

# ЗАКОНУ МУРА 50 ЛЕТ: ЗАВЕРШЕНИЕ ИЛИ ИЗМЕНЕНИЕ? FIFTIETH ANNIVERSARY OF MOORE'S LAW: END OR REVISION?

В.Вернер, Е.Кузнецов, А.Сауров / vdv@tcen.ru  
V.Verner, E.Kuznetsov, A.Saurov

В первых двух частях статьи (см.: "Наноиндустрия", №5(58), 2015, с. 22–38 и №6(59), 2015, с. 56–68) были рассмотрены появление закона Мура и его воздействие на развитие электронной промышленности. Теперь проанализируем восприятие отраслевым сообществом закона Мура в прошлом, настоящем и будущем.

In the first two parts of the article (Nanoindustry, No. 5(58), 2015, pp. 22–38 and No. 6(59), 2015, pp. 56–72), we discussed how Moore's Law came to exist and what impact it had on electronics development. Now, we want to analyze the industry's perception of Moore's Law in the past, present and future.

**В**новь вернемся к закону Мура, но уже с точки зрения наметившихся отклонений, которые могут привести к отрицанию его влияния на развитие микро-наноэлектроники. Первым звеном стала необходимость ограничения удельной мощности, рассеиваемой единицей площади ИС микропроцессоров (МП), которая достигла

значений, характерных для бытовой электрокомфорки. В результате эквивалентного масштабирования при проектировании были установлены ограничения на размеры кристаллов бытовых и высокопроизводительных МП, а удвоение степени интеграции стало происходить уже не за два, а за три года (рис.1).

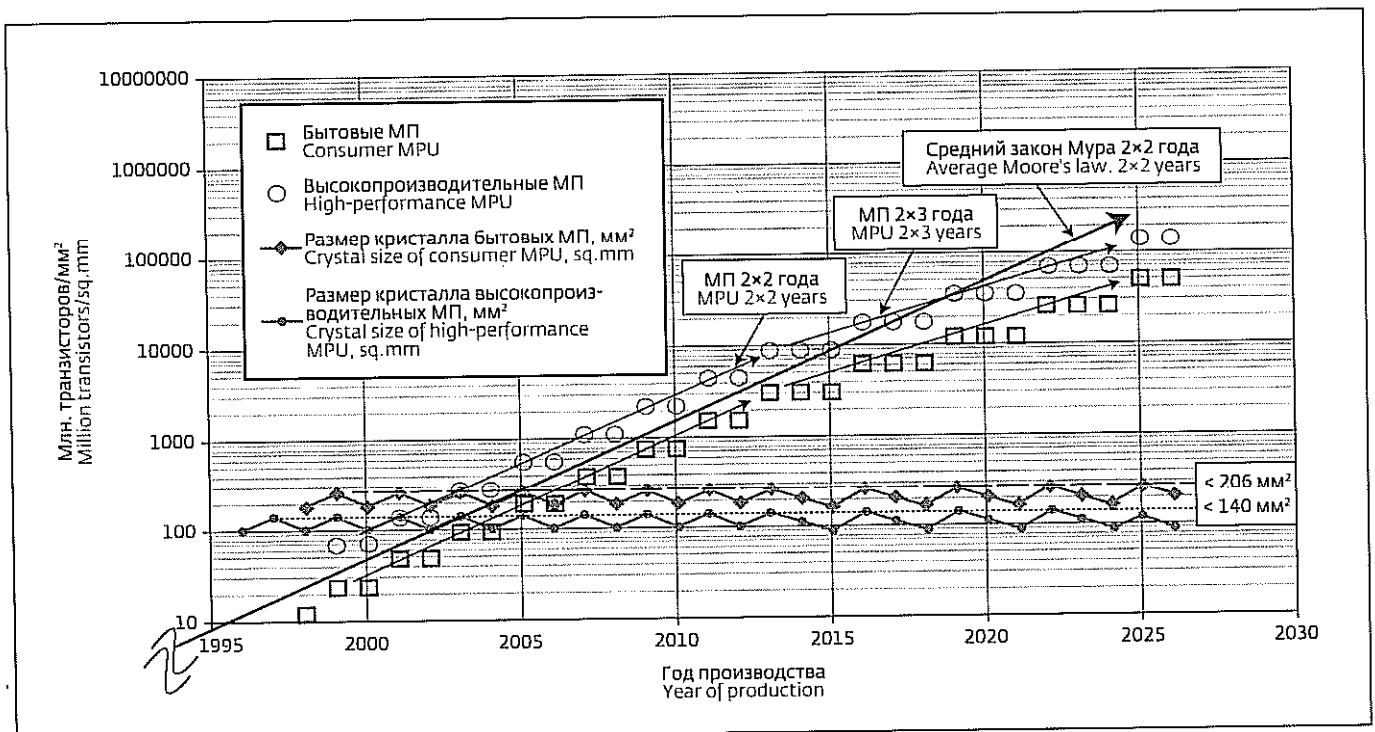


Рис.1. МП: тренды развития и закон Мура (2011 ITRS)  
Fig.1. MPU: development trends and Moore's law (2011 ITRS)

Как уже отмечалось, на уровне транзистора потребляемая мощность связана с быстродействием и напряжением питания  $V_{dd}$ . При геометрическом масштабировании эти величины должны подчиняться закону Деннарда – принципу согласованного изменения размеров элементов и характеристик транзистора в рамках закона Мура. Но на практике оказалось, что они достигли насыщения, что, в частности, было отмечено в выступлении директора МТО DARPA Б.Колвелла (Bob Colwell) на конференции в марте 2013 года [1]. Наибольшее внимание при этом было обращено на приближение  $V_{dd}$  к асимптотическому пределу при критических размерах менее 45 нм. Таким образом, дальнейшее масштабирование реально происходит при постоянной величине напряжения, в связи с чем делается вывод о прекращении действия закона Деннарда.

По мнению В.Колвелла [1] закон Деннарда прекратил действовать в 2005 году, но закон Мура продолжает действовать и в настоящее время в качественной форме: "Лучше, дешевле, быстрее" (Better, cheaper, faster). После 2020 года закон Мура в его различных формах должен быть заменен "Законом специализации и зачистки" (Post-Moore's Law specialization & cleanup), этот период характеризуется быстрым ростом тепловых ограничений для структур ИС и издержек их производства. После 2030 года возможно наступление новой электроники на базе фундаментальных законов физики (рис.2). Однако ряд ведущих фирм ищут новую электронику в микробиологии, считая, что новым "железом" после полупроводников станут вирусы и бактерии, а новой операционной систе-

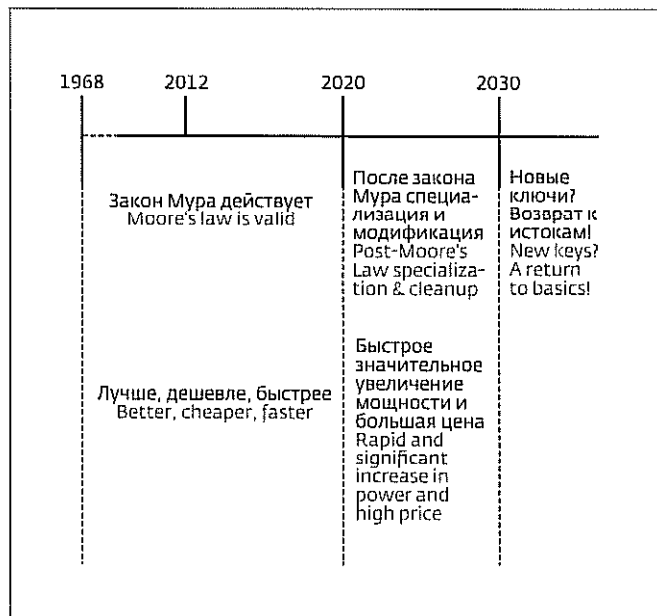


Рис.2. Во время и после закона Мура [1]  
Fig.2. During and after Moore's law [1]

мой будет ДНК [2]. Но даже на уровне молекулярных структур перспективы пока не ясны.

Закон Мура был законом стимулирования развития микроэлектроники, где главный стимул – постоянное снижение цены транзистора в ИС – перестал действовать в период освоения ИС с характеристическим размером 28 нм (рис.3) [3].

Дальнейший переход к меньшим характеристическим размерам (вплоть до 7–5 нм) делает производство все более дорогим, а цикл смены характеристических размеров все более длительным [4].

**W**e are turning to Moore's Law again, but now from the perspective of emerging deviations that may result in denying its impact on micro-nanoelectronics development. This first came into sight with the need to limit the specific power dissipated by an area unit of IC microprocessors (MPUs), which reached values similar to an electrical stove burner. Because of the equivalent scaling of design, the size of the crystal in consumer and high-performance MPUs became limited, and the

integration is doubling every three years instead of two (fig.1).

As it was noted previously, at a transistor level, the required power is related to the speed and voltage of the power supply  $V_{dd}$ . In geometric scaling, these values follow Dennard's Law, the principle of correlated changes in the size of transistor's elements and characteristics according to Moore's Law. However, in reality they appeared to have reached their limits, which was particularly noted in the statement of Bob Colwell, the Director of MTO

DARPA, at a conference held in March 2013 [1]. In his statement, the biggest focus was on the  $V_{dd}$  coming to asymptotic limit when the critical sizes are below 45 nm. Thus, further scaling is possible only with a constant voltage, so the conclusion is that Dennard's Law is no longer valid.

According to Colwell [1], Dennard's Law lapsed in 2005, but Moore's Law continues working in a qualitative way: "Better, Cheaper, Faster". After 2020, Moore's Law in its various forms must be replaced by Post-Moore's