так называемых двухфазных цепочек МНЧ, размещенных в стеклянной матрице и возбужденных в частотной области вытекающих волн. В этой области, как показывает теория, можно обеспечить угловую дисперсию вытекающих волн на уровне не менее 0.1 градуса на нанометр, что на порядок больше, чем у фотонно-кристаллических суперпризм миллиметрового размера [61,62]. В итоге пространственное разделение сигналов излучаемых цепочкой будет возможно в масштабе 2-3 микрон.

В работе [52] было впервые рассмотрена обработка светового сигнала в процессе его распространения в структуре, где скорость света замедляется на 6-7 порядков. Такой волновод (фотонный кристалл, работающий в нелинейном режиме) представляет собой фактически устройство хранения оптической информации, которая может храниться в ней в течение той доли секунды, за которую через нее проходит световой сигнал. За работой [52] последовал целый ряд работ, посвященных обработке световых сигналов в этом режиме, названном режимом медленных фотонов. Однако этот режим исследован и реализован только в структуре большого размера. Возможно ли подобное сверхзамедление света в нанофотонике? В работе [63] теоретически показано, что подобный режим распространения видимого света может быть достигнут без каких-либо нелинейных эффектов в цепочке МНЧ при соответствующем подборе ее параметров. Теоретически предсказывается, что коэффициент замедления света может быть равен относительной частотной полосе светового сигнала, так что для идеально монохроматической волны некоторой частоты волна оказывается стоячей. Длина такой стоячей волны никак не связана с наличием или отсутствием границ у цепочки. В [61] данный режим назван резонаторной модой.

В итоге, мы можем сформулировать следующие выводы:

1. Все исследования по нанофотонике можно разделить на исследования, связанные с полупроводниковыми КТ и с МНЧ.

2. В области полупроводниковых КТ занято огромное число исследователей, и имеется огромный прогресс, тогда как в области МНЧ прогресс невелик.

3. Исследованию в области МНЧ подлежат следующие принципиальные вопросы:

3.1 Возможно ли создание малоинерционного полностью оптического ключа на базе полупроводниковых частиц в металлической оболочке?

3.2 Можно ли повысить быстродействие инерционного полностью оптического ключа на базе МНЧ с полупроводниковой оболочкой или удешевить технологию изготовления таких ключей?

3.3 Насколько эффективны ввод и вывод световой волны из интегрального волновода с помощью МНЧ, расположенной на его поверхности?

3.4 Возможно ли на практике получение режима медленных фотонов в цепочке МНЧ, пригодного для хранения информации на время детектирования сигнала?

3.5 Каковы практические перспективы построения мультиплексоров и демultipлексоров на основе цепочек МНЧ?

Читателям, заинтересованным в подробном ознакомлении с оптикой наночастиц таких как КТ и МНЧ, рекомендуется превосходный сборник под редакцией А.В. Федорова [65].

## 2.2. Метаматериалы.

Как было показано выше, за последние несколько лет произошли существенные изменения в концепции создания компонентов для оптических устройств и систем, в том числе для оптических вычислителей. Часть ставок ставится на использование искусственных материалов, которые благодаря своим необычным свойствам получили название *метаматериалов*. Эти структуры замечательны тем, что при их помощи удается реализовать такие электродинамические свойства, которые подчас не встречаются в обычных натуральных материалах.

Одним из интересных примеров таких сред являются фотонные кристаллы [66,67]: материалы обладающие зонной структурой в оптическом диапазоне, и, тем самым, являющиеся аналогом полупроводников для светового излучения. Это периодические структуры из диэлектрических включений, функционирующие на частотах соответствующих пространственным резонансам, когда длина волны в структуре становится сравнимой с ее периодом. Таким образом, при помощи периодичности структуры удается получить материал, в котором свет не может распространяться на некоторых частотах (при том, что этот материал состоит из диэлектрика, в котором свет этих частот беспрепятственно распространяется).

Этот эффект используется для создания волноводов. Фотонный кристалл в запрещенном режиме препятствует распространению света, но при помощи внесения в структуру дефектов (удаление цепочек или плоскостей включений) удается выделить направления, в которых свет может распространяться. Волноводы, основанные на фотонных кристаллах имеют несколько преимуществ по сравнению с обычными диэлектрическими волноводами. Во-первых, их намного легче интегрировать в сложные оптические системы. Во вторых, фотонные волноводы можно беспрепятственно поворачивать на практически любой угол, не опасаясь потерь на рассеивание, в отличие от обычных диэлектрических волноводов. Таким образом, при помощи фотонных кристаллов можно создавать сколь угодно сложные компактные волноводящие структуры для оптических приложений.

Фотонные кристаллы в режиме прохождения используются для создания суперпризм с крайне высоким разрешением по частоте. Этот эффект обусловлен

сильной пространственной дисперсией в фотонных кристаллах, которая не наблюдается в обычных материалах в оптическом диапазоне.

Кроме фотонных кристаллов среди метаматериалов следует отметить «среды Веселаго» [68,69], также называемые «среды левши», являющиеся изотропными средами с отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостями. Это достаточно курьезные материалы с крайне экзотическими свойствами. Волны в таких средах обратные – у них волновой вектор и вектор Пойнтинга направлены в разные стороны. Более того при рефракции на поверхности между воздухом и такой средой наблюдается эффект отрицательной рефракции – свет отклоняется в противоположную сторону в отличие от обычных диэлектриков.

Благодаря эффекту отрицательной рефракции удастся создать псевдо-линзу на основе плоскопараллельной пластины среды Веселаго: устройство позволяющее фокусировать излучение точечного источника. Однако, это не самое главное свойство такой линзы. На самом деле, эта линза не только фокусирует распространяющиеся гармоники (дальнее поле), но еще и усиливает затухающие! Плоские псевдо-линзы позволяют передавать детали изображений, много меньшие, чем длина волны, и, тем самым, позволяют преодолеть классический дифракционный предел разрешения обыкновенных линз. Это удивительное свойство, открытое Джоном Пендри [69] послужило толчком к исследованию метаматериалов и сред Веселаго в частности.

На данный момент конкретные реализации сред Веселаго в оптическом диапазоне находятся в стадии разработки (в микроволновом диапазоне первые экземпляры сред Веселаго были созданы около пяти лет назад), однако это направление рассматривается крайне перспективным. Возможность передачи изображений с разрешением меньше длины волны является серьезным прорывом в различных областях знаний. Для оптических приложений наиболее важными областями применения являются ближнепольная микроскопия, а также разработка оптических накопителей. Кроме того, предполагается, что метаматериалы найдут применение при миниатюризации различных оптических и микроволновых устройств, где будет использоваться их свойство передавать на расстояние изображения с пространственным разрешением, меньшим длины волны. Они снимут дифракционное ограничение для разрешения оптических систем, которое казалось долгое время непреодолимым. В качестве одного из наиболее важных примеров достаточно упомянуть возможность использования линз со сверхразрешением для увеличения емкости оптических носителей (DVD), путем уменьшения области записи, которая в данный момент ограничена дифракционным пределом.

Эффекты обратных волн и отрицательной рефракции (присущие среде Веселаго) также наблюдаются и в фотонных кристаллах, на частотах близких к границам запрещенных зон [70-76]. Более того, плоско-параллельные пластины фотонных кристаллов могут с успехом быть использованы для передачи изображений с разрешением, меньшим, чем длина волны [77,78]. Однако, в работе [79], в фотонных кристаллах [77] наблюдается механизм передачи изображений, отличный от принципа, сформулированного в работах В.Г. Веселаго [66], Дж. Пендри [67] и Р.А. Силина [71].

В соответствии с этим принципом, который называется канализацией изображений [79], для передачи деталей изображения меньших, чем длина волны не требуется эффектов обратных волн и отрицательной рефракции. Ключевым требованием является то, что фотонный кристалл должен обладать плоскими изочастотными характеристиками [70-73], а также то, что толщина пластины должна удовлетворять условию толщинного резонанса Фабри-Перо. В такой системе изображение эффективно трансформируется в распространяющиеся плоские волны,

которые переносят его с одной поверхности линзы на другую. Таким образом, для реализации плоских псевдо-линз, обладающих разрешением меньшим, чем длина волны, не обязательно пытаться создавать среды Веселаго [68,69].

В оптическом диапазоне хорошими кандидатами для реализации режима канализации остаются фотонные кристаллы, но для улучшения разрешения линз лучше использовать металло-фотонные кристаллы, отличающиеся от обычных диэлектрических фотонных кристаллов тем, что их элементами являются металлические включения (плазмонные наночастицы). Металло-фотонные кристаллы в оптической области обладают запрещенными зонами, появление которых соответствует плазмон-поляритонным резонансам, наблюдаемым на частотах много меньших, чем решеточные резонансы обычных фотонных кристаллов. Это резонансы металлических включений, образующих фотонных кристалл.

В режиме канализации фотонные кристаллы поддерживают распространение узких пучков, аналогичных солитонам в нелинейных средах. Следует отметить, что фотонные кристаллы функционируют в линейном режиме, т.е. интенсивность канализуемого пучка может быть сколь угодно малой (в отличие от случая солитонов, которые должны обладать значительной интенсивностью для поддержания своего распространения в нелинейной среде).

В ближайшем будущем ожидается экспериментальное осуществление канализации субволновых изображений на оптических частотах на расстояния порядка длины волны и более от источника, а также разработка сканирующих ближнепольных оптических микроскопов, зонд которых защищен от микромеханических воздействий со стороны исследуемой поверхности фотонным кристаллом, функционирующем в режиме канализации изображений.

## **Заключение**

В данном обзоре рассмотрены основы аналоговых оптических вычислений, аналоговые оптические процессоры и цифровые оптические процессоры, оптические процессоры нечеткой логики, а также перспективные материалы и технологии для создания элементной базы будущих оптических компьютеров. Показано, что именно оптические технологии с привлечением достижений нанофотоники представляются наиболее перспективными для создания компьютерных систем следующего поколения.

## **Благодарности**

П.А. Белов благодарит совет по грантам Президента Российской Федерации (грант № МК-2672.2005.2), а также федеральное агентство по науке и инновациям (государственный контракт № 02.444.11.7226, шифр 2006-РИ-111.0/002/003, в рамках федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы) за финансовую поддержку исследований.

## **Список литературы**

1. *Исихара С.* Оптические компьютеры: Новая эра науки. - М.: Наука, 1992. - 96 с.
2. *Акаев А.А., Майоров С.А.* Оптические методы обработки информации. - М.: Высшая школа, 1988. - 237 с.
3. *Евтихийев Н.Н., Каринский С.С., Мирвицкий Д.И.* Когерентно - оптические устройства передачи и обработки информации. - М., 1987. - 158 с.

4. Морозов В.Н. Оптоэлектронные матричные процессоры. - М.: Радио и связь, 1986. – 112 с.
5. <http://www.lenslet.com/news.asp>
6. <http://www.lenslet.com>
7. [http://lenslet.com/docs/EnLight256\\_White\\_Paper.pdf](http://lenslet.com/docs/EnLight256_White_Paper.pdf)
8. Carls Y.A. Optical computing nears reality. // Laser Focus World, 1990, V. 26, P. 53-54.
9. Craft N.C., Prise M.E. Processor does light logic. // Laser Focus World, 1990, V. 26, P. 191-200.
10. 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.
11. Guilfoyle P.S., McCallum D.S. High-speed low-energy digital optical processors. // Optical Engineering, 1996, V. 35, P. A3-A9.
12. Arestova M.L., Bykovsky A.Yu. Possibilities for Optoelectronic Parallel Image Processing Based on Principles of Multiple-Valued Logic. // Photonics and Optoelectronics, 1994, v.2, i.4, pp.169-180.
13. Арестова М.Л., Быковский А.Ю. Методика реализации оптоэлектронных схем многопараметрической обработки сигналов на основе принципов многозначной логики // Кв. Электр., 1995, т.22, в.10, с.980-984.
14. Аверкин А.Н., Быковский А.Ю. ОПТОЭЛЕКТРОННОЕ ЛОГИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО, Патент РФ 2128356.
15. Liu L. Optical implementation of parallel fuzzy logic. // Opt. Commun. 1989, v.73, 183-187.
16. Lin S., Zhang S., Chen C., and Kumazawa I. Optical multiple-variable fuzzy logic array using shadow-casting. // Microwave Opt. Technol. Lett. 1993, v.6, 106-109.
17. Zhang S. and Chen C. Parallel optical fuzzy logic gates based on spatial area-encoding technique. // Opt. Commun. 1994, v.107, 11-16.
18. Lin S., Zhang S., Chen C., and Kumazawa I. Optical implementation of a spatial-variant fuzzy logic array // Opt. Commun. 1993, v.97, 162-166.
19. Konishi T., Tanida J., and Ichioka Y. Visual-area coding technique (VACT): optical parallel implementation of fuzzy logic and its visualization with the digital halftoning process. // Appl. Opt. 1995, v.34, 3097-3102.
20. Zhang S., Karim M. A., Chen X., and Alam M. F. Optical implementation of a parallel fuzzy flip-flop. // Microwave Opt. Technol. Lett. 1997, v.16, 44-48.
21. Jing H., Liu L., Qian F., Ruan H., Li Q., and Bu Y. Optical implementation of parallel fuzzy logic using a single electron trapping device. // Optic (Stuttgart) 1999, v.110, 471-475.
22. Caulfield H.J. Fuzzy Optical Metrology. // IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 1996, v.4, №2, pp.206-208.
23. Caulfield H.J. Amplitude-based optical fuzzy logic. // Microwave Opt. Tech. Lett. 1998, v.19, 332-333.
24. Jiang T. and Li Y. Content-addressable memory implementations for the three key operations of fuzzy logic. // Opt. Eng. 1999, v.38, 477-484.
25. Srinivasan R., Kinser J., Schamschula M., Shamir J., Caulfield H.J. Optical Syntactic Pattern Recognition by Fuzzy Scoring. // Opt. Letters, 1996, v.21, №11, pp.815-817.
26. Zhang J., Liu L., Li G., Shao L. Fuzzy Reasoning Morphological Operators and their Optical Implementation. // Appl. Opt. 1997, v.36, 11, pp.2328-2333.
27. Itoh H., Mukai S., and Yajima H. Optoelectronic fuzzy inference system based on beam scanning architecture. // Appl. Opt. 1994, v.33, 1485-1490.

28. *Itoh H., Yamada T., Mukai S., Watanabe M., and Brandl D.* Optoelectronic implementation of real-time control of an inverted pendulum by fuzzy-logic-control units based on a light-emitting-diode array and a position-sensing device. // *Appl. Opt.* 1997, v.36, 808-812.
29. *Itoh H., Shimizu M., Ogura M., Mukai S., Watanabe M.* Optoelectronic Fuzzy Inference Architecture Using Beam-steering Vertical Cavity Surface Emitting Laser Diodes. // *SPIE Proc. on Int. Conf. "Optics in Computing OC'98"*, v.3490.
30. *Zhou S., Wu W., Campbell S., Yeh P., and Ling H.* Optical implementation of fuzzy-set reasoning. // *Appl. Opt.* 1994, v.33, 5335 - 5347.
31. *Shao L., Liu L., and Li G.* Programmable fuzzy associative memory processor. // *Opt. Commun.* 1996, v.129, 89-97.
32. *Zhang S. and Karim M. A.* Optical fuzzy systems based on efficient implementation of a fuzzy associative memory. // *Opt. Lett.* 1998, v.23, 292 - 294.
33. *Zhang S. and Karim M. A.* Parallel optical fuzzy logic inference using a SLM-based architecture. // *Opt. Laser Technol.* 2000, v.32, 407-412.
34. *Zhang S. and Karim M. A.* Parallel fuzzy inference and logic processing with a joint transform correlator. // *Opt. Eng.* 2001, v.40(11) 2400-2406.
35. *Gur E., Mendlovic D., and Zalevsky Z.* Optical implementation of fuzzy-logic controllers: part I. // *Appl. Opt.* 1998, v.37, pp.6937-6945.
36. *Zalevsky Z., Mendlovic D., and Gur E.* Discussion on multi-dimensional fuzzy control// *Appl. Opt.* 2000, v.39, №2, pp.333-336.
37. *Caulfield H.J., Westphal J.* The logic of optics and the optics of logic. // *Information Sciences*, 2004, Vol. 162, 1, P. 21-33.
38. *Peruš M., Dey S.K.* Quantum systems can realize content addressable associative memory. // *Appl. Math. Lett.* 2000. V. 13. № 8. P. 31-36.
39. *Peruš M.* Neural networks as a basis for quantum associative networks. // *Neural Netw. World.* 2000. V. 10 . № 6. P. 1001-1013.
40. *Peruš M., Bischof H., Caulfield H.J., Loo C.K.* Quantum-implementable selective reconstruction of high-resolution images. // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. № 33.
41. *Loo C. K., Peruš M., , Bischof H* Object Recognition Using Quantum Holography with Neural-Net Preprocessing // *Оптический журнал*, 2005, №5.
42. *Роко М.* Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований. М.: Фазис, 2004.
43. *Малеев Н.А., Егоров А.Ю., Жуков А.Е. и др.* 2001, ФТП, 881.
44. <http://www.evidenttech.com/nanomaterials/quantum-dot-nanomaterials.php>
45. <http://www.evidenttech.com/qdot-definition/quantum-dot-about.php>
46. *Екимов А.И., Онищенко А.А.*, Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 345.
47. *Murray C.B., Norris D.J., Bawendi M.G.*, *JACS* 1993, 115, 8706.
48. *Alchalabi K., Zimin D., Kostorz G., and Zogg H.* *Phys. Rev. Lett.*, 2003, v.90, 026104.
49. *Kastalsky A., Vorobjev L.E., Firsov D.A., Zerova V.L., Towe E.*, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 2001, 37, 1356-1362.
50. *Vlasov Y. A., Bo X.-Z., Sturm J.C., Norris D.J.*, *Nature* 414, 2001, 289-293
51. *Achermann M., Petruska M.A., Kos S., Smith D.L., Koleske D.D., Klimov V.I.* Optical switch of quantum dots, *Nature*, 2004, v. 429, 642-645.
52. *Almeida V.R., Barrios C.A., Panepucci R.R., Lipson M.*, All-optical control of light on a silicon chip, *Nature* 2004, 431, 1081-1084.
53. *Vlasov Y.A., O'Boyle M., Hamann H.F., McNab S.J.*, Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides, *Nature* 2005, 438, 65-69.



54. Cowan A.R. and Young J.F., Nonlinear optics in high refractive index contrast periodic structures, *Semicond. Sci. Technol.* 2005, **20**, R41–R56.
55. Hui P. M., Xu C., Stroud D., Second-harmonic generation for a dilute suspension of coated particles, *Phys. Rev. B* **69**, 2004, 014203.
56. Quinten M, Leitner A., Krenn J.R, et al. Electromagnetic energy transport via linear chains of silver nanoparticles. *Optics Letters*, 1998, 23, 17, 1331.
57. Krenn J.R., Dereux A., Weeber J.C., et al. Squeezing the optical near-field zone by plasmon coupling of metal nanoparticles. *Physical Review Letters*, 1999, 82, 12, 2590.
58. Brongersma M.L., Hartman J.W., Atwater H.A.. Electromagnetic energy transfer and switching in nanoparticle chain arrays below the diffraction limit. *Physical Review B*, 2000, 62, 24, R16 356.
59. Maier S.A., Brongersma M.L., Kik P.G., Sheffer Meltzer, Ari A. G. Requicha, Atwater H.A.. Plasmonics – a route to nanoscale optical devices. *Advanced Materials*, 2001, 13, 1.
60. Maier S.A., Kik P.G., Atwater H.A.. Optical pulse propagation in metal nanoparticle chain waveguides. *Physical Review B*, 2003, 67, 205402.
61. Weber W.H., Ford G.W. Propagation of optical excitations by dipolar interactions in metal nanoparticle chains. *Physical Review B*, 2004, 70, 125429.
62. К.Р. Симовский, С.А. Третьяков, Волноводные моды в цепочках резонансных диполей, на рецензии в журнале «Радиотехника и электроника».
63. Симовский К.Р., Третьяков С.А., Виитанен А., Сверхлинза на основе серебряных сфер, на рецензии в журнале «Письма в ЖТФ».
64. Simovski C.R., Viitanen A., Tretyakov S.A., Resonator mode in chains of silver spheres and its possible application, *Phys. Rev.* 2005, vol. 72, 10120-10129.
65. Оптика наноструктур. Под редакцией А.В. Федорова: СПб. «Недра», 2005 г.
66. Sakoda K. *Optical Properties of Photonic Crystals*. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
67. Joannopoulos J., Mead R., Winn J. *Photonic crystals: molding the flow of light*. NJ: Princeton University Press, 1995.
68. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$ . // *Успехи физ. наук*. 1967. Т. 92. № 3. С. 517-526.
69. Pendry J.B. Negative refraction index makes perfect lens. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. P. 3966-3969.
70. Силин Р.А. Оптические свойства искусственных диэлектриков. // *Изв. выс. уч. зав. – Радиоп физика*. 1972. Т. 15. № 6. С. 809–820.
71. Силин Р.А. О возможности создания плоскопараллельных линз. // *Оптика и спектроскопия*. 1978. Т. 44. № 1. С. 189–191.
72. Силин Р.А., Чепурных И.П. О средах с отрицательной дисперсией. // *Радиотехника и электроника*. 2001. Т. 46. № 10. С. 1212-1217.
73. Силин Р.А. Периодические волноводы. М.: ФАЗИС, 2002.
74. Notomi M. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap // *Phys. Rev. B*. 2000. V. 62. № 16. P. 10696-10705.
75. Белов П.А., Симовский К.Р. Эффекты обратных волн и отрицательной рефракции на оптических частотах,- В кн.: *Современные технологии*, СПб: СПбГУИТМО. 2003. С. 56-75.
76. Белов П.А., Симовский К.Р., Третьяков С.А. Обратные волны и отрицательная рефракция в фотонных (электромагнитных) кристаллах. // *Радиотехника и Электроника*. 2004. Т. 49. № 11. С. 1199-1207.

77. Luo C.L., Johnson S.G., Jannopoulous J.D., Pendry J.B. All-angle negative refraction without negative effective index. // *Phys. Rev. B.* 2002. V. 65. P. 201104.
78. Luo C.L., Johnson S.G., Jannopoulous J.D., Pendry J.B. Subwavelength imaging in photonic crystals. // *Phys. Rev. B.* 2003. V. 68. P. 045115.
79. Belov P.A., Simovski C.R., Ikonen P. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals. // *Phys. Rev. B.* 2005. V. 71. P. 193105 (статья также включена в *Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology.* 2005. V. 11. № 23).