

# ЗАКОНУ МУРА 50 ЛЕТ: РАЗВИТИЕ МИКРОНАНОЭЛЕКТРОНИКИ

## FIFTIETH ANNIVERSARY OF MOORE'S LAW: DEVELOPMENT OF MICRO- AND NANOELECTRONICS

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

В первой части статьи (см. "Наноиндустрия", №5 (58), 2015, с. 22–38) была рассмотрена история появления закона Мура и его эволюции в связи с масштабированием. Во второй части рассматривается влияние закона Мура на развитие микр- и наноэлектроники и его воздействие на изменения в структуре отрасли.

The first part of the article (Nanoindustrie, No.5(58), 2015, p. 22–38) described the history of Moore's Law and its evolution in connection with scaling. The second part of the article examines how Moore's Law influenced the development of micro- and nanoelectronics, and what changes it caused in the structure of the industry.

**З**акон Мура оказал огромное влияние на развитие полупроводниковой электроники, определив высокие темпы роста ее важнейшей составляющей – микроэлектроники. В свою очередь это способствовало появлению и развитию новых направлений, например, микросистемной техники в форме МЭМС, а затем и наноэлектроники. В результате электроника стала ведущей отраслью, во многом определяющей развитие мировой экономики в целом (рис.1).

В материалах SEMI отмечено, что с 2013 года рынок микроэлектроники окончательно преодолел величину 300 млрд. долл. США [2]. Но освоение новых характеристических размеров происходит более медленно (рис.2) [3].

Несмотря на финансовые сложности, микроэлектроника остается высоко наукоемкой отраслью и капвложения на НИОКР сопоставимы или даже превышают капвложения на производство. В 1970–80 годах эти капвложения составляли 7–8% от прибыли, постоянно росли и достигли максимума в 2008 году – 17,5% [4]. В настоящее время они вновь возвращаются к 5–7% [5]. Но это средние цифры. Лидеры имеют большой рост, хотя он может быть и не постоянным и зависит от политики фирмы в области НИОКР [4].

Существенную роль в развитии научного базиса производства ИС играют различные формы коллективного участия фирм в этом процессе. На начальном этапе развития микроэлектроники они были направлены на решение проблем интегрированного производства (IDM) ИС. Изменение

структуры производства ИС, то есть появление помимо IDM новых форм специализации foundry-fabless, привело к встречным тенденциям. Фирмы IDM стали использовать элементы foundry-fabless, а последние стали организовываться в системы, подобные IDM [6].

Новые консорциумы стали включать производство ИС, производство оборудования и материалов, развитие САПР. Ожидается включение в них и системных компаний [7]. По выражению автора [8], исследования всегда были в ДНК

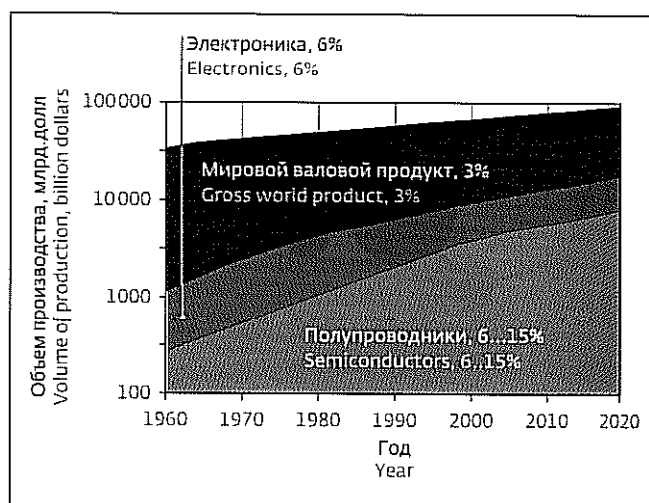


Рис.1. Сравнение темпов развития мирового валового продукта, электроники и полупроводников [1]

Fig.1. Comparison of growth of gross world product, electronics and semiconductors [1]

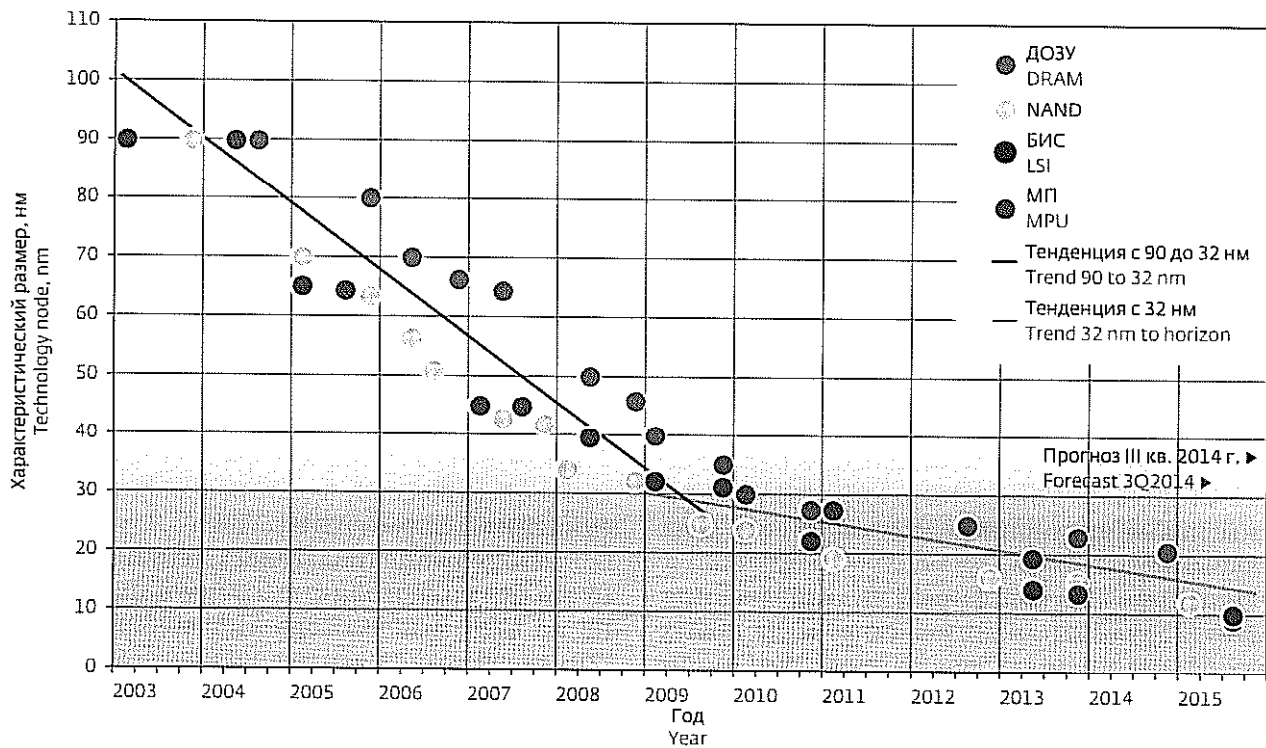


Рис.2. Переход к новым характеристическим размерам в массовом производстве [3]  
 Fig.2. Volume production technology node transitions [3]

микрoэлектроники. Только небольшое число других отраслей имеет близкий уровень отчислений на науку от прибыли. При этом движущей силой исследований был закон Мура, который выражался "мантрой": "дешевле, лучше, быстрее, меньше" ("cheaper, better, faster, smaller") [8]. Аналогичную позицию занимает президент ASML

Мартин ван ден Брипк, считающий, что говорить о конце закона Мура очень непродуктивно, потому что фактически это экстраполяция прошлого: нет закона Мура, а есть много идей многих умных людей в электронной промышленности [9].

Вице-президент IMEC Людо Деферм [10] отмечает, что полупроводниковая промышленность

**M**oore's Law greatly influenced the development of semiconductor electronics by setting high growth rate of its most important component - microelectronics. Subsequently, it contributed to the emergence and development of new areas, for example, microsystem technology in the form of MEMS and nano-electronics. As a result, electronics has become the leading sector, largely determining the development of the world economy as a whole (fig.1).

According to the SEMI, the market of microelectronics definitively went over 300 billion USD in 2013 [2]. However, new characteristic dimensions are developing more slowly (fig.2) [3].

Despite financial difficulties, microelectronics remains a highly knowledge-intensive industry and the R&D capital expenditures are comparable to or even higher than the capital expenditures of production. In 1970-80s, the capital expenditures were 7-8% of the profits, growing steadily and peaking

at 17.5% [4] in 2008. Currently, they are falling back to 5-7% [5]. However, these are average figures. The leaders enjoy large growth, which may be not steady, though, and which depends on the company's policy in the field of R&D [4].

Various forms of companies' collective participation in this process plays a significant role in the development of the scientific basis for the manufacture of ICs. At the initial stage of microelectronics development, they focused on resolving the problems of integrated device

развивалась по закону Мура почти 50 лет, но может ли и он и дальше поддерживать развитие? Новые технологии (EUV, переход к 450 нм), в принципе, могут привести к снижению цены транзистора, но первоначальные затраты на оборудование очень велики, и неизвестно как они будут компенсированы. Одна из возможностей снижения первоначальных издержек – широкое развитие кооперации, и считается, что ближайшие годы будут с этой точки зрения критическими, так как уровень кооперации между производственными, исследовательскими и государственными структурами разного уровня определит темпы роста. Закон Мура устанавливал общие задачи развития отрасли. Возможно, что по отдельным направлениям, например, в 3D-интеграции, будут выработаны новые критерии развития, своего рода "локальный" закон Мура.

Если раньше ведущие фирмы выделялись, прежде всего, объемами производства, то на новых этапах развития микроэлектроники они стали обладателями более продвинутых конструктивно-технологических базисов, таких как, например, FinFET фирмы Intel. По существу, возникло большее число фирменных конкурирующих технологий, а их выбор, в определенной мере, зависит от доли компании на рынке.

Фирмы с большими объемами массового производства ориентируются на переход к пластинам 450 мм и EUV-литографии. Компании с малыми и средними объемами производства рассматривают различные другие технологии литографии,

включая продолжение использования субволновой иммерсионной литографии 193 нм с применением многократного формирования рисунка (multiple patterning) и новых технологий прямой самоорганизации (directed self-assembly – DSA). Другим вариантом может быть безмасочная литография (maskless lithography – ML2) с использованием матриц лазерных или электронных пучков [11].

В рамках развития микроэлектроники происходит существенное преобразование исследовательских разрабатывающих и производственных структур [12], создание новых приборов и более полное использование уже выполненных разработок. В целом активно формируется экосистема микроэлектроники, включающая различные объединения и фирмы [13–15].

В 2012 году предполагалось, что ИС с нормами 15 нм будут способны выпускать пять фирм [5], но по данным 2014 года число фирм, работающих с нормами 14/16 нм, в 2013 году достигло семи, в 2014 году их стало 26, а в 2015 году ожидается рост до 33 [6]. В 2013 году 26 заводов работали с нормами 25/19 нм и 22 предприятия – с нормами 32/28 нм [3].

Как структурные, так и технологические изменения в микроэлектронике сопровождаются общим ростом полупроводниковой промышленности. SEMI отмечает, что рост капиталовложений в оборудование в 2014 году в среднем составил 20–30% [17]. Вложения направлены на развитие проектов по строительству и оснащению производственных линий для различных направлений

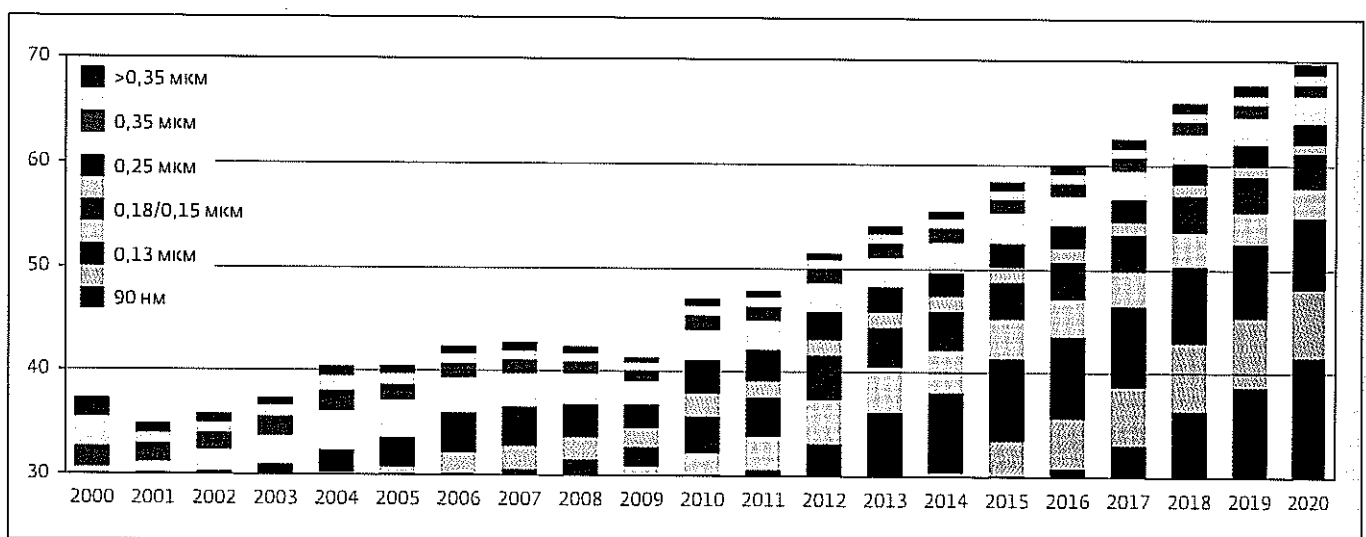


Рис.3. Годовые распределения производства ИС по характеристическим размерам [16]

Fig.3. Annual distribution of IC production depending on designs [16]

полупроводниковой промышленности (190 проектов в 2014 году и 250 – в 2015 году) [6].

Помимо общих тенденций, менее явно закон Мура влияет на отдельные направления развития полупроводниковой промышленности, стимулируя конкуренцию ведущих фирм.

Наиболее активную позицию в обосновании продолжения действия закона Мура, вплоть до характеристических размеров (N-node) 7-5 нм, занимает Intel [18]. В определенной мере это связано с объявленным в ноябре 2013 года переходом Intel к модели foundry, но необходимы и другие предпосылки, обеспечивающие преимущества перед конкурентами, прежде всего, перед TSMC [19]. Intel при этом ссылается на свое лидерство в технологии.

Диэлектрики с высоким К, освоение SiGe напряженного кремния, НКМГ и Tri-Gate фирма Intel прошла в среднем на 3,5 года раньше конкурентов (TSMC, GlobalFoundries, Samsung, IBM) [18, 19]. Но конкретное преимущество может обеспечить снижение цены транзистора ИС при переходе к более малым характеристическим размерам. Как известно, до 28 нм цена снижалась приблизительно на 30% на каждый цикл.

На рис.4, который должен демонстрировать прогресс Intel в рамках закона Мура, отражены соответствующие векторы развития [18]. Линейный характер графика (рис.4а) относительного снижения цены транзистора при переходе от 65 нм до 10 нм позволяет оценить уменьшение цены за цикл в 20%. Это меньше, чем указанные выше

30%, но снижение цены происходит. Надо отметить, что этот факт вызывает сомнение у многих критиков, так как они не видят оснований для снижения цены производства в настоящее время, а с учетом растущей цены оборудования – и в будущем. Тем более, что и технические характеристики меняются более медленно, чем это следовало бы из закона Мура. Так, для встроенных СОЗУ (embedded SRAM) площадь ячейки при характеристических размерах 22-20 нм составляет 0,09 мкм<sup>2</sup>, а при 11-10 нм она уменьшится только до 0,06 мкм<sup>2</sup>, или всего на 30% вместо четырех раз (до 0,02 мкм<sup>2</sup>) согласно правилу геометрического масштабирования по Муру [20].

В [21] отмечено, что по основному рыночному показателю, цене вентиля (Gate Cost), FinFET уступает объемному КМОП, так как цена FinFET выше в интервале с 2015 по 2017 годы, а темпы годового снижения цены при запуске в производство – ниже. Область применения FinFET – высокоуровневое электронное оборудование высокой плотности. Для массового рынка FinFET ИС неэффективны по цене. Аналитик фирмы IBS X. Джонс сформулировал это так: "FinFET – не лучшая кремниевая дорога" [21].

Особое значение имеет конкуренция FinFET и FD-SOI в области создания ИС с полным обеднением. Казалось бы, что у ИС на КНИ мало шансов конкурировать с другими технологиями, так как цена заготовки-пластины КНИ существенно выше цены пластины для объемных ИС (500 долл. против 120 долл.) [22]. Но из-за простой технологии

manufacturing (IDM) of ICs. The structural change of the IC manufacture, i.e. emergence of new forms of specialization – foundry-fabless – in addition to IDM, has resulted in counter-trends. The IDM companies commenced using some foundry-fabless elements, and the latter commenced arranging systems similar to IDM [6].

New consortia started including the manufacture of ICs, production of equipment and materials, development of CAD. System companies are also expected to be included therein [7]. According to the author of [8], research has always been in the DNA of microelectronics. Only

a small number of other industries have the same level of contributions to the science from the profits. At the same time, the driving force of this research was Moore's Law, which was defined by the mantra that said "cheaper, better, faster, smaller" [8]. Martin van den Brink, the president of ASML, has the same opinion, believing that it is very unproductive to discuss the end of Moore's Law, because it is an extrapolation of the past, in fact: there is no Moore's Law, but there are a lot of smart people in the electronics industry [9].

Ludo Deferm, the Vice-President of IMEC [10], noted

that the semiconductor industry had developed following Moore's Law for almost 50 years, but can this law continue to sustain the development? New technologies (EUV, transition to 450 nm), may indeed lead to a lower price of the transistor, but the initial equipment costs are very high, and it is unknown how they will be compensated. One of the possibilities for reducing the initial costs is wide development of cooperation, for which the next few years are believed to be critical because the level of cooperation between industrial, research and governmental organizations of different

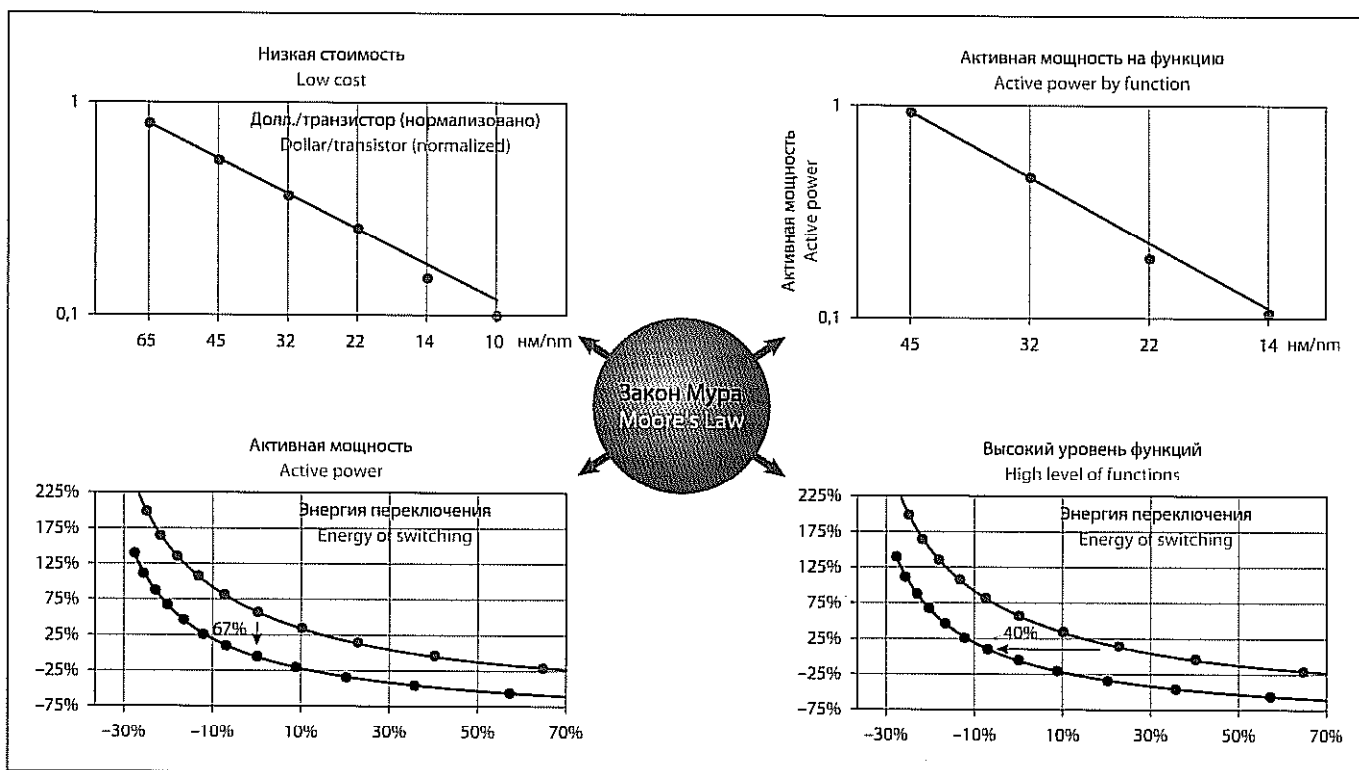


Рис.4. Диаграммы Intel по развитию закона Мура [18]

Fig.4. Development of Moore's law: the charts of Intel [18]

ИС на КНИ цена обработанной пластины может быть сравнима с ценой пластины традиционной ИС на объемном Si и существенно ниже цены пластины FinFET, так как стоимость технологических операций существенно выше у FinFET при одинаковой функциональности с FD-SOI.

Стоимость обработанной пластины 14 нм FD-SOI на 18,4% ниже, чем у 16 нм FinFET. Считают, что совокупность преимуществ FD-SOI обеспечивает этой технологии широкое применение в различных областях электроники в ближайшие 10 лет. Близость FD-SOI к хорошо отработанной

levels will determine the growth rate. Moore's Law established general development pace for the industry. Perhaps, in certain areas, for example, in 3D integration, there will be some new criteria of development, a sort of "local" Moore's Law.

If earlier the leading companies excelled primarily in production volumes, at the new microelectronics development stage they became owners of more advanced designs and technologies, such as, Intel's FinFET, for example. Essentially, a large number of branded competing technologies have emerged, and

their choice depends to some extent on the company's share on the market.

Companies with large volumes of mass production are focusing on a transition to 450 mm wafers and EUV lithography. Companies with small and medium production volumes are considering other various lithography technologies, including the continued use of sub-wavelength immersion lithography of 193 nm using multiple patterning and new technologies of direct self-assembly (DSA). Another option could maskless lithography (ML2) using matrices of laser or electron beams [11].

Research, design and production organizations are undergoing significant transformation with the development of microelectronics [12]. New devices are developed and existing designs are used more efficiently. In general, the microelectronic ecosystem is rapidly growing by incorporating various associations and companies [13-15].

In 2012, it was suggested that only five companies would be able to produce 15 nm ICs [5], but the 2014 data reveal that the number of companies working with the 14/16 nm standards was seven in 2013, twenty-six in 2014, and it is expected to reach thirty-three in

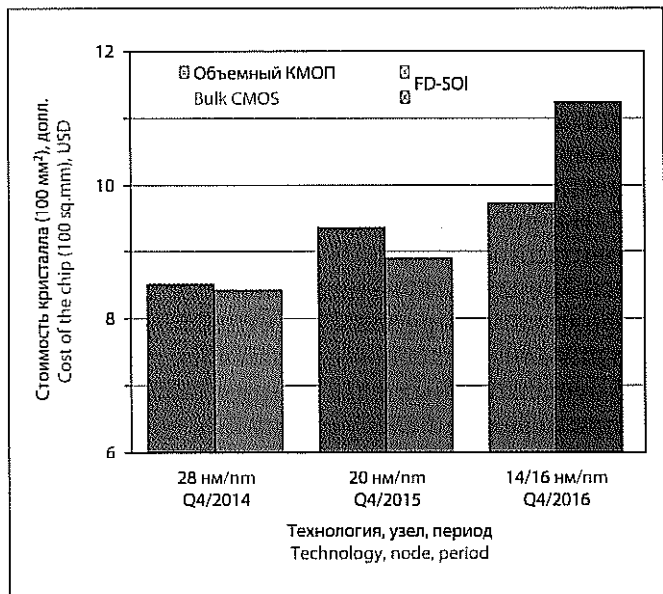


Рис.5. Стоимость кристалла (100 мм<sup>2</sup>) при разной технологии/узле (источник: IBS)  
 Fig.5. The cost of the chip (100 sq.mm) by various technology/ node (source: IBS)

планарной технологии КМОП делает дешевыми как проектирование, так и производство. Очень важно, что FD-SOI легко встраивается в различные варианты 3D-технологий.

С точки зрения обсуждаемой проблемы цены ИС, наглядное представление о соотношениях цен КМОП на объемном Si, FinFET и FD-SOI дает рис.5, из которого следует, что стоимость чипа FD-SOI (100 мм<sup>2</sup>) при характеристических размерах 28,

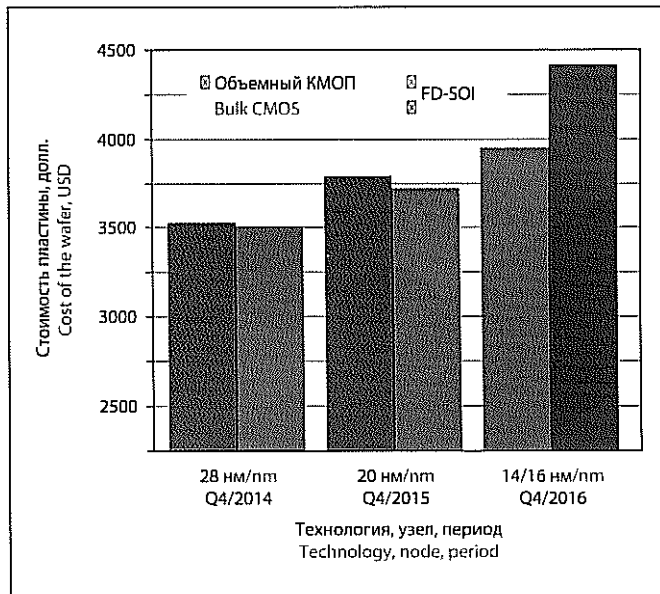


Рис.6. Стоимость пластины при разной технологии/узле (источник: IBS)  
 Fig.6. The cost of the wafer by different technologies/node (source: IBS)

20 и 14/16 нм всегда ниже, чем у конкурентов. Естественно, что и цена пластины с FD-SOI тоже ниже, чем у конкурентов (рис.6).

Из приведенных фактов следует, что технология FD-SOI обеспечивает возможность создания ИС при тех же характеристических размерах, что и FinFET. Близость к классической планарной технологии обеспечивает направлению FD-SOI возможность проектировать и создавать

2015 [6]. In 2013, twenty-six factories worked with the 25/19 nm standards and twenty-six enterprises with the 32/28 nm standards [3].

Both structural and technological changes in microelectronics are accompanied by a general growth of the semiconductor industry. SEMI notes that the average growth of capital investments in equipment was 20-30% in 2014 [17]. Investments are aimed at the development of projects for construction and equipment of production lines for different areas of the semiconductor industry (190 projects in 2014, and 250 in 2015) [6].

Apart from general trends, Moore's Law has a less obvious effect on some areas of the semiconductor industry development, promoting competition among leading companies.

The strongest advocate of applying Moore's Law until the characteristic dimension (N-node) reaches 7-5 nm is Intel [18]. To some extent, this is due to Intel's transition to the foundry model as it was announced in November 2013. However, some other preconditions are required to provide competitive advantage, above all, vis-à-vis TSMC [19]. In this regard, Intel refers to its leadership in the technology.

Intel was on average 3.5 years ahead of its competitors (TSMC, GlobalFoundries, Samsung, IBM) with its High-K dielectrics, use of SiGe strained silicon, HKMG and Tri-Gate [18, 19]. Yet, substantial advantage can be provided by a price reduction of IC transistors with the transition to smaller characteristic dimensions. Until 28 nm, the price is known to drop by approximately 30% at each cycle.

Fig.4, which supposedly demonstrates Intel's progress according to Moore's Law, reflects the corresponding developmental vectors [18]. The linear graph (Fig.4a) of transistor price reduction during

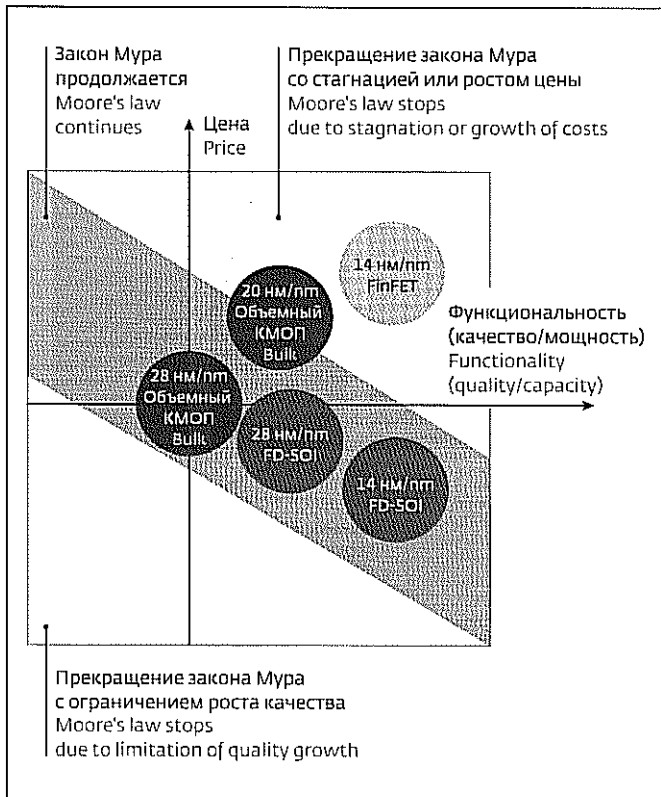


Рис.7. Технология продолжения закона Мура [23]

Fig.7. Technology of the continuation of Moore's law [23]

ИС при меньших затратах, чем для FinFET. Таким образом, FD-SOI существенно доступнее технологии FinFET, но, в отличие от хорошо развитой экосистемы последней, для нее экосистема только складывается.

Следует отметить, что и сторонники FinFET и сторонники FD-SOI рассматривают развитие микроэлектроники как результат действия закона Мура, пусть в усеченном виде. Примером может служить сообщение о презентации STMicroelectronics на ISS Europe Symposium [23]. На рис.7 представлен один из слайдов презентации.

Оси "Цена" и "Функциональность" делят поле графика на четыре зоны. Фактически речь идет не о выполнении основных соотношений закона, а об относительных изменениях характеристик ИС при переходе к следующему циклу, например, стоимость выросла на 10%, а функциональность на 30% или выросла только функциональность, или цена и функциональность выросли одинаково. Отметим, что о падении цены по закону Мура речи нет. Таким образом, как в случае, рассмотренном выше для FinFET, так и в случае FD-SOI, можно говорить не о количественном выполнении закона Мура, а только о качественных направлениях векторов развития микроэлектроники по Муру. Эта тенденция отмечена в [22] фразой: "1 node gain without scaling", то есть новый характеристический узел достигается без масштабирования.

Знаковым моментом, вероятно, является также сочетание 3D-архитектуры приборов с низким потреблением, которое обозначают как новую эру масштабирования: "3D масштабирование мощности" (3D Power Scaling). Увеличение числа транзисторов на единице площади сопровождается

the transition from 65 nm to 10 nm shows a 20% price decrease per cycle. It is less than the above-said 30%, but still the price is declining, indeed. It should be noted that many critics find this fact questionable because they see no reason for reducing the cost of production currently, and in the future given the rising prices of equipment. Furthermore, the technical characteristics change more slowly than suggested by Moore's Law. Thus, in embedded SRAMs, the cell area is  $0.09 \mu\text{m}^2$  when the characteristic dimensions are 22-20 nm, and in case of 11-10 nm, the cell area will decrease to  $0.06 \mu\text{m}^2$ , or only 30%

instead of a four times reduction ( $0.02 \mu\text{m}^2$ ) stipulated by the geometric scaling rule of Moore's Law [20].

In [21], it is noted that regarding the gate cost, which is the main market indicator, FinFET is inferior to the bulk CMOS because the FinFET price is higher in the interval from 2015 to 2017, and the rate of annual price decline in case of launching the production is lower. The area of FinFET is top-level high-density electronic equipment. For the mass market, FinFET ICs are price ineffective. H. Jones, an analyst from IBS, explains: "FinFET is not the best silicon path" [21].

FinFET and FD-SOI have a particular important competition in the field of fully depleting ICs. ICs on SOI seem to have little chance to compete with other technologies, because the cost of unprocessed SOI wafers is significantly higher than the cost of bulk ICs wafers (500 USD vs. 120 USD) [22]. But because of the SOI technology simplicity, the cost of processed SOI wafers is comparable to the cost of conventional bulk Si ICs and is significantly lower than the FinFET wafer price, because the cost of FinFET technological operations is significantly higher having the same FD-SOI functionality.

увеличением числа слоев с транзисторами в вертикальном направлении [24]. При этом плотность (интеграция) возрастает без снижения индивидуальных 2D-размеров. В результате, 3D-структуры позволяют получить параметры, сопоставимые с характерными для  $N+1$  2D-масштабирования уже при размерах  $N$  или даже  $N-1$  [25]. Ясно, что это может дать выигрыш в стоимости.

Переход к 3D-структурам обсуждается как один из возможных путей развития микроэлектроники, как "новая парадигма системы масштабирования на основе 3D-интеграции" (A New Paradigm - System Scaling through 3D system integration) [26]. Одним из стимулов стала проблема задержки сигнала межсоединений ИС. Уже для  $N16$  величина задержек на межсоединениях почти в 1000 раз больше, чем на транзисторном уровне [27]. Этот фактор, наряду с возрастанием цены при дальнейшем 2D-масштабировании, вызывает необходимость в переходе к 3D-интеграции.

Стековая технология на основе TSV частично решает проблему межсоединений. Но более кардинально она решается с помощью монокристаллических 3D-структур (M3D). Структуры M3D стали активно развиваться фирмой Qualcomm [28] и исследовательским центром CEA-LETI [25, 28]. Эти структуры дают возможность в определенной мере поддерживать масштабирование в рамках некоего обновленного варианта закона Мура [28].

Разработчики стековых 3D ИС считают, что это направление будет способствовать развитию нанозлектронных систем [29, 30]. Они считают,

что закон Мура не прекратил своего действия, а только замедлился ("Moore's Law is not over it's just slowing"). В качестве примеров эффективности стековых 3D ИС приводятся разработки ИС памяти Hybrid Memory Cube (HMC) и 3D NAND фирмы Micron.

В действительности не все так просто. Во-первых, сам процесс перехода к 3D ИС может быть достаточно длительным. Во-вторых, он требует определенного дополнительного оборудования и помещений чистых комнат. В результате, по оценкам специалистов Micron, этот переход может быть в два раза дороже, чем переход к 20 нм. Кроме того, размеры 3D NAND пока больше 2D аналогов [3].

Снижение цены производства и поиск новых потребителей являются постоянными проблемами. При этом заказчики часто согласны на удешевление даже за счет некоторого ухудшения качественных характеристик ИС. Снижение цены может быть достигнуто разными путями [26]:

- уменьшением стоимости отдельных процессов при переходе к новым технологическим циклам. Работу в этом направлении для 10-7 нм ведет IMEC совместно с Alix Partners [31];
- переходом к новой литографии (EUV), так как при использовании многократного экспонирования на базе 193 нм литографии для следующего технологического цикла необходимо на 15-20% увеличивать число этапов маскирования, что, естественно, удорожает процесс;

The cost of processed 14 nm FD-SOI wafers is 18.4% lower than the cost of 16 nm FinFET wafers. The benefits of FD-SOI are believed to make this technology widely used in various electronics fields for the next 10 years. The proximity of the FD-SOI to the well-developed planar CMOS technology makes both design and manufacture cheap. It is very important that FD-SOI can be easily integrated in a variety of 3D technologies.

From the perspective of the discussed IC price issue, a visual representation of correlation between the prices of bulk Si CMOS, FinFET and FD-SOI is given in Fig.5, from

which it is clear that the cost of the FD-SOI chip (100 mm<sup>2</sup>) with the characteristic dimensions of 28 nm, 20 nm and 14/16 nm is always lower than the competitor's cost. Naturally, the price of the FD-SOI wafer is also lower than the competitor's price (fig.6).

From these facts, it is clear that FD-SOI is used to create ICs with the same characteristic dimensions as FinFET. The proximity to the conventional planar technology ensures that FD-SOI can be used to design and to create ICs with a lower cost than FinFET. Thus, FD-SOI is significantly more affordable than FinFET, but, in contrast

to the well-developed ecosystem of the latter, the ecosystem of the former is only emerging.

It should be noted that FinFET and FD-SOI supporters believe that the development of microelectronics is occurring as the result of Moore's Law, albeit in a truncated form. An example of this can be the message about the presentation of STMicroelectronics at ISS Europe Symposium [23]. Fig.7 shows one of the slides of the presentation.

The axes of Price and Functionality divide the graph into four zones. In fact, the graph is not about the main



- использованием пластин 450 мм. Периодическое увеличение диаметра пластин для снижения цены кристалла на ней является одним из следствий закона Мура. Отметим, что EUV и переход на пластины 450 мм технически полностью готовы для производства [32], но высокая стоимость внедрения может сдвинуть начало их коммерческого использования к более поздним срокам [33]. Опытное производство практически было подготовлено на экспериментальной площадке в Олбани (США) при участии Intel, TSMC, Samsung, IBM, GlobalFoundries (GF) еще в конце 2013 года [32]. Необходимость в компьютерных чипах нового поколения можно рассматривать как данность, поэтому переход к новой литографии и новым пластинам неизбежен [34];
- бурным развитием мобильной/носимой техники вызвало повышенный спрос на ЭКБ, требования к характеристикам которой не столь жесткие, как для вычислительных средств высокого уровня. Поэтому цена функции может быть понижена [35];
- развитием 3D ЭКБ, где цена функции, как мы уже отмечали, может быть снижена. Она отражает тенденцию к переходу компонентной базы на системный уровень. В этом случае, помимо традиционной миниатюризации 2D-размеров для повышения функциональности, используется третий размер. 3D-технологии в различных вариантах используют соединение как однородных, так и разнородных слоев

по вертикали. Толщина слоев и их число могут стать новыми факторами масштабирования, а степень интеграции может определяться уже не относительно единицы площади, а относительно единицы объема. Увеличение степени объемной интеграции может привести к уменьшению стоимости единицы функциональности, например, бита информации. Таким образом, возникает качественная аналогия с законом Мура, что позволило говорить о новой его траектории [36].

Отклонения от закона Мура, прежде всего, выразились в нарушении единства триады "меньше, быстрее, дешевле". Домен "Больше Мура" (БМ) в настоящее время практически свелся к росту интеграции каждые два или больше года (см. табл.).

Рост стоимости производства практически привел к прекращению одновременного снижения цены. По мнению президента Итес Люка Ван ден Хова [37] движущей силой стало не уменьшение цены на ключ (транзистор), а уменьшение цены на функцию. Это привело к повышению роли других доменов в полупроводниковом производстве. Значительный коммерческий успех производства МЭМС отразился в появлении "Белой книги МЭМС" ITRS [38], но реальный успех мог быть достигнут только при массовом производстве.

По числу штук изделий домен "Другое чем Мур" (ДЧМ) уже приближается к домену БМ [39], а по такому важному показателю как снижение

ratios of the law, but is about relative changes in the characteristics of ICs occurring during the transition to the next cycle. For example, the cost increases by 10 percent and the functionality increases by 30 percent, or only the functionality increases, or the price and the functionality increases equally. Note that Moore's Law never refers to any reduction of price. Thus, both in the above-discussed FinFET case and in the FD-SOI case, Moore's Law is not about quantity, but is about qualitative directions of microelectronics development. This trend is highlighted in [22],

where it was stated: "1 gain node without scaling", i.e. a new characteristic node is achieved without scaling.

Probably, another important aspect is combining 3D architecture with low power consumption, which is referred to as a new era of scaling: "3D power scaling". An increase in the number of transistors per area unit is accompanied by an increase in the number of transistor layers in the vertical direction [24]. The density (integration) increases without reducing individual 2D-dimensions. As a result, 3D structures have parameters comparable with the

typical N+12D-scaling when the sizes equal N or even N-1 [25]. It is clear that this can improve the cost.

Transition to 3D structures is discussed as one of possible ways for microelectronics development, as a "New Paradigm – Scaling System through 3D system integration" [26]. One of the drivers was the problem of signal delay in the interconnections of ICs. For N16, the delay in interconnections is almost 1000 times longer than in transistors [27]. This factor combined with increasing prices of further 2D scaling necessitates a transition to 3D integration.

отношения "цена/функциональность" даже опережает его [40]. Существенное значение имеет конвергенция этих двух доменов. В результате, вместо гомогенного решения проблемы, характерного для кремниевой электроники домена БМ происходит переход к гетерогенным решениям домена ДчМ. Это позволило автору [41] переформулировать название домена ДчМ как "Закон Мура 2.0". Вряд ли символ обновления - "2.0" приживется в отношении закона Мура в формулировке, представленной на выразительном рис.8, но, как признак изменений в анализе электронной промышленности, появилось ITRS 2.0.

Первый шаг был сделан в рамках различных форм носимой электроники, прежде всего, бытовой. Но гигантский импульс был связан с появлением направления "Интернет вещей" (ИВ), который вскоре был перефразирован как "Интернет всего" (Internet for Everything).

Рынок ИВ на 2020 год по оценкам различных экспертных фирм может составить от 1,9 трлн. долл. до 26 трлн. долл. [42]. Такой разброс предполагает взрывной характер роста данного направления электроники. Это заставило ITRS переформулировать свою концепцию анализа развития полупроводниковой промышленности в форме ITRS 2.0, отклонившись от принятой с 1992 г. стандартной формы анализа ситуации, где основное внимание уделялось оценке с позиций закона Мура [43]. Теперь рассматриваются тенденции развития как ключевых секторов рынка

полупроводников, так и области их применения, и не только на уровне чипа, но и на системном уровне. Анализ ITRS 2.0 проводится по семи блокам (building blocks):

- системная интеграция, которая направлена на выбор архитектур, необходимых промышленности и основанных на гетерогенных устройствах конкретных систем;
  - внесистемные связи на основе физических и беспроводных технологий между частями системы;
  - гетерогенная интеграция отдельных производственных технологий в агрегированный продукт повышенной функциональности;
  - гетерогенные компоненты, которые не требуют масштабирования по закону Мура, но обеспечивают дополнительную функциональность в таких областях как управление мощностью или в сенсорике и актуации;
- "Вне КМОП" – приборы, основанные на новых физических принципах и обеспечивающие функциональное масштабирование вне КМОП, например, спиновые приборы, ферромагнитная логика, атомные ключи и т.д.;

"Больше Мура" – последовательное уменьшение горизонтальных и вертикальных размеров для уменьшения стоимости и улучшения характеристик;

интеграция производства через процедуры и процессы, необходимые для массового выпуска при приемлемой цене.

Отметим, что перечень направлений анализа ITRS 2.0 начинается с системной интеграции

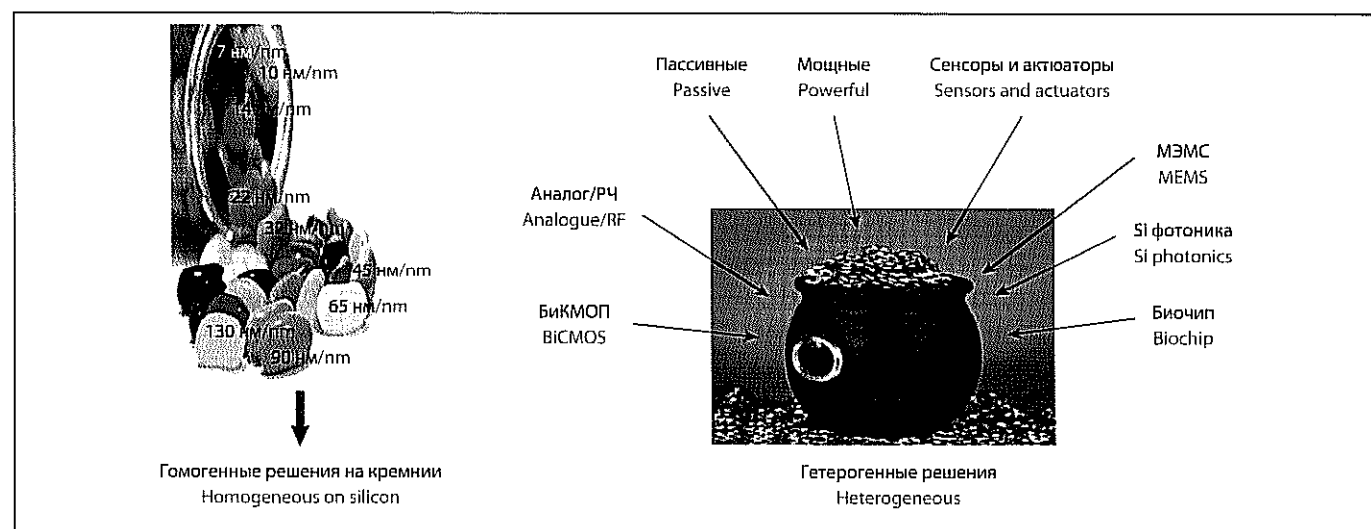


Рис.8. Закон Мура 2.0  
Fig.8. Moore's Law 2.0

"сверху-вниз" для выявления тенденций развития рынка потребления изделий полупроводниковой промышленности в 2015–2030 годов. Должна быть разработана новая система оценок (метрик – system metrics) для прогноза тенденций развития электроники в областях мобильной электроники, ИВ и облачных структур (Big Data). Вероятно, предполагается, что она заменит традиционную для настоящего времени метрику масштабирования, и это будут революционные изменения после 50 лет эволюционного развития в рамках закона Мура. Со своей стороны, отметим, что в известной мере повторяется ситуация начального периода развития микроэлектроники, когда системные компании определяли тренд ее развития (см. часть 1, табл.3).

Указанные тенденции проиллюстрированы в качестве примера для ИВ на рис.9, который можно рассматривать как вариант для ситуации рис.10 (см. часть 1).

Существенная роль ИВ в развитии электроники, отраженная в новом документе ITRS, вполне обоснована, так как пакетные решения для ИВ включают не только отдельные модемы или датчики, но и каналы связи (в основном беспроводные) с облачными сервисами на основе новых алгоритмов [44].

Рынок больших данных потребует использования новых типов твердотельных ЗУ и микропроцессоров. Облачные и мобильные технологии потребуют более энергоэффективных ЗУ и МЭМС. Аналитическая фирма HIS считает, что

главенствующие технологии изменят мир в ближайшие 5 лет. К ним относят "Интернет для всего", облачные системы больших данных и 3D-печать. Последнее тоже понятно, так как потребуются разнообразные конструктивные решения для ИВ-устройств [45].

Роль ИВ в развитии активно обсуждается на всех международных конференциях и выставках по электронике, например на "Электроника-2014" в Мюнхене. Отмечается, что камнем преткновения для распространения ИВ может стать проблема конфиденциальности (безопасности), которую также могут решать специальные ИС и устройства [46].

ИВ – коммуникационная технология глобального уровня, но и на уровне локальных структур связи предполагается значительный рост в ближайшие годы. Это касается, например, носимых устройств (Wearable Devices), развитие которых может происходить и в рамках ИВ, и независимо [47]. Новые коммуникационные технологии должны оказать существенное влияние на выбор энергоэффективных комплектующих из числа однотипных приборов [48] или конкурирующих, например, цифровых или аналоговых ИС [49]. Поэтому тенденция изменения энергоэффективности может стать дополнительным параметром развития элементной базы электроники наряду с классической триадой закона Мура – "меньше, быстрее, дешевле".

Оптимистичная оценка грядущего развития рынка ИВ может быть сильно завышена.

TSV-based stack technology partially resolves the problem of interconnections. However, it is better resolved using monolithic 3D-structures (M3D). The M3D structures began to be developed by Qualcomm [28] and the research center CEA-LETI [25, 28]. These structures allow some scaling according to an updated version of Moore's Law [28].

The stack 3D ICs developers believe that this area will greatly contribute to the development of nanoelectronic systems [29, 30]. They believe that Moore's Law is not over – it is just slowing. Examples of effective stack 3D ICs are IC

memories Hybrid Memory Cube (HMC) and 3D NAND manufactured by Micron.

In reality, it is not so simple. Firstly, the process of transition to 3D ICs may be rather long. Secondly, it requires some additional equipment and clean rooms. As a result, according to experts from Micron, this transition may be twice as expensive as the transition to 20 nm. In addition, the dimensions of the 3D NAND are still greater than the dimensions of 2D alternatives [3].

Lowering production cost and searching for new consumers are persistent problems, with

customers often agreeing to a reduction of price, even at the expense of some deterioration in the quality characteristics of ICs. The price reduction can be achieved in different ways [26]:

- decrease in the cost of individual processes in the transition to new technological cycles. IMEC in collaboration with Alix Partners are working in this direction for 10–7 nm [31];
- transition to a new lithography (EUV), because when using multiple exposures based on 193 nm lithography for the next technological cycle, it is necessary to increase the number of masking

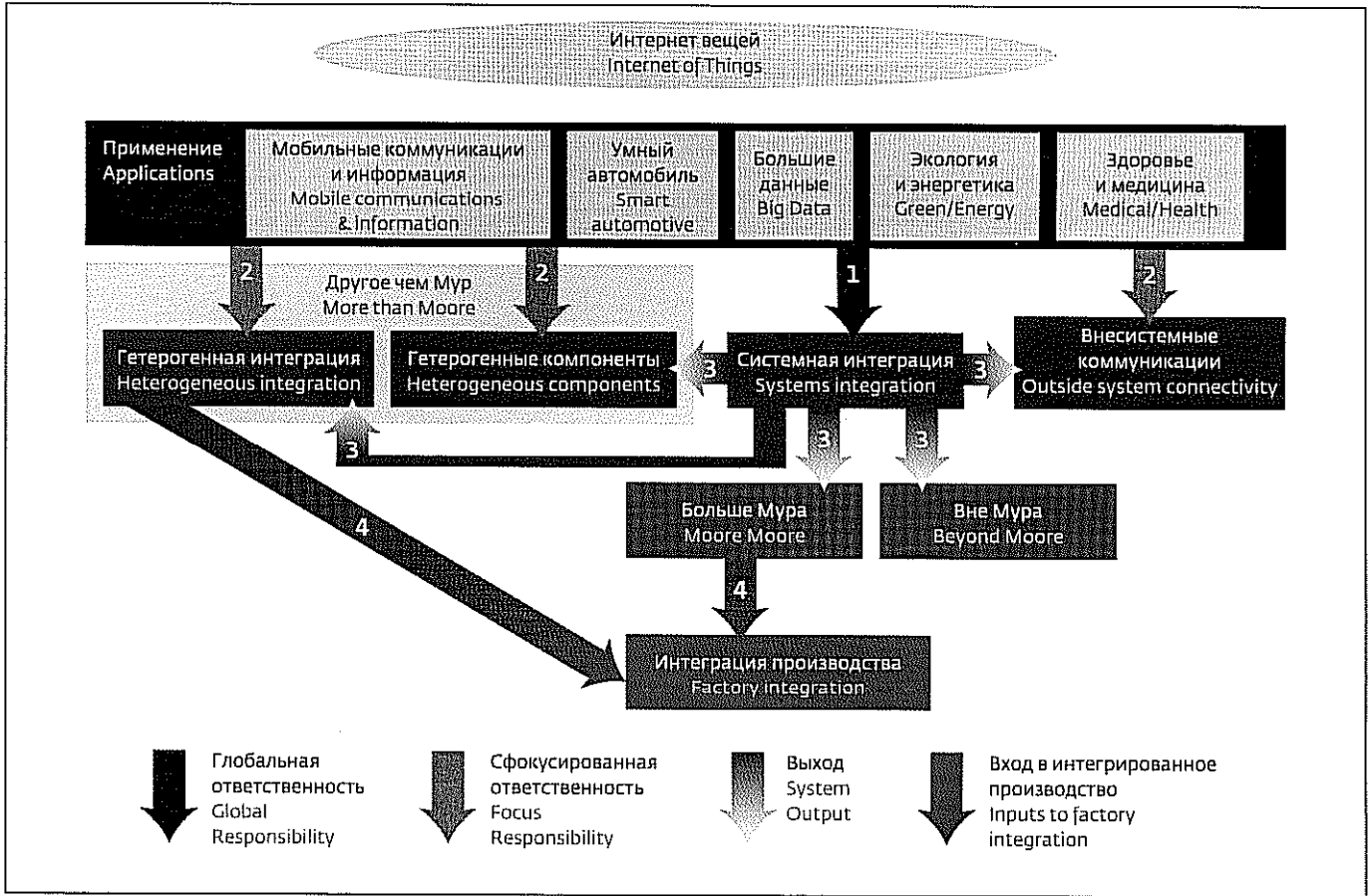


Рис.9. Оценка движущих сил  
Fig.9. Assessment of driving forces

Триллионы изделий ИВ, прогнозируемые на следующее десятилетие, кажутся чрезмерными

на фоне более реальных оценок для полупроводниковой промышленности. В [50] предполагается,

stages by 15-20%, which accordingly makes the process more expensive;

- use of 450 mm wafers. A periodic increase in the wafer diameter in order to reduce the crystal price is one of the consequences of Moore's Law. Note that the EUV and transition to 450 mm wafers are technically feasible in the manufacture [32], but the high cost of implementation may shift the beginning of their commercial use to a later time [33]. The pilot production was almost complete on the experimental site in Albany (USA) under the assistance of Intel, TSMC, Samsung, IBM,

GlobalFoundries (GF) as early as the end of 2013 [32]. The need for new generation of computer chips can be considered as a fact, so the transition to new lithography and new wafers is inevitable [34];

- the rapid development of mobile/wearable technology has led to an increased demand for ECB, to which performance requirements are not as high as for high-level computational tools. Therefore, the function price may be reduced [35];
- development of 3D ECB, where the function price, as we have noted, may be reduced. It reflects the trend of components transition

to a system level. In this case, the third dimension is used for increased functionality in addition to the conventional 2D miniaturization. 3D technologies in different embodiments use the connection of both homogeneous and heterogeneous layers vertically. Layer thickness and number may become new scaling factors, and the integration degree may be determined not relative to an area unit, but relative to a volume unit. The increase in the degree of volumetric integration may lead to reduction of cost per unit of functionality, for example per bit of information. Thus, there is a

Показатели тренда в технологии в 2013 году (ITRS)

The indicators of the trend in technology in 2013 (ITRS)

Год производства	2013	2015	2017	2019	2021	2023	2025	2028
Характеристический размер для логики	16/14	10	7	5	3,5	2,5	1,8	
Критический размер ½ зазора для логики, нм	40	32	25	20	16	13	10	7
Критический размер ½ зазора для флэш (2D), нм	18	15	13	11	9	8	8	8
½ зазора для ДОЗУ, нм	28	24	20	17	14	12	10	7,7
FinFET ½ зазора, нм	30	24	19	15	12	9,5	7,5	5,3
Ширина плавника для FinFET, нм	7,6	7,2	6,8	6,4	6,1	5,7	5,4	5,0
Размер ячейки 6-транзисторных СОЗУ, мм <sup>2</sup>	0,0096	0,061	0,038	0,024	0,015	0,010	0,0060	0,0030
Размер затвора для МП и ASIC, мм <sup>2</sup>	0,248	0,157	0,099	0,062	0,039	0,025	0,018	0,009
Плотность затворов 4 входа NAND, тыс. затворов/мм	4,03·10 <sup>3</sup>	6,37·10 <sup>3</sup>	1,01·10 <sup>4</sup>	1,61·10 <sup>4</sup>	2,55·10 <sup>4</sup>	4,05·10 <sup>4</sup>	6,42·10 <sup>4</sup>	1,28·10 <sup>5</sup>
Генерации флэш	64G/ 128G	128G/ 256G	256G/ 512G	512G/ 1T	512G/ 1T	1T/ 2T	2T/ 4T	4T/ 8T
Число слоев 3D флэш	16-32	16-32	16-32	32-64	48-96	64-128	96-192	192-384
Половина зазора для слоя 3D флэш (нм)	64	54	45	30	28	27	25	22
Генерации ДОЗУ	4G	8G	8G	16G	32G	32G	32G	32G
Начало массового производства на 450 мм пластинах				2018				
V <sub>dd</sub> для ИС с высокими характеристиками, В	0,86	0,83	0,80	0,77	0,74	0,71	0,68	0,64
Отношение 1/(CV/I)	1,13	1,53	1,75	1,97	2,10	2,29	2,52	3,17
Локальная частота на чипе МП	5,50	5,95	6,44	6,96	7,53	8,14	8,8	9,9
Литографическая длина затвора высокопроизводительных МП (HP MPU), нм	28	22	18	14	11	9	7	5
Физическая длина затвора, нм	20	17	14	12	10	8	7	5
Физическая длина затвора для ASIC, нм	23	19	16	13	11	9	8	6

qualitative analogy with Moore's Law, which leads to discussion of its new trajectory [36].

Deviations from Moore's Law have resulted, above all, in the breach of the triad "smaller, faster, cheaper". The domain "More Moore" (MM) has practically reduced to an integration growth happening every two or more years (see Table).

The rising production cost has resulted in practical termination of the simultaneous price reduction. According to the President of Imec, Luc van den Hove [37], the driving force has not been the price reduction of the key (transistor), but

the price reduction of the function. This has led to an increasing role of other domains in semiconductor manufacture. The significant commercial success of MEMS manufacture has resulted in the emergence of the "MEMS White Book" ITRS [38], but the real success may be achieved only with mass production.

The number of "More than Moore" (MTM) domain products is already close to that number in the MM domain [39], and is even ahead of it according to such an important indicator as reduction of the price/functionality ratio [40]. The convergence of these two domains is critical. As a result, instead of a

homogeneous solution, which is typical for silicon electronics of the MM domain, a transition is occurring to heterogeneous solutions of the MTM domain. This allowed the author [41] to reformulate the domain MTM name as "Moore's Law 2.0". It is unlikely that the update sign "2.0" will be widely accepted in respect of Moore's Law in the formulation presented on the eloquent Fig. 8, but the sign of changes in the analysis of electronic industry has become ITRS 2.0.

The first step was made in the different forms of wearable electronics, primarily, home appliances. However, the gigantic impulse was

что в 2017 году будет выпущен триллион полупроводниковых приборов, но только 26% придется на долю ИС, а 74% – это опто-сенсорно-дискретные приборы – ОСД (opto-sensor-discrete products – OSD), то есть основные изделия для ИВ. Но с точки зрения цены картина обратная: 65% объема рынка дают ИС и 35% – ОСД.

В третьей части статьи мы вновь вернемся к закону Мура, но уже с точки зрения наметившихся отклонений, которые могут привести к отрицанию его влияния на развитие микро- и нанoeлектроники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Niedermayer M.. Cost-driven design of MEMS devices and smart microsystems // MEMS Journal, November 21, 2013.
2. Chamness L. 2013: A Year in Review – Semiconductor Equipment and Materials Market and Outlook // www.semi.org/marketinfo, April 1st, 2014.
3. Dieseldorff C.G., Tseng C. Technology Node Transitions Slowing Below 32 nm // http://www.semi.org/en/node/50391?id=squen0714t.
4. Garou P. Semiconductor R&D spending rises 7% despite weak market // http://electroiq.com/blog/2013/02/semiconductor-rand-spending-rises-7percent-despite-weak-market.
5. Singer P. Moore's Law: Will Lack of R&D Funding Kill It? // http://electroiq.com/petes-posts/2010/01/22/moores-law-will-lack-of-rd-funding-kill-it.
6. Dieseldorff C.G. Strengthening Recovery: Fab Equipment Spending – 24% Increase in 2014, Possible Record in 2015 // http://www.semi.org/node/50086.
7. Semiconductor R&D: A state of transition // http://electroiq.com/blog/2013/04/semiconductor-rd-a-state-of-transition.
8. Pushkar P. Apte. Breakthrough research in the semiconductor industry // http://electroiq.com/blog/2014/06/breakthrough-research-in-the-semiconductor-industry.
9. Martin van den Brink. Speaking about the end of Moore's Law is very unproductive // http://magazine.imec.
10. Future Vision Ludo Deferm on Semiconductor Industry // http://magazine.imec.be/data/33/reader/reader.html#preferred/1/package/33/pub/39/page/2, 04/04/2014.
11. Multibeam technology predicted for use in advanced photomask production by 2016, says survey // http://electroiq.com/blog/2013/09/multibeam-technology-predicted-for-use-in-advanced-photomask-production-by-2016-says-survey.
12. ISS 2013: Semiconductor leaders see massive industry transformation // http://electroiq.com/blog/2013/01/iss-2013-semiconductor-leaders-see-massive-industry-transformation.
13. 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.

associated with the emergence of "Internet of Things" (IOT), which was soon paraphrased as "Internet for Everything".

According to various expert companies, the 2020 IOT market can range from 1.9 trillion to 26 trillion USD [42]. This range implies an explosive growth in this type of electronics. It made ITRS reformulate their concepts for analyzing the semiconductor industry development in the form of ITRS 2.0, which deviated from the standard form of analysis adopted in 1992, where the focus was on evaluation from the standpoint of Moore's Law [43]. Now it examines the development trends

in key market sectors of semiconductors and their application, and not only at the chip level, but also at the system level. The ITRS 2.0 analysis is conducted using seven building blocks:

- system integration, which focuses on the selection of architectures required by the industry and based on heterogeneous devices of some specific systems;
- off-system communications based on physical and wireless technologies between parts of the system;
- heterogeneous integration of individual production technologies into an aggregated product with advanced functionality;

- heterogeneous components that do not require scaling according to Moore's Law, but provide additional functionality in areas such as power control or in sensing and actuation;
- "Beyond CMOS" – devices based on new physical principles and providing functional scaling beyond CMOS, for example, spin devices, ferromagnetic logic technologies, atomic keys, etc.;
- "More Moore" – consistent reduction of horizontal and vertical sizes in order to reduce the cost and to improve the performance;
- Integration of production through procedures and processes required

14. **Gregor C.** "Crisis? What Crisis?": New paradigm adjustments for capacity and equipment spending // Solid State Technology.
15. Executives debate innovation drivers and cost reduction in microelectronics supply chain // Solid State Technology, 07/02/2014.
16. IFTLE 182: IEEE ISS 2014 IBM, Linx, IMEC, IHS, IBS // Solid State Technology, 03/03/2014.
17. **Read J.** Can Legacy Fabs Keep Up With IoT Demand. - <http://semimd.com/applied/2014/04/28/can-legacy-fabs-keep-up-with-iot-demand>.
18. **Ray T.** Intel: Competitors Have Given Up "Scaling" Advantage in Moore's Law // Tech Trader Daily.
19. **Or-Bach Zvi.** Can Intel beat TSMC // Solid State Technology, 27/11/2013.
20. **Or-Bach Zvi.** ASML at Semicon West 2013: SRAM scaling has stopped! // Solid State Technology, 07/18/2013.
21. FTLE 187 More IBM rumors; Altera FPGAs, IBS Addresses Transistor Costs, ASE / Inotera 3DIC JV. - <http://electroi.com/insights-from-leading-edge/2014/04/iftle-187-more-ibm-rumors-altera-fpgas-ibs-addresses-transistor-costs-ase-inotera-3dic-jv>.
22. **Or-Bach Zvi.** Why SOI is the Future Technology of Semiconductors. - <http://semimd.com/blog/2013/12/23/why-soi-is-the-future-technology-of-semiconductors>.
23. **Hars A.** FD-SOI Keeps Moore's Law On Track // Semiconductor Manufacturing & Design, March 6th, 2014.
24. **Bakshi V.** Is the Chip Industry as Important as We Think? Depends on Whom You Ask // Solid State Technology, 06/02/2014.
25. **Michallet J.-E., Metras H., Batude P.** Going Up! Monolithic 3D as an Alternative to CMOS Scaling // Solid State Technology, May 2014. P. 24-27.
26. **Trapp F. von.** The 2014 European 3D TSV Summit: Get Ready for the Domino Effect // SEMI, [www.semi.org](http://www.semi.org), February 4th, 2014.
27. **Or-Bach Zvi.** Qualcomm: Scaling down is not cost-economic anymore - so we are looking at true monolithic 3D. - <http://semimd.com/blog/2014/06/16/qualcomm-scaling-down-is-not-cost-economic-anymore-so-we-are-looking-at-true-monolithic-3d>.
28. **Ramachandran V.** Will interconnect manufacturing requirements cramp Moore's Law's style? - <http://electroi.com/blog/2014/04/will-interconnect-manufacturing-requirements-cramp-moores-laws-style>.
29. **Kim K., Jung S.-M.** 3D Technology for Nanoelectronics // Nanotechnology Materials and Devices Conference, 2006. P. 84-85.
30. **Korczynski E.** 3D memory for future nanoelectronic systems. - <http://semimd.com/blog/2014/06/18/3d-memory-for-future-nanoelectronic-systems>.
31. Imec, AlixPartners to develop model for lowering costs of advanced semiconductor tech // Solid State Technology, 14/01/2014.
32. No technical barriers seen for 450mm // Semiconductor Manufacturing & Design, February 19th, 2014.

for mass production at a reasonable price.

It is noteworthy that the areas of ITRS 2.0 analysis start with top-down system integration to identify trends in the product consumption market of the semiconductor industry in 2015-2030. A new system metrics need to be developed for prediction of trends in the electronics development in areas of mobile electronics, IOT and cloud infrastructure (Big Data). It is anticipated that it will replace the current conventional scaling metrics, and it will be a revolutionary change after 50 evolutionary years in the framework of

Moore's Law. For our part, we note that to some extent the initial situation of microelectronics development is reiterating, when system companies determined its development trend (see part 1, table 3).

The said trends are illustrated as an example for IOT in fig. 9, which may be viewed as an option for the situation in fig. 10 (see part 1).

Significant role of IOT in the development of electronics, reflected in the new ITRS document, is well grounded because package solutions for IOT include not only individual modems or sensors, but also communication channels (mostly wireless) with

cloud services based on new algorithms [44].

The big data market will require using new types of solid-state storage devices and microprocessors. Cloud and mobile technologies will require more energy-efficient memory and MEMS. The analytical company IHS believes that the leading technologies will change the world in the next 5 years. These include "Internet for Everything", big data cloud systems and 3D printing. The latter is also reasonable because there will be a need for various design solutions for IOT devices [45].

The IOT role in the development is being actively discussed

33. Paradigm shift: SEMI equipment tells the future // *Solid State Technology*, 21/01/2014;
34. **Zwi Or-Bach**. Moore's Law has stopped at 28nm // *Solid State Technology*, 13/03/2014.
35. Cellphones Pass PCs as Biggest Systems Market and IC User // *IC Insights*, 2014 edition of Insight's IC Market Drivers report.
36. **Or-Bach Zwi**. Monolithic 3D is now on the roadmap for 2019. - <http://electroiq.com/blog/2013/08/monolithic-3d-is-now-on-the-roadmap-for-2019>.
37. **Luc Van den hove**. Future vision.
38. Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) // ITRS 2013.
39. **Clarke P., Bryzek Janus**. The trillion-sensor man // *Electronic Engineering Times Europe*, December 2013. P. 10-11.
40. **Niedermayer M**. Cost-driven design of MEMS devices and smart microsystems // *MEMS Journal*, November 21, 2013.
41. **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>.
42. **Neiger C**. Motley Fool: Bear case for "Internet of things". - <http://www.usatoday.com/story/money/2014/11/22/the-bear-case-for-the-internet-of-things/19026061>.
43. Reframing the Roadmap: ITRS 2.0 // <http://electroiq.com/petes-posts/2015/02/02/reframing-the-roadmap-itrs-2-0>.
44. Интернет вещей подстегивает производство полупроводников. - <http://www.ostec-group.ru/group-ostec/pressroom/news/internet-veshchey-podstyeigivaet-proizvodstvo-poluprovodnikov>.
45. IHS Identifies Technologies to Transform the World over Next Five Years. - <http://press.ihs.com/press-release/technology/ihs-identifies-technologies-transform-world-over-next-five-years>.
46. **Абанин И.Е., Вернер В.Д., Ефимов А.А.** Выставка "Электроника-2014" г. Мюнхен, Германия // *Известия высших учебных заведений. Электроника* № 2. 2015.
47. **Lightman K**. Wearable Devices and the Search for the Holy Grail at 2015 International CES. - <http://www.memindustrygroup.org/blogpost/1221495/206516/Wearable-Devices-and-the-Search-for-the-Holy-Grail-at-2015-International-CES>.
48. New Technology May Lead to Prolonged Power in Mobile Devices. - [http://www.utdallas.edu/news/2014/9/26-31210\\_New-Technology-May-Lead-to-Prolonged-Power-in-Mobi\\_story-wide.html](http://www.utdallas.edu/news/2014/9/26-31210_New-Technology-May-Lead-to-Prolonged-Power-in-Mobi_story-wide.html).
49. **Gillhuber A**. Analog vs. digital - der Machtkampf geht weiter! - <http://www.elektroniknet.de/power/sonstiges/artikel/114410>.
50. Semiconductor unit shipments to exceed one trillion devices in 2017. - <http://electroiq.com/blog/2015/02/semiconductor-unit-shipments-to-exceed-one-trillion-devices-in-2017>.

in all international conferences and exhibitions of electronics, for example at "Electronics-2014" in Munich. It is noted that an obstacle in the spread of IOT may be the issue of privacy (security), which may also be resolved with special ICs and devices [46].

IOT is a communication technology of the global level, but, in the coming years, significant growth is also anticipated at the local level of communication between structures. For example, this applies to wearable devices, the development of which may occur under IOT or independently [47]. New communication

technologies must have a significant impact on the selection of energy-efficient components from among devices of the same type [48] or competing devices, for example, digital or analog ICs [49]. Therefore, energy efficiency may be an additional parameter in the development of the electronics elements along with the classical triad of Moore's Law - "smaller, faster, cheaper".

The optimistic estimate of the future development of the IOT market may be highly exaggerated. Trillions of IOT products projected for the next decade seem to be excessive against the more realistic

estimates of the semiconductor industry. In [50], it is assumed that, in 2017, a trillion of semiconductor devices will be released, but the share ICs will constitute only 26%, and 74% are opto-sensor-discrete devices (OSD), which are the main products for IOT. However, from the price perspective, the picture is opposite: ICs cover 65% of the market and OSD - 35%.

In the third part of the article, we will once again discuss Moore's Law, but from the perspective of emerging deviations that may lead to a denial of its influence on the development of micro- and nano-electronics. ■