

# МИКРОЭЛЕКТРОННОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЗАКОНЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В философии и естественных науках давно существует понятие "идеальный процесс развития системы". Оно означает определенную последовательность этапов становления любой системы (технической, технологической, экономической, биологической, социальной, религиозной). Эти этапы неравномерны по времени, и число их в каждой системе различно. Процесс функционирования любой системы можно представить в виде спирали, проекция которой на плоскость дает кривую развития. В научной литературе кривую развития, описывающую временную зависимость количественных изменений системы (эволюцию основных ее показателей в процессе развития), называют S-кривой из-за ее подобия букве "S". В ходе научных исследований кривой развития давали специфические названия – кривая насыщения, логистическая кривая, сатурационная кривая, кривая жизненного цикла, кривая технологической эволюции и т.п. Независимо от названия S-кривую принято считать отображением развития во времени систем различной природы на ограниченных ресурсах [1,2]. Изучение S-кривой важно и для оценки технологической эволюции (развития) современного микроэлектронного производства.



В.Киреев  
Valeri\_Kireev@srisa.ru

Технологическое развитие производства интегральных микросхем (ИМС) основано на определенной базовой концепции (конкретные технологии изготовления и конструкции микросхем). Эта концепция в течение многих лет определяет последующие улучшения выпускаемой продукции, а также оказывает решающее воздействие на возможности и характер дальнейшего развития ИМС, т.е. практически направляет технический прогресс отрасли [2, 3]. За 40 лет развития микроэлектроники такими базовыми технологиями ИМС были биполярная эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ, или ECL), биполярная транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ, или TTL), р- и n-канальные МОП-технологии (PMOS- и NMOS-структуры). Сегодня базовая технология производства ИМС – классическая КМОП-технология на объемном монокристаллическом кремнии [3].

На рис.1а приведена S-кривая развития классической КМОП-технологии. По оси ординат\* отложен обобщенный показатель совершенства ИМС  $\rho$ , по оси абсцисс – время использования классической КМОП-технологии в качестве базовой в микроэлектронном производстве [4]. S-кривая отражает три характерных этапа развития: обучения технологии (от начала до времени  $t_1$ ), повышенной отдачи технологии (от  $t_1$  до  $t_3$ ) и насыщения (от  $t_3$ ).

На этапе обучения новой базовой технологии идет накопление опыта реализующих ее исследователей и технологов. Именно они и "обучаются". Начало обучения представляет собой процесс периодического решения возникающих технологических проблем, который и позволяет реализовывать но-

\* По оси ординат S-кривых обычно откладывается главный параметр системы (ГПС): прибыль предприятия, коэффициент экономического роста фирмы, обобщенный показатель совершенства изделий и т.п. [2].



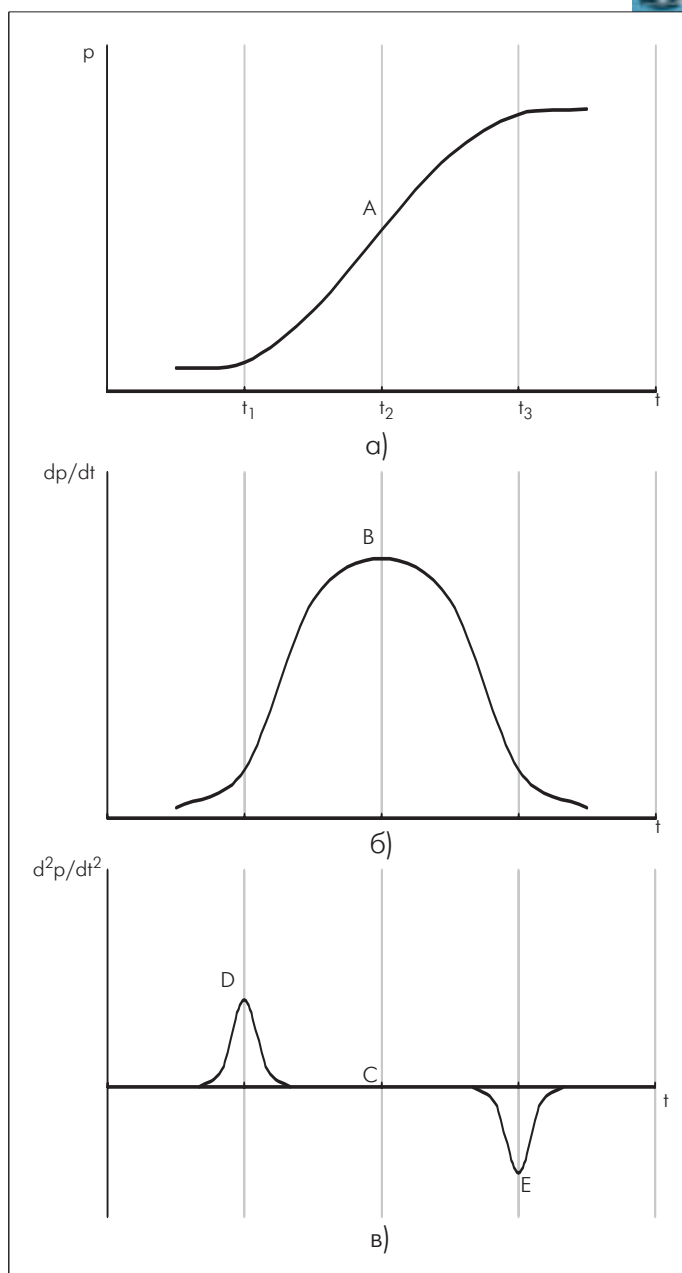
вую концепцию. По мере ее развития число проблем к моменту  $t_1$  сокращается, и решение их облегчается. Это подтверждает правильность выбранной базовой технологической концепции. В период обучения новой технологии S-кривая пологая, так как отдача ресурсов, вкладываемых в развитие технологии и в увеличение обобщенного показателя совершенства ИМС, пока не велика. Для отладки новой базовой технологии и реализации заложенного в ней потенциала все еще необходимы крупные инвестиции.

К моменту перехода на этап повышенной отдачи основные технологические проблемы решены. Это потребовало много времени и средств, но теперь уже догнать обучившуюся группу новаторов (компанию) нелегко. Любая другая группа должна пройти свой этап обучения, даже если ею взята на вооружение та же технология новаторов. Деятельность новаторов (или атакующих, поскольку они "атакуют" старую технологию) неудержимо набирает обороты. Дополнительные вложения в развитие новой базовой технологии на этом этапе приводят к резкому улучшению обобщенного показателя совершенства ИМС, производство которых все более оптимизируется.

Однако к моменту  $t_3$  дополнительные вложения уже не приводят к заметному увеличению обобщенного показателя совершенства ИМС. Так, классическая КМОП-технология сталкивается с новыми ограничениями. Дальнейшему уменьшению размеров микросхем и повышению степени интеграции препятствуют проблемы, связанные с увеличением токов утечки, потребляемой мощности и с отводом тепла. Приходится тратить все более крупные средства на преодоление трудностей, придумывать "довески" к базовой технологической концепции. Наступает этап насыщения, проявляются факторы, ограничивающие дальнейшее совершенствование технологии в рамках принятой базовой концепции. Приходит пора менять существующую базовую концепцию и начинать активные поиски новой более эффективной базовой технологии. Если фирма не сделает этого вовремя, ее опередит кто-либо из конкурентов, начавший работать на основе новой базовой технологии с большими возможностями, т.е. формировать новую S-кривую [4, 5].

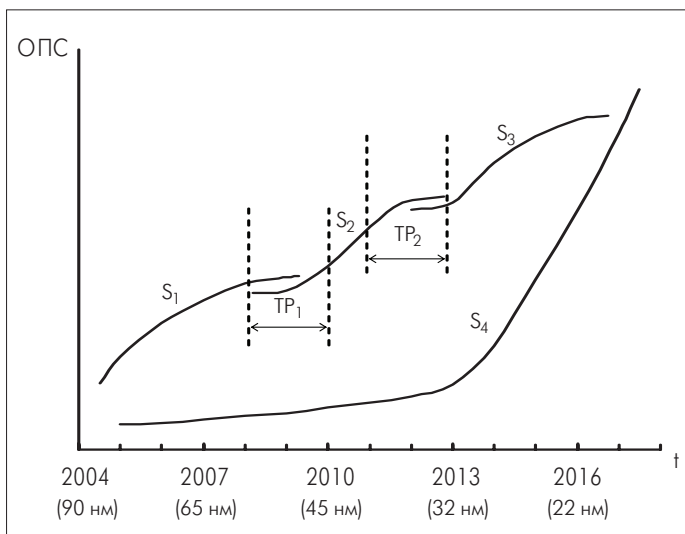
При назревании технологических перемен важно понять, какому участку S-кривой используемой технологии (или выпускаемой продукции) соответствует текущий момент. Приведут ли дальнейшие вложения в совершенствование производственных процессов и выпускаемых изделий к осязаемым результатам? Или же развитие технологии достигло предела? Если технологическая концепция достигла пределов развития, средства целесообразно направлять на разработку и внедрение новой базовой технологии или в подготовку и освоение выпуска новых видов изделий.

Точка А на S-кривой (см. рис. 1а) – это точка перегиба, в которой наклон кривой к оси абсцисс максимален. От началь-



**Рис. 1. Кривая развития (S-кривая) для параметра  $p$  (а), ее первая (б) и вторая (в) производные по времени  $t$**

ной точки до точки А скорость увеличения обобщенного показателя совершенства ИМС растет и достигает в ней максимума. Пройдя через этап обучения, фирма на участке повышенной отдачи технологии наращивает производство и сбыт изделий и по инерции проскакивает точку А, после чего темпы роста обобщенного показателя совершенства ИМС снижаются. Но здесь возникает психологическая ловушка, заключающаяся в том, что обобщенный показатель совершенства ИМС продолжает расти. Правда, чем дальше, тем медленнее, пока он не дойдет до насыщения вследствие истощения ресурсов базовой технологии. Поэтому важно заранее располагать информацией о характере изменения обобщенного показателя совершенства до наступления этого момента. Как известно, скорость роста характеризуется первой производной по времени. Действительно, кривая первой производной прохо-



**Рис.2. Временные зависимости обобщенного показателя совершенства ИМС: S<sub>1</sub> – классическая КМОП-технология на объемном монокристаллическом кремнии; S<sub>2</sub> – КМОП-технология на КНИ с ультратонким полностью обедненным слоем; S<sub>3</sub> – многозатворные КМОП-структуры на КНИ; S<sub>4</sub> – нанотехнология с подходом к изготовлению ИМС "снизу вверх". В скобках указаны топологические нормы ИМС. TP – технологический разрыв**

дит через максимум в точке В (рис. 1б). При этом кривая имеет две точки перегиба. Если взять производную по времени от этой кривой, т. е. вторую производную по времени от начальной S-кривой, можно получить новую кривую (рис. 1в). На ней точка D указывает начало второго этапа S-кривой, точка С – середину второго этапа, а точка Е – начало третьего этапа, или насыщение S-кривой [4].

Базовая технология (как и любая система с ограниченными ресурсами) в ходе развития неизбежно рано или поздно использует все свои ресурсы, что приведет к ее деградации и кризису. Поэтому вопрос об оптимальном использовании ресурсов приобретает особую важность. Когда компания находится в начале этапа повышенной отдачи базовой технологии (рис. 1а, участок  $t_1-t_2$ ), в развитие производства целесообразно вкладывать 90% ресурсов, а 10% – в развитие новых технологических направлений и изделий, т. е. закладывать новые S-кривые, диверсифицируя, таким образом, производство ИМС.

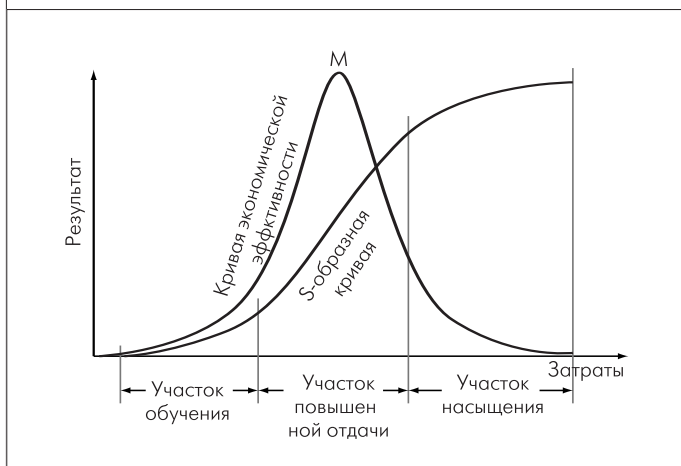
Как только начнется насыщение S-кривой (рис. 1а, участок вблизи точки  $t_3$ ), основные ресурсы уже следует направлять на исследовательские и проектные работы, возможно, даже сокращая объемы производства. Если конкуренты сумеют первыми внедрить новую технологию, заводы или производственные участки по производству изделий на основе существующей базовой технологии могут не понадобиться ни себе, ни другим. Новая технологическая концепция может очень быстро радикально изменить положение дел в науке и на рынке, как это произошло в начале 50-х годов. Тогда создание транзистора Д.Бардином, У.Брайтеном и У.Шокли привело к свертыванию разработок и производства приборов на основе вакуумных электронных ламп (диодов, триодов и т.п.).

Период замены старой базовой концепции (технологии изготовления и конструкции микросхемы) на новую определяет технологический разрыв или переломный момент (рис.2) [2,3]. В период технологического разрыва начинает формироваться новая S-кривая как на основе расширения старой базовой концепции (введение новых подсистем), так и на базе совершенно новых знаний.

Согласно программе развития международной полупроводниковой технологии (The International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS), классическая КМОП-технология сегодня достигает насыщения (рис.2, кривая S<sub>1</sub>). В ближайшее время будут последовательно осваиваться новые ее формы: КМОП на КНИ (кремний на изоляторе) с ультратонким полностью обедненным слоем (рис.2, кривая S<sub>2</sub>) и многозатворные КМОП-структуры на КНИ (рис.2, кривая S<sub>3</sub>) [6]. Одновременно большие средства вкладываются в развитие принципиально новой нанотехнологии, основанной на принципе изготовления ИМС "снизу вверх" (bottom-up), т.е. последовательного формирования наноэлементов микросхем от поверхности подложки (рис.2, кривая S<sub>4</sub>). Таким образом, микроэлектронное производство в своем развитии для страховки от неудач и обеспечения заданного роста обобщенного показателя совершенства (ОПС) ИМС использует оба подхода.

При экономическом анализе микроэлектронного производства S-кривую удобнее строить в координатах "результат-затраты" (рис.3). В этом случае производная S-кривой определяет экономическую эффективность технологии производства. Естественно, что при отсутствии конкуренции фирме необходимо стремиться к достижению максимума экономической эффективности производства (рис.3, точка М).

В периоды технологических разрывов обостряется конкуренция между атакующими фирмами, стремящимися получить максимальную прибыль от новой технологической концепции, и фирмами-консерваторами (обороняющимися), пытающимися сохранить свои доходы, не изменяя техноло-



**Рис.3. S-кривая развития технологии микроэлектронного производства в координатах "результат-затраты" и ее производная, или кривая экономической эффективности**





гической концепции. Чтобы вовремя выявить опасность и своевременно принять меры (подготовиться к атаке или защите), фирме-консерватору необходимо определить свое положение на S-кривой развития технологии микроэлектронного производства. Стратегия долгоживущих фирм: хорошо обороняться и одновременно готовиться к атаке. В области технологии такой подход означает проведение нетрадиционных разработок с комплексным подходом и заданной целевой функцией [2]. А применительно к микроэлектронике – владение всем комплексом технологий изготовления ИМС, электронных блоков и систем под конкретную целевую задачу, например создание специализированных компьютеров.

С конца 70-х годов прошлого столетия микроэлектроника развивается на основе классической КМОП-технологии в соответствии с законом Гордона Мура [6–9]. Индикаторы уровня этой технологии (УТ) и уровня совершенства изделий микроэлектроники – ИМС микропроцессоров (МП) и ДОЗУ [6]. Согласно закону Мура, функциональные возможности ДОЗУ (объем памяти, или число ячеек памяти) и МП (число транзисторов и быстродействие) удваиваются каждые два года. При этом удельная стоимость ИМС в пересчете на функцию (cost per function) ежегодно снижается на 29%. Первоначально микроэлектроника развивалась в первую очередь за счет уменьшения минимальных размеров элементов (топологических норм), увеличения площади кристалла и совершенствования конструкции и топологии микросхемы [8]. Сейчас же развитие происходит в основном лишь за счет уменьшения с каждым новым УТ топологической нормы на 30% (коэффициент масштабирования 0,7\*) [9].

Следует отметить, что закон Мура основан на законе опыта (Experience Low) применительно к специфике микроэлектронного производства. Закон опыта был открыт в конце 60-х годов прошлого века бостонской консалтинговой группой (Boston Consulting Group – BCG) в ходе эмпирических исследований изменения цен и издержек (затрат) в различных отраслях промышленности [10]. Согласно современной формулировке этого закона, при удвоении совокупного (накопленного, кумулятивного) объема произведенной продукции реальные (т.е. без учета инфляционной составляющей) затраты на производство единицы продукции уменьшаются на относительно постоянную величину (~10–30%) [11, 12]. Если по оси абсцисс отложить совокупный объем произведенной продукции с начала отчетного периода, а по оси ординат – затраты на единицу продукции (удельная себестоимость), получим графическое представление закона опыта, или кривую опыта (experience curve). Кривая опыта – это функция, отражающая снижение общих затрат на единицу продукции в ре-

\* Уменьшение минимального размера в 0,7 раза при переходе от одного УТ к другому эквивалентно двукратному уменьшению площади, занимаемой МОП-транзистором, и, следовательно, эквивалентно увеличению их числа на единицу площади в два раза.

альном денежном выражении (удельной себестоимости) по мере увеличения накопленного объема производства. Кривая опыта может быть описана формулой

$$C_p = C_b \cdot (Q_p/Q_b)^e, \quad (1)$$

где  $C_p$  и  $C_b$  – плановые и базовые затраты на единицу продукции,  $Q_p$  и  $Q_b$  – соответственно, плановый и базовый совокупный объем продукции,  $e$  – отрицательный ( $e < 0$ ) коэффициент, отражающий эластичность затрат на единицу продукции [12]. По определению

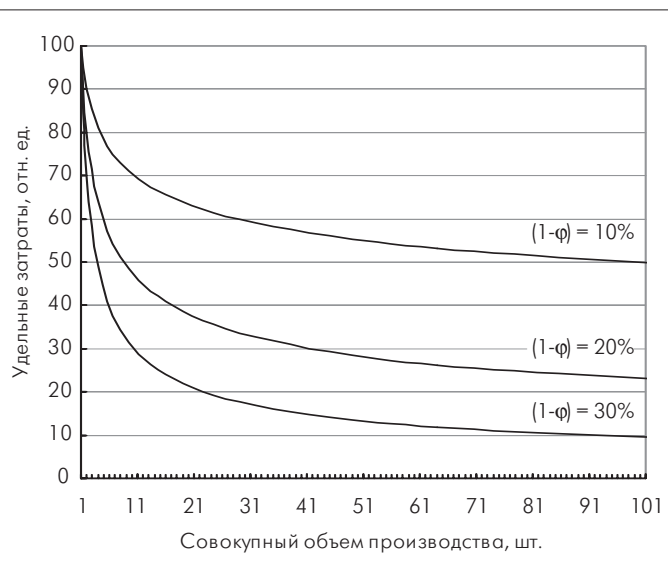
$$e = \log_2 j, \quad (2)$$

где  $j = 2^e \in 1$  – коэффициент опыта, отражающий уровень снижения затрат на единицу продукции после удвоения совокупного объема производства. Коэффициент прогресса, показывающий процент снижения удельных затрат за время удвоения объема производства, равен  $(1 - j)$ .

Если в формуле (1) принять  $Q_p = 2Q_b$  и подставить в нее выражение  $e$  из формулы (2), получим

$$C_p = j \cdot C_b. \quad (3)$$

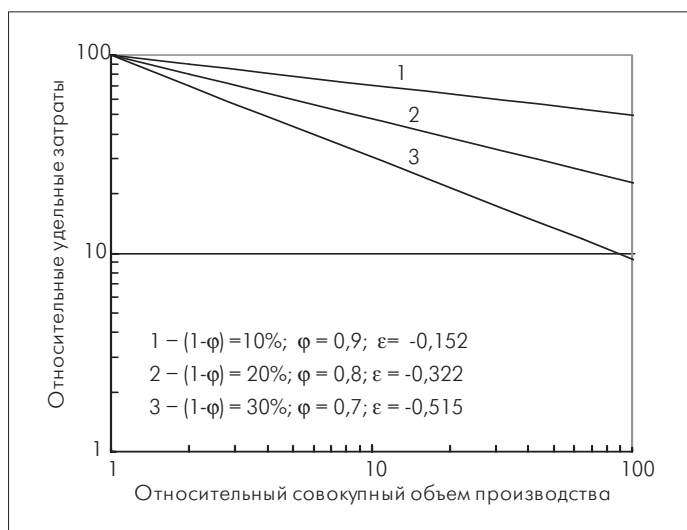
Это значит, что при удвоении совокупного объема продукции новые затраты на единицу продукции уменьшаются до уровня  $j \cdot C_b$  или на  $(1 - j)$  процентов, так как  $j \in 1$ .



**Рис.4. Кривые опыта с различными коэффициентами прогресса (1 - j) при затрате на первую единицу продукции 100 относительных единиц**

Графики кривых опыта с 70-, 80- и 90%-ными уровнями снижения удельных затрат при удвоении совокупного объема продукции (соответственно 70-, 80- и 90%-ные кривые опыта, или кривые опыта с коэффициентами прогресса  $(1 - j)$  30, 20 и 10%, соответственно) приведены на рис.4.

Поскольку кривая опыта должна отражать постоянные относительные изменения в совокупном производстве, ее разумнее строить в логарифмических координатах. Тогда зависимость (1) примет вид  $\lg(C_p/C_b) = e \cdot \lg(Q_p/Q_b)$ , т.е. прямой



**Рис.5. Кривые опыта, приведенные на рис.4, в логарифмических координатах**

линии с коэффициентом наклона, равным ε (рис.5). Из полученных прямых следует, что увеличение совокупного объема производства с 50 до 100 или с 1 млн. до 2 млн. единиц продукции приведет к пропорциональному снижению реальных издержек. В табл.1 приведены значения коэффициентов опыта и прогресса для различных значений эластичности затрат.

**Таблица 1. Зависимость коэффициентов опыта и прогресса от коэффициента эластичности затрат**

Коэффициент опыта j	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,71	0,70
Коэффициент прогресса (1-j), %	0	5	10	15	20	25	29	30
Коэффициент эластичности затрат ε	0	-0,074	-0,152	-0,234	-0,322	-0,450	-0,494	-0,515

Гордон Мур с середины 60-х до середины 70-х годов фактически изучал S-кривую технологического развития изделий фирмы Intel на участке максимального экспоненциального роста, аналогичного участку  $t_1-t_2$  вблизи точки A на кривой рис.1а. В качестве анализируемого параметра  $p$  первоначально принималось число компонентов на кристалле, затем — число МОП-транзисторов и, наконец, минимальный размер элемента или зазора в периодических структурах с максимальной плотностью упаковки —  $L_{min} = 1/2$  минимального периода\*. Одновременно он анализировал кривые опыта для этих изделий. При построении кривых по оси абсцисс откладывалось совокупное число обработанных пластин или совокупная площадь обрабатываемого кремния (см. рис.4, 5). Все анализируемые кривые показали коэффициент прогресса  $1 - j \gg 29\%$ .

Для микроэлектронного производства, где стоимость обработки  $1 \text{ см}^2$  кремния поддерживается практически постоянной [9], закон опыта можно сформулировать следующим образом: **себестоимость изготовления основной функ-**

**циональной единицы ИМС (стоимость на функцию) ежегодно уменьшается на относительно постоянную величину (~29%), когда минимальная топологическая норма  $L_{min}$  с каждым следующим УТ уменьшается на 30% (масштабируется в 0,7 раза).** Если переход от одного УТ к другому занимает два года (табл.2), то с учетом неизменных затрат на обработку единицы площади кремния удельная стоимость элемента в пересчете на функцию будет снижаться в два раза за два года, в 1,41 раза за год, или на 29% в год. Таким образом, закон Мура выполняется без дополнительных условий.

При переходе с одного УТ на следующий в течение трех лет (см. табл.2) удельная стоимость уменьшится в два раза за три года, в 1,26 раза за год или на 21% в год. Чтобы закон Мура выполнялся в этом случае, необходимо снижать стоимость обработки единицы площади кремния, улучшать архитектуру и конструкцию изделия. Снизить стоимость обработки единицы площади кремния, помимо увеличения диаметра обрабатываемых пластин, можно за счет [6,9]:

- уменьшения сроков строительства предприятий, ускорения их запуска и выхода на целевые объемы производства;
- повышения производительности и коэффициента использования оборудования;
- повышения надежности и коэффициента готовности оборудования, улучшения его диагностики и обслуживания;
- повышения целевого значения выхода годных изделий и сокращения периода его достижения, начиная с момента запуска производства;
- увеличения объема производства.

Например, объем производства (число ежемесячно запускаемых в производство пластин) вводимых в эксплуатацию предприятий постоянно увеличивается. В начале 80-х годов он составлял 8000 пластин/месяц, а в конце — уже 10–15 тыс. пластин/месяц. В 90-е годы ежемесячно обрабатывалось 20–25 тыс. пластин, в первое пятилетие 21-го века — 30–40 тыс. пластин. Ожидается, что в ближайшее время объем производства возрастет до 50–60 тыс. пластин/месяц [6, 13, 14]. При этом практически стоимость единицы обрабатываемой площади кристалла при изготовлении ИМС остается постоянной. В 1980 году установка фотолитографии стоила в среднем 500 тыс. долл. Ее максимальная производительность составляла 40 пластин диаметром 100 мм в час, т.е. стоимость обработки  $1 \text{ см}^2$  кремния была равна 159 долл. В 2003 году степер-сканер стоимостью 10 млн. долл. обрабатывал 90 пластин диаметром 300 мм в час, т.е. стоимость обработки  $1 \text{ см}^2$  кремния практически не изменилась — 157 долларов [9].

Можно выделить два типа движущих сил технологического развития микроэлектроники: толкающие и тянущие. Толкающие силы — это усовершенствованные технологические процессы, обеспечивающие целевые улучшения ИМС. Тянущие силы — это экономические показатели, которые определяют

\* Сейчас минимальный размер элемента определяется по первому уровню разводки ДОЗУ [6].

**Таблица 2. Прогноз развития КМОП-микросхем ДОЗУ и МП на 1992–2016 годы\***

Характеристика	Уровень технологии, нм									
	500	350	250	180	130	90	65	45	32	22
Год освоения массового производства	1992	1994	1997	1999	2001	2004	2007	2010	2013	2016
Минимальный размер элемента изделия, нм										
ДОЗУ (первый уровень разводки)	500	350	250	180	130	90	65	45	32	22
МП (литографическая длина затворов)	350	250	180	130	90	60	42	30	21	13
МП (физическая длина затворов)	300	200	150	100	65	37	25	18	13	8
Функциональные возможности на стадии массового производства										
емкость ДОЗУ, Мбит	4	16	64	256	512	1·10 <sup>3</sup>	4·10 <sup>3</sup>	8·10 <sup>3</sup>	16·10 <sup>3</sup>	32·10 <sup>3</sup>
число транзисторов МП, млн. шт.	13	21	52,8	108	276	553	1,1·10 <sup>3</sup>	2,2·10 <sup>3</sup>	4,4·10 <sup>3</sup>	8,8·10 <sup>3</sup>
Удельная стоимость в пересчете на функцию на стадии массового производства										
ДОЗУ, микроцент/бит	170	86	28	15	7,7	2,7	0,96	0,34	0,12	0,04
МП, микроцент/транзистор	2,5·10 <sup>3</sup>	1,3·10 <sup>3</sup>	470	245	97	34	12,2	4,3	1,5	0,54

\* Версия скорректирована по состоянию на 2006 год.

себестоимость ИМС в период внедрения технологических инноваций. Эти два типа движущих сил зависят друг от друга. Но доминируют всегда экономические показатели, т.е. процесс миниатюризации ИМС в большей степени ограничен законами экономики, а не законами физики. Если технологические возможности производства по числу изготавливаемых функциональных единиц на кристалле опережают запросы рынка, процесс миниатюризации замедляется. Вот почему массовое производство ДОЗУ емкостью 4 Гбит до сих пор не освоено (см. табл.2). В микропроцессорах не используется столько МОП-транзисторов, сколько их позволяют создать технологические возможности современного производства. Пока еще не создана микросхема, для работы которой потребовалось бы столько транзисторов [9].

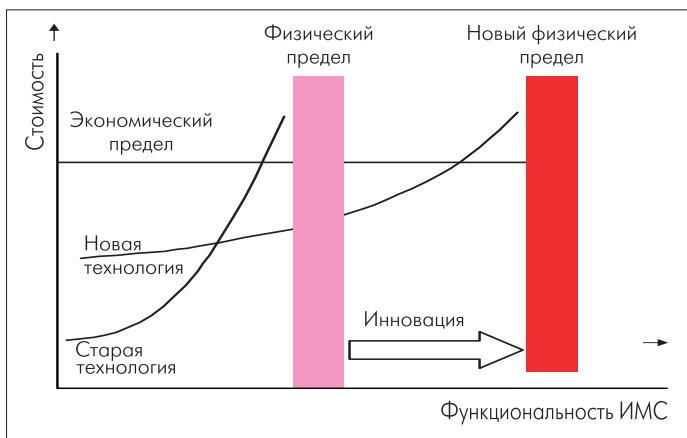
Закон Мура описывает эволюцию микроэлектронного производства уже более 30 лет, и на его основе до сих пор составляются производственно санкционированные прогнозы развития полупроводниковой технологии (ITRS) (см. табл.2). Прогноз развития микроэлектроники до 2020 года последней версии ITRS (выпуска 2005 года) также основан на законе Мура [6]. Почему этот закон действует так долго? Будет ли он справедлив в ближайшие 15 лет? И есть ли у него предел?

Сам Гордон Мур много раз говорил, что экспоненциальный закон развития не может действовать всегда, так как должен достичь предела. Существуют экономические и технологические пределы развития, причем первые всегда наступают раньше, чем вторые. Действительно, преодолеть законы физики нельзя ни за какие деньги [9, 15, 16]. Выполнение закона Мура путем масштабирования МОП-транзисторов обеспечивает практически максимальную экономическую эффективность микроэлектронного производства в соответствии с законом опыта (29% из возможных 30%). Поэтому масштабирование имеет решающее экономическое значение для развития микроэлектроники. Чем меньше МОП-транзисторы, тем выше их быстродействие, меньше потребляемая мощность и тем они надежнее и дешевле [9, 16]. Все это отражено в прогнозах ITRS.

Хотя экономика в законе Мура играет важную роль, возможность дальнейшего совершенствования ИМС путем масштабирования зависит от уровня развития технологии. Существует критический цикл взаимодействия технологии и экономики (technology/economics cycle). Появление технологий, обеспечивающих экономически эффективное производство МОП-транзисторов с уменьшенными топологическими нормами, позволяет производителю поставлять на рынок новые микроэлектронные изделия. Их совершенствование (расширение функциональных возможностей), снижение стоимости или оба этих фактора приводят к возникновению новых рынков и увеличению объема продаж ИМС. А более высокие объемы продаж позволяют инвестировать процент от полученного дохода в развитие следующего УТ (взаимосвязь причины и следствия в кривой опыта). Таким образом, технологическое развитие ведет к экономическому росту, позволяющему инвестировать его дальнейшее продвижение.

Экспоненциальное увеличение функциональной сложности ИМС не может продолжаться вечно. Существуют экономические и технологические пределы. Экономические пределы определяются ростом спроса на ИМС. При замедлении роста спроса действие закона Мура также замедляется. Увеличение издержек производства масштабированных МОП-транзисторов может привести к росту затрат в пересчете на площадь обрабатываемого кремния (cost/processed area of silicon), а значит, и удельной стоимости на функцию.

Увеличение удельной стоимости на функцию ограничивает возможности роста новых рынков, что снижает и рост совокупной обрабатываемой площади кремния, и, следовательно, — замедляет продвижение микроэлектронного производства по кривой опыта (замедляет процесс обучения) [9]. С 1998 года мировое микроэлектронное производство обрабатывает ежегодно  $3 \cdot 10^{10}$  см<sup>2</sup> кремния [9,17]. Согласно данным, приведенным в [3], в 2005 году в мире при производстве ИМС было обработано  $8 \cdot 10^6$  пластин диаметром 300 мм,  $5,4 \cdot 10^7$  пластин диаметром 200 мм,  $3,5 \cdot 10^7$  150-мм пластин,  $2,1 \cdot 10^7$  125-мм пластин и  $1,5 \cdot 10^7$  пластин диаметром 100 мм и менее. Всего

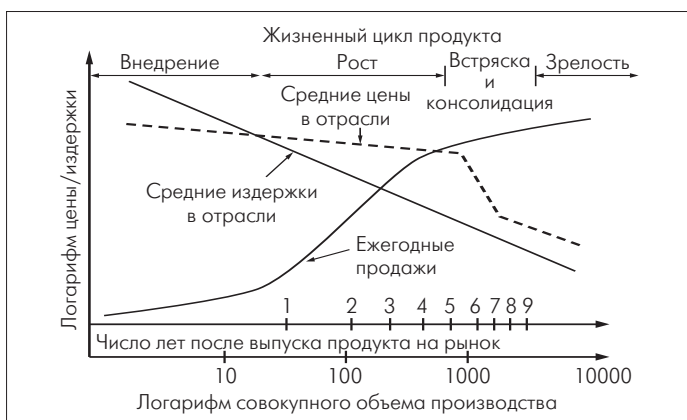


**Рис.6. Зависимости затрат от функциональных возможностей ИМС, изготавливаемых с помощью технологий с разными физическими пределами (физический предел изменяется в результате внедрения технических новшеств – инноваций)**

с начала выпуска ИМС до 2006 года в мире обработано  $58,5 \cdot 10^{10}$  см<sup>2</sup> кремния [9].

При масштабировании ИМС основную роль играют процессы литографии. При достижении физических пределов процесса затраты на совершенствование ИМС экспоненциально возрастают. Поэтому производители ИМС пытаются всеми способами расширить физические пределы разрешающей способности проекционной оптической литографии с помощью таких инноваций, как фазосдвигающие фотошаблоны и внеосевое освещение [3]. Затраты на изготовление микросхем с помощью новой технологии первоначально больше, чем при использовании более старой технологии (рис.6) для производства микросхем той же функциональности. Однако по мере роста функциональности ИМС новая технология становится экономически более эффективной. Таким образом, чтобы снизить удельную стоимость производимых ИМС в пересчете на функцию, к новой технологии следует переходить после достижения точки пересечения зависимостей затрат от функциональности схем (см. рис.6) [9].

Кривую опыта можно построить как для отдельно взятого предприятия, так и для всей отрасли. Ее анализ позволяет составлять долгосрочные прогнозы изменения удельной себестоимости продукции, цен (предполагается, что в долгосрочной перспективе цены меняются параллельно издержкам) и потен-



**Рис.7. Механизм ценообразования при производстве ИМС**

циальной прибыли. Особенно эффективны кривые опыта при ценообразовании в высокотехнологических отраслях промышленности, таких как производство ИМС (рис.7). Если цены на единицу продукции на протяжении долгого времени выше издержек, создается так называемый "ценовой навес". Он привлекает на рынок новых игроков или побуждает существующих конкурентов в ожидании высокой прибыли расширять свои производственные мощности, а значит – и выпуск продукции [12].

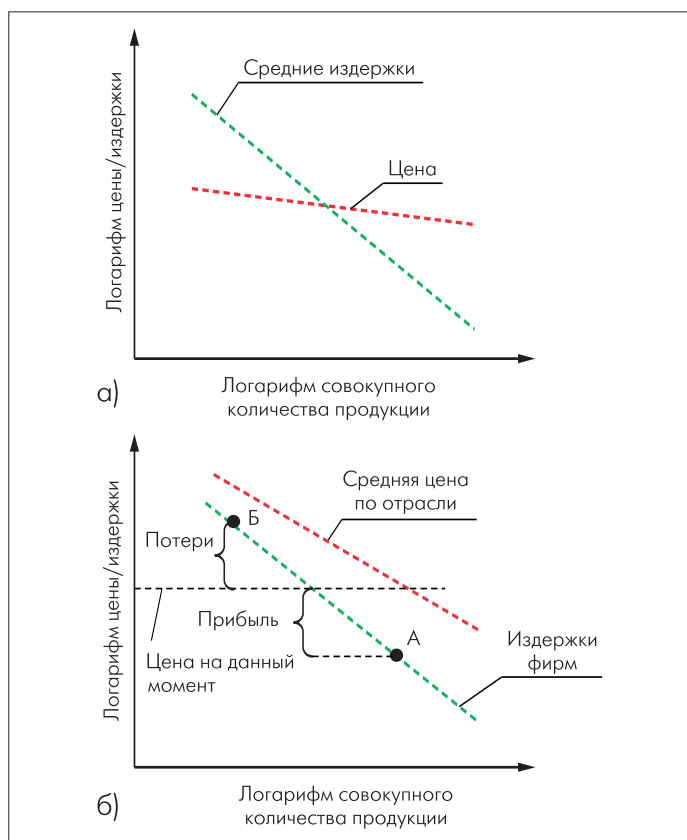
Рыночный жизненный цикл ИМС включает следующие стадии [3, 13]:

- внедрения (выхода на рынок): ведущие производители поставляют ключевым заказчикам для проверки небольшие партии ( $10^3$ – $10^5$  опытных образцов) изделий, произведенных с помощью аттестованных промышленных процессов и оборудования;
- роста серийного производства, когда на рынок поставляются большие партии изделий, например 16–80 млн. микросхем ДОЗУ или 2–10 млн. микросхем процессоров в месяц;
- консолидации производителей на пике производства, когда поколение изделий с наибольшим объемом производства начинают заменять изделия следующего поколения, экономическая эффективность производства которых в пересчете на функцию (бит, транзистор) выше;
- зрелости, когда объемы производства заменяемого изделия уже не растут, а в дальнейшем падают.

Жизненный цикл ДОЗУ (введение–рост–пик) до достижения зрелости, как правило, составляет шесть лет. Жизненный цикл микропроцессоров до достижения зрелости – четыре года, поскольку они выполняются на основе процессорного ядра уже внедренных в производство экономически эффективных усовершенствованных микросхем. В конкурентной борьбе выигрывает тот, кто быстрее спустится по кривой опыта. Поскольку возможности снижения издержек зависят от роста продаж, особенно успешна стратегия увеличения относительной доли фирмы на быстрорастущем рынке, даже за счет продажи продукции в начале жизненного цикла по цене ниже себестоимости (рис.8а,б). Таким образом, многие фирмы посредством крупных инвестиций и агрессивного ценообразования пытаются как можно быстрее занять лидирующее положение на рынке. Капиталовложения могут окупиться позже, после достижения поставленной цели [12].

Стратегию завоевания большой рыночной доли обычно проводят предприятия с ограниченным набором технологий и малой номенклатурой выпускаемых изделий, основываясь на своем опыте. Успешны и предприятия с небольшой долей рынка, нашедшие свою рыночную нишу, располагающие полным набором технологий по изготовлению специализированных изделий и ориентированные на повышение их качества и снижение себестоимости. Им тоже стоит проанализировать кривую опыта и попытаться использовать свой потенциал снижения издержек, пусть и небольшой.





**Рис.8. Основные режимы ценообразования на начальном этапе жизненного цикла ИМС (а) и на этапе зрелости (б). Точки А, Б указывают положение фирмы на кривой опыта**

Чтобы избежать ценовых войн в результате увеличения предложения со стороны конкурентов или чтобы не пускать на рынок новых игроков, предприятиям с большой долей рынка рекомендуется после достижения порога прибыли постепенно снижать цены параллельно снижению издержек. Однако стратегия снижения затрат по мере накопления опыта известна конкурентам, и станет ли кривая опыта барьером для их входа на рынок, зависит от мер, принимаемых для снижения издержек. Если издержки падают за счет реализации уже известных технических новшеств или применения приобретенного у поставщиков передового технологического оборудования, кривая опыта не будет барьером для конкурентов. Менее опытные конкуренты всегда смогут приобрести новейшее оборудование и технологии. При этом их издержки производства могут оказаться ниже, чем у лидеров, так как им не нужно компенсировать инвестиции в НИОКР. Барьер кривой опыта можно преодолеть с помощью инноваций процессов производства. Это приводит к появлению совершенно новой технологии и, соответственно, совершенно новой кривой опыта. А у конкурентов появляется шанс обогнать лидеров отрасли. Если же кривая опыта выполняется за счет патентов, то лидеры сохраняют свои преимущества по издержкам.

Анализ кривой опыта позволяет прогнозировать снижение издержек и изменение цены продукта как для отдельно взятого предприятия, так и для всей отрасли. При определении

целей он помогает установить долю рынка, к которой предприятию следует стремиться, и прибыль, на которую можно рассчитывать. Кроме того, результаты анализа кривой опыта являются источником информации при разработке ценовой политики [18].

Таким образом, на протяжении последних 30 лет производство ИМС развивалось на базе классической КМОП-технологии, следуя закону Мура. Это позволило получать максимальную прибыль в результате увеличения объема продаж более дешевых и более совершенных изделий. Чтобы сохранить лидерство на рынке в условиях жесткой конкуренции необходимо продолжать процессы масштабирования ИМС в соответствии с законом Мура, несмотря на рост сложности и стоимости технологии их производства. Эту стратегию следует проводить до тех пор, пока масштабирование обеспечивает совершенствование МОП-транзисторов и пока инвестиции в технологию производства масштабированных изделий окупаются за счет объема их продаж. Однако классическая КМОП-технология приближается к своему пределу, и начинается освоение новой нанотехнологии. Изменения производственного технологического оборудования и инфраструктуры предприятий требуют огромных капиталовложений. Поэтому переход на принципиально новую нанотехнологию производства электронных устройств произойдет только после достижения пределов совершенствования КМОП ИМС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Викентьев И.Л. Приемы рекламы и Public Relations. Программы-консультанты: 400 примеров; 200 учебных задач и 20 практических приложений. 7-е издание. – СПб.: Изд-во "ТРИЗ-ШАНС", 2004.
2. Масштаб технологии и пределы роста. Принцип переломных точек в эволюции систем. 02.09.2001. – [http://www.integro.rb.ru/system/ots/evolution/s\\_curve.htm](http://www.integro.rb.ru/system/ots/evolution/s_curve.htm).
3. Киреев В. Технология и оборудование для производства интегральных микросхем. Состояние и тенденции развития. – ЭЛЕКТРОНИКА: Наука. Технология. Бизнес, 2004, № 7, с.72–77.
4. Сибиряков В.Г., Семенова Л.Н., Серединский А.В. S-кривая: инструмент менеджера. – Доклад на НПК "Творчество во имя достойной жизни". – Великий Новгород, 11–12 июля 2001 года. – <http://natm.ru/triz/articles/sibir/sibir06.htm>.
5. Сибиряков В.Г. Проектирование кризисов – путь к успеху. 1999. <http://www.triz.minsk.by/e/248014.htm>.
6. The International Technology Roadmap for Semiconductors, 2005 ed., Semiconductor Industry Association, San Jose, CA.
7. Moore G.E. Cramming more components onto integrated



- circuits. – Electronics, 1965, v.38, No.8, p. 114–117.
8. **Moore G.E.** Progress in digital integrated circuits. – IEDM Technical Digest, 1975, p.11–13.
9. **Мак С.А.** Using learning curve theory to redefine Moore's Law. – Solid State Technology, July 2003, p.51–58.
10. Стратегии, которые работают. Подход VCG. / Под ред. К. Штерна и Д. Стока-мл. Перев. с англ. – М.: Изд-во "Манн, Иванов и Фербер", 2005. – 496 с.
11. **Уорд К.** Стратегический управленческий учет. / Перев. с англ. М.: Изд-во "Олимп-Бизнес", 2002. – 435 с.
12. **Лукашов А.В.** Стратегия и тактика ценообразования. – Агентство делового образования. 2006. – <http://www.forumconsulting.ru/File/1143722965.pdf>.
13. The National Technology Roadmap for Semiconductors, 1997 ed, Semiconductor Industry Association, San Jose, CA.
14. **Механик А.** Как нам перезагрузить матрицу? – Эксперт, 2006, № 31, с. 52–58.
15. **Numan P.** The challenges adjusting scaling control knobs. – Solid State Technology, Oct. 2005, p.24–27.
16. **Derbyshire K.** Sub-100 nm transistors defy conventional wisdom. – Semiconductor Magazine, Feb. 2002, p. 2–31.
17. **Горнев Е.** Как нам обустроить свой микроэлектронный мир? – ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. 2004, № 7, с.22–25.
18. **Ламбен Ж.** Менеджмент, ориентированный на рынок. /Перев. с фран. М.: Изд-во "Питер", 2004. – 800 с.