

07.10;11;12

©1995

## О ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЬЮТЕРОВ

*В.В.Анциферов, Г.И.Смирнов, Г.Г.Телегин*

Процессы записи, хранения, обработки и считывания информации на атомно-молекулярном уровне подчиняются законам квантовой механики. В связи с этим Фейнман, а также целый ряд его предшественников и последователей, пришли к идее квантово-механических компьютеров [1,2]. В настоящей работе предложены возможные схемы реализации квантово-механического компьютера с использованием логических элементов на основе атомных или молекулярных структур. Управление работой компьютера осуществляется электромагнитным излучением, а также внешними электрическими и магнитными полями [3-5].

Вычислительную сеть любой сложности можно конструировать путем применения комбинаций из трех первичных логических элементов: НЕ, И и ИЛИ [1]. Первичные логические элементы квантово-механического процессора можно создавать с помощью атомов (молекул), адсорбированных на поверхности полупроводников. Электронные переходы в этих элементах осуществляются с помощью резонансного излучения, а их работа основывается на механизме резонансной поверхностной фотоионизации адатомов [6-8]. Критерием срабатывания логических элементов служит переход адатомов под воздействием резонансного излучения в возбужденное энергетическое состояние, сопровождаемый их ионизацией.

На рис. 1 представлены схемы расположения уровней энергии  $E$  рабочих состояний адатомов  $j = m, n, j$  относительно энергетических зон полупроводника для логических элементов НЕ, И и ИЛИ. Здесь через  $E_g = (E_c - E_v)$  обозначена запрещенная зона;  $E_v$  — потолок валентной зоны;  $E_c$  — дно зоны проводимости;  $\omega_1, \omega_2$  — частоты резонансного излучения.

Основное состояние адатома  $n$  попадает в запрещенную зону. При реализации логического элемента НЕ возбуждение адатома излучением частоты  $\omega_1$  в состояние  $m$  сопровождается туннельным переходом электрона с возбужденного атома в зону проводимости полупроводника, тогда как при возбуждении адатома излучением частоты  $\omega_2$  на уровень  $z$ ,

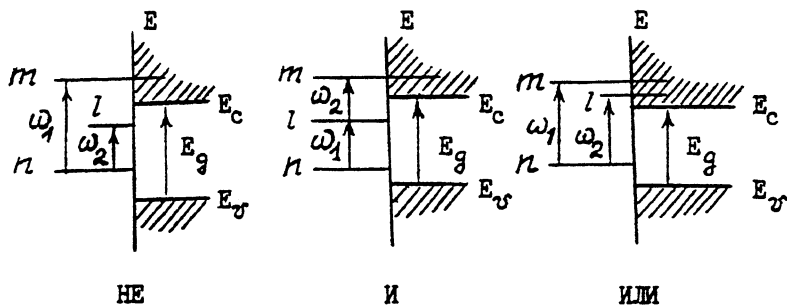


Рис. 1. Энергетические уровни первичных логических элементов НЕ, И и ИЛИ.

располагающийся на фоне запрещенной зоны, такого разделения зарядов не происходит. Элемент И реализуется посредством двухквантового перехода ( $\omega_1, \omega_2$  — частоты) через промежуточный уровень  $l$  на уровень  $m$  и последующего туннелирования электрона с верхнего уровня  $m$  в зону проводимости. В случае элемента ИЛИ поглощение адатомом излучения на частоте  $\omega_1$  или  $\omega_2$  сопровождается возбуждением состояний  $m$  либо  $l$  соответственно и туннельным переходом электрона в полупроводник.

Монослой адатомов на поверхности полупроводника с характерным размером порядка длины волны  $\lambda$  управляющего излучения твердотельный микролазер образует логический блок, содержащий около  $10^6 - 10^7$  логических элементов при  $\lambda \sim 1$  мкм и представляющий собой по существу квантово-механический микропроцессор (рис. 2). Большое количество связей между отдельными логическими элементами данного блока определяет коллективный характер вычислительного процесса в нем. В отличие от обычного процессора общая схема вычислений задается не пошаговыми инструкциями, а разветвленной структурой связей между различными элементами по типу нейроноподобных вычислительных схем [9]. Следует отметить, что современные достижения квантовой электроники обеспечивают возможность селективного лазерного воздействия на отдельные атомы [10].

Быстродействие логических элементов характеризуется вероятностью резонансной поверхностной фотоиониза-

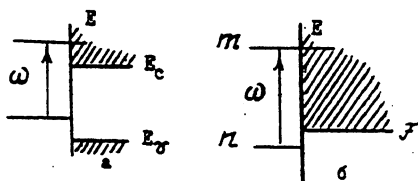


Рис. 2. Системы вывода информации.

ции  $W \sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$  [7,12], т. е. время резонансной перезарядки между адатомом и поверхностью полупроводника  $\tau = W^{-1} \sim 10^{-12} \text{ с}$ . Энергетические затраты на одно срабатывание логического элемента определяются энергией резонансных фотонов  $\hbar\omega_{1,2} \sim 10^{-12} \text{ эрг}$ . Для обратимых вариантов вычислительных систем при температуре  $T$  минимум энергетических затрат составит  $kT$  на один бит выходной информации [1,2] ( $kT \sim 10^{-14} \text{ эрг}$  при  $T \sim 10^2 \text{ К}$ ).

Нанотехнологии создания и использования гетероструктур из монослоя адатомов на поверхности полупроводников могут не только обеспечить возможность разделения зарядов, резко повышающую информационную эффективность квантово-механического компьютера, но и играть весьма важную роль в миниатюризации элементной базы традиционной оптоэлектроники. Кооперативные явления в резонансной поверхностной фотоионизации можно использовать для гетерогенного резонансного фотокатализа, позволяющего создавать вычислительную среду и устройства ввода и вывода информации по типу цепной реакции, управляемой лазерным излучением. Связи между отдельными логическими блоками (квантово-механическими микропроцессорами) обеспечивают их параллельную вычислительную работу, что превращает квантово-механический компьютер в аналог коммутационной машины [11] и резко повышает его быстродействие. Блок-схема квантово-механического компьютера содержит системы оптического ввода и оптоэлектронного вывода информации, системы создания внешних управляющих сигналов в виде электромагнитного, электрического и магнитного полей, а также процессор, включающий оперативную и архивную память. Система ввода информации работает как логический элемент И (рис. 1), где частота  $\omega_1$  уподобляется частоте входного сигнала, а  $\omega_2$  — частоте управляющего сигнала. Поэтому функции этих элементов могут быть совмещены.

На рис. 2, а изображена оптоэлектронная система вывода информации, построенная аналогично прибору с зарядовой связью (ПЗС), управляемому лазерным излучением и описанному в [8]. Выходящее из процессора электромагнитное излучение, поглощаясь адатомом на поверхности полупроводника, преобразуется при туннельном переходе электрона с возбужденного атома в электрический сигнал, связываемый с внешней электронной системой обычным образом. Сигналы из процессора могут быть получены в виде излучения лазерных диодов, расположенных в плоскости как матричные планарные структуры. В этом случае не требуется сканирования лучей по поверхности ПЗС. Другой вариант системы вывода информации, изображенный

на рис. 2, б, представлен гетероструктурой из резонансных адатомов на металлической поверхности. При возбуждении атома в состояние  $m$ , расположенное выше уровня Ферми  $F$ , электрон переходит с адатома на поверхность металла.

При реализации быстродействующей памяти и в процессах передачи информации можно использовать эффекты фотонного эха и оптической нутации, оптические солитоны и симултоны [4,5]. Применение внешних магнитных и электрических полей существенно обогащает возможности управления вычислительными процессами.

### Список литературы

- [1] Фейман Р.Ф. // УФН. 1986. Т. 149. С. 671–688.
- [2] Peres A. // Phys. Rev. A., 1985, V. 32. P. 3266–3276.
- [3] Раутиан С.Г., Смирнов Г.И., Шалагин А.М. // Нелинейные резонансы в спектрах атомов и молекул. Новосибирск: Наука, 1979.
- [4] Смирнов Г.И., Мезенцев В.К. // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. С. 1235–1243.
- [5] Смирнов Г.И., Мезенцев В.К. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. С. 336–343.
- [6] Малышев Г.Ф., Телегин Г.Г. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1195–1198.
- [7] Смирнов Г.И., Телегин Г.Г. // Препринт ИТФ СО АН СССР. 1990. № 229.
- [8] Калинин С.В., Смирнов Г.И., Телегин Г.Г. // Бюлл. изобр. 1992. № 48. Пат. РФ № 1785582А3.
- [9] *Computing with Neutral Networks* Ed. by J. Denker. American Institute of Physics. 1986. Hopfield J.J., Tank D.W. // Science. 1986. V. 233. P. 625–631.
- [10] Багаев С.Н., Дычков А.С., Чеботаев В.П. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. С. 85–88.
- [11] Nilis W.D. // The Connection Machine. The MIT Press, 1985.
- [12] Yu M.L., Kang N.D. // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P. 127–130.

Институт ядерной физики  
СО РАН  
Новосибирск

Поступило в Редакцию  
29 ноября 1994 г.  
В окончательной редакции  
11 мая 1995 г.