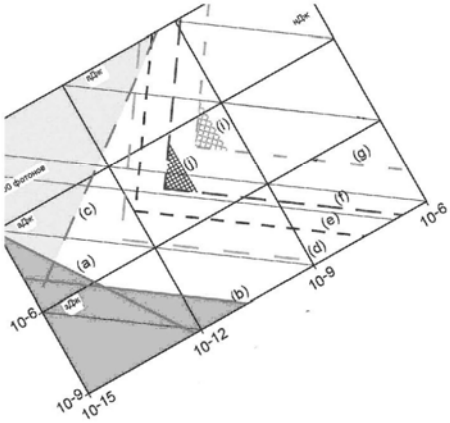
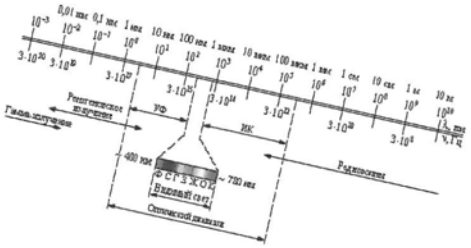
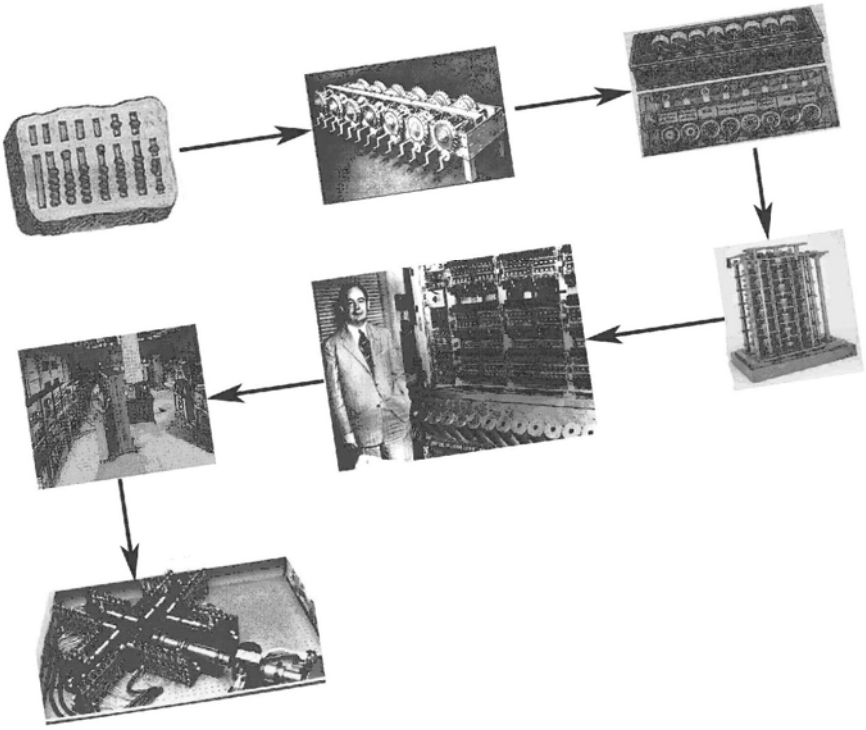




В.Г. Беспалов

ОСНОВЫ ОПТОИНФОРМАТИКИ

Часть I.
Информационные технологии – от электронного к оптическому компьютеру



Санкт-Петербург
2006

**Министерство образования и науки
Российской Федерации**

Федеральное агентство по образованию

**Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики**

Кафедра фотоники и оптоинформатики

В.Г. Беспалов

ОСНОВЫ ОПТОИНФОРМАТИКИ

Часть I. Информационные технологии – от электронного к оптическому компьютеру

**Учебное пособие по дисциплине
«Основы оптоинформатики»**

Санкт-Петербург
2006

УДК 535+519.7; 681.3.01
«ОСНОВЫ ОПТОИНФОРМАТИКИ
Часть I. Информационные технологии – от электронного к оптическому компьютеру»
СПб: СПбГУ ИТМО, 2006 – 52 с.

АННОТАЦИЯ

В учебном пособии рассмотрены физические ограничения на параметры электронных компьютеров, возможности оптических систем по передаче, записи и обработке информации, рассмотрены схемные решения и принцип работы оптических компьютеров.
Предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению фотоника и оптоинформатика, а также для студентов других оптических и информационных специальностей.

Учебное пособие одобрено к изданию на заседании факультета фотоники и оптоинформатики, протокол № 3 от 27.11.2006 г.

© Санкт-Петербургский
государственный университет
информационных технологий,
механики и оптики, 2006

© В.Г. Беспалов, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4
§1. Информационные технологии – от абака к электронному процессору 5
§2. Предельные возможности электронной компьютерной техники 19
§3. Оптические технологии в информатике 27
§4. Аналоговые оптические вычисления и процессоры 30
§5. Оптический процессор Enlight256 38
§6. Голографические методы обработки информации. **Ошибка! Закладка не определена.**
§7. Цифровые оптические процессоры ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
Контрольные вопросы. ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
Список литературы ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
К истории создания факультета фотоники и оптоинформатики..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Введение

В последнее десятилетие традиционные информационные технологии, основанные на электронной технике, достигли некоторых физических и технических ограничений, при продолжающемся росте потребительского спроса на скорость и объем передаваемой информации. Ключевым решением данной проблемы явилось объединение оптических и информационных технологий, и начало XXI века характеризуется стремительным прогрессом в области разработки и внедрения оптоинформационных технологий. Термин «Оптоинформатика» обозначает область науки и техники, связанной с исследованием, разработкой, созданием и использованием новых материалов, технологий, приборов и устройств, предназначенных для передачи, приема, обработки, хранения и отображения информации на основе оптических технологий, с использованием материального носителя информации – светового фотона. Главный вектор оптоинформатики сориентирован на миниатюризацию и интеграцию оптических элементов, устройств и систем, создание полифункциональных оптических материалов, элементов и систем, перевод аналоговых оптических устройств в цифровые и т.п. Одним из достижений оптоинформатики явилось создание компанией Lenslet (http://www.lenslet.com/) в конце 2003 г. коммерческого оптического процессора “Enlight256” с быстродействием в тысячу раз превышающим электронные аналоги с рекордной производительностью в 8 терафлоп (8 триллионов операций с плавающей точкой в секунду). Другим достижением явилась прокладка 3000 километровой волоконно-оптической солитонной линии связи между Пертом и Мельбурном (Австралия), со 160 спектральными каналами и скоростью передачи 1,6 терабит в секунду. Компания Intel объявила в 2004 г. программу «Кремниевая фотоника» (Silicon Photonics), ориентированную на использование оптических технологий при передаче информации от одного электронного процессора к другому.

В 2004 г. в СПб ГУ ИТМО было открыто новое направление подготовки бакалавров и магистров «Фотоника и оптоинформатика», одной из федеральных образовательных компонент которого, является учебный курс «Основы оптоинформатики». В курсе рассматриваются физические основы и направления развития оптической, лазерной, телекоммуникационной и вычислительной техники, дается общий обзор проблем оптоинформационных технологий. Данное учебное пособие предназначено для ознакомления бакалавров с первой частью курса «Основы оптоинформатики» - предельными возможностями электронной техники и возможностями оптических систем по передаче, записи и обработке информации.

§1. Информационные технологии – от абака к электронному процессору

В настоящее время термин "информатика" все чаще заменяется более содержательным термином "информационные технологии" (ИТ), обозначающим с одной стороны, разработку, проектирование и производство компьютеров, их периферии и элементной базы, сетевого оборудования, алгоритмического и системного программного обеспечения, а с другой - их применение в системах самого различного назначения. В настоящее время ИТ становятся важнейшим двигателем научно-технического прогресса и развития человеческого общества. Основной технической базой ИТ являются средства обработки, хранения и передачи информации. Скорость их развития поразительна, в истории человечества этому бурно развивающемуся процессу нет аналога. Последние десятилетия характеризуются возрастанием интереса к истории развития информатики, в первую очередь к истории появления первых цифровых вычислительных машин и их создателям. В большинстве развитых стран созданы музеи, сохраняющие образцы первых машин, проводятся конференции и симпозиумы, выпускаются книги о приоритетных достижениях в этой области. История создания средств цифровой вычислительной техники уходит в глубь веков. Она увлекательна и поучительна, с нею связаны имена выдающихся ученых мира.

Изначально носителем информации была речь. Развитие речи, языка - объективный процесс в развитии общества и является первой информационной революцией на заре формирования человека разумного (40 тыс. лет до н.э.). Развитие речи помогало общению, передаче накопленного опыта и знаний. В дальнейшем возникла потребность в передаче информации знаковым образом - появилось первобытное искусство — целые галереи наскальных рисунков с изображением животных и охоты сохранились в пещерах, например в Альтаирской пещере (Испания), которую один из археологов назвал «первобытной Сикстинской капеллой», в пещере Монтеспан (Франция), Костенки (на Дону) найдены многочисленные статуэтки женщин, животных. К ранним знаковым информационным системам можно отнести приметы, гадания, изобразительное искусство, музыку, графику, танец и т.д. Постепенно развивался процесс обособления и подъема духовной сферы — изобразительного и музыкального искусства, архитектуры. Изобретение и освоение письменности стало второй информационной революцией (около 5 тыс. лет до н.э.). К каменному веку относятся первые примеры информационной символики — пиктографическое письмо (рисунки) на камне. В бронзовом веке появились изображения повторяющихся систем понятий — идеограмм, которые к концу IV в. до н. э. превратились в рисуночное иероглифическое письмо. В этот же период благодаря развитию производства и торговли совершенствуется числовая символика, которая сначала возникла в виде счета из двух чисел —

1 и 2. Дальнейшее развитие счета произошло благодаря физиологическим особенностям человека — наличию пальцев на руках (счет с 5 до 10). В III тыс. до н. э. в Вавилоне возникла клинописная запись счета. Позднее появились другие способы записи счета, например вавилонская, критская, латинская, арабская. Добумажные ИТ характеризуются постоянным совершенствованием носителя информации. Запись на камне впервые позволила добиться эффекта обезличения процесса передачи информации. Запись на глиняных табличках и деревянных дощечках дала возможность перейти к информационным коммуникациям, изобретение папируса (III тыс. до н. о.) означало значительное повышение емкости носителя информации, а применение пергамента завершило добумажную фазу: появился оптимальный носитель информации — книга (IV в. до н.э.). Александрийская библиотека была основана в 3 веке до н. э. и хранилища одного из крупнейших собраний книг той эпохи насчитывало по разным сведениям от 40 тыс. до 500 тыс. свитков. Александрийская библиотека была значительным научным центром, где работали Эратосфен, Зенодот, Аристарх Самосский, Каллимах и др. Весь объем информации, заключавшийся в свитках Александрийской библиотеки можно оценить в 10^6 – 10^8 слов или в 0.1…1 Гб и это можно назвать одним из первых ИТ хранения.

В те же времена начались развиваться и ИТ передачи информации – качественно новый, более динамичный и открытый характер информационные коммуникации приобрели, когда в крупных государствах (Греция, Персия, Египет IV – III в. до н.э.) возникла хорошо налаженная почтовая связь.

Первая ИТ система обработки информации появилась в то время, когда с увеличением объёма вычислений от счета на предметах человек естественно перешел на счет на абаке. Древнегреческий абак (доска или "саламинская доска" по имени острова Саламин в Эгейском море) представлял собой посыпанную морским песком дощечку. На песке проводились бороздки, на которых камешками обозначались числа. Римляне усовершенствовали абак, перейдя от деревянных досок, песка и камешков к мраморным доскам с выточенными желобками и мраморными шариками.

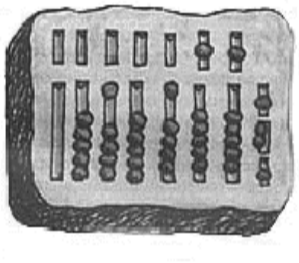


Рис. 1. Древнеримский абак.

Абак или в дальнейшем счеты сохранились до эпохи возрождения, а в видоизмененном виде, сначала как "дощатый счет" и как русские счеты - до наших дней. Абак удобно использовать для выполнения операций сложения

и вычитания, умножение и деление выполнять при помощи абака гораздо сложнее. Революцию в области механизации умножения и деления, и соответственно в области ИТ обработки информации, совершил шотландский математик Джон Непер (John Neper).

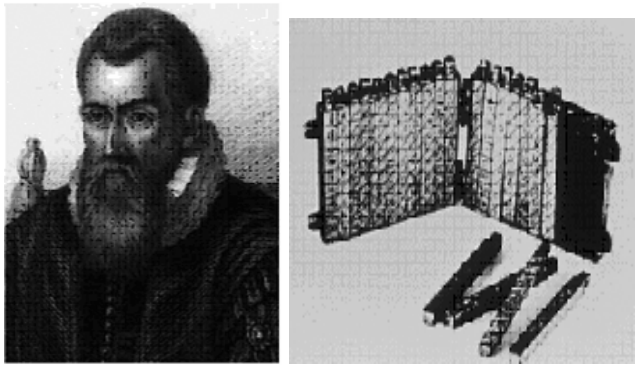


Рис. 2. Джон Непер (1550 - 1617) создал деревянную машину для выполнения простейших вычислений – счетные палочки.

Изобретение логарифмов в 1614 г. - крупнейшее достижение Джона Непера, при помощи логарифмических таблиц легко было выполнять умножение и деление больших чисел. Джон Непер также создал прибор для умножения с использованием логарифмов, названный счетными палочками. Особенно интересно изобретение Непером счетной доски для умножения, деления, возведения в квадрат, извлечения квадратного корня в двоичной системе счисления. В 1622 году, используя принцип действия этого устройства, Вильям Оугтред (William Oughtred) разработал логарифмическую линейку, которая в 19-20 веках стала основным инструментом инженеров.

В дневниках гениального итальянца Леонардо да Винчи (1452-1519) уже в наше время был обнаружен ряд рисунков, которые оказались эскизным наброском первой вычислительной машины - тринадцатиразрядного десятичного суммирующего устройства на основе колес с десятью зубцами.

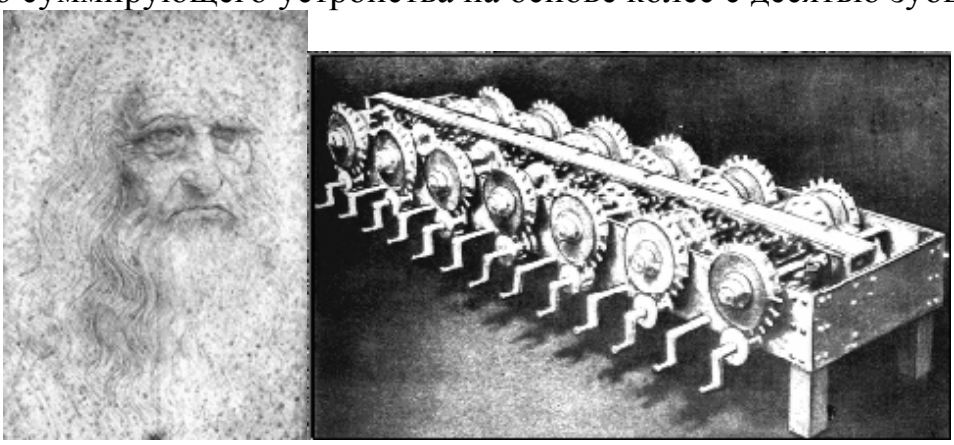


Рис. 3. Автопортрет и модель счетного устройства Леонардо да Винчи.

Считается, что первая машина, способная автоматически выполнять четыре арифметических действия, была создана в 1623 году Вильгельмом Шиккардом (1592-1635). Причиной, побудившей Шиккарда разработать счетную машину для суммирования и умножения шестиразрядных десятичных чисел, было его знакомство с польским астрономом И. Кеплером. Ознакомившись с работой великого астронома, связанной в основном с вычислениями, Шиккард загорелся идеей оказать ему помощь в нелегком труде. В письме на его имя, отправленном в 1623 г., он приводит рисунок машины и рассказывает, что она устроена на базе шестиразрядного десятичного вычислителя, состоявшего также из зубчатых колес, рассчитанного на выполнение сложения, вычитания, а также табличного умножения и деления. Об изобретениях Леонардо да Винчи и Вильгельма Шиккарда стало известно лишь в наше время, современникам они были неизвестны.

В 1642 году великий французский ученый Блез Паскаль (1623-1662) механизировал канцелярские расчеты по налогообложению, соорудив настольный арифмометр на основе зубчатого колеса. 18-летний сын французского сборщика налогов изобрел механический калькулятор, чтобы помочь отцу в расчетах с пошлинами. В медной прямоугольной коробке, получившей название “Pascaline”, были размещены шесть или восемь подвижных дисков.

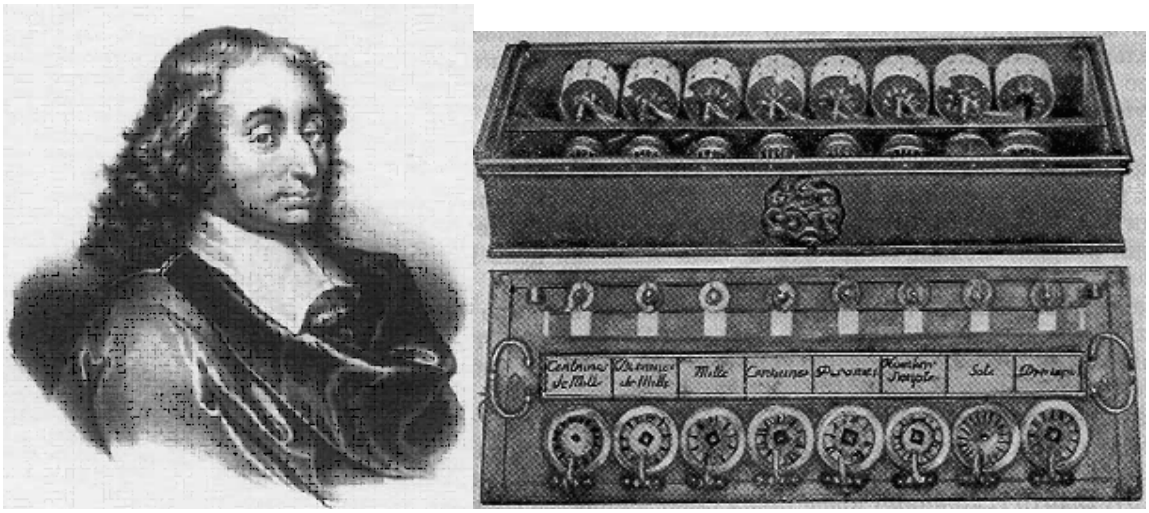


Рис. 4. Блез Паскаль создал машину для суммирования чисел.

В 1673 г. другой великий европеец, немецкий ученый Вильгельм Готфрид Лейбниц (1646-1716), создает счетную машину (арифметический прибор, по словам Лейбница) для сложения и умножения двенадцатиразрядных десятичных чисел. К зубчатым колесам он добавил ступенчатый валик, позволяющий осуществлять умножение и деление. "...Моя машина дает возможность совершать умножение и деление над огромными числами мгновенно, притом не прибегая к последовательному сложению и вычитанию", – писал В. Лейбниц одному из своих друзей. В

1821 году француз Карл Томас организовал серийное производство арифмометров, основанных на применении ступенчатого валика Лейбница. В дальнейшем петербургским ученым В.Т. Однером был создан и организован массовый выпуск арифмометров, которые распространились по всему миру. Несколько десятков лет это была самая распространенная вычислительная машина. Однер заменил ступенчатые валики Лейбница зубчатым колесом с меняющимся числом зубцов. В 1876 г. был создан первый арифмометр Чебышева, который является 10-разрядной суммирующей машиной с непрерывной передачей десятков, где колесо высшего разряда продвигается на одно деление, в то время как колесо низшего разряда переходит с 9 на 0. На основе арифмометра Чебышева в 1935 г. в СССР был выпущен клавишный полуавтоматический арифмометр КСМ-1 (клавишная счетная машина). Эта машина имела два привода: электрический (со скоростью 300 оборотов в минуту) и ручной (на случай отсутствия питания).

Считается, что первым ученым, предложившим использовать принцип программного управления для автоматического выполнения арифметических вычислений, был английский профессор математики Чарльз Бэббидж (1791-1871). Разочарованный большим количеством ошибок в вычислениях Королевского Астрономического Общества, Бэббидж пришел к мысли о необходимости автоматизации вычислений. Первая попытка реализации такой машины была предпринята Бэббиджем в 1822 г., когда он создал машину, предназначенную для решения дифференциальных уравнений, названную “разностной машиной”.

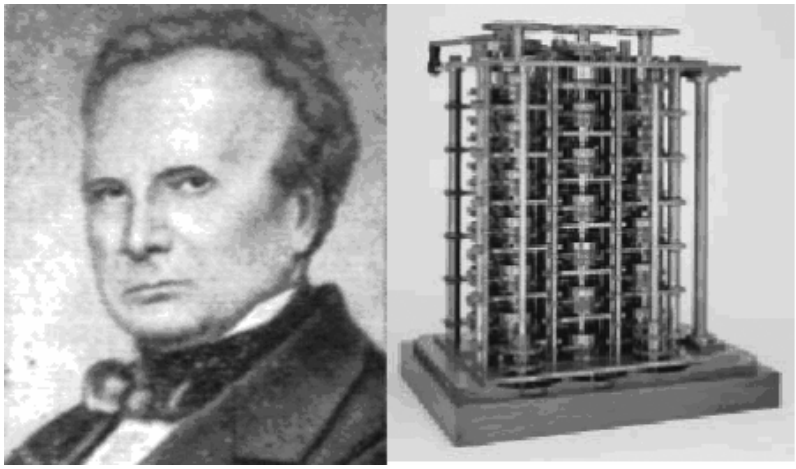


Рис. 5. Чарлз Бэббидж и модель аналитической машины (25 тыс. деталей, стоимость 17470 ф.с.)

Работа модели основывалась на принципе, известном в математике как "метод конечных разностей". Аналитическая машина (так назвал ее Бэббидж), проект которой он разработал в 1836-1848 годах, явилась механическим прототипом появившихся спустя столетие ЭВМ. В ней предполагалось иметь те же, что и в ЭВМ, пять основных устройств:

арифметическое, памяти, управления, ввода, вывода. Для арифметического устройства Ч. Бэббидж использовал зубчатые колеса, подобные тем, что использовались ранее. На них же Ч. Бэббидж намеревался построить устройство памяти из 1000 50-разрядных регистров (по 50 колес в каждом). Программа выполнения вычислений записывалась на перфокартах (пробивками), на них же записывались исходные данные и результаты вычислений. В число операций, помимо четырех арифметических, была включена операция условного перехода и операции с кодами команд. Автоматическое выполнение программы вычислений обеспечивалось устройством управления. Время сложения двух 50-разрядных десятичных чисел составляло, по расчетам ученого, 1 с., умножения – 1 мин. Движение механических частей машины должен был осуществлять паровой двигатель. Большая, как локомотив, машина должна была автоматически выполнять вычисления и печатать результаты. Программы вычислений на машине Беббиджа, составленные дочерью Байрона Адой Августой Лавлейс (1815-1852), поразительно схожи с программами, составленными впоследствии для первых ЭВМ. Не случайно именем этой замечательной женщины назвали одну из первых систем программирования. Большая разностная машина так и не была построена до конца. В 1871 году Бэббидж изготовил опытный образец арифметического устройства ("завода") аналитической машины и принтера. Технические трудности, с которыми пришлось встретиться при реализации, не позволили осуществить проект, поэтому Бэббидж не опубликовал проект полностью, а ограничился описанием его в своих лекциях, чертежах и рисунках.

В 1847 году английский математик Джордж Буль (1815-1864) опубликовал работу "Математический анализ логики". Появился новый раздел математики, получивший название - "Булева алгебра". Каждая величина в ней может принимать только одно из двух значений: истина или ложь, 1 или 0. Буль изобрел своеобразную алгебру - систему обозначений и правил, применимую к различным объектам, от чисел до предложений. Пользуясь правилами алгебры, он мог закодировать высказывания (утверждения, истинность или ложность которых требовалось доказать) с помощью символов своего языка, а затем манипулировать ими, подобно тому как в математике манипулируют числами. Основными операциями булевой алгебры являются конъюнкция (И), дизъюнкция (ИЛИ), отрицание (НЕ). Через некоторое время стало понятно, что система Буля хорошо подходит для описания переключательных схем. Ток в электрической цепи может либо протекать, либо отсутствовать, подобно тому, как утверждение может быть либо истинным, либо ложным. Разработанная им алгебра логики (алгебра Буля) нашла применение лишь в следующем веке, когда понадобился математический аппарат для проектирования схем ЭВМ, использующих двоичную систему счисления.

Через 63 года после смерти Ч. Бэббиджа немецкий студент Конрад Цузе (1910-1985) взял на себя задачу создать машину, подобную по принципу

действия той, которой отдал жизнь Ч. Бэббидж. Работу по созданию машины он начал в 1934 г., за год до получения инженерного диплома. Конрад ничего не знал ни о машине Беббиджа, ни о работах Лейбница, ни о алгебре Буля, которая словно создана для того, чтобы проектировать схемы с использованием элементов, имеющих лишь два устойчивых состояния. Тем не менее он оказался достойным наследником В. Лейбница и Дж. Буля, поскольку вернул к жизни уже забытую двоичную систему исчисления, а при расчете схем использовал нечто подобное булевой алгебре. В 1937 г. машина Z1 (что означало "Цузе 1") была готова и заработала. Она была, подобно машине Беббиджа, чисто механической. Использование двоичной системы сотворило чудо – машина занимала всего два квадратных метра на столе в квартире изобретателя! Длина слов составляла 22 двоичных разряда. Выполнение операций производилось с использованием плавающей запятой. Для мантиссы и ее знака отводилось 15 разрядов, для порядка – 7. Память (тоже на механических элементах) содержала 64 слова (против 1000 у Беббиджа, что тоже уменьшило размеры машины). Числа и программа вводилась вручную. Еще через год в машине появилось устройство ввода данных и программы, использовавшее киноленту, на которую перфорировалась информация, а механическое арифметическое устройство заменило АУ последовательного действия на телефонных реле.

Почти одновременно, в 1943 году, американец Говард Эйкен с помощью работ Бэббиджа на основе техники XX века – электромеханических реле – смог построить на одном из предприятий фирмы IBM легендарный гарвардский «Марк-1» (а позднее еще и «Марк-2»). «Марк-1» имел в длину 15 метров и в высоту 2,5 метра, содержал 800 тысяч деталей, располагал 60 регистрами для констант, 72 запоминающими регистрами для сложения, центральным блоком умножения и деления, мог вычислять элементарные трансцендентные функции.

Работа по созданию первой электронно-вычислительной машины была начата, по-видимому, в 1937 году в США профессором Джоном Атанасовым, болгарином по происхождению. Эта машина была специализированной и предназначалась для решения задач математической физики. В ходе разработок Атанасов создал и запатентовал первые электронные устройства, которые впоследствии применялись довольно широко в первых компьютерах. Атанасов сформулировал, а в 1939 году опубликовал окончательный вариант своей концепции современной вычислительной машины. Полностью проект Атанасова не был завершен, однако через три десятка лет в результате судебного разбирательства профессора признали родоначальником электронной вычислительной техники.

Летом 1940 г. другим выдающимся ученым Норбертом Винером (1894 – 1964) были сформулированы требования к созданию быстродействующей вычислительной машины:

«1) Центральные суммирующие и множительные устройства должны быть цифровыми, как в обычном арифмометре, а не основываться на измерении, как в дифференциальном анализаторе Буша.

2) Эти устройства, являющиеся по существу переключателями, должны состоять из электронных ламп, а не из зубчатых передач или электромеханических реле. Это необходимо, чтобы обеспечить достаточное быстродействие.

3) В соответствии с принципами, принятыми для ряда существующих машин Белловских телефонных лабораторий, должна использоваться более экономичная двоичная, а не десятичная система счисления.

4) Последовательность действий должна планироваться самой машиной так, чтобы человек не вмешивался в процесс решения задачи с момента введения исходных данных до снятия окончательных результатов. Все логические операции, необходимые для этого, должна выполнять сама машина.

5) Машина должна содержать устройство для запасания данных. Это устройство должно быстро их записывать, надежно хранить до стирания, быстро считывать, быстро стирать их и немедленно подготавливаться к запасанию нового материала.». Данные требования были полностью учтены дальнейшими разработчиками ЭВМ.

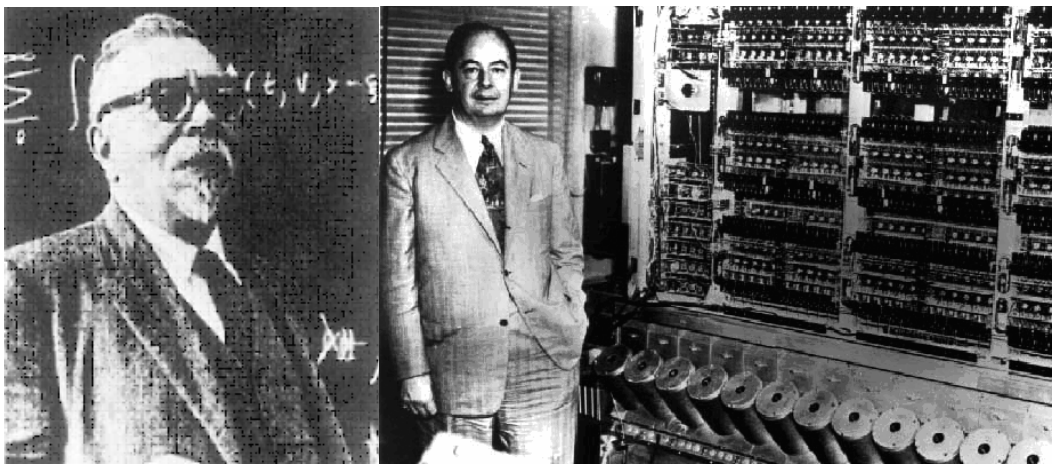


Рис. 6. Норберт Винер (слева) – основатель кибернетики и Джон фон Нейман.

Начиная с 1943 года группа специалистов под руководством Говарда Эйкена, Дж. Моучли и П. Эккерта в США начала конструировать вычислительную машину на основе электронных ламп, а не на электромагнитных реле. Эта машина была названа ENIAC (Electronic Numeral Integrator And Computer) и работала она в тысячу раз быстрее, чем «Марк-1».

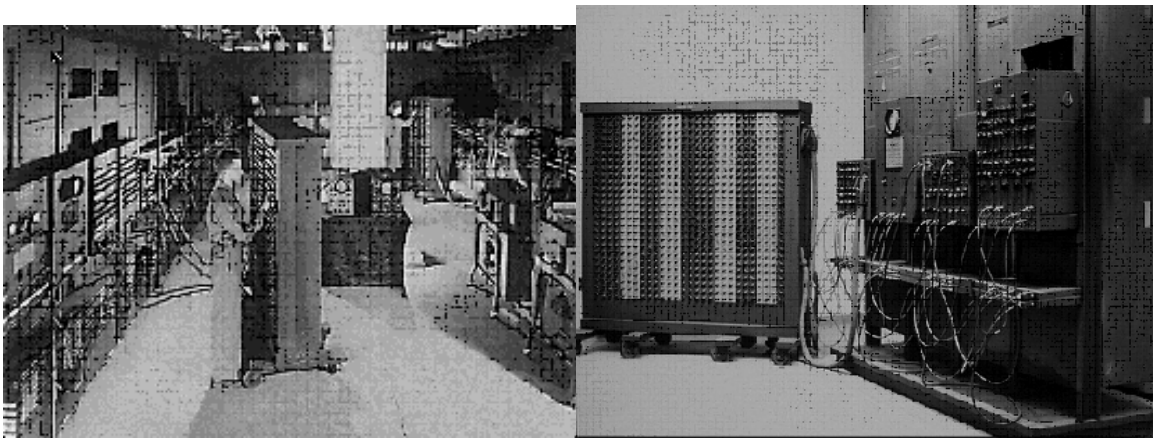


Рис. 7. ENIAC (Electronic Numeral Integrator And Computer)

ENIAC содержал 18 тысяч вакуумных ламп, занимал площадь 9х15 метров, весил 30 тонн и потреблял мощность 150 киловатт. ENIAC имел и существенный недостаток – управление им осуществлялось с помощью коммутационной панели, у него отсутствовала память, и для того чтобы задать программу приходилось в течение нескольких часов или даже дней подсоединять нужным образом провода. Худшим из всех недостатков была ужасающая ненадежность компьютера, так как за день работы успевало выйти из строя около десятка вакуумных ламп.

Чтобы упростить процесс задания программ, Моучли и Эккерт стали конструировать новую машину, которая могла бы хранить программу в своей памяти. В 1945 году к работе был привлечен знаменитый математик Джон фон Нейман, который подготовил доклад об этой машине. В этом докладе фон Нейман, основываясь на идеях Н. Винера, сформулировал общие принципы функционирования универсальных вычислительных устройств, т.е. компьютеров. Это первая действующая машина, построенная на вакуумных лампах, официально была введена в эксплуатацию 15 февраля 1946 года. Эту машину пытались использовать для решения некоторых задач, подготовленных фон Нейманом и связанных с проектом атомной бомбы. Затем она была перевезена на Абердинский полигон, где работала до 1955 года.

ENIAC стал первым представителем 1-го поколения компьютеров. Любая классификация условна, но большинство специалистов согласилось с тем, что различать поколения следует исходя из той элементной базы, на основе которой строятся машины. Таким образом, первое поколение представлено ламповыми машинами.

Патент на открытие транзистора был выдан в 1948 году американцам Д. Бардину и У. Браттейну, а через восемь лет они вместе с теоретиком В. Шокли стали лауреатами Нобелевской премии. Скорости переключения уже первых транзисторных элементов оказались в сотни раз выше, чем ламповых, надежность и экономичность – тоже. Успехи полупроводниковой технологии и связанные с этим возможности совершенствования структуры компьютеров, расширения выполняемых функций и усложнения решаемых

задач привели к смене элементной базы. Запоминающие устройства на магнитных сердечниках, магнитных барабанах и магнитных лентах вытеснили полностью запоминающие устройства на электронно-лучевых трубках и ртутных ультразвуковых линиях задержки, применяемых в компьютерах первого поколения. Сначала лампы были заменены в оперативной памяти, затем в арифметическом и управляющем устройствах германиевыми диодами, позже в оперативной памяти стали применяться феррит-диодные ячейки, позволявшие реализовать логические функции управления памятью, а в арифметическом и управляющем устройствах - транзисторы. Впервые стала широко применяться память на ферритовых сердечниках и тонких магнитных пленках, были опробованы индуктивные элементы – параметроны.

Первые серийные универсальные ЭВМ на транзисторах были выпущены в 1958 году одновременно в США, ФРГ и Японии. В Советском Союзе первые безламповые машины «Сетунь», «Раздан» и «Раздан 2» были созданы в 1959-1961 годах. В 60-х годах советские конструкторы разработали около 30 моделей транзисторных компьютеров, большинство которых стали выпускаться серийно. Наиболее мощный из них – «Минск 32» выполнял 65 тысяч операций в секунду. Появились целые семейства машин: «Урал», «Минск», БЭСМ. Рекордсменом среди ЭВМ второго поколения стала БЭСМ 6, имевшая быстродействие около миллиона операций в секунду – одна из самых производительных в мире.

Приоритет в изобретении интегральных схем, ставших элементной базой ЭВМ третьего поколения, принадлежит американским ученым Д. Килби и Р. Нойсу, сделавшим это открытие независимо друг от друга.

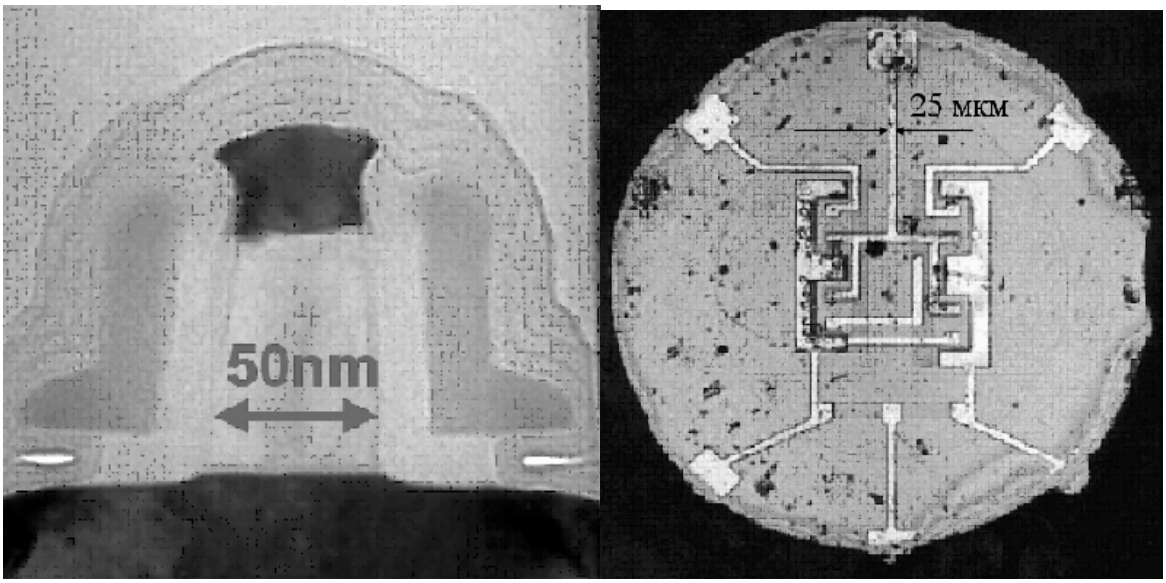


Рис. 8. Первая планарная интегральная схема 1961 г. (слева), и отдельный транзистор по технологии 90 нм (2005 г.)

Массовый выпуск интегральных схем начался в 1962 году, а в 1964 начал быстро осуществляться переход от дискретных элементов к интегральным. Упоминавшийся выше ЭНИАК размерами 9х15 метров в 1971 году мог бы быть собран на пластине в 1,5 квадратных сантиметра. В 1964 году фирма IBM объявила о создании шести моделей семейства IBM (System 360), ставших первыми компьютерами третьего поколения. Модели имели единую систему команд и отличались друг от друга объемом оперативной памяти и производительностью.

Начало 70-х годов знаменует переход к компьютерам четвертого поколения – на сверхбольших интегральных схемах (СБИС). Другим признаком ЭВМ нового поколения являются резкие изменения в архитектуре.

Техника четвертого поколения породила качественно новый элемент ЭВМ – микропроцессор или чип (от английского слова chip). В 1971 году пришли к идее ограничить возможности процессора, заложив в него небольшой набор операций, микропрограммы которых должны быть заранее введены в постоянную память. Оценки показали, что применение постоянного запоминающего устройства в 16 килобит позволит исключить 100-200 обычных интегральных схем. Так возникла идея микропроцессора, который можно реализовать даже на одном кристалле, а программу в его память записать навсегда.

К середине 70-х годов положение на компьютерном рынке резко и непредвиденно стало изменяться. Четко выделились две концепции развития ЭВМ. Воплощением первой концепции стали суперкомпьютеры, а второй – персональные ЭВМ. Из больших компьютеров четвертого поколения на сверхбольших интегральных схемах особенно выделялись американские машины «Крей-1» и «Крей-2», а также советские модели «Эльбрус-1» и «Эльбрус-2». Первые их образцы появились примерно в одно и то же время – в 1976 году. Все они относятся к категории суперкомпьютеров, так как имеют предельно достижимые для своего времени характеристики и очень высокую стоимость. К началу 80-х годов производительность персональных компьютеров составляла сотни тысяч операций в секунду, производительность суперкомпьютеров достигала сотен миллионов операций в секунду, а мировой парк компьютеров превысил 100 млн.

19 апреля 1965 года, в журнале Electronics (vol. 39, No.8) вышла знаменитая теперь статья Гордона Мура (Gordon Moore) «Переполнение числа элементов на интегральных схемах» («Cramming more components onto integrated circuits»), в которой тогдашний директор отдела разработок компании Fairchild Semiconductors и будущий сооснователь корпорации Intel дал прогноз развития микроэлектроники на ближайшие десять лет, предсказав, что количество элементов на кристаллах электронных микросхем будет и далее удваиваться каждый год.

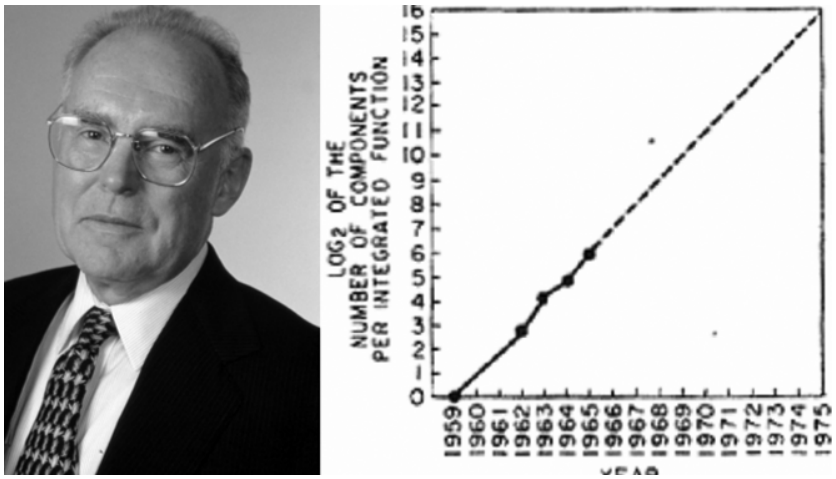


Рис. 9. Гордон Мур и его прогноз роста числа транзисторов на интегральной схеме 1965 г.

Позднее, выступая в 1975 году перед аудиторией конференции International Electron Devices Meeting, Годрон Мур отметил, что за прошедшее десятилетие количество элементов на кристаллах действительно удваивалось каждый год, однако в будущем, когда сложность чипов возрастёт, удвоение числа транзисторов в микросхемах будет происходить каждые два года. Это новое предсказание также сбылось, и закон Мура продолжает в этом виде (удвоение за два года) действовать и поныне, что можно наглядно видеть по следующей таблице и графику.

Микропроцессор	Год выпуска	Число транзисторов
4004	1971	2 300
8008	1972	2 500
8080	1974	5 000
8086	1978	29 000
286	1982	120 000
Intel 386	1985	275 000
Intel 486	1989	1 180 000
Intel Pentium	1993	3 100 000
Intel Pentium II	1997	7 500 000
Intel Pentium III	1999	24 000 000
Intel Pentium 4	2000	42 000 000
Intel Itanium	2002	220 000 000
Intel Itanium 2	2003	410 000 000
Intel Itanium (Montecito)	2005	1 720 000 000

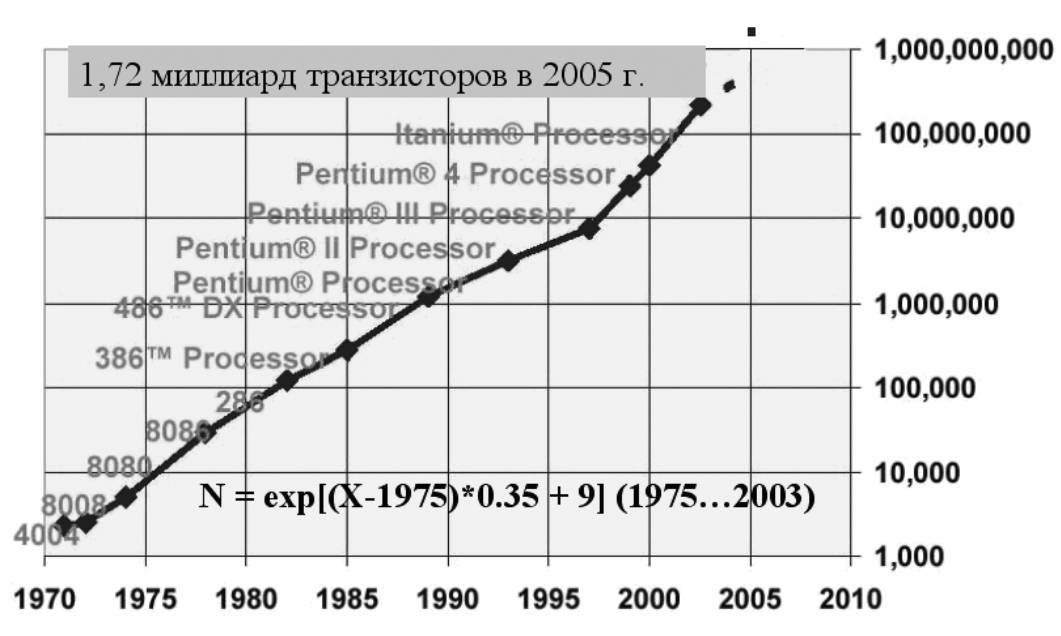


Рис. 10. Закон Мура.

Если судить по последнему технологическому скачку, который удалось совершить Intel за последний год, подготовив двуядерные процессоры с удвоенным количеством транзисторов на кристалле, а в случае с переходом от Madison к Montecito – так вообще учетверяющему это количество, то закон Мура возвращается, пусть и ненадолго, к своему первоначальному виду – удвоение числа элементов на микросхеме за год.

Можно рассмотреть следствие закона для тактовой частоты микропроцессоров, хотя Гордон Мур неоднократно утверждал, что его закон относится только к числу транзисторов на кристалле и отражает общие для многих процессов экспоненциальные закономерности развития.

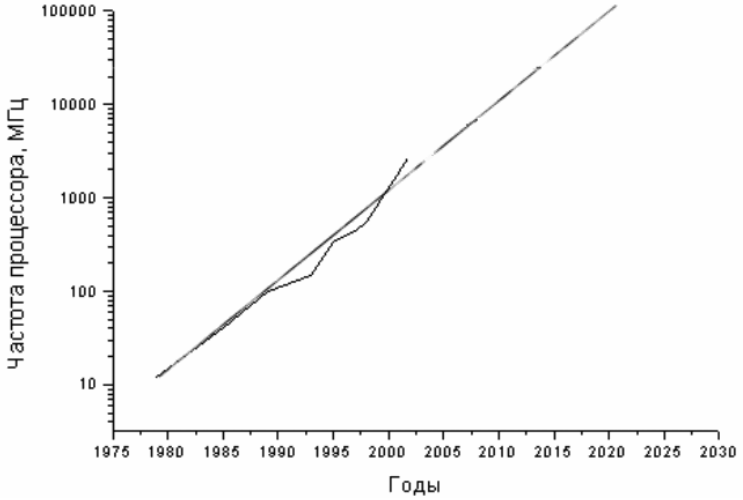


Рис. 11. Следствие из закона Мура для тактовой частоты электронного микропроцессора.

В связи с бурным развитием микроэлектроники возникают вопросы. Можно ли ожидать появление в 2020 г. электронного микропроцессора с тактовой частотой 100 ГГц? Возможно ли уменьшение электрического напряжения на

ядре микропроцессора и, соответственно, уменьшение теплоотдачи? Например, производство памяти и процессоров по технологии 65 нанометров уже почти отлажено и начнётся в этом году, на 2007-й намечен переход на 45-нанометровый процесс, на 2009 год – внедрение 32-нанометрового, а в 2011 году настанет черёд технологического процесса 22 нм. Но что ожидается после 2011 года? Станет ли возможным создание транзисторов по технологиям 16, 11 и 8 нм с длинами затворов транзисторов 7, 5 и 3 нм соответственно?

§2. Предельные возможности электронной компьютерной техники

Три основных фундаментальных предела характеристик логической ячейки на основе электронной техники могут быть определены из основных законов термодинамики, квантовой механики и электромагнитной теории. Первоначально рассмотрим термодинамический предел. Предположим, что узел N ячейки (рис. 12),

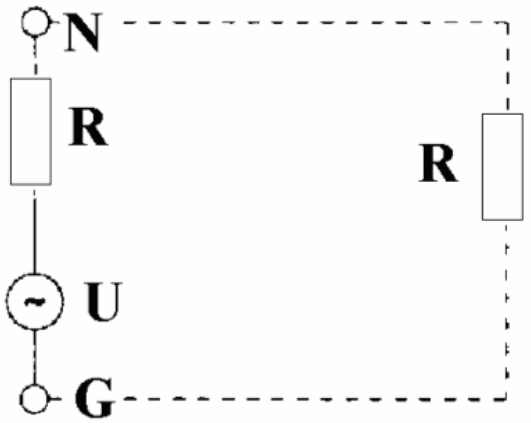


Рис. 12. Эквивалентная электрическая схема элементарной логической ячейки.

расположен в чипе микропроцессора и что между N и G существует эквивалентное сопротивление R. Исходя из статистической термодинамики, можно показать, что среднеквадратичное значение шумового напряжения U разомкнутой цепи R дается выражением:

$$\overline{U}^2 = 4kTR\Delta f \quad (1),$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура в градусах Кельвина, Δf – частотная полоса спектра шума. Соответственно, средняя мощность шума $P_ш$, излучаемая ячейкой, определяется выражением:

$$P_Ш = \frac{\overline{U}^2}{4R} = kT\Delta f \quad (2).$$

Теперь, можно утверждать, что, если состояние логической ячейки изменяется от 0 до 1, или наоборот, то средняя сигнальная мощность P_C в течение времени переключения должна быть больше чем (или по крайней мере равна) шумовой мощности с коэффициентом γ, который для обеспечения безошибочной работы ячейки обычно принимают равным 4:

$$P_C \geq \gamma P_Ш = \frac{\gamma kT}{t_d} \quad (3),$$

учитывая, что время переключения t_d ячейки обратно пропорционально частотной полосе спектра шума. Также можно записать выражение для уровня минимальной энергии переключения E_C:

$$E_C \geq \gamma kT \quad (4).$$

Исходя из (3) можно сделать оценки минимальной энергии, необходимой для переключения электронной ячейки при комнатной температуре T = 300°K: $E_C \geq 1{,}66 \cdot 10^{-20}$ Дж = 0,104 эВ. Из данной оценки следует вывод о минимально возможном напряжении на электронном узле – напряжение меньшее 0,1 В будет приводить к его нестабильной работе, вследствие тепловых шумов, что и видно из характеристик транзистора на рис. 13.

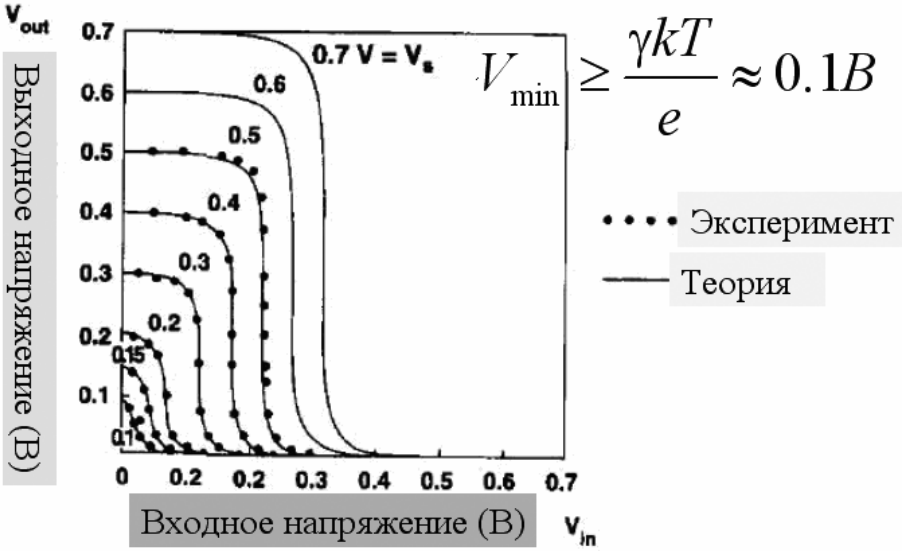


Рис. 13. Передаточная кривая транзистора, изготовленного по технологии КМОП (кремний-метал-окисел-полупроводник).

Второй фундаментальный предел по энергии электронной ячейки может быть получен из квантовой механики, из гейзенберговского соотношения неопределенности, который может интерпретироваться следующим образом: физическое изменение энергии квантовой системы связанно со временем переключения Δt следующим неравенством:

$$\Delta E \geq \frac{\hbar}{\Delta t} \quad (5),$$

где $\hbar = 1{,}055 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка. Соответственно, для мощности переключения можно записать:

$$P_C \geq \frac{\hbar}{(\Delta t)^2} \quad (6).$$

Третий фундаментальный предел связан со скоростью распространения электрического импульса по микрочипу v, который не может быть больше скорости света в вакууме c_0 :

$$v = \frac{L}{\Delta t} \leq c_0 \quad (7),$$

где L – длина межсоединения между ячейками. Из (7) можно оценить предельную тактовую частоту микропроцессора размером 1×1 см^2 – минимальная длина межсоединений в таком чипе (длина по диагонали) $L_{min} = \sqrt{2} \approx 1{,}41$ см, соответственно $\Delta t_{min} \approx L_{min}/c_0 \approx 47$ пс и $f_{max} \approx 22$ ГГц. Увеличение тактовой частоты возможно при размещении на чипе нескольких

синхронизированных тактовых генераторов, но это приводит к усложнению архитектуры микропроцессора.

Основные свойства полупроводника как материала, которые определяют пределы его использования это 1) подвижность носителей (электронов и вакансий) 2) максимальная скорость носителей, 3) напряженность электрического поля самоионизации (пробоя), и 4) коэффициент теплопроводности. Определим влияние наиболее важного параметра - теплопроводности полупроводника. Рассмотрим изолированную электронную полупроводниковую ячейку, в форме полусферы с радиусом r_i, расположенной на идеальном радиаторе с температурой T_0 (рис. 14). Основываясь на уравнении теплопроводности (Фурье), можно записать (8):

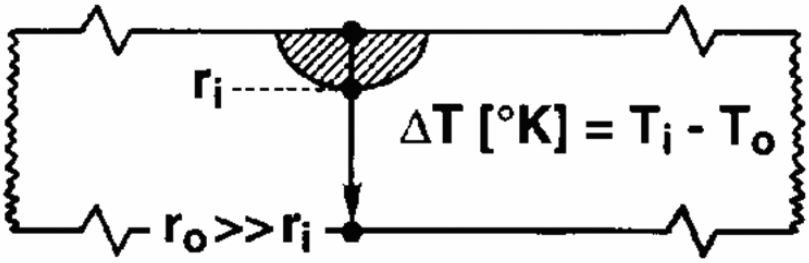


Рис. 14. Схема отвода тепла от электронной логической ячейки.

$Q = -KAdT/dx$ (8),

где Q - тепловой поток в Дж/с через подложку в присутствии температурного градиента dT/dx, K - коэффициент теплопроводности, A – площадь излучающей тепло поверхности. Радиус полусферы определяется максимальной скоростью движения электронов v_S и временем переключения t_d, т.е. $r_i = v_S \cdot t_d$, тогда выражение для площади A можно записать в виде:

$A = \pi r_i^2 = \pi (v_S t_d)^2$ (9) .

Переходя от производных к конечным разностям, $dT = \Delta T$, $dx = r_i$, подставив (9) в (8) можно получить выражение для отвода мощности P от ячейки:

$P = \pi K v_S \Delta T t_d$ (10),

т.е. отводимая мощность прямо пропорциональна времени переключения. Принимая $\Delta T = 100°$ (обычная разность температур, определяемая воздушным охлаждением радиатора), $K_{Si} \approx 1$Вт·см$^{-1}$·град$^{-1}$, $v_S = 10^7$ см·с$^{-1}$ (максимальная скорость электронов в кремнии) можно получить следующую зависимость мощности от времени переключения (кривая с рис.15). На рис. 15 также представлены зависимость (3), определяющая термодинамический предел (кривая b) и зависимость (6), определяющая квантовый предел (кривая a). Диагональные линии на графике представляют собой уровни равной энергии переключения от 10^{-9} Дж (нДж) до 10^{-21} Дж (зДж), заштрихованные области представляют области запрещенных значений энергий с точки зрения фундаментальных законов (слева от кривых a b), так и с точки зрения отвода тепла (над кривой c).

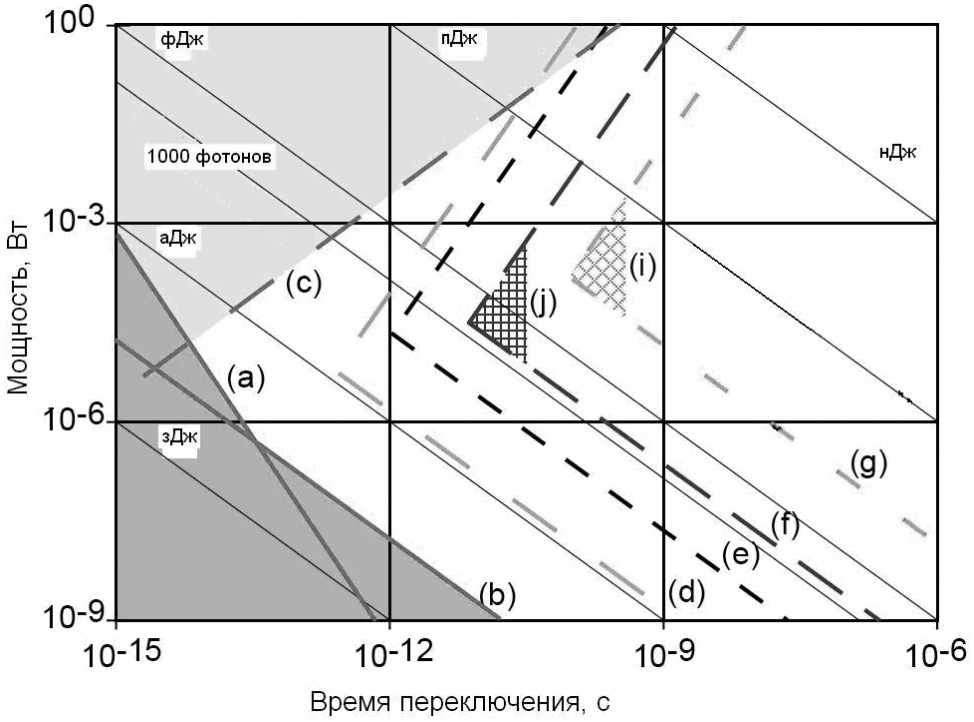


Рис. 15. Зависимости, определяющие пределы потребления энергии от времени переключения для электронной логической ячейки. Фундаментальные пределы: (a) – квантовый, (b) – термодинамический. Предел отвода тепла (c); пределы, определяемые электрическими свойствами кремния (электрический пробой, скорость носителей) (d); пределы, определяемые свойствами транзистора (e); пределы, определяемые свойствами электрической цепи логической ячейки (f); пределы, определяемые совокупностью элементов микропроцессора (логических ячеек, межсоединений и т.д.) (g). Область предельных характеристик кремниевой электроники (i), возможная область предельных характеристик оптоэлектронных устройств (j).

На рис. 15 представлены более подробные расчетные кривые, отражающие зависимость мощности от времени переключения с учетом характеристик кремния (d), свойств транзисторов (e), свойств электрической цепи логической ячейки (f) и пределы, определяемые совокупностью элементов микропроцессора (логических ячеек, межсоединений и т.д.) (g), отображены области предельных характеристик кремниевой электроники (i) и возможная область предельных характеристик оптоэлектронных устройств (j).

Можно рассчитать точки на графике, соответствующие современным микропроцессорам, исходя из потребляемой мощности (равной ~100 Вт), числа транзисторов и тактовой частоты — Pentium IV 55 млн., 3 ГГц , Itanium Montecito 1720 млн., 1,5 ГГц. Несмотря на столь большое количество транзисторов, в каждом такте используется по разным оценкам не более 10^5 транзисторов. То есть имеет место простой значительной части оборудования, потенциально способного производить обработку данных. Конечно, простой оборудования имеет и некоторое достоинство: это оборудование потребляет и выделяет мало электрической и тепловой

энергии. Расчеты показывают, что на одну ячейку в Pentium IV приходится 2 мВт при времени переключения $0.33 \cdot 10^{-9}$ с и на Itanium Montecito приходится 60 мкВт при времени переключения $0.66 \cdot 10^{-9}$ с т.е. данные процессоры расположены в зоне (i) рис. 15.

Рассмотрим влияние емкостных характеристик электронной схемы микрочипа на потребление ею энергии. Как видно из рис. 16, величина емкости между двумя проводящими структурами микропроцессора не изменяется с уменьшением характерного размера микросхемы или технологии.

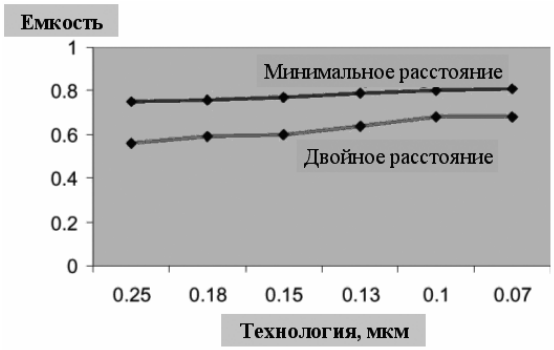


Рис. 16. Технологическая зависимость относительной величины емкости между двумя проводящими структурами микрочипа.

Однако с уменьшением характерного размера и ростом числа элементов на микросхеме растет число межсоединений и их длина. С ростом длины межсоединений растет величина емкости, и, соответственно возрастают энергетические потери (рис. 17).

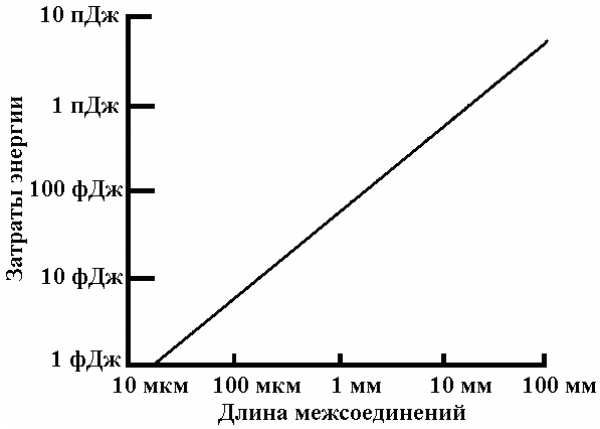


Рис.17. Потери энергии вследствие перезарядки распределенной RC цепи проводника при передаче напряжения 1 В от его длины.

Для энергии E на перезарядку суммарной емкости микрочипа C_Σ в каждом рабочем такте можно записать следующую формулу:

$$E = \frac{C_\Sigma U^2}{2}, \quad (11)$$

где U – напряжение питания микросхемы. Поскольку суммарная емкость растет, растут и потери.

С переходом на все более совершенную технологию с меньшим характерным размером возрастает и сопротивление медных контактов, используемых для межсоединений (рис. 18).

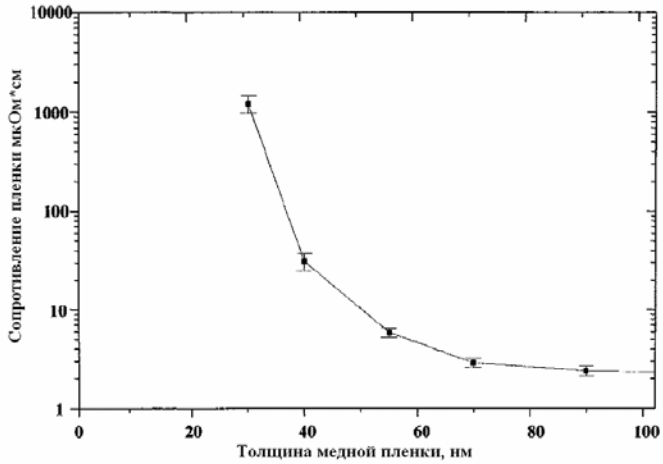


Рис. 18. Рост удельного электрического сопротивления медной пленки с уменьшением её толщины.

Соответственно возрастает время прохождения сигнала по межсоединениям, т.к. время на перезарядку распределенной RC-цепочки определяется формулой:

$\tau = rcL^2$ (12),

где r – сопротивление на единицу длины, c – удельная емкость, L-длина межсоединений.

Если у отдельного транзистора микросхемы уменьшить габариты активной области до 20 нм, можно получить время переключения ~ 1 пс, т.е. он может работать на тактовой частоте 1 ТГц, однако, наличие межсоединений к такому транзистору дают задержку в 25 пс, что не позволяет всей схеме работать на частоте выше 40 ГГц.

Энергия, обеспечивающая представление логической «1» и «0» в микропроцессоре, может быть накоплена и хранится на конденсаторе $C_{вых}$, входящем в состав электронной схемы логического вентиля. В некоторых схемах стационарные состояния могут быть обеспечены при протекании тока через вентиль. В обеих схемах происходит транспортировка энергии от источника к логической электронной ячейки с использованием материального носителя электрона. Транспорт электрической энергии, согласно закону Джоуля-Ленца, сопровождается ее превращением в тепло. И поэтому даже в стационарных состояниях от источника энергоснабжения потребляется энергия. Накопление энергии происходит путем ее транспорта от источника энергопитания по электрическим цепям с паразитными резисторами и, следовательно, сопровождается джоулевыми потерями.

Потребляемая и соответственно выделяемая процессом энергия определяется не только активными потерями, связанными с информационным представлением, но также и различными пассивными потерями в электронных схемах. К таким паразитным эффектам, в значительной мере определяющим энергетику логических схем, прежде всего, необходимо отнести диссипацию энергии на сопротивлениях переключателей и соединений и из-за утечки тока через закрытые переключатели. Почему термолизация энергии неизбежна в цифровых системах, построенных на электронных схемах традиционных управляемых переключателей, традиционных электронных компонентов (резисторов, конденсаторов, диодов и т.п.). Ответ прост. Электронные компоненты являются «неидеальными» и их шунтируют паразитные сопротивления, обуславливающие утечки тока. Паразитные сопротивления включаются и последовательно с «идеальными» элементами. Сопротивления включены последовательно и/или параллельно конденсаторам, диодам и, конечно, переключателям (транзисторам). Физические механизмы, обуславливающие эти утечки тока, определяются туннельным эффектом, термоэлектрической эмиссией, генерацией носителей в области пространственного заряда и другими физическими эффектами. Паразитные сопротивления имеют большую величину (порядка 10^9 – 10^{12} Ом), но, тем не менее, они в значительной мере определяют энергетику современных электронных цифровых устройств обработки информации. Действительно, при напряжении на ядре микропроцессора 1 В ток утечки одной ячейки составляет величину 10^{-9} ... 10^{-12} А, но при общем числе элементов на микросхеме $N = 10^9$, ток может достигать и превышать 1 А. Уменьшение характерного размера микросхем приводит только к увеличению пассивных потерь, причем их рост происходит быстрее активных, что наглядно представлено на рис. 19.

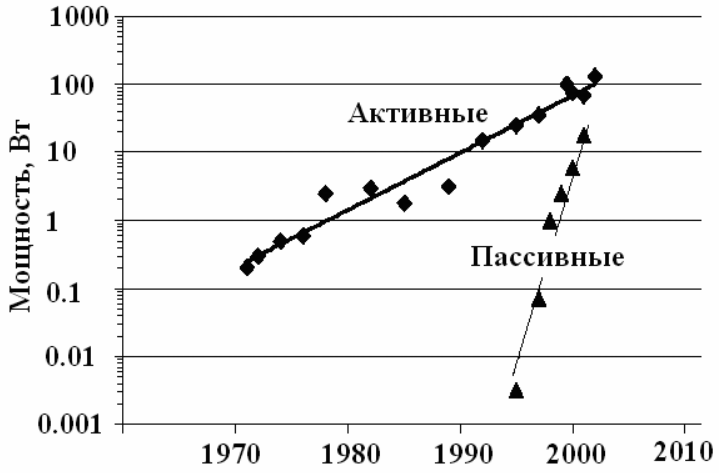


Рис. 19. Рост потерь мощности в полупроводниковых процессорах.

Энергия активных и пассивных потерь полностью диссипируется в электронных логических ячейках и порождает проблемы теплоотвода. На рис. 20 приведена временная зависимость плотности мощности

микропроцессоров, иллюстрирующая серьезность проблемы теплоотвода в цифровых устройствах. Эффективный теплоотвод необходим для термостабилизации цифровых устройств, поскольку повышение температуры является основным дестабилизирующим фактором при производстве информации с высокими скоростями.

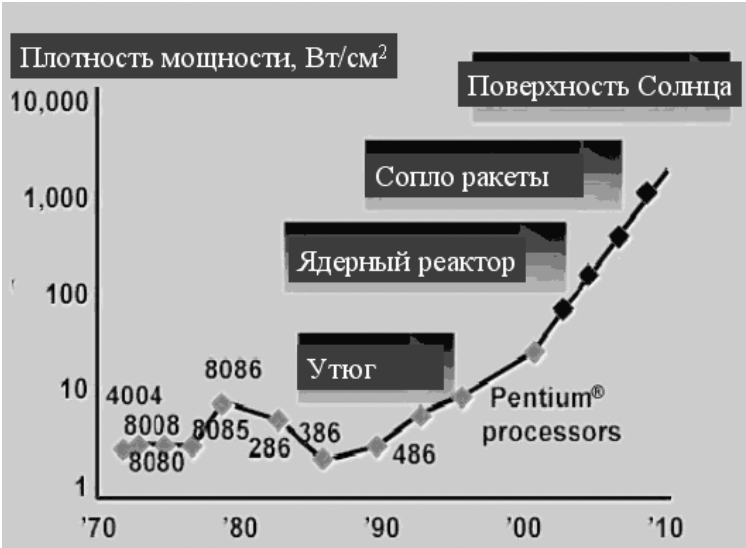


Рис.20. Проблема отвода тепла от микропроцессора.

Сформулируем основные ограничения электронной информационной технологии: с ростом числа элементов на микросхеме увеличивается электрическая емкость системы и препятствует увеличению тактовой частоты; увеличение числа элементов приводит к росту числа межсоединений и, соответственно, к увеличению времени задержки прохода сигнала между макроструктурами процессора; с уменьшением характерного размера элемента возрастают активные и пассивные потери, что приводит к нагреву системы и проблеме отвода тепла.

§3. Оптические технологии в информатике

Оптику можно определить как науку о распространении света и его взаимодействии с веществом. Установлено, что свет есть проявление одного из фундаментальных взаимодействий — электромагнитного взаимодействия и переносится фотонами - частицами с нулевой массой покоя и нулевым электрическим зарядом. В настоящее время к оптическому диапазону относят диапазон длин волн от единиц нанометров до сотен микрометров (см. рис. 21).

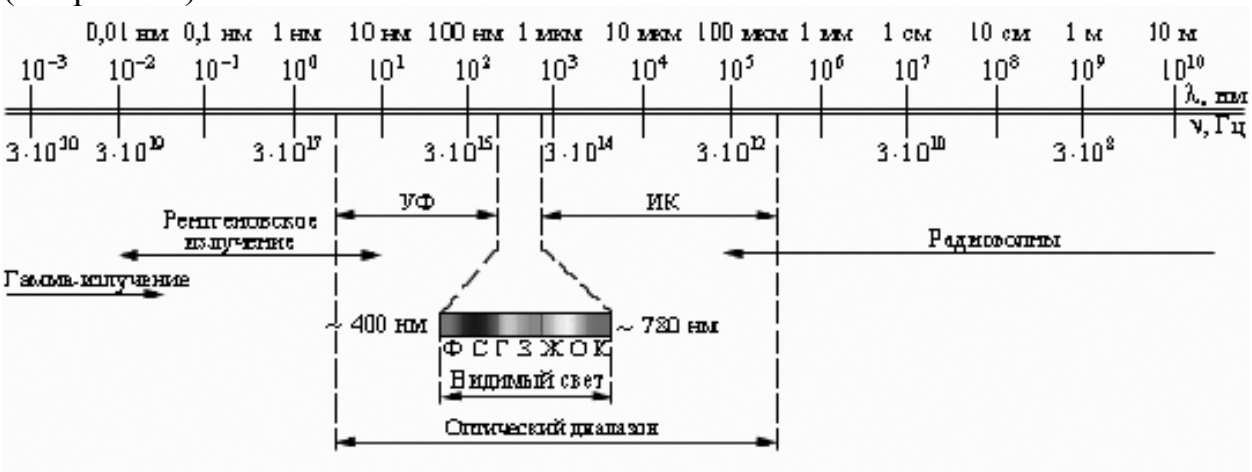


Рис. 21. Шкала электромагнитных волн.

Волновая и корпускулярная природа света обуславливает многочисленные преимущества оптических технологий для задач передачи, хранения и обработки информации:

- частота оптического излучения составляет $10^{12}\ldots10^{16}$ Гц, что позволяет создать 10^4 информационных каналов со спектральной шириной 100 ГГц;
- передача информации происходит действительно со скоростью света $c_0 = 3\cdot10^{10}$ 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, или световой волны, посредством которых может кодироваться информация, следующие:

- Амплитуда
- Фаза
- Частота
- Поляризация
- Разрешаемые элементы в изображении (пикселы).

Используя комбинации этих независимых параметров, возможна передача огромных массивов информации и их обработка со сверхвысокой скоростью. Возможности оптических технологий уже в настоящее время широко используются в информатике – впечатляющий пример – волоконно-оптические линии связи.

Концептуально, любой компьютер можно представить в виде следующей схемы (рис. 22), фактически имитирующей работу человеческого мозга.

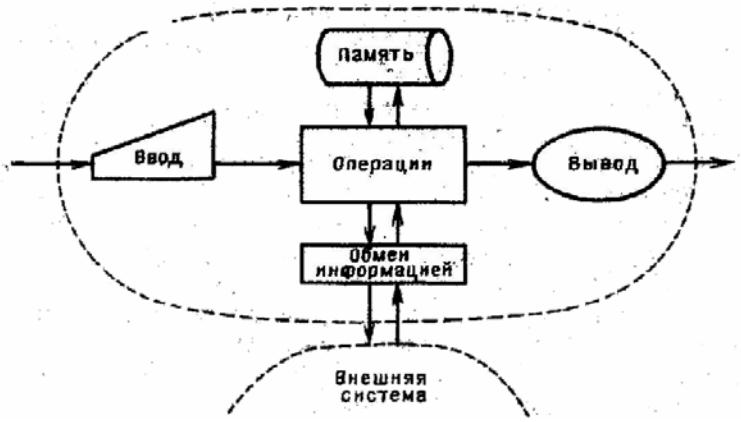


Рис. 22. Концептуальная схема компьютера.

Устройства ввода информации соответствуют органам чувств человека (зрение, обоняние, осязание и т.п.), долговременная (например жесткий диск) и кратковременная (кэш в процессоре) запись информации в компьютере соответствует человеческой памяти, процессор соответствует мозгу, обрабатывающему поступающий поток информации. В современном электронном компьютере можно отметить следующие оптические узлы и элементы: устройства ввода информации – оптический сканер, оптическая мышь; устройства обмена информацией - инфракрасный порт, оптоволокно; устройства вывода информации – лазерный принтер, дисплей, голографический (объемный) дисплей; устройства памяти – 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 плавающей запятой в секунду

(www.lenslet.com). Основу процессора составляет блок оптического векторно-матричного умножения, созданный на основе пространственного модулятора света – матрицы, размером 256x256 элементов. Данный процессор уже используется в военных целях, в системах безопасности, для обработки больших потоков видеоинформации. Следует отметить, что данный процессор в большей степени «электронный», так как входные, выходные и управляющие сигналы – электрические.

Можно провести классификацию оптических устройств обработки информации – оптических процессоров, исходя из степени оптической интеграции. Первым классом следует наименее «оптический» (1) электронный процессор с оптическими межсоединениями, вторым следует (2) аналоговый оптический процессор, (3) цифровой оптический процессор, (4) полностью оптический процессор. Если первые три класса реально созданы, то четвертый в настоящее время интенсивно исследуется. В дальнейшем мы подробно рассмотрим аналоговые и цифровые оптические процессоры.

§4. Аналоговые оптические вычисления и процессоры

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 отличие от этого способа, в современных компьютерах информация представляется в виде ограниченного числа цифр, например 1 или 0. Такой способ представления информации называется цифровым.

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».

Обсудим основные методы аналоговых вычислений, производимых в аналоговых оптических компьютерах, с использованием основных законов оптики. Прежде всего, обратимся к рис. 23, поясняющему, как с помощью светового луча можно выполнять хорошо знакомые всем нам операции сложения и умножения.

На рис. 23 а, б показано, как несколько световых лучей собираются в одной точке. В данном случае собираются три луча: *A, B и C*, и если измерить интенсивность света в этой точке, то легко догадаться, что полученное значение представляет собой сумму интенсивностей лучей *A, B и C*. Если воспользоваться линзой, то можно облегчить фокусировку лучей, т.е. еще более упростить выполнение операции сложения.

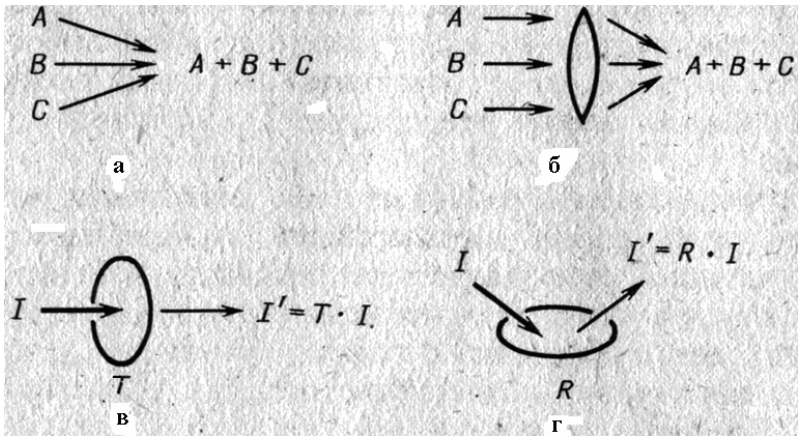


Рис.23. Основные аналоговые оптические операции: а — сложение; б — сложение с помощью линзы; в — умножение на основе эффекта пропускания света; г — умножение на основе эффекта отражения света.

Следует отметить, что такие 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. Однако в этом случае возможно управление результатом сложения и выполнять вычисления, более сложные и с более высокой точностью.

Теперь рассмотрим операции умножения и деления. Такие операции возможны с использованием оптических элементов с управляемой прозрачностью T (отношением интенсивности выходного светового луча I' к интенсивности входного I), например, с использованием свойств жидких кристаллов, либо с управляемым коэффициентом отражения R, на основе свойств полупроводников. И в этом случае, так же как и при сложении, при использовании когерентного лазерного луча умножаются амплитуды, а не интенсивности.

Основными операциями аналогового оптического компьютера являются только две операции - сложение и умножение, однако одни лишь эти операции не позволяют выполнять сложных вычислений. Как уже упоминалось ранее, отличительным свойством света является способность его равномерного распространения во всех направлениях. Благодаря этой особенности появляется возможность параллельной (одновременной) обработки больших объемов информации, и в этом смысле применение оптического компьютера имеет большое значение, 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).

Рассмотрим свойства линз, которые играют центральную роль в аналоговых оптических компьютерах. Тонкая линза представляет собой простейший оптический прибор с двумя сферическими

поверхностями. Как показано на рис.24, 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 (имеющем размер 6x12 см, обладающем 60000x120000 элементами разрешения, что соответствует минимально 7,2 Гб используя программу, например Adobe Photoshop).

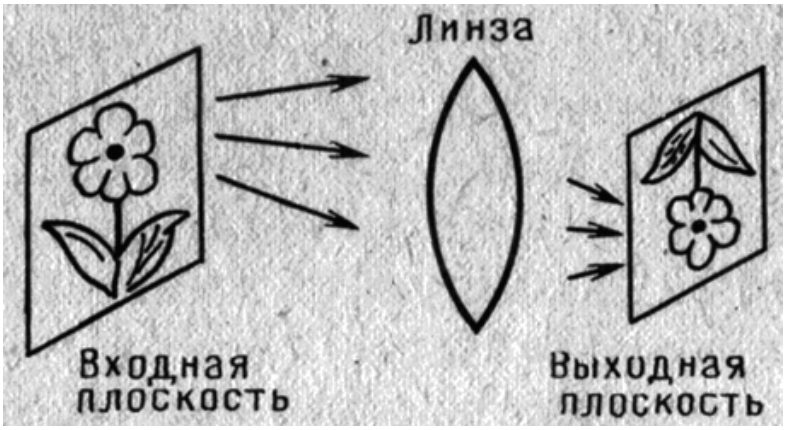


Рис.24. Операция инвертирования и масштабирования, выполняемая линзой при построении изображения.

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:

$$U_н(x_н,y_н)=\frac{1}{i\lambda f}\int\int_{-\infty}^{\infty}U_1(x_1,y_1)*\exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda f}(x_н*x_1+y_н*y_1)\right]dx_1dy_1=\kappa_{1н}U_1\left(\frac{x_н}{\lambda f},\frac{y_н}{\lambda f}\right) \quad (1)$$

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 сверток.

Рассмотрим простейшую оптическую систему, осуществляющую двумерное фурье-преобразование транспаранта, содержащего изображения полос A B C D с различным периодом (пространственной частотой) и ориентацией (рис.25).

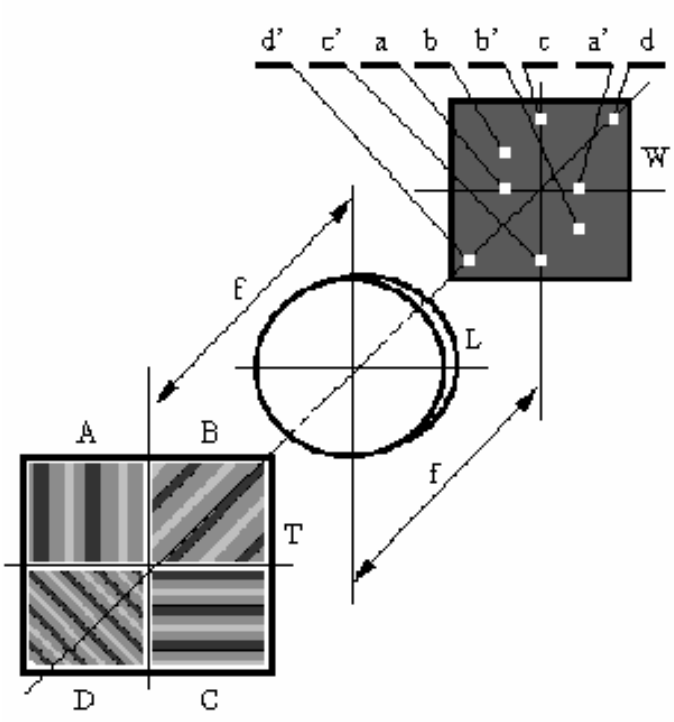


Рис. 25. Оптическая система, осуществляющая двумерное фурье-преобразование.

Отметим следующие свойства устройства:

- каждой пространственной частоте изображений в Фурье-плоскости (частотной плоскости) соответствует две точки (действительная и мнимая), например для А это точки а и а' (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 полос в частотной области отражает ориентацию полос, но не место этих полос в плоскости изображения.

Поскольку фурье-образы двухмерных 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. 26) состоит из следующих компонентов: 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 ($x_н$,$y_н$) и выходной (x_D,y_D) плоскостях системы. Плоскости имеют одинаковые масштабы.

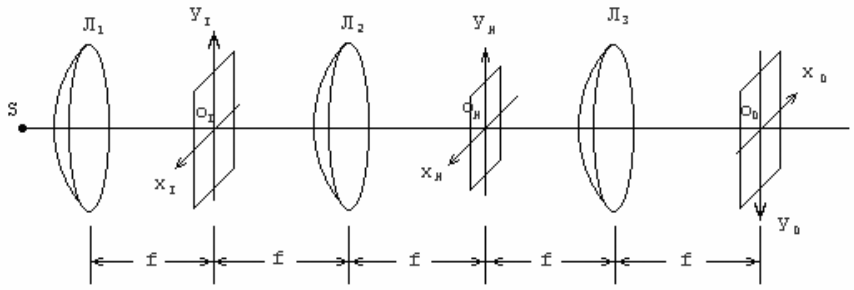


Схема когерентной оптической системы пространственной фильтрации

$(x_т, y_т)$-транспарант,формирующий изображение
$(x_н, y_н)$-фильтр
(x_0, y_0)-выходная плоскость

Рис. 26

Линза $Л_2$ 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, т.е.

$$U_н(\xi,\eta) = \frac{k_1 A}{i\lambda f} U_1(\xi,\eta) \qquad (2)$$

Амплитудный коэффициент пропускания операционного фильтра

$$t_н = k_н H(\xi,\eta)$$

где $k_н$ – комплексная константа (3)

Функция H соответствует математической операции, которую необходимо выполнить над входным сигналом, ее называют передаточной функцией фильтра. В результате пространственной фильтрации получается сигнал, описываемый распределением комплексных амплитуд:

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

$H(\xi,\eta)$ – передаточная функция
далее: H

(4)

Отфильтрованный сигнал подвергается повторному преобразованию Фурье с помощью линзы $Л_3$. В результате в выходной плоскости системы свет будет иметь распределение:

$$U_d(x_d, y_d) = k\int\int_{-\infty}^{\infty} U_1(\xi,\eta) H(\xi,\eta) \exp\left[2\pi i\left(x_d\xi + y_d\eta\right)\right] d\xi d\eta$$

$$k = -\frac{k_1 k_н A}{(\lambda f)^2}$$

(5)

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). Соотношение (5) можно записать в виде свертки:

$$U_d(x_d, y_d) = kU_1(x_1, y_1) * h(x, y) = k\int\int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) h(x_1 - x_d, y_1 - y_d) dx_1 dy_1 \quad (6)$$

где h(x,y) - обратное преобразование Фурье передаточной функции фильтра. Таким образом, оптическая система, представленная на рис. 26, способна выполнять линейные интегральные преобразования типа свертки, описываемые уравнением (6). 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. Сейчас была рассмотрена оптическая система аналогового процессора, предназначенного для параллельной обработки двумерных сигналов. На практике часто приходится иметь дело с одномерными сигналами. Оптическая система когерентного аналогового процессора, способного параллельно обрабатывать множество одномерных сигналов, представлена на рис. 27. Такой процессор называют астигматическим.

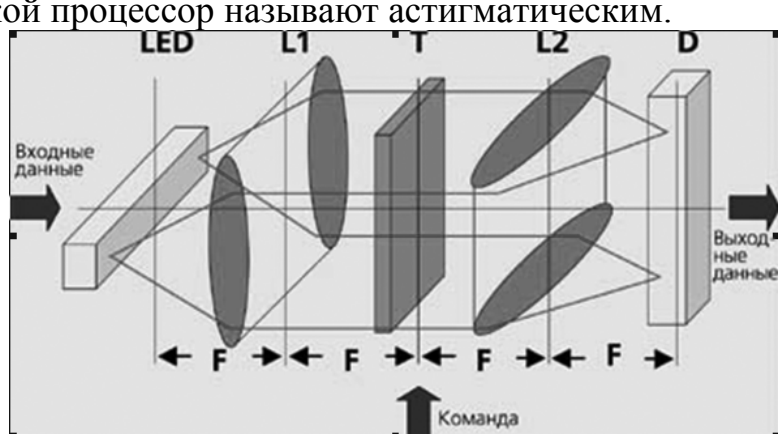


Рис. 27. Когерентный аналоговый астигматический процессор, реализующий произвольное матричное преобразование входного вектора-строки в выходной вектор-столбец.

Здесь LED - линейка светоизлучающих диодов. Они расположены на фокальной линии цилиндрической линзы L1. T - оптический транспарант с записанной на нем матрицей пропускания T(i, j). Строки матрицы параллельны образующей первой линзы. L2 - цилиндрическая линза, образующая которой параллельна столбцам матрицы транспаранта. Она собирает лучи, прошедшие через элементы одной строки, на одном пикселе многоэлементного линейного фотоприемника D. Нетрудно видеть, что входной X и выходной Y вектора связаны линейным преобразованием Y=TX

В качестве другого примера практического использования аналоговых оптических компьютеров рассмотрим операционные устройства, выполняющие операции со множеством числовых данных.

Объектом операций, или данными, будем считать вектор, состоящий из n чисел, и двумерную матрицу размерностью n x n. На рис. 28 показан пример структуры базового оптического арифметического устройства, выполняющего умножение вектора и матрицы при n. = 3.

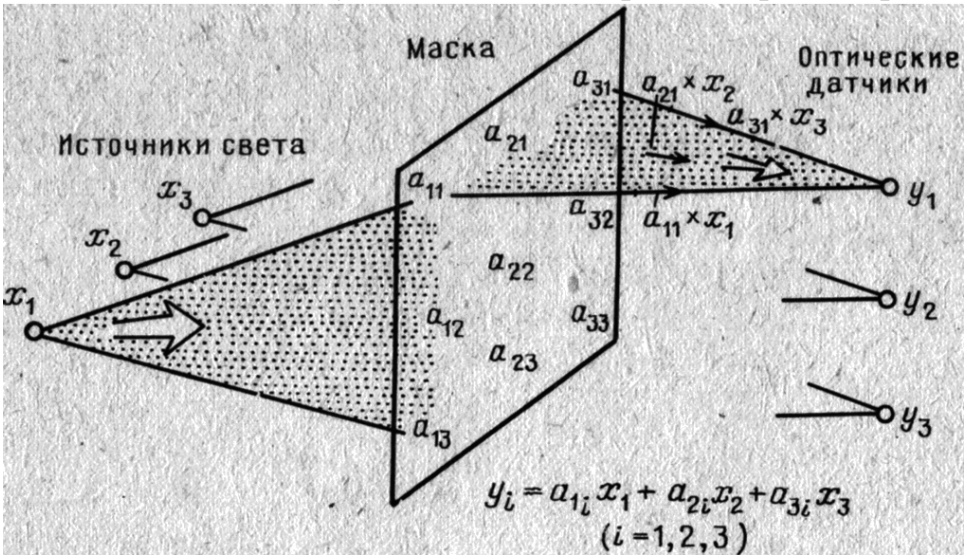


Рис. 28. Принцип действия оптического операционного устройства, выполняющего умножение вектора на матрицу.

Слева показаны три источника света, расположенные горизонтально. В центре расположена маска, имеющая форму решетки размером 3x3, а справа — вертикально три оптических датчика. 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 маску, определяется произведением интенсивности входного луча x_i на коэффициент пропускания a_{ij} данной маски.

Далее, свет, прошедший через маску, 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 маски, достигают только самого верхнего оптического датчика y_1. Аналогично световые лучи, прошедшие через второй ряд ячеек маски 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. 28), которая по определению представляет собой произведение вектора x на матрицу a.

Разумеется, число элементов n вектора и матрицы не обязательно может равняться трех, 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. Оптический процессор Enlight256

Компания “Lenslet”, 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, соответствующую стандарту JTAG). 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

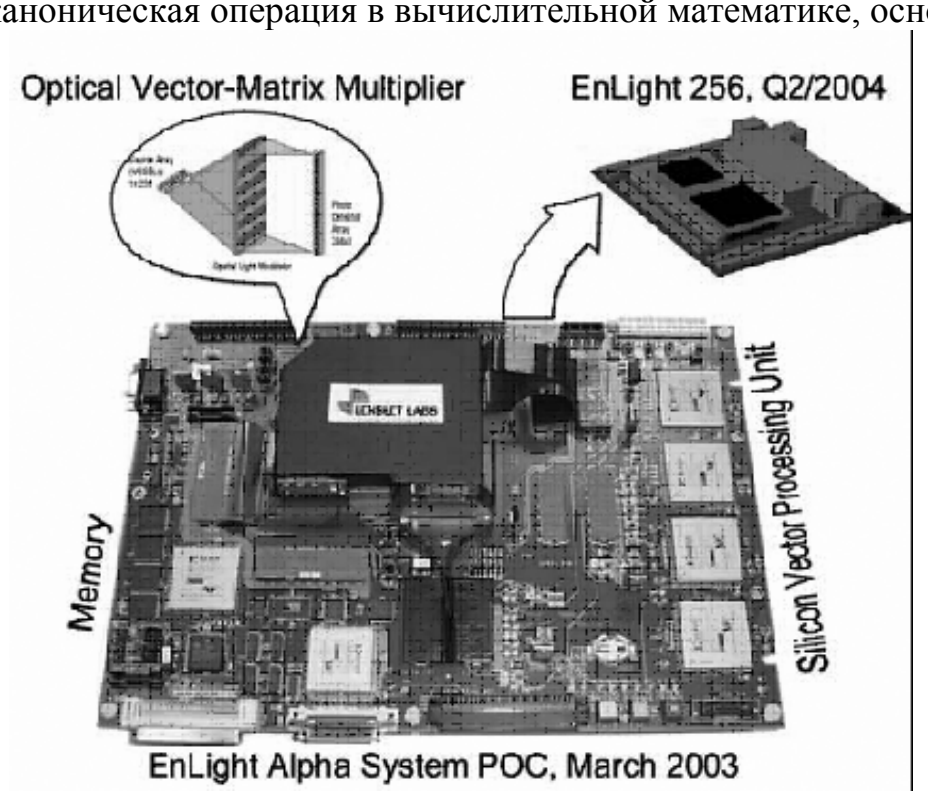


Рис.29. Внешний вид процессора Enlight256.

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.

Ядро процессора Enlight256 - оптическое, а входная и выходная информация представляется в электронном виде. Ядро состоит из 256-ти VCSEL-лазеров[1], 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 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).

Принцип умножения устройства детально рассказан в предыдущей главе (рис.4). Каждый элемент входного вектора проектируется на столбец матрицы, а каждый ряд матрицы проектируется на один детектор в векторе результата (вывода).

Программирование оптического цифрового сигнального процессора (Optical Digital Signal Processing Engine, ODSPE) заключается в изменении значений, которые сохранены в пространственном модуляторе (Spatial Light Modulator, SLM). Загрузка приложения (или данные внутри приложения) аналогична замене матрицы в пространственном модуляторе. Пространственный модулятор может поставляться как отдельный продукт, так что ничто не помешает потенциальному разработчику создать свой оптический процессор. Этот модулятор называется Ablaze, и о нем можно прочитать на сайте компании Lenslet.

---

[1] VCSEL - Vertical Cavity Surface-Emitting Laser – лазер поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором.

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 радарах высокого разрешения, так как способен обрабатывать данные от массивов антенн. Кроме того, размеры EnLight256 позволяют размещать его на транспортных средствах.

§6. Голографические методы обработки информации

Голография – метод получения объемного изображения объекта, путем регистрации и последующего восстановления, волн, изобретенный английским физиком венгерского происхождения Д. Габором в 1948 г. – открывает новые возможности при аналоговой обработке информации. Рассмотрим кратко принципы голографии. Пусть пучок когерентного излучения лазера одновременно направляется на исследуемый объект (транспарант) и на призму (рис. 30). Преломленная призмой опорная волна и

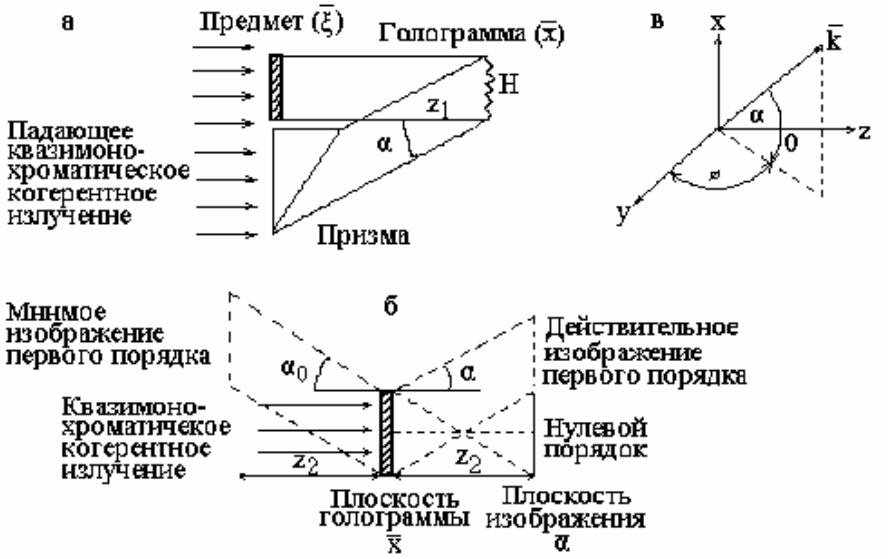


Рис. 30. Запись и восстановление голограммы.

рассеянная объектом световая волна падают на высокоразрешающую регистрирующую среду, где и происходит запись возникшей сложной интерференционной картины, полученная при наложении опорной и предметной волн. Зарегистрированная картина интерференции и есть голограмма. Для восстановления волнового поля предмета, голограмму освещают световым пучком того же лазера и под тем же углом, под которым была осуществлена запись. При этом происходит дифракция опорной волны на интерференционной структуре голограммы и в первом порядке возникает действительное и мнимое трехмерное изображение объекта.

С использованием голографии возможно создать различные вычислительные устройства, в которых выполняются математические операции над информацией, записанной на голограмме. В качестве примера рассмотрим опознавание образов. Под термином «опознавания» имеется в виду сравнение изображения двух объектов и установления корреляции (соответствия) между ними.

Возможность опознавания образов основана на свойстве голограмм восстанавливать изображения объекта только в том случае, когда считывающий пучок света совпадает по форме с опорным лучом,

использовавшимся при записи. Пусть, например, имеется голограмма-фильтр, на которой записана интерференция между светом точечного лазерного источника и светом, прошедшим через транспарант с буквой Т (рис. 31). Если затем голограмму освещать лазерным излучением, проходящим через объект - транспарант в виде произвольного текста, то только в случае совпадения волновых фронтов буквы Т мы увидим в плоскости изображения объекта в соответствующих местах яркие точки.

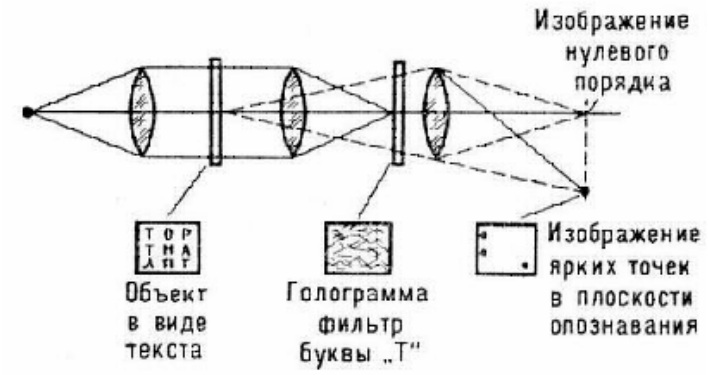


Рис. 31. Оптическая схема голографического коррелятора.

Голографическая система ассоциативной памяти с устройствами обращения волнового фронта способна распознать два изображения, имеющие общие черты или по фрагменту изображения восстановить его целиком. Элемент голографической памяти формируется следующим образом: голографическая среда освещается световым пучком, пропущенным через транспарант с изображением квадрата и опорным пучком (рис. 32-1), процесс повторяется с треугольником и кругом (рис. 32-2,3). Угол падения опорного пучка каждый раз меняется, чтобы иметь возможность различать изображения. Следует отметить, что элемент голографической памяти может содержать образы до 10000 различных объектов.

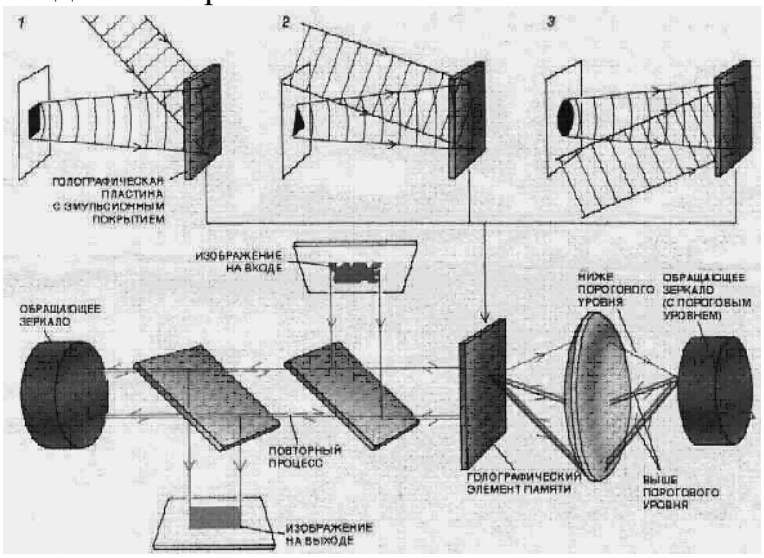


Рис. 32. Принципиальная оптическая схема голографической ассоциативной памяти с обращающими волновой фронт зеркалами.

Голографический элемент памяти помещается между двумя обращающими волновой фронт зеркалами. Чтобы описать свойства обращенной волны, вспомним сначала ряд понятий, относящихся к волновому движению. Поверхности, объединяющие точки с одинаковой фазой колебаний, носят название поверхностей волнового фронта. Важным свойством поверхностей волнового фронта является то, что они перпендикулярны локальному направлению распространения волны. Волновые фронты плоских волн — плоскости, волновые фронты сферических волн — концентрические сферы. Волновые фронты реальных световых пучков могут иметь довольно сложную форму и топологию. На рис. 33 слева представлена модель распространения сложной световой волны, представляющую собой как бы мгновенную фотографию с субволновым разрешением, а справа картина волнового фронта.

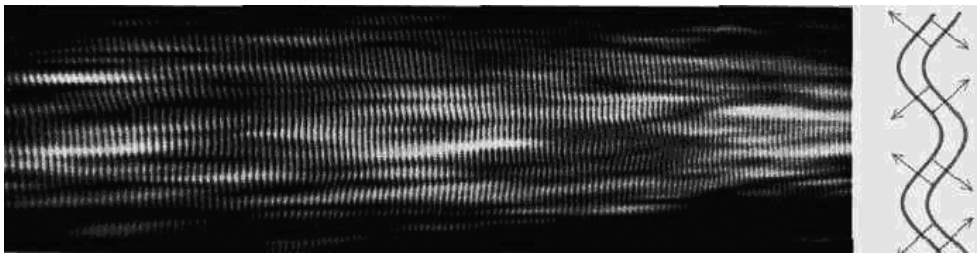


Рис. 33. Модель распространения сложной световой волны.

Из картины невозможно угадать направление движения световой волны — слева направо или справа налево. Пусть исходный (необращенный) пучок распространяется слева направо, тогда световая волна, имеющая точно такую же структуру волнового фронта, но распространяющая справа налево, будет как бы обращенной по времени по отношению к волновому фронту исходного пучка. Обращенные во времени волны принято называть фазово-сопряженными или волнами с обращенным волновым фронтом.

Изображение, которое необходимо распознать (изображенный здесь несколько искаженный квадрат), проецируется полупрозрачным зеркалом на голографический элемент. Все лучи, которые в опознаваемом квадрате соответствуют лучам одной из хранимой голограмм, складываясь, дают интенсивный выходной пучок (толстая линия); если соответствия лучей нет, выходной пучок получается слабее (линия средней толщины и тонкая линия). Интенсивный выходной пучок отражается обращающим зеркалом расположенным справа на рисунке, а поскольку данное зеркало имеет пороговые характеристики обращения волнового фронта, то слабый выходной пучок, интенсивность которого недостаточна для возбуждения обращения, проходит сквозь обращающее зеркало. Интенсивный пучок уже с обращенным волновым фронтом, наиболее совпадающем с волновым фронтом зарегистрированного на голограмме квадрата, проходя через голографический элемент справа налево, восстанавливает уже больший фрагмент волнового фронта квадрата. Более интенсивный пучок попадает на

второе обращающее зеркало без пороговых характеристик обращения волнового фронта. После второго обращения левым обращающим зеркалом часть волнового фронта, соответствующего изображению квадрата, отражается на выход системы, а также поступает на следующий проход по системе. В результате нескольких итераций на выходе системы формируется четкое изображение квадрата. Иначе говоря, система “распознала”, что входным было изображение неточного квадрата, а не круга или треугольника.

§7. Цифровые оптические процессоры

В 1984 году Б. Дженкинс из Университета Южной Калифорнии продемонстрировал первый цифровой оптический компьютер, выполнявший достаточно сложную последовательность команд. Взаимодействие двух лучей осуществлялось элементом, состоящим из жидкого кристалла и фотопроводника. Проходя, свет влияет на электрическое поле, приложенное к жидкому кристаллу, отчего меняется прозрачность элемента. Быстродействие определяется инерционностью жидкого кристалла.

В 80-е годы прошлого века интенсивно работали над созданием полностью оптических компьютеров нового поколения. Сердцем такого компьютера должен был стать оптический процессор, использующий элементы, в которых свет управляет светом, а логические операции осуществляются в процессе взаимодействия световых волн с веществом. Значительные усилия, направленные на создание оптического компьютера, привели к определенным успехам. Так, в 1990 г. в лабораториях американской фирмы "Белл" был создан макет цифрового оптического устройства (рис. 34).

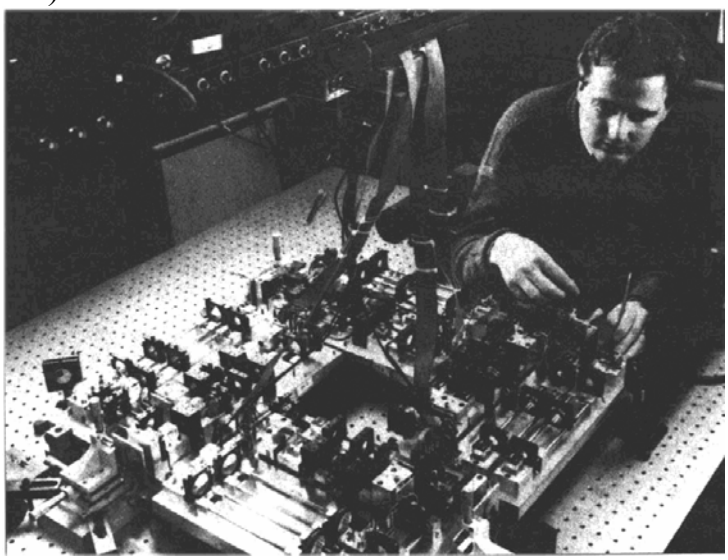


Рис. 34. Макет цифрового оптического устройства фирмы Bell .

С 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 4x8) на основе квантоворазмерных полупроводниковых структур, обладающих нелинейными электро- оптическим свойствами (self-electro-optic-effect devices - SEED).

Первоначально остановимся на основных параметрах оптических бистабильных элементов. Система называется бистабильной, если она имеет два устойчивых состояния (мультистабильная – более двух) при одних и тех

же контролируемых параметрах. В бистабильных системах, которые мы рассмотрим ниже, контролируемым параметром является интенсивность света на входе в систему, а два устойчивых состояния соответствуют двум значениям интенсивности света на ее выходе. Очевидно, что бистабильная система должна быть нелинейной, так как нельзя получить два значения интенсивности света на выходе I_T при простом умножении интенсивности света на входе I_0 на постоянное число (рис. 35, а, б, в). Для получения многозначности нелинейного пропускания системы ($T \equiv I_T / I_0$), то есть бистабильного режима, необходимо в нелинейной системе осуществить обратную связь.

Рассмотрим в общем виде поведение нелинейной системы с обратной связью (рис. 35). На нелинейную систему (представлена на схеме в виде прямоугольника; зависимость $I'_T = f(I_{in})$ нелинейная) помимо излучения интенсивностью I_0 на вход подается часть $\beta I'_T$ отраженного от прозрачной пластинки выходного излучения I'_T, то есть система охвачена положительной обратной связью ($\beta > 0$). Таким образом, интенсивность излучения внутри системы $I_{in} = I_0 + \beta I'_T$. Пропускание системы до частично отражающей свет пластинки на выходе:

$$T'(I_{in}) = \frac{I'_T}{I_0} = -\frac{1}{\beta} + \frac{1}{\beta I_0} I_{in} \qquad (1)$$

где зависимость I'_T и соответственно T' от I_{in} нелинейная.

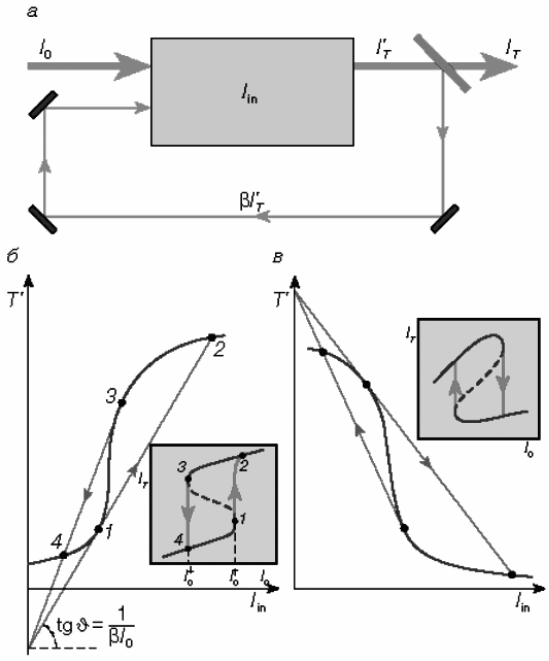


Рис. 35. а- схема нелинейной оптической системы с обратной связью; б, в – зависимости пропускания системы от интенсивности внутри элемента и на вставках зависимость интенсивности на выходе от интенсивности на входе для систем S (б) и N (в) типа.

Правая часть уравнения (1) представляет собой прямую с наклоном $1/(\beta I_0)$. Проанализировать поведение нелинейной системы с обратной связью можно применяя графический метод. Решением (1) будут точки пересечения нелинейной функции $T'(I_{in})$ с прямой. Зададим нелинейную зависимость T' от I_{in} в виде кривой, представленной на рис. 35, б. Это типичная зависимость для нелинейной насыщающейся системы: линейный рост пропускания сменяется его резким увеличением с ростом интенсивности света на входе I_0 и затем насыщением при относительно больших значениях I_0. При увеличении I_0 уменьшается наклон прямой и пропускание плавно увеличивается до значения, обозначенного цифрой 1 на рис. 35, б. Когда I_0 достигает значения $I_0^{\uparrow}$, происходит резкое увеличение пропускания (скачок из точки 1 в 2) и затем снова его плавное изменение. При обратном движении резкое уменьшение пропускания (переход из точки 3 в 4) происходит при меньшем значении входной интенсивности света $I_0^{\downarrow}$.

Итак, в области значений интенсивности света на входе в нелинейную систему с положительной обратной связью $I_0^{\downarrow} < I_0 < I_0^{\uparrow}$ возникает многозначность пропускания (бистабильный режим работы): пропускание (выходная интенсивность излучения) принимает два устойчивых значения при одном и том же значении I_0. Бистабильная система с таким видом гистерезиса называется системой S-типа. Точное решение напоминает латинскую букву S (см. вставку на рис. 35, б), однако часть решения в области, обозначенной штриховой линией, неустойчива. Аналогично можно проанализировать работу нелинейной системы с положительной обратной связью N-типа (рис. 35, в), у которой нелинейно растет поглощение при увеличении входной интенсивности света и $\beta < 0$.

Бистабильные системы можно классифицировать по способу осуществления обратной связи и механизму нелинейного пропускания. В оптическом бистабильном 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. При больших концентрациях экситонов и свободных носителей происходит просветление в области экситонного резонанса. Это связано, во-первых, с тем, что в присутствии большого числа электронов и дырок кулоновское взаимодействие между электроном и дыркой ослабляется (этот эффект называется экранированием). Во-вторых, при большой концентрации экситонов они начинают интенсивно взаимодействовать, разрушая друг друга. Поэтому экситонное поглощение исчезает при концентрации экситонов $N_{ex} \approx (\pi a_{ex})^{-3}$, a_{ex} – боровский радиус экситона.

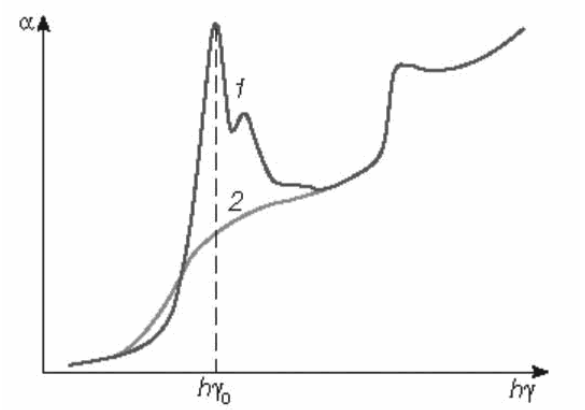


Рис. 36. Спектр поглощения полупроводниковой структуры с квантовыми ямами при отсутствии возбуждения (1) и при возбуждении экситонов и носителей заряда большой плотности. hν0 – энергия экситонного перехода.

SEED был разработан в 1986 г. и представляет собой PIN[1] 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 (MQW – multiple quantum well). 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'е (S-SEED рис. 37), 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.

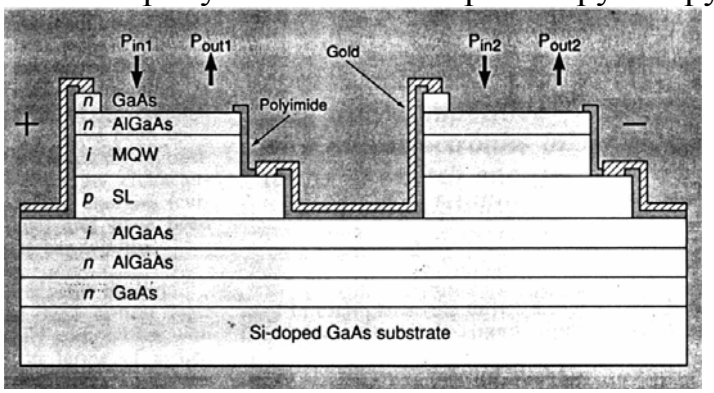


Рис. 37. Оптический логический элемент S-SEED.

[1] PIN – диод со структурой p-n перехода, в центре которого находиться слаболегированная область.

Таким образом, возникала положительная обратная связь, и совокупность таких элементов могла образовать логические ячейки «или – не», «или – и» и т.д. Первый оптический компьютер состоял из 4 каскадов и располагался на оптической плите размером I x I $м^2$. Пространственное распределение излучения на выходе каждого из каскадов компьютера определялось состоянием входящей в его состав жидко- кристаллической 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 4x8); 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 Opticomp Corporation. В DOC-II использован принцип векторно-матричного умножения, однако вектор и матрица являются булевскими логическими.

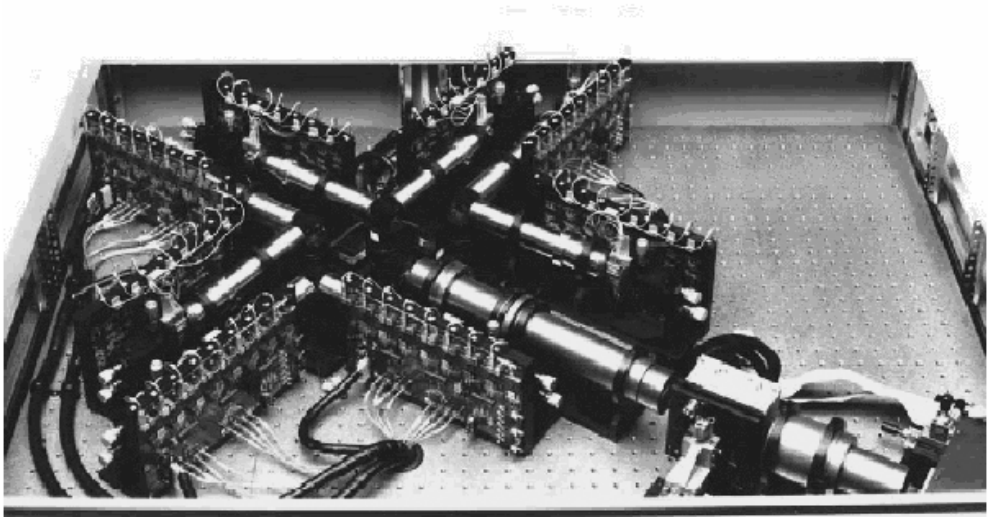


Рис. 38. Оптический компьютер DOC-II

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 64×128 элементов. Отдельный элемент матрицы представлял собой акусто-оптическую брэгговскую ячейку на основе полупроводника GaP. Свет, выходящий из рядов пространственного модулятора, попадал линейку из 128 лавинных

фотодиодов. DOC-II имел 64×128 = 8192 межсоединений и работал на частоте передачи данных 100 Мб·с$^{-1}$, что соответствует 0.8192×10^{12} переключений в секунду. Энергия на одно переключение составляет 7.15 фДж (~ 30000 фотонов). Для иллюстрации быстродействия представим, что нужно найти какое-то слово в тексте. Типичный современный персональный компьютер Duron 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 HPOC (High Performance Optoelectronic Communication). 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, совмещенной с матрицей вертикально-излучающих диодов. Опытные образцы показали производительность 4.096 Тб·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 ВОЛС работы были прекращены. В настоящее время фирма Opticomp 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.

Контрольные вопросы.

1. История информатики до компьютеров.
2. Основные даты компьютерной техники. Поколения компьютерной техники.
3. Прогноз Г. Мура.
4. Термодинамический предел электронной ячейки.
5. Квантовый предел электронной ячейки.
6. Проблема отвода тепла.
7. График фундаментальных пределов
8. Влияние емкостных характеристик. Влияние задержки сигналов.
9. Предельные возможности кремниевой технологии.
10. Основные свойства оптического излучения и его преимущества перед другими спектральными диапазонами электромагнитного излучения для передачи информации.
11. Концептуальная схема компьютера, основные элементы.
12. Типы оптических процессоров. Аналоговый оптический процессор. Аналоговые операции.
13. Принцип действия оптического аналогового устройства, реализующего умножение вектора на матрицу.
14. Оптический процессор Enlight256.
15. Получение голограммы. Сохранение информации с помощью голографии. Распознавание образов с помощью голографии.
16. Параметры первого оптического цифрового процессора и их анализ.
17. Второе поколение оптических цифровых процессоров, основные параметры.

Список литературы

1. С.А. Ахманов, С.Ю Никитин. Физическая оптика– М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004. –654 с.
2. Оптоинформатика. ч.1,2. Уч.-метод. пособие под ред. В.Г. Беспалова, О.В. Андреевой, СПб., Изд. ИТМО, 2003.
3. Проблемы когерентной и нелинейной оптики. Сборники под. ред. И.П. Гурова, С.А. Козлова, СПб., Изд. ИТМО, 2000, 2002, 2004, 2006.
4. О. Ермаков. Прикладная оптоэлектроника, М., Техносфера, 2004 г.
5. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. пер. с франц. Издательство: Техносфера 2004 г. — 591 стр.
6. А.Л. Микаэлян. Оптические методы в информатике: Запись, обработка и передача информации. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1990.-232 с.
7. Moore G.E. Progress in digital integrated electronics //IEEE IEDM Tech. Dig., 1975, P. 11-13.
8. Meindl J.D. Low power microelectronics: retrospect and prospect //Proc. IEEE, 1995, V. 83, P. 619-635.
9. McAulay A.D. Optical Computer Architectures: the Application of Optical Concepts to Next Generation Computers, John Wiley & Sons, New York, NY (1991).
10. Carts Y.A. Optical computing nears reality //Laser Focus World, 1990, V. 26, P. 53-54.
11. 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.

К истории создания факультета фотоники и оптоинформатики.

Вариант пояснительной записки, для представления на Межведомственный Совет по Государственным образовательным стандартам Высшего профессионального образования РФ для открытия нового направления подготовки бакалавров и магистров «Оптоинформатика» (2003 г., текст составляли Беспалов В.Г., Козлов С.А., Никоноров Н.В.)

1. Что такое Оптоинформатика?

1. Новые направления науки возникают на стыке наук. Например, оптоэлектроника, это уже устоявшийся термин. Здесь налицо перекрывание двух дисциплин - оптики и электроники. При этом важной особенностью является то, что невозможно установить доминирующую составляющую – оптику или электронику. В этом случае реализуется конвертация этих понятий, т.е. в одном случае электроны управляют фотонами, в другом- фотоны управляют электронами.

Оптоинформатика также возникла на стыке двух наук - оптики и информатики. В этом случае также налицо перекрывание и конвертация этих двух понятий - оптические принципы лежат в основе информатики, а информационные технологии управляют оптическими системами. В данном случае элементарными составляющими (по аналогии с оптоэлектроникой) являются фотоны и биты информации.

2. Оптоинформатика является областью науки и техники, включающей совокупность средств, способов и методов человеческой деятельности, связанных с исследованием, разработкой, созданием и эксплуатацией новых материалов, технологий, приборов и устройств, направленных на передачу, прием, обработку, хранение и отображение информации на основе оптических технологий.

Оптоинформатика (оптическая информатика) - область науки и техники, связанная с разработкой, исследованием и использованием оптических информационных технологий и систем.

Оптоинформатика (оптическая информатика) - область науки и техники, связанная с разработкой, исследованием и использованием информационных технологий и систем на основе получения, преобразования, накопления, хранения и передачи информации с помощью оптического излучения.

Оптоинформатика - область науки и техники, связанная с изучением процессов создания, преобразования, накопления, хранения и передачи

информации с помощью оптического излучения, а также разработкой и использованием информационных технологий и систем на основе этих процессов.

3. Объектами оптоинформатики являются:

- элементная база, системы и технические средства, обеспечивающие оптическую передачу, прием, обработку и хранение информации;
- системы отображения информации;
- элементная база и комплексы интегральной, волоконной и градиентной оптики;
- элементная база и системы на основе голографии;
- элементная база на основе наноразмерных и фотонно-кристаллических структур;
- оптические и квантовые вычисления и оптический компьютер;
- оптические датчики физических величин;
- элементная база на основе фотонных кристаллов и микрооптики.
- методы получения, преобразования, накопления, хранения и передачи информации с помощью оптического излучения;
- оптические информационные технологии и системы (т. е. информационные технологии и системы на основе этих методов);
- элементная база, технологии производства оптических материалов, а также компьютерные технологии и программные средства обеспечения оптических информационных технологий и систем.

2. Состояние на сегодняшний день

1. Оптоинформатика – быстро развивающееся направление в мире и в России. Такой рост обусловлен потребностями развития и совершенствования:

а) информационных технологий на основе оптических принципов, например:

- увеличения скорости и объема передаваемой и обрабатываемой информации на основе оптических принципов (от десятков гигабит до терабит в секунду);
- создания нового поколения быстродействующих и эффективных оптических компьютеров;

б) оптических технологий различного функционального назначения на основе информационных технологий.

2. В 2003 году вышло постановление президиума РАН «Об утверждении основных направлений фундаментальных исследований» от 1 июля 2003 г. №233, где в приложении к постановлению («Поиск» №35 (745, 29 августа 2003 г.) в разделе «Физико-математические науки» выделено самостоятельное направление 1.3.6. под названием «Оптическая информатика, голография».

3. В настоящее время оптическая информатика формируется как самостоятельное направление в России. Ее формированию предшествовала сложная история. На протяжении последних 10 лет Россия теряла свои

лидирующие позиции в мире в области оптики. Однако на этом фоне одновременно шел бурный рост информационных технологий. Причина падения и роста этих двух направлений понятна - это практическое отсутствие потребителя в области оптики и его наличие в сфере информационных услуг. Однако следует отметить, что в последние годы информационные технологии достигли некоторых физических и технических ограничений при продолжающемся росте потребительского спроса. Ключевым решением данной проблемы явилось объединение (слияние) оптических и информационных технологий. Таким образом, оптика через информационные технологии сейчас начинает приобретать второе дыхание с выходом на потребительский рынок. А информатика через оптические технологии начинает преодолевать физические и технические ограничения и продолжает удовлетворять растущий потребительский спрос.

4. Указанные тенденции развития оптики и информатики привели к потребности подготовки специалистов нового профиля, основу специализации которых составляет разработка приборов и систем, реализующих оптические алгоритмы информационными технологиями, эффективно решающих оптические задачи информационными способами, а информационные – оптическими. В настоящее время спрос на высококвалифицированных специалистов по направлению "Оптоинформатика" растет. Таким образом, встает задача подготовки таких специалистов.

ИТМО является на протяжении 70 лет лидирующим вузом СССР и России в области подготовки высококвалифицированных кадров по оптике. Ключевое направление подготовки специалистов, бакалавров и магистров в вузе – "Оптотехника". За последние 5 лет ИТМО вышел в лидеры и по информационным технологиям в России. Подготовка бакалавров по направлению "Информатика и вычислительная техника" является также ключевым звеном в вузе. Таким образом, ИТМО является основным вузом России, где сконцентрированы силы по подготовке специалистов по оптике и информатике. Ввиду большого научного и практического значения направления "Оптоинформатика", а также спроса на него на потребительском рынке, решением ректора и НТС ГИТМО в 2002 был организован факультет Фотоники и оптоинформатики. Однако в настоящее время факультет готовит выпускников только по направлению "Оптотехника", тогда как специалистов, бакалавров и магистров в рамках самостоятельного направления "Оптоинформатика" ни ИТМО, ни другие вузы не готовят.

Таким образом, задачу создания нового самостоятельного направления подготовки бакалавром и магистров - направления "Оптоинформатика" - следует считать назревшей и неотложной.

Учебное пособие

Виктор Георгиевич Беспалов

ОСНОВЫ ОПТОИНФОРМАТИКИ
Часть I. Информационные технологии – от электронного к оптическому компьютеру

В авторской редакции
Компьютерная верстка А.А. Городецкий

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99
Подписано к печати 25.12.06 Отпечатано на ризографе
Тираж 100 экз Заказ №959