

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 анализируем 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.

Вновь вернемся к закону Мура, но уже с точки зрения наметившихся отклонений, которые могут привести к отрицанию его влияния на развитие микро-наноэлектроники. Первым звонком 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).

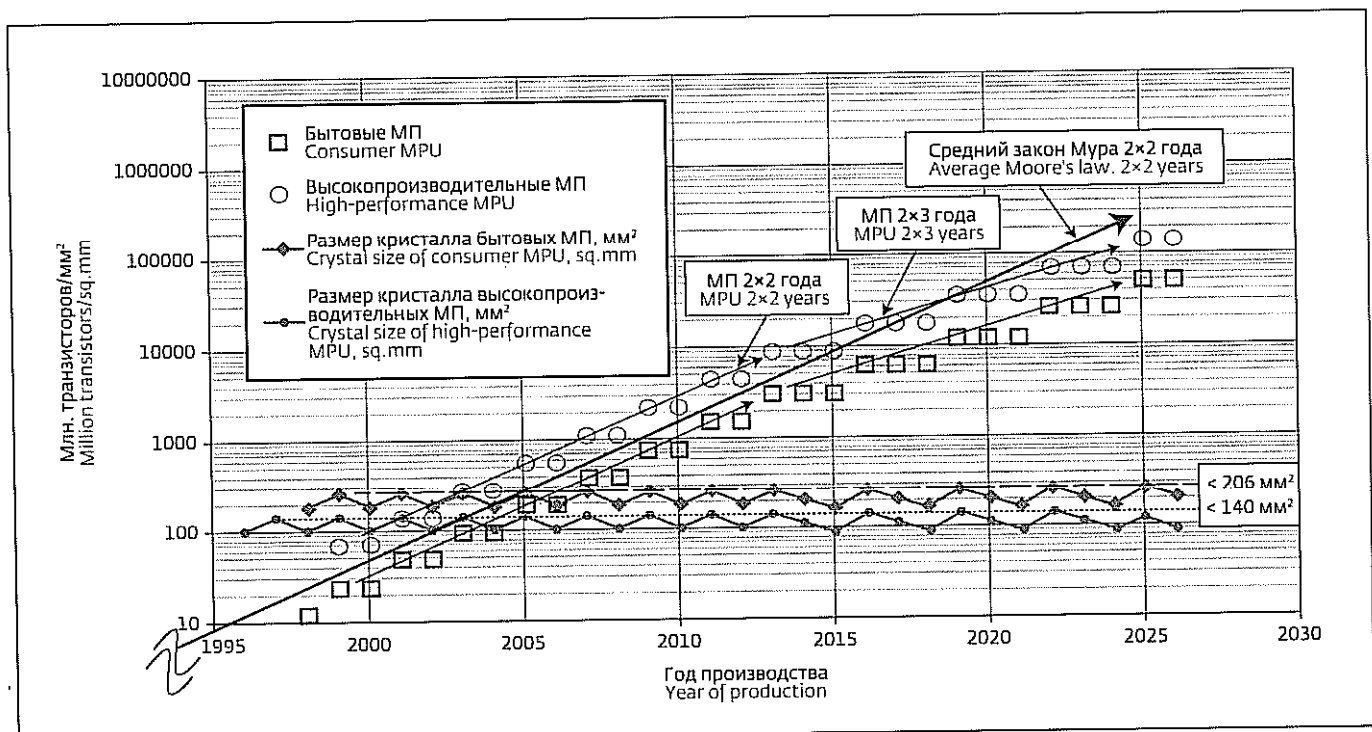


Рис.1. МП: тренды развития и закон Мура (2011 ITRS)
Fig.1. MPU: development trends and Moore's law (2011 ITRS)

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-

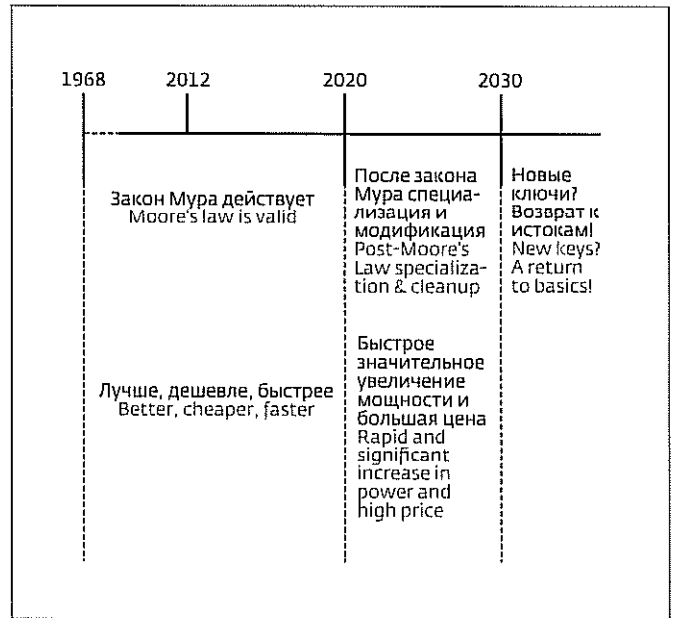


Рис.2. Во время и после закона Мура [1]
Fig.2. During and after Moore's law [1]

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].

We 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

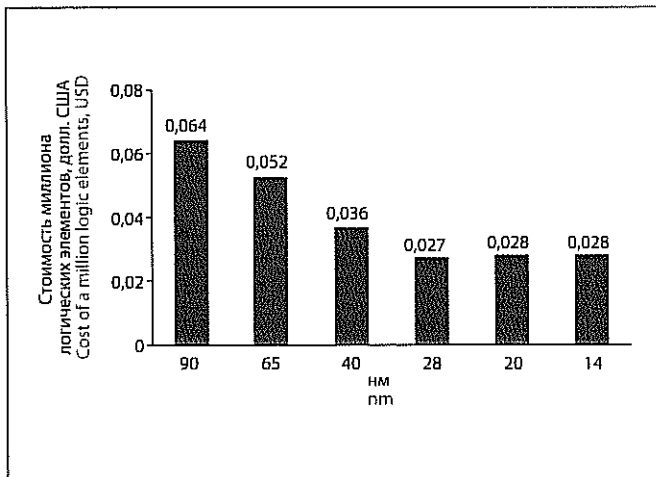


Рис.3. Стоимость становится проблемой (2013 IEEE) [3]
Fig.3. The cost becomes a problem (2013 IEEE) [3]

Тенденции изменения характеристических размеров были рассмотрены в ITRS-2013 (рис.4) [5].

Приводимые в различных аналитических материалах данные свидетельствуют о том, что, по крайней мере, внутри отдельной фирмы минимальные размеры меняются через 2 года в соответствии с дорожными картами изменений характеристических размеров (N-node).

Отклонение от тенденции снижения цены по закону Мура при повышении степени интеграции происходит из-за увеличения стоимости производства. В [6] это связывают с ростом затрат на проектирование шаблонов. Если для 90 нм про-

ектирование и использование маски обходилось в 1 млн. долл., то для 65 нм – уже в 3-4 млн. долл. причем для этих норм было необходимо 1-2 маски на каждый физический слой. После достижения 28 нм традиционный метод экспонирования неприменим. При 28 нм формирование рисунка требует трех процессов, при 14/16 нм необходимо двухкратное формирование рисунка и 8 процессов, при 10 нм – трехкратное формирование рисунка и 21 процесс [7].

Трудности развития проектирования и технологии производства изделий микроэлектроники новых поколений вызывают попытки как-то сформулировать общие тенденции. В частности, это проявилось в использовании при обсуждении развития микроэлектроники и технологии ИС математического термина "точка перегиба" (inflection point), как символа отклонения от закономерностей классического периода действия закона Мура. В зависимости от области обсуждения в качестве "точки перегиба" могут быть названы разные факторы, – например, рассмотренные в настоящей статье изменения временных законов развития микроэлектроники. В определенной мере сама оценка значимости закона Мура может рассматриваться как "точка перегиба".

Закон Мура стал энциклопедической категорией. Дебаты вокруг него ведутся с момента его появления, то есть 50 лет. При этом существует две крайности. Согласно первой из них, закон Мура отражает факт, что для каждой технологии есть вполне определенный уровень сложности

Law of Specialization and Cleanup and this period will be characterized by a rapid growth of thermal limitations in ICs and their cost of production. After 2030, new types of electronics based on the fundamental laws of physics may emerge (fig.2). However, some leading companies are investigating new electronics based on microbiology, believing that new post-semiconductor hardware will be based on viruses and bacteria, and new operating systems will be based on DNA [2]. Nevertheless, the prospects are not yet clear even at a molecular level.

Moore's Law was a law that drove microelectronics development, where the main driving force was steady reduction of the transistor cost in ICs, but it ceased to work when ICs reached the node size of 28 nm (fig.3) [3].

Further movement to a smaller node size (down to 7-5 nm) makes the production more expensive and the cycle of changes in node sizes becomes longer [4]. The trends of changes in node sizes were described in ITRS-2013 (fig.4) [5].

Various analytical materials mention that, at least in an individual firm, the minimal

sizes change every 2 years in accordance with the roadmap of N-node.

Deviations from the price reduction trend according to Moore's Law with increasing integration is associated with a higher cost of production. In [6], it is attributed to rising costs of masks. Whilst the cost of a 90 nm design and mask was around 1 million USD, the cost of 65 nm was 3 to 4 million USD, and these norms required 1-2 masks for each physical layer. After reaching 28 nm, the conventional method of exposing is no longer applicable. At 28 nm, one

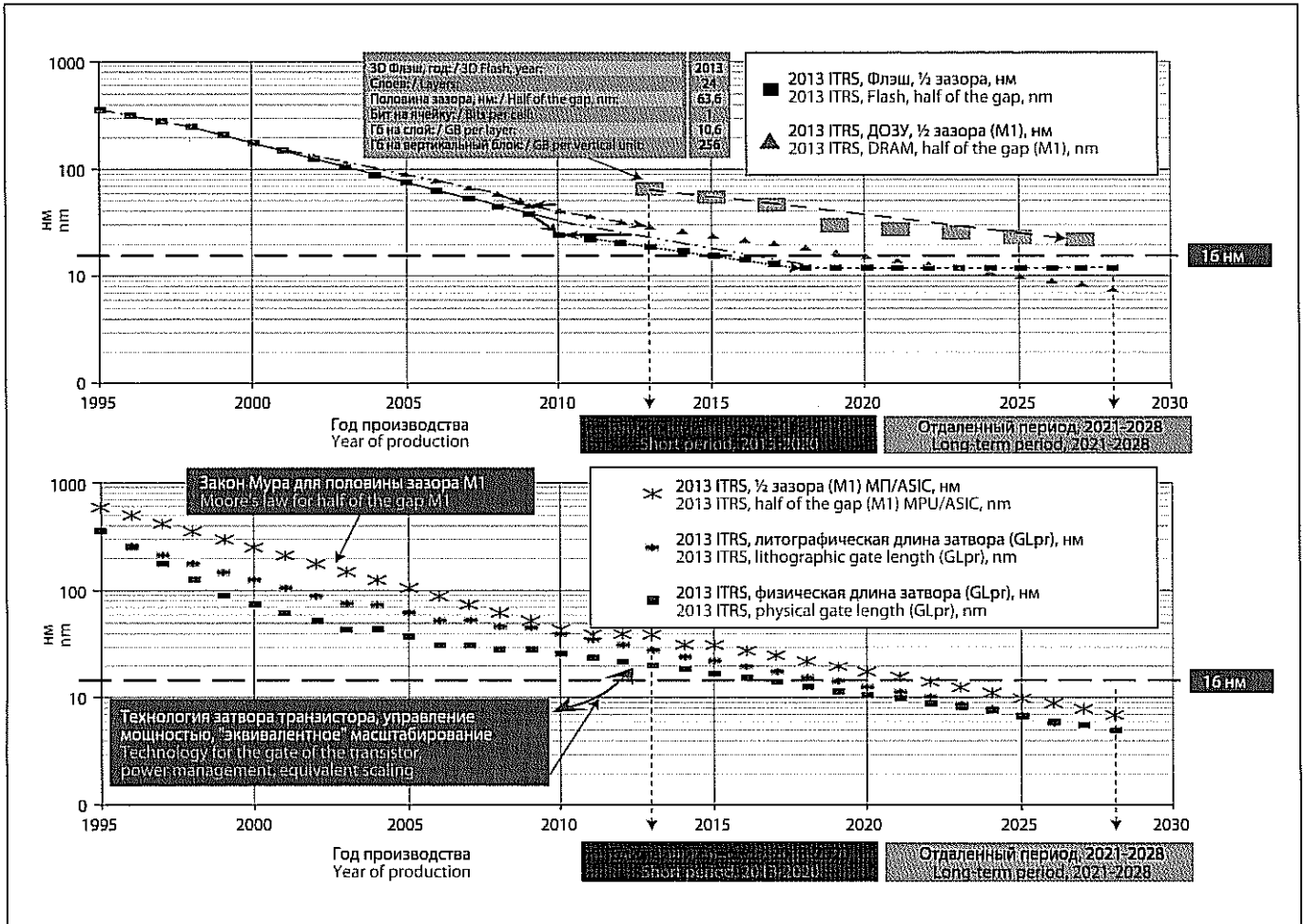


Рис.4. Тренды изменения половины зазора и длины затвора (2013 ITRS)
 Fig.4. Trends in change of half of the gap and the gate length (2013 ITRS)

pattern formation requires three processes; at 14/16 nm, 2 pattern formations and 8 processes are required; and at 10 nm, 3 pattern formations and 21 process are required [7].

The hardships in the design and production development of new generation microelectronics encourage attempts to formulate some general trend. In particular, this was manifested during the discussion of the microelectronics and technology development by the use of a mathematical term "inflection point" as a symbol denoting deviation from the classical Moore's Law.

Depending on the area of discussion, different factors may be identified as inflection points, for example, the changes in temporal laws of microelectronics development discussed in this article. To some extent, even the discussion of the effect of Moore's Law itself may be regarded as an inflection point.

Moore's Law has become an encyclopedic entry. This law has been debated since the moment of its emergence, i.e. for 50 years. There are two extreme opinions. The first one is that Moore's Law means that each technology has a certain limit

of complexity (for example, depending on the number of transistors on a chip), at which the IC component cost is minimal. The second one is that Moore's Law is only a marketing strategy for meeting the consumer demand growing at a certain pace. A faster advancement of technology is supposedly possible, but not profitable [8], in other words, it may be regarded as a tacit collusion of producers.

In fact, the strength of Moore's Law is in its objective forecast of the technological capacity for a predictable timespan. This capacity is primarily

(например, число транзисторов на кристалле ИС), при которой цена компонента ИС – минимальна. По второй из них закон Мура – это просто маркетинговая стратегия последовательного удовлетворения растущего в определенном темпе потребительского спроса. Более быстрое продвижение технологий якобы возможно, но не выгодно [8], то есть можно говорить о негласном сговоре производителей.

На самом деле сила закона Мура заключается в его объективном отражении возможностей технологии на прогнозируемый период времени. Эти возможности, прежде всего, определяются темпом снижения размеров элементов ИС. Недаром известная триада развития микроэлектроники – "меньше, быстрее, дешевле" – начинается с размерной характеристики. В классическом варианте закона Мура темпы изменений составляющих триады были согласованы. В настоящее время это согласование нарушается, что и дает повод считать закон Мура прекратившим свое действие. Но качественные характеристики – "меньше", "быстрее" и даже "дешевле" как тенденции продолжают действовать. Это позволяет считать, что и закон Мура тоже продолжает действовать.

Таким образом, оценка ситуации лежит в диапазоне от "он продолжается" через "он выполняется частично" до "он прекратился". За второй вариант оценки выступает, например, автор [9], который утверждает, что если закон Мура и прекратил свое действие, то не

по техническим, а по экономическим причинам. Это разделение закона Мура на экономическую и техническую составляющие весьма существенно. Наибольшие сомнения из них вызывает именно экономическая, которую рассматривают как основное содержание закона Мура. Как раз с этих позиций выступал автор [10] и нескольких блогов с тем же названием, считая, что закон Мура завершился при характеристических размерах 28 нм. Но живучесть технологии 28 нм заставила его изменить точку зрения, признав сохранение закона Мура для 28 нм, а общая тенденция была им охарактеризована с использованием термина "бифуркация" [11].

В статье [12] приведена интересная статистика мнений о жизнеспособности закона Мура (к сожалению, без ссылок на первоисточники): 24,8% считают, что действие закона уже прекратилось или будет прекращено при нормах 7 нм; 34,7% считают, что действие закона Мура сохраняется для производства ИС на базе FD SOI или FinFET; 14,4% связывают продление действия закона с использованием 3D-структур и 12,5% – графена; 13,6% предполагают, что действие закона никогда не прекратится. Обсуждение судьбы закона Мура обусловлено его важностью для информационного общества [13].

Закон Мура не был внутренним регламентом для микроэлектроники, многочисленные потребители также ориентировались на него. Прекращение действия закона вызвало опасе-

determined by the size reduction rate of IC elements. No wonder the famous triad of microelectronics development "Smaller, Faster, Cheaper" starts with size characteristics. In the classical version of Moore's Law, the rate of changes in the components of this triad was agreed. Currently, this agreement is disrupted, which leads to believing that Moore's Law has lapsed. However, the qualitative characteristics of "Smaller", "Faster" and "Cheaper" as trends are still valid. Therefore, it is assumed that Moore's Law is still effective.

Thus, the situation is assessed using the range from "it continues", through "it is partly effective" to "it has lapsed". The second assessment is supported, for example, by the author [9], who says that if Moore's Law has ceased to be effective, it is not for technical reasons, but for economic ones. This breakdown of Moore's Law into economic and technical parts is important. The most dubious of them is the economic part, which is regarded as the major content of Moore's Law. This opinion was supported by the author [10] and several blogs under the

same name stating that Moore's Law ended at the node size of 28 nm. However, the viability of the 28 nm technology made him change his opinion, recognizing the effect of Moore's Law for 28 nm, while the overall trend was characterized by the term "bifurcation" [11].

The article [12] provides some interesting statistics on the viability of Moore's Law (unfortunately without stating the original source): 24.8% believe that Moore's Law has ceased or will cease with the size of 7 nm; 34.7% believe that Moore's Law continues for the production of

ния дальнейшего роста цены ИС в связи с трудностями кремниевой технологии. Отраслевое сообщество старается развеять эти сомнения. Ключом для дальнейшего развития электроники в духе закона Мура будут новые технологии, новые материалы в новых приборах (например, GaAs), обновленные формы производства и научных исследований.

Попробуем несколько формализовать ситуацию с законом Мура. Важнейшей характеристикой ИС является степень интеграции при определенности ее связи с конструкционными размерами (линейными размерами элементов, площадями ячейки, транзистора, кристалла) и определенности их связи с параметрами функциональности (например, быстродействием) и ее обеспечения (например, мощностью). В свою очередь, одной из важнейших характеристик степени интеграции является темп ее повышения при определенности времени изменений конструкционных размеров и характеристик функциональности. Закон Мура вводил указанные определенности, но в настоящее время они частично нарушены или изменены, поэтому закон частично не выполняется.

Следует отметить, что в блоге [14] приводится достаточно полная цитата из статьи Мура в журнале "Electronis" 1965 года. Из нее следует, что сам Мур рассматривал свой закон как экстраполяцию прошлого опыта производства на конечный временной интервал, напри-

мер, 10 лет. В действительности срок действия закона Мура оказался существенно больше. Влияние закона на развитие микроэлектроники многообразно. В частности, оно связано с повышением степени интеграции и уменьшением характеристического размера, которые продолжают действовать.

В завершение отметим несколько работ, в которых обсуждают проблемы, связанные с законом Мура и общей ситуацией в микроэлектронной промышленности. Прежде всего, это серия из четырех блогов под общим заголовком: "Закон Мура скончался?" (Moore's Law is Dead?) [15-17]. В [15] отмечается, что по существу закон Мура информирует экосистему потребителей чипов о тренде масштабирования ИС для планирования их бизнеса. Отмечается, что в оригинальной концепции закона (1965 и 1975 годов) не обсуждается цена, быстродействие, потребляемая мощность или надежность. Речь идет только о периодическом увеличении числа компонентов в кристалле за счет увеличения площади кристалла, уменьшения размеров элементов и улучшения проектирования. В период расцвета микроэлектроники это означало, что в каждой новой генерации чипов больше компонентов, выше быстродействие и меньше цена компонента. В настоящее время число компонентов продолжает расти, но при этом уже не достигается одновременное уменьшение размеров, увеличение быстродействия и снижение стоимости компонента ИС.

FD SOI or FinFET based ICs; 14.4% attribute the extension of the Law to the use of 3D-structures and 12.5% to graphene; 13.6% believe that the Law will never lapse. The effect of Moore's Law has been ardently discussed because of its importance for the informational community [13].

Moore's Law was not some internal instruction for microelectronics industry because numerous consumers relied on it too. The termination of the Law has raised fears about further price growth of ICs in connection with the growing complexity of silicon technology.

The sector's community is trying to dispel these doubts. The key for further electronics development in the spirit of Moore's Law will be linked with new technologies, new materials used in new devices (e.g., GaAs), modernized forms of production and scientific research.

Let us try to somewhat formalize the situation with Moore's Law. The most important IC characteristic is the integration degree along with the certainty about its relation to the structural sizes (linear dimensions of elements, areas of cells, transistors, crystals)

and certainty about its relation to functional parameters (e.g., speed) and their performance (e.g., power). In turn, one of the most important characteristics of the integration degree is its rate of increase with the certainty about the timing of changes in structural sizes and functional characteristics. Moore's Law provided these certainties, but it has been partially disrupted or changed, so the Law partially fails.

It should be noted that the blog [14] provides an almost complete quote from Moore's article written in the Electronics

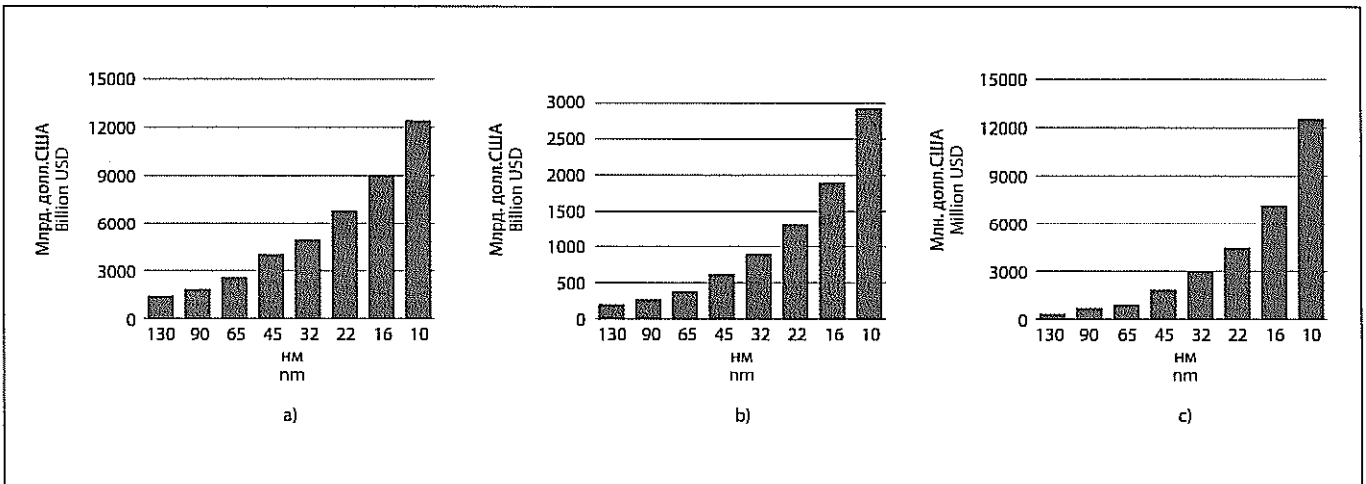


Рис.5. Изменение стоимости завода (а), развития технологии (b) и проектирования (с) в зависимости от характеристического размера [20]

Fig.5. Change in the costs of the plant (a), technology development (b) and design (c) depending on the N-node [20]

Закон Мура продолжает действовать, но уже не обеспечивает общее экспоненциальное развитие, поэтому и возникла дискуссия о его конце. В [16] отмечается, что рост стоимости процессов литографии вызывает замедление процессов перехода к новым характеристическим размерам. Многократная литография после 45 нм на основе источников 193 нм подходит к своему экономическому пределу, хотя технически непреодолимых препятствий нет.

Сочетание технологических и экономических проблем приводит к реальным ограничениям экс-

поненциального роста микроэлектронного рынка. Возможно, они могут быть сняты за счет инноваций в создании новых типов ключей.

В [17] указывается, что закон Мура просто подчеркивал тенденцию постоянного улучшения характеристик ИС. В 1997 году Мур отметил, что двигателем промышленности является низкая стоимость изделия, которая делает его распространенным. При одинаковом числе транзисторов можно повышать функциональность и расширять области применения ИС. Новая генерация ИС может быть или быстрее, или меньше по

journal (1965). It says that Moore considered his law to be an extrapolation of the past production experience on a finite time interval, e.g. 10 years. In fact, Moore's Law appeared valid substantially longer. The impact of the Law on microelectronics development is manifested in many ways. In particular, this impact is associated with a higher integration degree and node size reduction, which go on occurring.

In conclusion, we note several works, which discuss the problems associated with Moore's Law and the general situation in the microelectronic industry. Above all, it is

a series of four blogs titled "Moore's Law is Dead?" [15-17]. In [15], it is noted that essentially Moore's Law informs the consumers of chips on the trend in IC scaling for planning their businesses. It is noted that in its original concept, the Law (1965 and 1975) did not discuss the price, speed, power consumption or reliability. It only described a periodic increase in the number of components in a crystal associated with the increasing chip area, reduction in the size of elements and design improvements. In the heyday of microelectronics, it meant that each new generation of chips had more components, higher speed

and lower cost. Currently, the number of components continues growing, but it is no longer accompanied by the diminishing size, increasing speed or reducing cost of IC components.

Moore's Law is still working, but it no longer describes the general exponential development, therefore it raised discussions on its termination. In [16], it is noted that the rising cost of lithography causes slower transition to a new node size. Multiple lithography below 45 nm based on 193 nm sources is approaching its economic limit, though technically it does not have any insuperable obstacles.

размерам элементов, или функциональней, или дешевле. Общий вывод: новая генерация коммерческих ИС должна быть лучше. Собственно, на это и был нацелен закон Мура. Сам Мур признает, что название его формулировок временных тенденций развития микроэлектроники законом и долговечность последнего были для него неожиданными [18].

Масштабирование в микроэлектронике продолжается за счет инноваций в области процессов, материалов и проектирования. С 1980 года по настоящее время цена транзистора в ИС снизилась на шесть порядков, и на семь порядков вырос рынок приложений ИС с этими транзисторами [19].

Общее удорожание на всех этапах производства ИС (рис.5), конечно, замедлило темп развития полупроводниковой электроники, но оно продолжается вместе с продолжением масштабирования: 14/16 нм, 10 нм, 7 нм и далее 5 нм. При этом масштабирование на уровне приборов дополняется масштабированием на уровне систем [21], создается определенное подобие "виртуальной ИВМ" (virtual IBM's) с масштабированием от проектирования, изготовления и до корпусирования ИС. Масштабирование часто связывают с законом Мура как основным фактором развития микроэлектроники.

Закон Мура стал символом развития микроэлектроники. Без электроники невозможно развитие современного "умного" общества. На рис.6 мы иллюстрируем этапы развития закона Мура как отражения развития электроники.

В качестве заключения отметим некоторые тенденции в развитии современной микроэлектроники:

- Продолжение 2D-масштабирования при характеристических размерах 20/16/14 нм, а в будущем – 10/7/5 нм.
- Продолжение производства ИС с характеристическими размерами ≥ 28 нм.
- Улучшение параметров ИС в триаде 3р (power, performance, price) – мощность, быстродействие, цена.
- Использование транзисторов с полным обеднением и противостояние FinFET и FDSOI.
- Развитие 3D ИС и 3D траектории масштабирования.
- Бурное развитие домена "Другое чем Мур".
- Относительно медленное развитие домена "Вне КМОП".
- Акцент на переоснащение, а не увеличение производственных мощностей.
- Подготовка новых технологий для снижения стоимости обработанной пластины, включая EUV-литографию и пластины диаметром 450 мм.
- Обсуждение закона Мура при поиске путей дальнейшего развития микроэлектроники.
- Использование значительного числа новых материалов для вновь разрабатываемых и уже выпускаемых типов приборов.
- Ускорение воздействия требований заказчиков и конечных потребителей на разработку новых типов приборов, например, для носимой и потребительской техники.
- Переход к новой структуре изданий ITRS – ITRS 2.0.

The combination of technological and economic problems cause real limitations for the exponential growth of the microelectronics market. Perhaps, these limitations can be undone by innovations creating new type keys.

The article [17] states that Moore's Law only highlighted a trend of continuous improvements in IC characteristics. In 1997, Moore noted that the industry driver was the low cost of the product, which made it widespread. It is possible to improve the IC functionality and scope of use with the same

number of transistors. A new generation IC may be faster, or with smaller elements, or more functional, or cheaper. The general conclusion is that new generations of commercial ICs must be better. Actually, this was the objective of Moore's Law. Moore himself admitted that he named the temporal trend of microelectronics development as a law, but its longevity was unexpected for him [18].

Scaling in microelectronics continues occurring through innovations in processes, materials and design. From 1980 to present, the transistor price has

reduced by six orders of magnitude, and the market of IC applications with these transistors has grown by seven orders of magnitude [19].

The general rise in costs at all stages of IC production (fig.5) has certainly slowed down the development pace of semiconductor electronics, but it goes on with the continued scaling to 14/16 nm, 10 nm, 7 nm and 5 nm. Scaling at the level of devices is complemented by scaling at the level of systems [21], when a kind of IBM's Virtual is being created with the scaling of IC design, production and packaging.

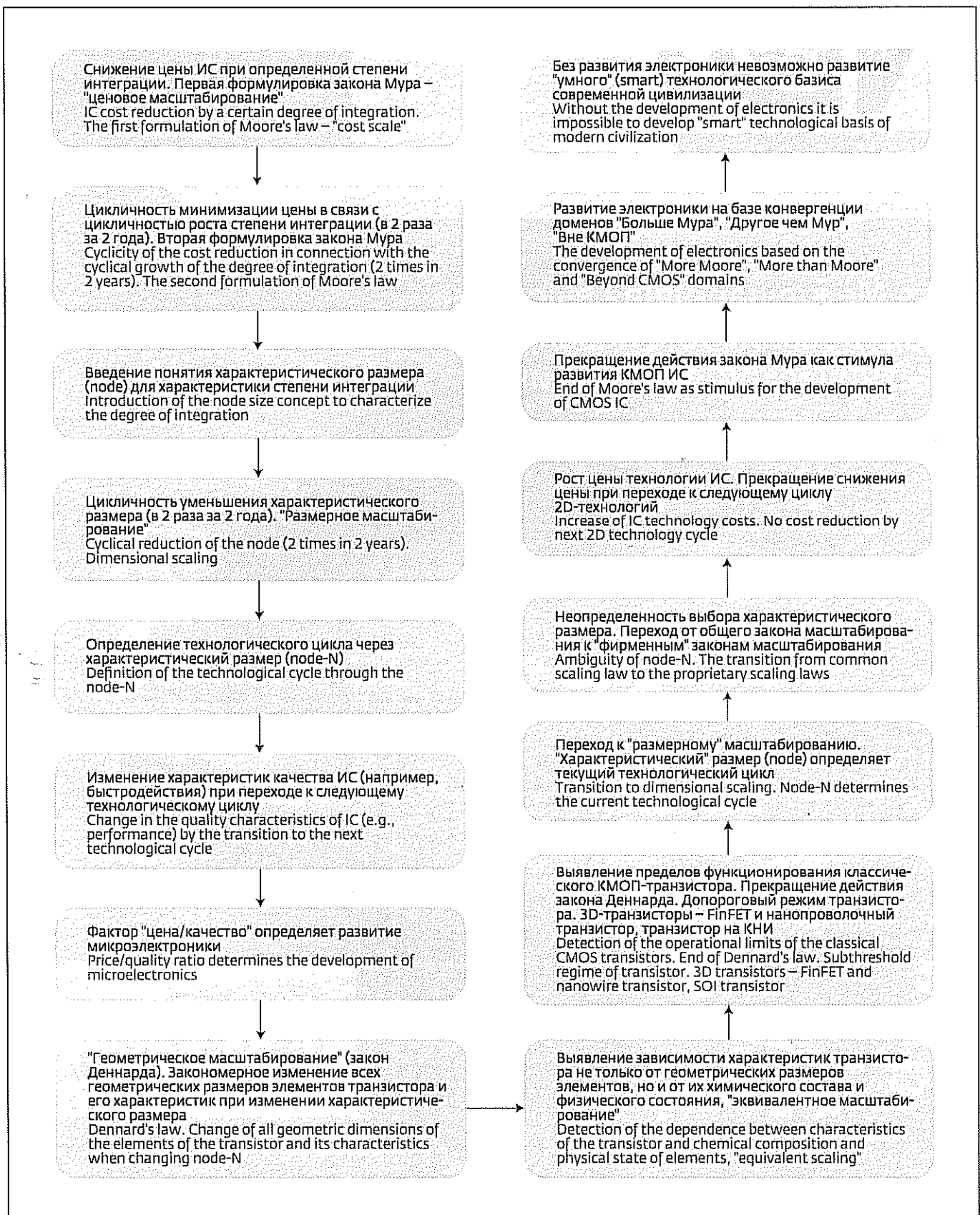


Рис.6. Этапы закона Мура
Fig.6. Stages of Moore's law

ЛИТЕРАТУРА

1. Colwell B. EDA at the End of Moore's Law. - www.darpa.mil, 2013.
2. Intel, Microsoft и Autodesk ищут новую электронику в микробиологии. - <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/news/51820/doc/71646>.
3. Singer P. IEDM: Nanoelectronics provide a path beyond CMOS/ - <http://electroiq.com/blog/2012/12/iedm-nanoelectronics-provide-a-path-beyond-cmos>.
4. Stroh I. IEDM 2013: Bei 7 nm wird's zu teuer // <http://www.elektroniknet.de/halbleiter/sonstiges/artikel/104096>.
5. ITRS-2013, P.23.
6. Martin B. Are We At an Inflection Point with Silicon Scaling and Homogeneous ICs? - <http://semimd.com/blog/2014/10/15/are-we-at-an-inflection-point-with-silicon-scaling-and-homogeneous-ics>.
7. Dorsch J. Changes and Challenges Abound in Multi-patterning Lithography. - <http://semimd.com/blog/2015/01/26/changes-and-challenges-abound-in-multi-patterning-lithography>.
8. Закон Мура - закон или маркетинговая стратегия? - 14.05.2012.
9. Davis S. At The ConFab 2014: Do we still need Moore's Law? - <http://electroiq.com/blog/2014/06/at-the-confab-2014-do-we-still-need-moores-law>.
10. Zvi Or-Bach. Are we using Moore's name in vain? - <http://electroiq.com/blog/2013/11/are-we-using-moores-name-in-vain>.
11. Zvi Or-Bach. Moore's law to keep on 28 nm. - <http://electroiq.com/blog/2015/05/moores-law-to-keep-on-28-nm>.
12. Макушин М. Домасштабировались? Экономика уменьшения топологий // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2014. №3 (00134). С. 134-147.
13. Закон масштабирования Деннарда // Открытые системы. 2012. № 2.
14. Davis S. ConFab panelists discuss optimizing R&D in the changing semi landscape. - <http://electroiq.com/blog/2014/06/confab-panelists-discuss-optimizing-r-d-in-the-changing-semi-landscape>.
15. Moore's Law is Dead - (Part 1) What? - <http://electroiq.com/eds-threads/2014/07/02/moores-law-is-dead-part-1-what>.
16. Moore's Law is Dead - (Part 2) When? - <http://electroiq.com/eds-threads/2014/07/10/moores-law-is-dead-part-2-when>.
17. Moore's Law is Dead - (Part 4) Why? - <http://semimd.com/eds-threads/2014/07/23/moores-law-is-dead-part-4-why>.
18. Takahashi D. Intel's Gordon Moore speculates on the future of tech and the end of Moore's Law. - <http://venturebeat.com/2015/05/11/intels-gordon-moore-speculates-on-the-future-and-the-end-of-moores-law>.
19. Can we take cost out of technology scaling? - <http://electroiq.com/petes-posts/2014/07/14/can-we-take-cost-out-of-technology-scaling>.
20. <http://electroiq.com/wp-content/uploads/2014/07/2.png>.
21. Dorsch J. The End of Scaling? - <http://electroiq.com/mysemicondaily/2014/07/09/the-end-of-scaling>.

Scaling is often associated with Moore's Law as a major factor of microelectronics development.

Moore's Law has become a symbol of microelectronics development. Without electronics, it would be impossible to develop a modern "smart" society. Fig.6 illustrates the development stages of Moore's Law as a reflection of electronics development.

In conclusion, we bring forward some trends in the development of contemporary microelectronics:

- Continuation of 2D scaling with node sizes of 20/16/14 nm, and later - 10/7/5 nm.
- Continuation of production of ICs with node sizes ≥ 28 nm.
- Improvement of IC parameters according to 3P Triad (Power, Performance, Price)
- Use of transistors with full depletion and competition between FinFET and FDSOI.
- Development of 3D IC and 3D scaling.
- Rapid development of "More than Moore" domain.
- Relatively slow development of "Beyond CMOS" domain.
- Focus on retooling rather than on increasing production capacity.
- Elaboration of new technologies for reduction of processed wafer cost, including EUV lithography and 450 mm wafers.
- Discussion of Moore's Law in search for ways of further microelectronics development.
- Use of a large number of new materials in newly developed and existing devices.
- Increasing requirements of customers and end users for development of new devices, for example, wearable and consumer technologies.
- Transition to a new ITRS structure - ITRS 2.0. ■