

В 1965 г. Гордон Мур, один из основателей фирмы Intel, на основании практических наблюдений высказал предположение, что число транзисторов на кристалле в дальнейшем будет удваиваться приблизительно каждые 24 месяца. Этот прогноз получил название «закон Мура», который хорошо знаком специалистам в области микроэлектроники. Спустя 40 лет закон продолжает работать, несмотря на начавшиеся еще в 1980-х годах попытки оспаривать сделанный прогноз.

В 2007 г. г-н Мур заявил, что его закон, очевидно, скоро перестанет действовать из-за атомарной природы вещества и ограничения скорости света. А в публикуемой ниже статье указывается временной предел действия этого закона, который следует из неоспоримых положений квантовой механики.

Перевод статьи из журнала "Proceedings of the IEEE" (N 8, Vol. 96, 2008.— P. 1247—1248) выполнен профессором БГУИР В. В. Барановым и публикуется в сокращенном варианте.

Отметим, что на Конгрессе IEEE, который проходил в сентябре прошлого года в Квебеке (Канада), Гордону Муру в торжественной обстановке была вручена почетная медаль за заслуги в области микроэлектроники и в связи с 80-летием.



Г-н Г. Мур дает автограф проф. В. В. Баранову, делегату от Белорусской секции IEEE

ДЖЕЙМС Р. ПАУЭЛЛ

КВАНТОВОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ЗАКОНА МУРА

Закон Мура точно предсказывал темпы роста мощности вычислительной техники, исходя из возрастания плотности транзисторов в кристалле интегральной схемы (ИС), начиная с 1965 г. Многие полагают, что эта тенденция будет продолжаться неопределенное время, однако законы квантовой физики могут ограничить предел миниатюризации и рост мощности компьютеров. Неопределенность Гейзенберга в терминах комптоновской длины волны частицы предполагает существование такого рода барьера даже для альтернативных подходов при квантовых вычислениях.

Закон Мура явился надежным средством прогноза развития электронной технологии, начиная с 1965 г. [1]. Однако с помощью квантовой физики можно определить конечный предел для такого рода математической модели. Согласно закону Мура, плотность транзисторов и мощность компьютеров удваиваются

каждые два года, включая период, когда ИС состояли из сотен транзисторов, и в настоящее время, когда транзисторов в кристалле (чипе) миллионы. Это оспаривалось рядом специалистов, заявляющих, что технологическая эволюция иногда не следует прогнозам, и предсказывающих отмирание закона Мура. При этом утверждалось, что закон Мура, в конце концов, в будущем сойдет на нет из-за технологических и научных ограничений [2]. Тем не менее, до сих пор инженеры и ученые находили пути решения этих проблем, и закон Мура продолжает оставаться точным средством прогноза развития технологии.

Однако современная физика постулирует, что существует абсолютный предел разрешающей способности, которого может достичь наука и техника, и это связывается с неопределенностью Гейзенберга. Где сойдутся закон Мура и неопределенность Гейзенберга и явится ли это потолком продолжающегося удвоения вычислительной мощности каждые два года?

Гордон Мур во время интервью 18.09 2007 г. на проводимой дважды в год технической конференции Intel заявлял о том, что скоро придется столкнуться с законами физики: «В следующем десятилетии или в течение 15 лет мы наткнемся на что-то действительно фундаментальное». Затем он перешел к цитированию:

«Когда Стивена Хоукинга во время его визита на Intel в 2005 г. спросили, что является фундаментальным ограничением микроэлектроники, он указал на скорость света и атомное строение вещества». Определение предельного физического ограничения закона Мура и будет означать будущую границу миниатюризации в электронике.

Математически закон Мура может быть описан выражением

$$n_2 = n_1 2^{[(y_2 - y_1)/2]} \quad (1)$$

Оно указывает на количество транзисторов n_2 (или эквивалентную вычислительную мощность) в каждый данный год y_2 в зависимости от количества транзисторов n_1 в любой другой более ранний год y_1 . Из определения закона Мура известно, что характеристический размер (длина L) транзистора обратно пропорционален количеству транзисторов n на единице площади ИС. Если n определять в m^{-1} , то можно переписать выражение (1) в следующем виде:

$$1/L_2 = (1/L_1) 2^{[(y_2 - y_1)/2]} \quad (2)$$

Для L_1 можно взять $0,045 \cdot 10^{-6}$ м — характеристический размер транзистора, достигнутый Intel и Advanced Micro Devices в 2008 году [3]. Что касается L_2 , то эту величину можно рассматривать в рамках результатов текущих и перспективных исследований в области квантовой механики.

В одной из недавних статей сообщается о прорыве в так называемой «спинтронике» в связи с определением в полупроводнике спина электрона, инжектируемого с границы раздела металл/AlGaAs или металл/GaAs. В том эксперименте спин электрона рассматривался как своего рода электрический затвор, который может обеспечить переключение будущего транзистора. Полагая, что электрон — это будущий предел в данной технологии, что можно принять в качестве характеристического размера такого транзистора?

Исходя из неопределенности Гейзенберга, характеристическим размером электрона является комптоновская длина волны $\lambda_c = h/m_e c = 2,4263 \cdot 10^{-12}$ м, при определении которой используется постоянная Планка h , масса электрона m_e и скорость света c . Комптоновская длина волны электрона, таким образом, является фундаментальным пределом для определения его положения в пространстве и основана на теории квантовой механики и специальной теории относительности. Поэтому λ_c является фундаментальным понятием для определения положения (или спина) частицы, что удовлетворяет предположению Стивена

Хоукинга, определяющего этот предел на основе скорости света и атомной природы вещества.

Переписав уравнение (2) с учетом современного характеристического размера транзистора и комптоновской длины волны $2,4263 \cdot 10^{-12}$ м или $0,00243$ нм, получим

$$(2,4263 \cdot 10^{-12} \text{ м})^{-1} = (0,045 \cdot 10^{-6} \text{ м})^{-1} \cdot 2^{[(y_2 - 2008)/2]} \quad (3)$$

Решая уравнение относительно $\Delta y = (y_2 - 2008)$, получим

$$\ln(0,045 \cdot 10^{-6} / 2,43 \cdot 10^{-12}) = (\Delta y / 2) \ln 2 \quad (4)$$

Таким образом,

$$y_2 = \Delta y + y_1 = 2(9,827) / 0,693 + y_1 = 28,36 + 2008 = 2036 \text{ (год)} \quad (5)$$

Полученный результат означает год окончания действия закона Мура, если предположить, что электрон является наименьшим квантовым элементом в структуре транзистора.

В итоге, вопрос о том, существует ли конечный предел для закона Мура, остается открытым, т. к. он зависит от инновационных решений в области физических основ электроники. Убедительным аргументом со стороны квантовой механики является то, что неопределенность Гейзенберга определяет конечный предел миниатюризации, который может быть достигнут в физике и технике полупроводников. Конкретными факторами могут выступать термические потери мощности, токи утечки, тепловой шум, что не способствует внедрению инноваций в структуре транзистора, но только для широко используемых ИС на основе кремния. В частных беседах г-н Мур утверждал, что в области техники полупроводников существуют и другие атомные ограничения, которые мешают даже приблизиться к пределу квантовой неопределенности. Однако, если эти технические проблемы будут все же преодолены, неопределенность Гейзенберга явится фундаментальным ограничением закона Мура и, если электрон рассматривать как наименьший компонент транзистора, то 2036 год станет той временной точкой, где сойдутся закон Мура и квантовая физика.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Moore G. E. Gramming more components onto integrated circuits. Electron. Mag., April 19, 1965.
2. Martell D. Intel's Moore muses on end of technology maxim, Reuters, Sep. 19, 2007.
3. Intel shows off next generation transistors, in Newscientist.com Net Service, Jan. 27, 2007. Available: www.newscientist.com