

Архитектура ЭВМ и систем

Лекция № 2

Простейшие типовые элементы вычислительных машин

План лекции

1. Комбинационные схемы
2. Автоматы с памятью
3. Триггеры
4. Проблемы и перспективы развития элементной базы вычислительных машин

Базовые элементы вычислительных машин

Базовые элементы ВМ:

1. *инверторы (строятся на основе транзистора);*
2. *вентили (на базе двух транзисторов);*
3. *триггеры (состоят из двух вентилей).*

Классы базовых элементов по назначению:

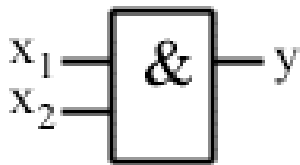
- 1) Формирующие элементы** - различные формирователи, усилители и т.п., которые служат для выработки определённых электрических сигналов, восстановления их параметров (полярности, мощности, амплитуды и т.д.).
- 2) Логические (комбинационного типа)** - это цифровые устройства, выполняющие определённую логическую операцию («И», «ИЛИ», «НЕ» и т.д.). Логические элементы являются основой построения комбинационных схем (цепей). Особенностью логических элементов и построенных на их основе комбинационных схем - их выходные сигналы зависят только от входных сигналов (т.е., не содержат памяти).
- 3) Запоминающие (последовательного типа)** - используются для построения более сложных цифровых устройств – автоматов с памятью. В них результат обработки информации зависит не только от входных сигналов, но и от внутреннего состояния автомата.

Комбинационные схемы

Для описания законов функционирования комбинационных схем используется специальный математический аппарат булевой логики.

1. Конъюнкция (логическое умножение) $y = x_1 \wedge x_2$

Эта функция реализуется логическим элементом «И» – вентилем, на выходе которого формируется уровень логической 1 тогда и только тогда, когда на все его входы будет подан уровень логической 1.



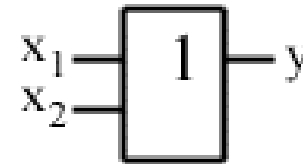
Условное обозначение «И»

X ₁	X ₂	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица истинности «И»

2. Дизъюнкция (логическое сложение) $y = x_1 \vee x_2$

Эта функция реализуется логическим элементом «ИЛИ» – вентилем, на выходе которого формируется уровень логического 0 тогда и только тогда, когда на все его входы будет подан уровень логического 0.



Условное обозначение «ИЛИ»

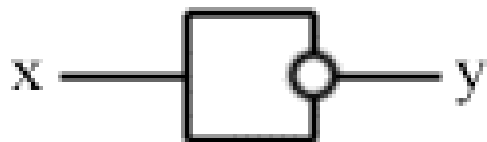
X ₁	X ₂	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблица истинности «ИЛИ»

Комбинационные схемы

3. Отрицание (инверсия) $y = \bar{x}$

Эта функция реализуется логическим элементом «НЕ» – инвертором, который изменяет входной сигнал на противоположный.



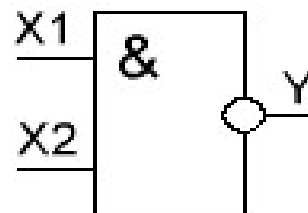
Условное обозначение «НЕ»

X	Y
0	1
1	0

Таблица истинности «НЕ»

4. Конъюнкция и инверсия (Штрих Шеффера) $y = x_1 \wedge x_2$

Эта функция реализуется логическим элементом «И-НЕ» – вентилем, на выходе которого формируется уровень логического 0 тогда и только тогда, когда на все его входы будет подан уровень логической 1.



Условное обозначение «И-НЕ»

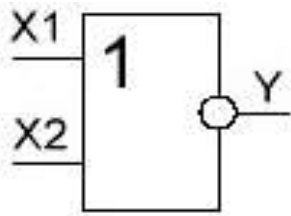
X ₁	X ₂	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Таблица истинности «И-НЕ»

Комбинационные схемы

5. Дизъюнкция и инверсия (Стрелка Пирса) $y = x_1 \vee x_2$

Эта функция реализуется логическим элементом «ИЛИ-НЕ» – вентилем, на выходе которого формируется уровень логической 1 тогда и только тогда, когда на все его входы будет подан уровень логического 0.



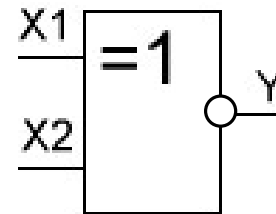
Условное обозначение «ИЛИ-НЕ»

X_1	X_2	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Таблица истинности «ИЛИ-НЕ»

6. Эквивалентность $y = x_1 \equiv x_2$

Эта функция реализуется логическим элементом «Исключающее ИЛИ-НЕ» – вентилем, на выходе которого формируется уровень логической 1 тогда и только тогда, когда на его входы подаются одинаковые сигналы (оба 0 или обе 1).



Условное обозначение
«Исключающее ИЛИ-НЕ»

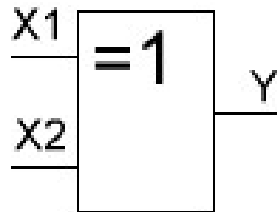
X_1	X_2	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица истинности
«Исключающее ИЛИ-НЕ»

Комбинационные схемы

6. Отрицание эквивалентности $y = \overline{x_1 \equiv x_2}$

Эта функция реализуется логическим элементом «Исключающее ИЛИ» – вентилем, на выходе которого формируется уровень логической 1 тогда и только тогда, когда на один вход подаётся уровень логической 1, а на другой – уровень логического 0.



Условное обозначение «Исключающее ИЛИ»

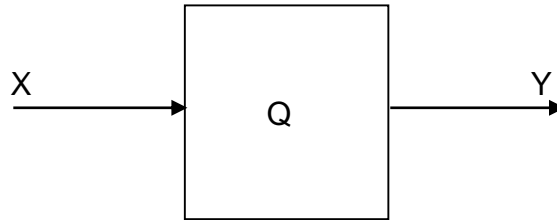
X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Таблица истинности «Исключающее ИЛИ»

Разработал: Конюхова О.В.

Автоматы с памятью

Узлы и устройства, содержащие элементы памяти, относятся к классу автоматов с памятью (цифровых автоматов).



Общая схема автомата с памятью

- **Цифровой автомат** – это абстрактное представление реального устройства. Для полного описания цифрового автомата необходимо определить пять характеристик:
 1. X – совокупность одновременно действующих входных сигналов;
 2. Y – совокупность выходных сигналов;
 3. Q – совокупность внутренних состояний;
 4. q_0 – начальное состояние автомата, $q_0 \in Q$;
 5. f – функция перехода цифрового автомата из текущего состояния в новое по значениям текущих входных сигналов, $Q_n = f(Q_m, X_m)$;
 6. φ – функция формирования текущих выходных сигналов Y_t по значениям текущего состояния и текущей совокупности входных сигналов, $Y_m = \varphi(Q_m, X_m)$.

Автоматы с памятью

- Состояние автомата с памятью называется **устойчивым**, если возникнув под действием входных сигналов, оно продолжает неограниченно долго сохраняться при сохранении или повторении этих входных сигналов.
- По видам зависимости состояний перехода и выходных сигналов, цифровые автоматы делят на два класса:

1. Автоматы Мили – в них новое состояние и выходные сигналы зависят как от текущего состояния автомата, так и от текущих входных сигналов

$$Q_n = f(Q_m, X_m); Y_m = \varphi(Q_m, X_m).$$

2. Автоматы Мура – в них новое состояние зависит от текущего состояния и текущих входных сигналов, а выходные сигналы – только от текущего состояния

$$Q_n = f(Q_m, X_m); Y_m = \varphi(Q_m).$$

- **Автономный автомат с памятью** – это цифровой автомат, не имеющий информационных входов и переходящий из одного состояния в другое под действием тактирующих сигналов по алгоритму, заданному структурой автомата.

Автоматы с памятью

- **Элементарный автомат с памятью** – это цифровой автомат, обладающий следующими свойствами:
 1. является автоматом Мура;
 2. число состояний автомата равно двум;
 3. является детерминированным (правило переходов и выходов являются однозначными);
 4. имеет полную систему переходов и выходов (функции переходов f и выходов φ описаны для всех допустимых состояний и входных сигналов);
 5. структурные каналы автомата несут двоичную информацию.
- Обычно элементарный автомат имеет два выхода: один прямой, другой инверсный, которые рассматриваются как один структурный канал. Принципы разработки, проектирования и реализации автоматов с памятью описывает теория автоматов. Ярким примером элементарного цифрового автомата является *триггер*.

Триггеры

- **Триггером** называют элементарный автомат с положительной обратной связью, который может многократно переходить из одного устойчивого состояния в другое.
- В структуре триггера можно выделить собственно элементы памяти (фиксатор) и схему управления. Фиксатор строится на двух элементах «ИЛИ-НЕ» или двух элементах «И-НЕ», связанных друг с другом «накрест», так, что выход одного соединён со входом другого. Состояние триггера оценивается по его прямому выходу.

1. По логическому функционированию различают следующие виды триггеров:

1.1 **RS-триггер**. Самый простой из всех триггеров. На его примере рассмотрим принципы функционирования триггеров. Буквой R (*Reset*) обозначается сигнал сброса триггера в 0, а буквой S (*Set*) – сигнал установки триггера в 1.

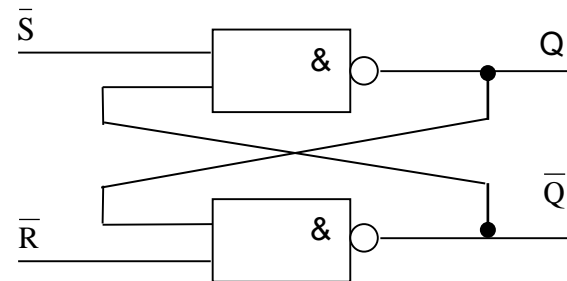
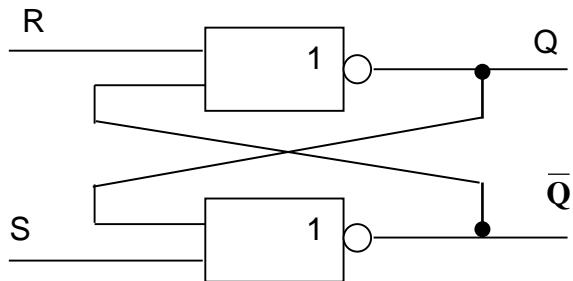
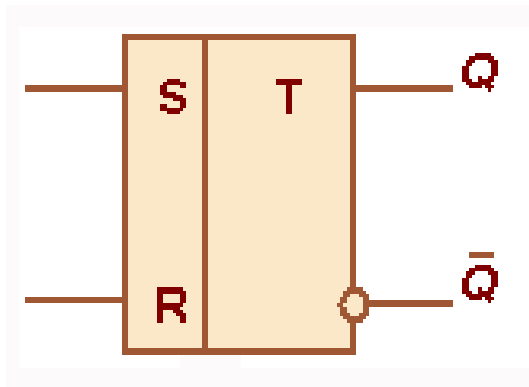


Схема RS-триггера на элементах «ИЛИ-НЕ» и «И-НЕ»

Триггеры



Условное обозначение RS-триггера

S	R	Q	\bar{Q}
0	0	без изменения	
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	запрещено	

Состояния RS-триггера

Для RS-триггера на элементах «ИЛИ-НЕ» при подаче на его входы R и S нулевых сигналов сохраняется одно из двух его устойчивых состояний.

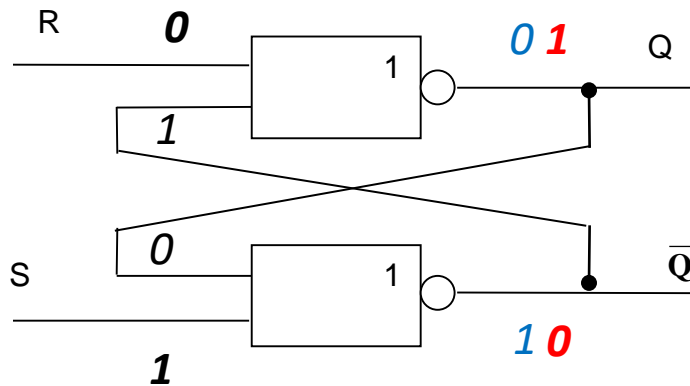
Например, если значение на выходе Q равно 1, то этот единичный сигнал поступает по цепи обратной связи на вход второго элемента и вызывает появление на выходе \bar{Q} логического 0. В свою очередь, этот 0, поступая на вход первого элемента, поддерживает выход Q в единичном состоянии. Такой режим работы RS-триггера называется **режимом хранения**.

Подача единичного сигнала на вход S переводит RS-триггер в единичное состояние (**состояние установки**).

Подача единичного сигнала на вход R сбрасывает RS-триггер в нулевое состояние (**состояние сброса**).

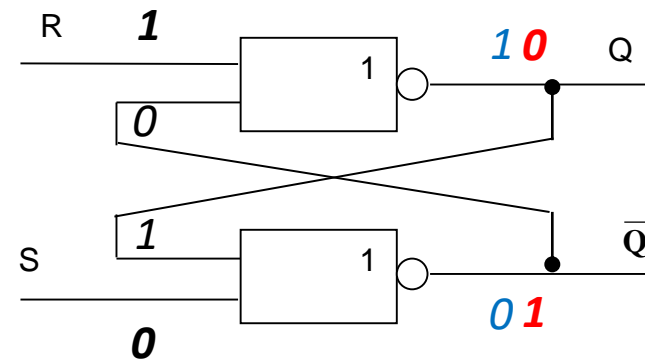
Одновременная подача сигнала установки (логической 1 на вход S) и сигнала сброса (логической 1 на вход R) не допускается и является **запрещённой**.

Триггеры



*Переход RS-триггера в
единичное состояние*

*Переход RS-триггера в
нулевое состояние*



Триггеры

1.2 **D-триггер** (от слова *Delay* – задержка) также имеет два устойчивых состояния. Его выход *Q* повторяет входной сигнал, но с задержкой, определяемой тактовым генератором.

1.3 **T-триггер** изменяет своё состояние каждый раз при поступлении входного сигнала. Его называют **счётным триггером**.

1.4 Триггер **JK** является универсальным, имеет входы установки (*J*) и сброса (*K*), подобно входам RS-триггера. JK-триггер может принимать два единичных сигнала по своим входам *J* и *K*, переходя при этом в противоположное текущему состояние.

2. По способу записи информации различают **асинхронные** (нетактируемые) и **синхронные** (тактируемые) триггеры. В первых переход в новое состояние вызывается непосредственно изменением входных информационных сигналов. В тактируемых триггерах имеется специальный вход *C* (от слова *Clock* – часы). Переход осуществляется при подаче на этот вход тактовых сигналов.

Триггер может запомнить *один бит* информации. Триггеры входят в состав устройств, где требуется запоминание данных: регистры, счётчики, последовательные сумматоры и другие.

Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

Для достижения высокой производительности ВМ их необходимо строить на новейшей элементной базе. Почти все устройства современных ВМ и ВС реализуются на базе полупроводниковых технологий в виде БИС и СБИС.

Увеличение числа элементов на кристалле БИС или СБИС позволяет повысить производительность ВМ и ВС. Решение этой задачи средствами традиционных технологий возможно :

1. либо путём увеличения размеров кристалла;
2. либо за счёт уменьшения площади, занимаемой простейшим элементом, с одновременным увеличением плотности упаковки этих элементов на кристалле .

НО:

1. Увеличение размеров кристалла возможно до определённых пределов, поскольку нарушаются его свойства и возникают технические сложности при его изготовлении.
2. Рассеиваемая мощность кристалла - величина постоянная. Увеличение числа элементов на кристалле приводит к уменьшению мощности каждого из них и, как следствие, снижению быстродействия. Для его увеличения необходимо уменьшать степень интеграции элементов на кристалле.

Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

Дальнейший прогресс в повышении производительности:

1. Архитектурные решения.
2. Новые принципы построения и работы микросхем.

В ВМ будущих поколений СБИС целесообразно объединять в системы. Несколько СБИС должны работать параллельно, а координацию работ в системе должны обеспечивать сверхскоростные интегральные схемы (ССИС), которые не могут иметь высокой степени интеграции.

Масштабные исследования проводятся также в области явления *сверхпроводимости* и *туннельного эффекта*.

3. Новые алгоритмы обработки данных.

Например, для повышения скорости вычислений всё больше применяются процессоры видеокарт. Используя специальное программное обеспечение, можно перенаправить основную вычислительную нагрузку с центрального процессора на графический.

НО: решающей преградой в дальнейшем повышении производительности традиционных ВМ является скорость электронов.

Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

Направления развития ВМ:

1. Оптические компьютеры.
2. Квантовые компьютеры.
3. Молекулярные компьютеры.
4. ДНК – компьютеры.

Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

В основе **оптических** ВМ лежит оптический процессор, операции в котором выполняются за счёт манипуляции потоков света.

Преимущества оптических ВМ:

1. Более высокая скорость световых потоков (по сравнению с электронами).
2. Способность световых потоков параллельно распространяться в пространстве.
3. Большая эффективность с позиции безопасности данных.

Сдерживающие факторы создания полноценных оптических ВМ:

1. Высокая стоимость разработки.
2. Низкая степень интегрируемости компонентов.

Сейчас существуют **электронно-оптические ВМ**: световые элементы применяются для создания оптических ядер процессоров, используются в качестве средств связи между узлами ЭВМ и ядрами традиционных многоядерных процессоров.

Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

История оптических ВМ насчитывает 30 лет.

1984 г., Б. Дженкинс, Университет Южной Калифорнии - макет первого оптического компьютера на жидких кристаллах.

1990 г., А. Хуанг и сотрудники, компания «AT&T Bell Laboratories» - оптический компьютер с процессором на базе двумерные матрицы бистабильных полупроводниковых элементов со множествами квантовых ям. Команды вводились с обычной ЭВМ. Следующее поколение - *DOC-II (digital optical computer)*.

2003 г., компания «Lenslet» - единственный коммерческий оптический процессор *EnLight256*. Его ядро основано на оптических технологиях, все входы и выходы – электронные. Производительность процессора - 8 триллионов операций в секунду. Основные сферы применения - военная промышленность и обработка видеoinформации в режиме реального времени.

В 2008 г., компания «IBM» - оптический коммутатор; обеспечивает пакетную передачу данных со скоростью более 1 Тбит/сек.

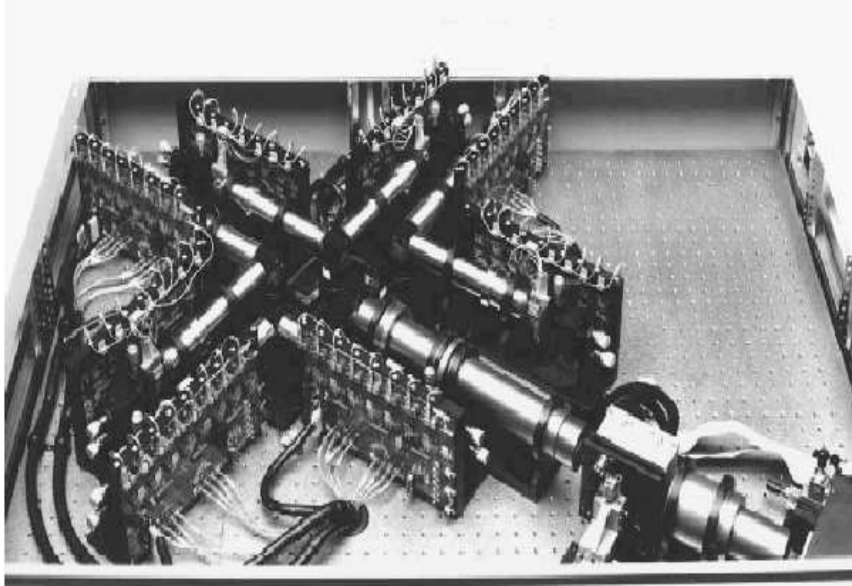
Проблемы и перспективы элементной базы ВМ

Ощутимый прогресс в сторону оптических технологий, был продемонстрирован в 2015 году, когда исследователи описали решение, которое приведет к преодолению ограничений полупроводников.

Журнал «Nature» - микропроцессор «Смена нуля». Применяя кремниевую основу в микросхемах, можно использовать фотонику. Самый распространенный пример применения фотоники – это беспроводное интернет-соединение 4G.

Ведутся работы по созданию интегрального модуля оптического компьютера. Компьютер будет называться *High Performance Optoelectronic Communication – НРОС*.

Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ



Оптический компьютер DOC-II

Процессор EnLight 256



Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

Работа **квантовой** ВМ основана на законах квантовой механики, согласно которым, энергия атома может принимать дискретный ряд значений – уровней энергии.

Излучение и поглощение атомом электромагнитной энергии происходит порциями – квантами или фотонами.

Этими переходами можно управлять путём воздействия электромагнитного поля от атомного молекулярного генератора.

Квантовые объекты (электроны или фотоны), в соответствии с принципом суперпозиции, могут одновременно находиться в нескольких состояниях, каждое из которых присутствует со своей вероятностью.

Кубит (квантовый бит) – квантовый объект, который одновременно находится в двух состояниях.

В квантовых компьютерах кубиты объединены в последовательности – **регистры**.

Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

Упрощённая схема вычисления на квантовом компьютере:

1. берётся система кубитов, на которую записывается начальное состояние;
2. состояние системы изменяется посредством квантовых операций;
3. в конце измеряется значение, которое и является результатом работы ВМ.

Одна операция над группой кубитов затрагивает все значения, которые она может принимать, что обеспечивает беспрецедентный уровень параллелизма вычислений, а, следовательно, высокую производительность.

Проблемы создания квантовых компьютеров:

1. необходимо обеспечить высокую точность измерений состояний кубитов;
2. внешние воздействия могут разрушить квантовую систему, что требует специальных установок для обеспечения оптимальных условий.

Разработал: Конюхова О.В.



Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

История квантовых компьютеров:

1980, Юрий Манин – идея о квантовых вычислениях.

1981, Ричард Фейнман – предложена одна из первых моделей квантового компьютера.

1985, Дэвид Дойч - конкретная математическая модель квантового компьютера.

Однако вплоть до середины 90-х годов направление квантовых вычислений развивалось медленно – сложности в практической реализации квантовых компьютеров.

Ноябрь, 2009 - в Национальном институте стандартов и технологий США создан программируемый квантовый компьютер, состоящий из двух кубитов.

Декабрь, 2012 - представлен новый процессор «*Vesuvius*», который объединяет 512 кубитов.

Проблемы и перспективы элементной базы ВМ

Успешные практические реализации связаны с компьютером «*D-Wave*» канадской компании «*D-Wave Systems*» (2007 – 2016 годы).

В 2016 году компанией «*Google*» смоделирована молекула водорода на 9-и кубитном компьютере.

В 2017 году компания «*IBM*» смоделировала гидрид бериллия BeH_2 (три атома).

В 2019 году компания «*Google*» представила 53-х кубитный процессор «*Sycamore*», фирма IBM представила 20-и кубитный компьютер «*IBM Q System One*» в облаке.

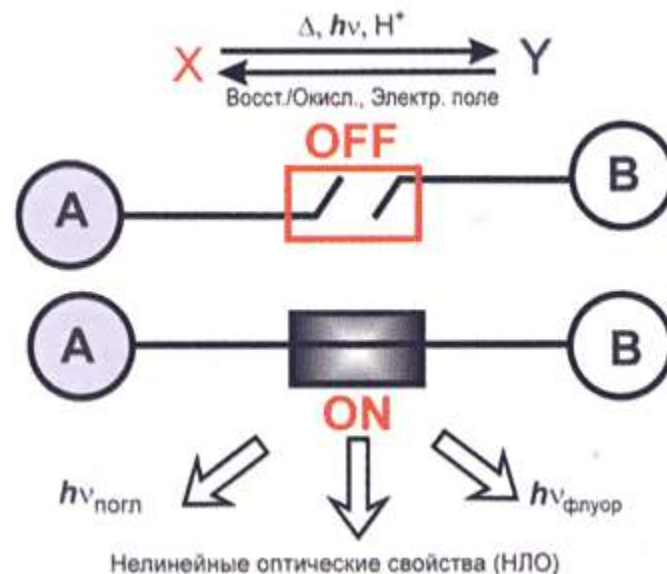
Идеи квантовой механики применяются в области криптографии.

Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

В основе **молекулярных** ВМ лежат *бистабильные молекулы*, которые могут находиться в двух устойчивых термодинамических состояниях. Каждое состояние характеризуется своими физическими и химическими свойствами. Переводить молекулы из одного состояния в другое можно с помощью света, тепла, химических реагентов, электрических и магнитных полей.

На рисунке показано влияние электрического поля на свойство молекул, которое приводит к разрыву или восстановлению связи.

Такие молекулы представляют собой транзисторы размером в несколько нанометров.



Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

Преимущества молекулярных компьютеров:

1. Значительное увеличение производительности компьютеров за счёт размещения большего числа элементов на единице площади кристалла.
2. Малое время отклика (порядка фемтосекунд, 10^{-15} секунд).

В результате, эффективность молекулярного компьютера может оказаться в 100 миллиардов раз выше, чем кремниевого.

Проблема молекулярных компьютеров – обеспечение устойчивости сложных структур молекул.

1959 г., Ричард Фейнман – идея о возможности использования молекул с особыми свойствами в качестве переключателей.

Проблемы и перспективы элементной базы ВМ

Настоящее время - создаются различные варианты основных составляющих молекулярного компьютера: переключателей, памяти, соединительных проводов.

2019 год: ученые из Hewlett-Packard и Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA) объявили о том, что им удалось заставить молекулы ротаксана переходить из одного состояния в другое - по существу, это означает создание молекулярного элемента памяти.

По оценкам учёных, полностью молекулярные компьютеры появятся к 30 годам 21 века.

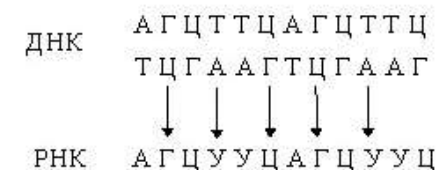
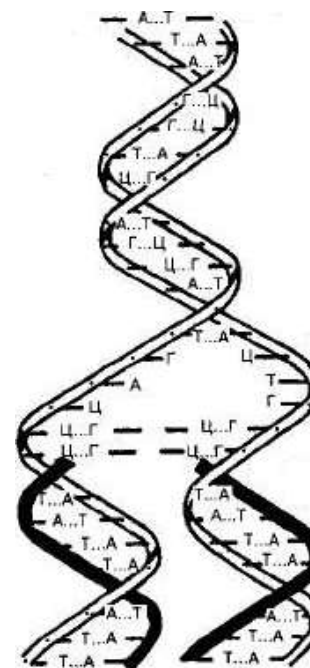
Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

ДНК-компьютеры основаны на молекулах ДНК.

В этих ВМ роль логических вентилях играют группы цепочек ДНК, которые образуют друг с другом прочные соединения.

Метод ДНК позволяет сразу сгенерировать все возможные варианты решений задачи с помощью биохимических реакций:

1. Создается одна цепочка ДНК, представляющая собой математическую или логическую проблему.
2. Генерируются миллиарды других ДНК-соединений, каждое из которых - одно возможное решение этой проблемы.
3. Компьютер отсеивает неверные решения, оставляя только одну цепочку, которая представляет собой верное решение.



Фрагмент молекулы ДНК

Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

Преимущества ДНК - компьютеров:

1. Высокая скорость вычислений (порядка миллиарда в секунду) – малые размеры молекул позволяют разместить в небольшом объёме огромное количество вычислительных модулей.
2. Работоспособность внутри человека.

Проблемы ДНК-компьютеров:

1. При увеличении количества возможных вариантов решения задачи резко увеличивается масса требуемого ДНК-материала.
2. При генерации молекул ДНК требуется трудоёмкая серия реакций при соблюдении строго определённых условий.

Наиболее перспективная сфера применения ДНК-компьютеров – медицина.

Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

История развития ДНК-компьютеров:

1994 г., Леонард Адлеман (*Leonard Adleman*) – демонстрация возможности использования молекул ДНК для выполнения вычислений (на примере решения комбинаторной задачи «о коммивояжёре»).

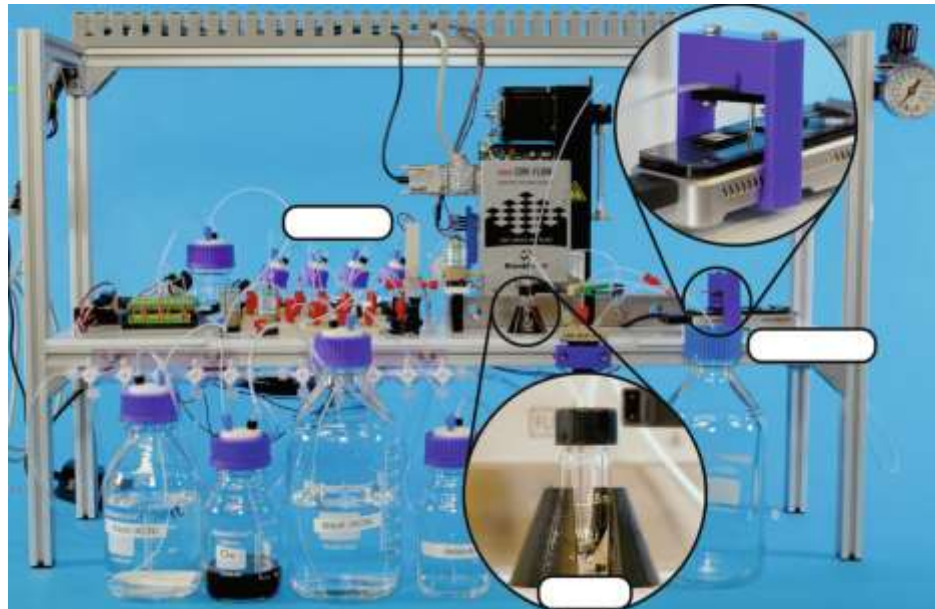
2002 г. - исследователи из Института Вейцмана (Израиль) представили программируемую молекулярную ВМ, состоящую из ферментов и молекул ДНК.

2009 г. - ученые Колумбийского университета Нью-Йорка и университета Нью-Мексико сообщили о создании ДНК-компьютера «MAYA-II» (*Molecular Array of YES and AND logic gates*), способного проводить самую точную и быструю диагностику таких вирусов, как вирус Западного Нила, куриного гриппа и др.

Проблемы и перспективы развития элементной базы ВМ

Январь 2013 г. - исследователи смогли записать в ДНК-коде несколько фотографий JPEG, набор шекспировских сонетов, и звуковой файл.

В *2019 году* учёные из Вашингтонского университета и «*Microsoft*» построили «первый в мире DNA-винчестер» (см. рисунок).



20 марта 2019 года, журнал «*Nature*» описан первый программируемый компьютер на ДНК.