

**В ПРОИЗВОДСТВЕ НАУКОЕМКИХ ПРОДУКТОВ  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

*Каковы технологические и экономические механизмы развития микроэлектроники? Какие тенденции и закономерности будут преобладать в ближайшие годы? Как обеспечить возвратность громадных инвестиций в микроэлектронное производство? Насколько экономически оправданно создание гибких мелкосерийных ультраточистых мини-производств на базе технологий “глубокого субмикрона”? Публикуемая ниже статья посвящена анализу этих ключевых проблем, возникающих на стыке технологии и экономики.*

**М**икроэлектронные технологические инновации сегодня играют решающую роль в конкурентной борьбе на мировом рынке, которая требует от их создателей все более быстрорастущих, низковольтных, маломощных, плотно упакованных СБИС и УБИС. Никогда еще за сорокалетнюю историю интегральной микроэлектроники технологические и экономические факторы в процессе создания конкурентоспособных наукоемких продуктов (КНП) микроэлектроники не переплетались столь тесно, как в середине–конце 90-х годов [1,2]. Симбиоз технологии и экономики становится ключевым фактором их создания и производства. Неслучайно именно в последние годы в зарубежной научно-технической литературе появляются такие неологизмы, как “техноэкономика” или “технономика”.

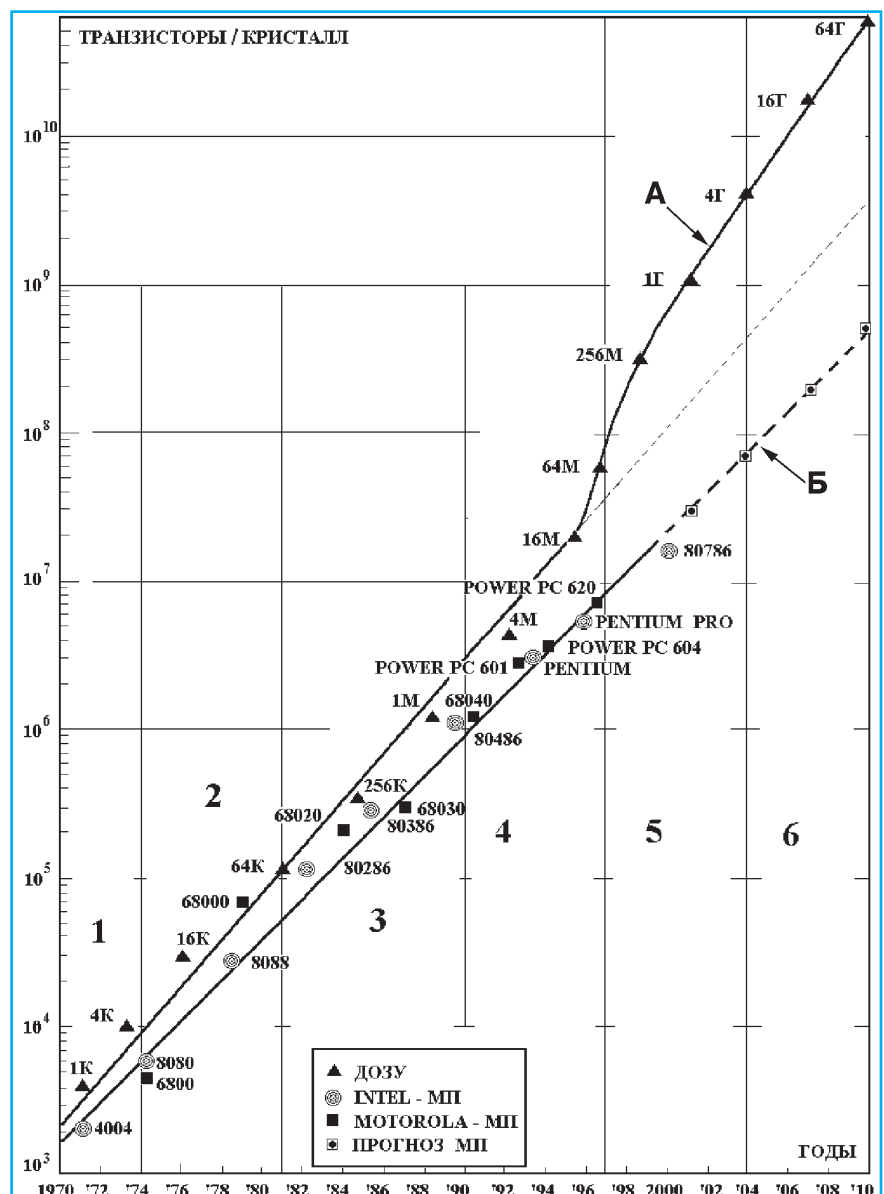
На фоне углубляющегося отставания отечественной микроэлектроники и вычислительной техники [3–5] исследование взаимосвязанных механизмов техноэкономики мировой микроэлектроники представляется весьма актуальным.

Прогресс микроэлектронной субмикронной технологии и производства СБИС вызвал значительный рост объемов их выпуска и продаж на мировом рынке. Темпы прироста объемов продаж в полупроводниковом секторе (28–30%) значительно выше, чем в целом на рынке радиоэлектронной техники (6–8%). Ключевую роль микроэлектроники подтверждает и такой показатель, как отношение объема продаж изделий микроэлектроники к общему объему продаж на рынке радиоэлектронной техники, который увеличился с 10% в 1992-м до 19–22% в 1995–1996 годах. Ожидается, что к 2001 году этот показатель превысит 25%.

Процесс развития технологии, схемотехники и архитектуры изделий микроэлектроники характеризуется растущей интеграцией ИС. По закону Мура, степень интеграции микросхем с регулярной структурой ДОЗУ до конца 70-х годов удваивалась с каждым годом. Позднее наметилась тенденция к снижению темпов интеграции: с 1979 года степень интеграции удваивалась за полтора года, с конца 80-х–начала 90-х – за два года. На рис.1 показаны

две ветви развития кремниевых микросхем от ИС к УБИС: для однородных схем памяти ДОЗУ и для неоднородных – микропроцессоров (фирм Intel и Motorola), изготовленных на производствах с соот-

ветствующим уровнем литографического оборудования до 1997 года [2] и на производствах будущего вплоть до 2010 года с учетом более интенсивного развития УБИС ДОЗУ [1,6,7].



**Рис.1. Эволюционные зависимости числа транзисторов от времени:** для микросхем ДОЗУ (А) и микропроцессоров (Б), реализованных на контактной литографии (1); проекционной литографии (2); поколения q-степперов (436 нм) (3); i-степперов (365 нм) (4); степперов на базе эксимерных лазеров на КгF (248 нм) и ArF (193 нм) (5); прогнозируемых поколений рентгенолитографических и электронных литографов (6)

Помимо названных Муром трех факторов, обуславливающих повышение степени интеграции УБИС (уменьшение топологических размеров элементов, увеличение размеров кристалла, совершенствование схмотехники и архитектуры), на этот процесс безусловно влияет и качество полупроводникового производства, обеспечивающее выход годных, надежность и воспроизводимость временные зависимости минимальных проектных топологических норм для данных типов микросхем (рис.2). В табл.1 отражены реальные и моделируемые тенденции увеличения степени интеграции, снижения удельной стоимости типовых микросхем памяти (ДОЗУ) и логики (микропроцессоров и специализированных ИС), а также требования к уровню технологии и массового производства (около 20000 обрабатываемых пластин в месяц).

Серьезнейшей экономической проблемой является механизм ценообразования ИС и рост объемов инвестиций в производство УБИС по мере развития процесса масштабирования в область глубокого субмикрона. Уменьшение геометрических размеров элементов УБИС и увеличение выхода годных обуславливают постоянное снижение приведенной стоимости на один вентиль или бит информации (табл.1). Это связано с тем, что стоимость единицы площади как обработанных, так и “сырых” кремниевых пластин практически не меняется уже несколько десятилетий (2–3 и 0,18– 0,25 долл./см<sup>2</sup> соответственно). Усредненные рыночные цены составляют для используемых в производстве СБИС кремниевых пластин диаметром 125 мм 20 долл., 150 мм – 40 долл., 200 мм – 80 долл., а диаметром 300 мм прогнозируются на уровне 200 долларов.

К ключевым факторам, определяющим стоимость обработанной пластины, относятся ее диаметр; число масочных этапов в технологическом маршруте изготовления СБИС; минимальный размер и условия его обеспечения используемым оборудованием и выбранным маршрутом; “зрелость” производства; временные сроки адаптации технологии в производство; контроль загрязнения (уровень плотности дефектов на пластине и вблизи нее); максимальный объем выпуска, производительность оборудования и процент его загрузки; амортизация оборудования и собственно производства; средняя почасовая оплата труда операторов и др.[1,6].

Масштабирование размеров элементов и линий связи в УБИС при переходе от h-

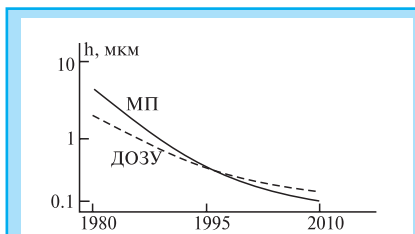


Рис.2. Эволюционные временные зависимости минимального топологического размера

тых помещений, а также сверхчистых химреагентов и прецизионного изготовления масок. В этой связи отметим, что по сравнению со схемами памяти (ИС с регулярной структурой) удельная стоимость неоднородных логических схем (микропроцессоры и специализированные ИС) снижается более медленно при минимальном изменении удельной стоимости корпусирования (от 1,4 до 0,8 цент/вывод). Это свидетельствует об “узком месте” в дорогостоящем процессе разработки УБИС.

Таблица 1  
Тенденции развития технологии и производства УБИС

Показатель	1995г.	1998г.	2001г.	2004г.	2007г.	2010г.
Мин.размер, мкм	0,35	0,25	0,18	0,13	0,10	0,07
Память/ ДОЗУ						
Объем памяти, ДОЗУ/ФЛЭШ	64 Мбит	256 Мбит	1Гбит	4Гбит	16Гбит	64Гбит
Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>	190	280	420	640	980	1400
Цена ДОЗУ, мцент/бит	0,017	0,007	0,003	0,001	0,0008	0,0002
Микропроцессоры						
Интеграция, транз./см <sup>2</sup>	4М	7М	13М	25М	50М	90М
Кэш-СОЗУ, бит/см <sup>2</sup>	2М	6М	20М	50М	100М	300М
Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>	250	300	360	430	520	620
Цена транз., мцент/см <sup>2</sup>	1	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02
Специализированные ИС						
Интеграция, транз./см <sup>2</sup>	2М	4М	7М	12М	25М	40М
Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>	450	680	750	900	1100	1400
Цена, мцент/см <sup>2</sup>	0,3	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01
Число выводов УБИС						
Микропроцессоры	512	512	512	512	800	1024
Специализированные ИС	750	1100	1700	2200	3000	4800
Цена, цент/вывод	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8
Рабочая частота, МГц						
маломощная УБИС	150	200	300	400	500	625
быстродействующая УБИС	300	450	600	800	1000	1200
Требования к массовому производству						
Плотность дефектов, деф./м <sup>2</sup>	240	160	140	120	100	25
Макс. диаметр пластин, мм	200	200	300	300	400	400
Мин. число шаблонов	18	20	20	22	22	24
Инвестиции в производство, млрд. долл.	1,3	2,5	5	10	?	?

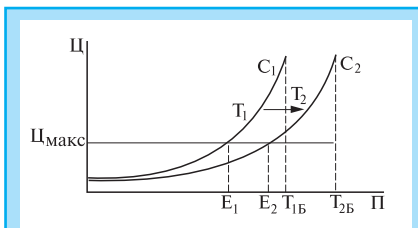
мкм к h/K-мкм технологии (K – фактор масштабирования) обеспечивает увеличение в K<sup>2</sup> раз сложности кристалла при примерно одинаковой стоимости единицы площади “сырого” и “обработанного” кристалла. Это снижает удельную стоимость УБИС примерно в K<sup>2</sup> раз. По мере освоения технологии более глубокого субмикрона меньшие топологические размеры элементов также приводят к более высокому выходу годных и, следовательно, к дополнительному снижению удельной стоимости УБИС. Отсюда можно сделать вывод, что при переходе от h-мкм к h/K-мкм технологии удельная стоимость кристалла снизится в K<sup>2</sup>D раз (D – нелинейный фактор, характеризующий более высокий выход годных в области глубокого субмикрона; D>1). Правда, такое снижение в значительной степени компенсируется увеличением стоимости отдельных технологических установок, в первую очередь литографического оборудования, чис-

Иницируемое субмикронной технологией увеличение степени интеграции и системной производительности УБИС при меньшей удельной стоимости их изготовления сопряжено с постоянным преодолением технологических и экономических барьеров. Так, производство УБИС с топологическими нормами глубокого субмикрона требует совершенствования литографического оборудования, технологии литографии и фоторезистов (табл.2).

Особенность применения оптической литографии видимого и УФ-диапазона в технологии глубокого субмикрона заключается в том, что литографические размеры воспроизводимых элементов максимально приблизились к теоретическим пределам практически для всех известных сегодня источников экспонирующего излучения. Это обуславливает более высокую стоимость литографического оборудования (табл.2) и производства в целом, а значит, требует все больших инвестиций (табл. 1).

Совершенно очевидно, что для перспективных производств экономические барьеры становятся даже более значимыми, чем технологические.

Этот вывод наглядно иллюстрирует качественная интерпретация преодоления технологических ( $T_{16}$ ) и экономических ( $E_1$ ) барьеров при переходе от стандартной технологии ( $T_1$ ) к прорывной ( $T_2$ ) [2] в рамках нового производства УБИС (рис.3). Использование дорогостоящего оборудования может повлечь за собой резкий рост цен на УБИС по сравнению с их предельным уровнем в соответствующем секторе мирового рынка ( $C_{\text{макс}}$ ). В этом случае влияние экономических барьеров на зависимость цены изделия от его производительности проявляется значительно раньше, чем технологических. Прогнозируемый уровень производительности изделия для первой стандартной технологии  $T_1$  ограничен барьером  $T_{16}$ , приближение к которому связано с огромными затратами на производство и, как следствие, “запредельной” ценой:  $C(T_{16}) > C(E_1)$ . Появление новой прорывной технологии  $T_2$  в рамках усовершенствованного производства ведет к новой зависимости цены изделия от его производительности, отодвигая на второй план не только технологический барьер ( $T_{26}$ ), преодолеваемый за счет огромных затрат и цен, но и экономический ( $E_2$ ). Переход на новую ценовую кривую для второй технологии приводит либо к достижению более высокой производительности при верхнем пределе рыночной цены, либо к достижению той же производительности, но при меньшей цене:  $C_{T_2}(E_2) < C_{T_1}(E_1)$ . Таким образом, внедрение прорывной технологии смещает



**Рис.3. Зависимость цены от производительности УБИС для стандартной ( $T_1$ ) и принципиально новой ( $T_2$ ) технологии:**  $C_1, C_2$  – соответствующая стоимость производства;  $E_1, E_2$  – экономические барьеры,  $T_{16}, T_{26}$  – технологические барьеры

вниз зависимость “цена–производительность изделия”. Чем дальше раздвигаются технологический и экономический барьеры, тем ощутимее вклад “прорыва” в конкурентоспособность новой технологии и рыночный успех.

Технологический прорыв, с одной стороны, вызвал снижение цен на память объемом 1 Мбит с 550 тыс. долл. в 1971 году до 6–8 долл. в 1996-м, а с другой – рост стоимости производства с оборудованием для

## Эволюция литографического оборудования

Таблица 2

Параметр	1995	1998	2001	2004
Емкость ДОЗУ	64Мб	256 Мб	1Гб	4Гб
Топологическая норма, мкм	0,35	0,25	0,18	0,12
Литография	i-лин+	KrF+	ArF+	X-ray, EB
		+ фазовый сдвиг		
Минимальная ширина линии, мкм	0,25	0,2	0,12	0,08
Точность совмещения, мкм	0,1	0,08	0,05	0,03
Минимальный размер дефекта, мкм	0,1	0,08	0,05	0,03
Удельная стоимость процессов, долл./см <sup>2</sup>	3,90	3,80	3,70	3,60
Удельная стоимость литографии, долл./см <sup>2</sup>	1,37	1,33	1,30	1,26
Цена литографического оборудования, млн. долл.	3-5	4-7	6-10	10-17

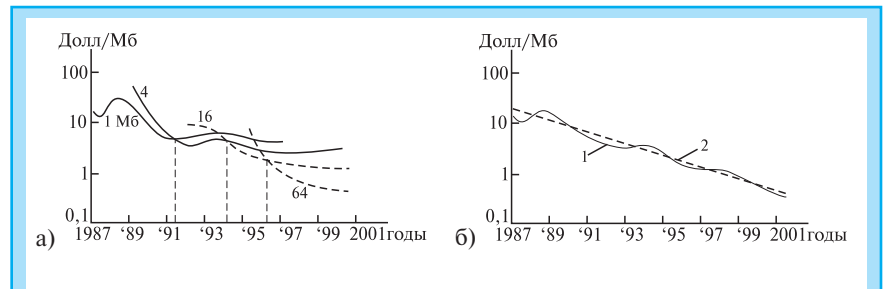
микронных и глубоко субмикронных технологий с 4 млн. до 1,2–2,5 млрд.долл. [2,6].

На рис. 4 графически показаны эволюционные зависимости ценообразования СБИС ДОЗУ при массовом производстве памяти, построенные на основе данных Dataquest и SEMI-Market Statistics Department (1990–1996). Тенденция снижения цены единицы объема памяти (долл./Мбит) примерно на 25% ежегодно (рис. 4б) характерна для СБИС более высокой степени интеграции. Узловые периоды смены поколений СБИС памяти (через три–четыре года) проявляются в пересечении кривых удельной стоимости СБИС памяти, отличающихся по степени интеграции в четыре раза. Цена нового поколения более интегрированных СБИС приблизительно в пять раз больше цены образцов предыдущих поколений (рис.4 а,б). Трансформация удельных цен СБИС ДОЗУ новых поколений с соответствующими пиками и смещениями регулируется спросом на более интегрированные изделия с повышенными технико-эксплуатационными параметрами. Процесс ценообразования на СБИС новых поколений порой преподносит сюрпризы их разработчикам и изготовителям. Так, обвал мировых цен на 16-Мбит СБИС в начале 1996 года с 35–50 до 8–14 долл. вынудил многие японские и южнокорейские компании пересмотреть производственные планы и даже приостановить выпуск этих микросхем, чтобы модернизировать производство под технологии 64–256 Мбит..

Если для предыдущих поколений БИС ДОЗУ с емкостью памяти для менее 0,5 Мбит

ежегодные объемы продаж превышали инвестиции, необходимые для поддержания конкурентоспособности изделий, то в 90-х годах ситуация кардинально изменилась. Например, для 64-Мбит УБИС объем продаж составляет уже менее половины необходимых инвестиций, для 256-Мбит УБИС – менее трети, а для 1-Гбит УБИС прогнозируется на уровне 0,1–0,15 [1,6]. В связи с этим проблема возврата инвестиций в перспективные производства стала критической для всех технологически развитых стран. Чтобы снизить инвестиционные риски при разработке новых классов 64-М, 256-М и 1-Гбит ДОЗУ мировые лидеры организуют национальные и мировые альянсы [8,9], позволяющие в минимально короткие сроки преодолеть экономические и технологические ограничения путем совместной разработки базовой технологии на основе единого производственного инструментария (рис. 5). Следует отметить, что в рамках стратегического менеджмента инвестиции в технологии и совместно выбранное “опережающее” оборудование осуществляются параллельно.

Ситуация на рынке микропроцессоров несколько иная. Фирма Intel пока остается фактически монополистом в этой области несмотря на появление на рынке новейших микропроцессоров PowerPC национального альянса IBM, Apple и Motorola, а также Alpha фирмы DEC. В табл. 3 приводятся характеристики ряда поколений микропроцессоров Intel с учетом тенденции развития технологии глубокого субмикрона УБИС. Данные таблицы отражают стремительные темпы



**Рис.4. Эволюционная временная зависимость удельной цены за 1 Мбит для СБИС ДОЗУ:** а) по мере увеличения степени интеграции при больших объемах продаж (пунктиром показано время перехода от одного поколения к другому); б) вследствие увеличения степени интеграции и конъюнктуры рынка (кривая 1) (экстраполяция уменьшения удельной цены за 1 Мб для СБИС ДОЗУ – кривая 2)



внедрения и освоения новых изделий фирмы Intel. Исключительно важна такая тенденция, как “перекрытие во времени” уже выпускаемых, опытных и только проектируемых микропроцессоров с учетом последних достижений технологии УБИС и конъюнктуры мирового рынка. Эта стратегия Intel рассчитана на долгосрочную перспективу.

Intel пока не вступает в национальные и международные альянсы, поскольку не испытывает недостатка средств на миллиардные инвестиции в мегафабы в США и за рубежом. Учитывая, что ее главный конкурент Motorola в ближайшее время планирует ввести в строй производства стоимостью более 2,5 млрд.долл., Intel обречена на дальнейшую инвестиционную гонку. В связи с этим интересно рассмотреть эволюцию инвестиций в производство и их возврата за счет прибыли от продаж. На рис.6 показана эволюционная зависимость роста прибыли Intel от увеличения инвестиций в производство и оборудование в

характеризующемуся высокими объемами годовых продаж и минимальными инвестициями. К середине 90-х годов Intel вошла в период, когда для поддержания на высоком конкурентном уровне технологий глубокого субмикрона и микропроцессоров новейших поколений необходимы значительные инвестиции (табл. 3). Смещение вниз по шкале прибыльности точек максимальной прибыли в каждом из трех циклов свидетельствует об относительном снижении эффективности механизма возврата инвестиций в производство. Об этом говорит и меньшая амплитуда петли каждого нового цикла по отношению к предыдущему. Отсюда можно сделать вывод, что для повышения эффективности и оптимизации реинвестиций нужны новые нестандартные решения.

Реализуя высочайший научно-технологический потенциал в сфере производства микропроцессоров новейших поколений, Intel вышла на мировой рынок суперкомпьютеров с уникальной параллельной ЭВМ,

содержащей 7264 микропроцессора Pentium Pro с рекордной пиковой производительностью 1 трлн. операций с плавающей запятой в секунду. Это почти в три раза превышает мировой рекорд производительности, принадлежащий фирме Hitachi. Окончательный промышленный вариант

параллельной ЭВМ, содержащей 7264 микропроцессора Pentium Pro с рекордной пиковой производительностью 1 трлн. операций с плавающей запятой в секунду. Это почти в три раза превышает мировой рекорд производительности, принадлежащий фирме Hitachi. Окончательный промышленный вариант параллельного компьютера фирмы Intel в 1997 году состоит из 9 тыс. микропроцессоров Pentium Pro и обладает пиковой производительностью около 1,5 трлн. операций в секунду. Рынок в увеличении производительности ПК и параллель-

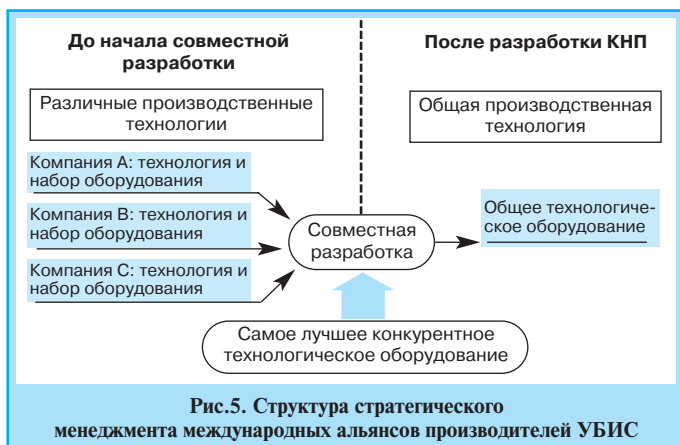


Рис.5. Структура стратегического менеджмента международных альянсов производителей УБИС

1971–1994 годах [2]. При оценке технологического прорыва, инициируемого инвестициями, важно учитывать, что основные реинвестиции идут в сферы производственного оборудования и НИОКР. Под приведенной прибылью (П) подразумевается отношение новых наличных средств, полученных от продаж новых изделий, к инвестициям в оборудование, инфраструктуру производства и НИОКР в течение года, а под приведенными инвестициями (И) – отношение инвестиций в оборудование и производство к инвестициям в НИОКР.

Для инвестиционной истории Intel, представленной на диаграмме (рис.6), характерны несколько примечательных аспектов. Соединенные точки эволюционной зависимости  $P=f(I)$  образуют “реинвестиционные” петли, которые соответствуют примерно шестилетнему циклу. В течение этого цикла Intel перемещается от бесприбыльного периода, вызванного значительными инвестициями, к прибыльному,

параллельного компьютера фирмы Intel в 1997 году состоит из 9 тыс. микропроцессоров Pentium Pro и обладает пиковой производительностью около 1,5 трлн. операций в секунду. Рынок в увеличении производительности ПК и параллель-

ных суперкомпьютеров Intel на микропроцессорах XXI века (табл.3) потребует новых значительных инвестиций в мегафабы “сверхглубокого” субмикрона. Хватит ли у Intel собственных сил для сверхинвестиций или настанет время организации новых “микропроцессор-

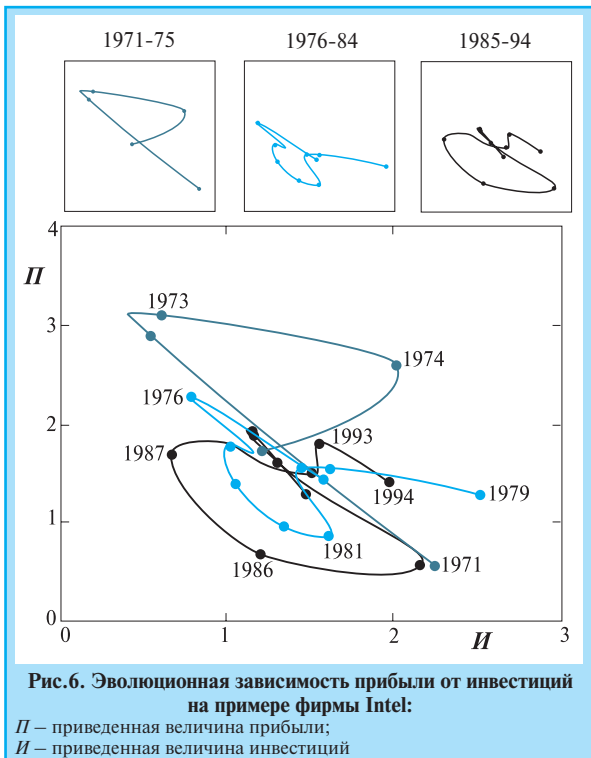
ных” альянсов с участием бывшего монополиста? Отметим, что реинвестиционный шести-семилетний цикл типичен для многих ведущих фирм, включая японские NEC, Hitachi, Toshiba и др. [7–11]. Есть все основания полагать, что петли последних циклов развития этих фирм гораздо уже, чем у Intel (рис.6). Следовательно, конкуренция с фирмой Intel реально возможна только в рамках альянсов. Чтобы обойти ее, японские производители УБИС в начале 1997 года решили создать новый мощный международный альянс. В него вошли фирмы Fujitsu, Toshiba, NEC, Hitachi, Mitsubishi, Sony, Fuji, а также дочернее подразделение в Японии американской компании Texas Instruments и компания SGS-Thomson Microelectronics. Цель консорциума – разработка конкурентных микропроцессоров и микропроцессорных схем широкой номенклатуры, которые по быстрдействию превзойдут аналоги Intel, а по стоимости будут вдвое дешевле [10].

Данные табл. 4 позволяют сравнить значение различных факторов менеджмента производства УБИС (инфраструктура, оплата труда инженеров и операторов, нормы налогов) в отношении к уровню современной Японии [11]. На основе этих данных можно также оценить потенциальные возможности привлечения инвестиций и заинтересованных производителей в микроэлектронную промышленность России. Экономические факторы влияют на формирование и развитие технологии УБИС как на макроэкономическом (международная и научно-технологическая политика государства, налоги, таможенные тарифы, протекционизм в отношении национальных производителей и изделий), так и на микроэкономическом уровне. Последнее хорошо иллюстрирует показанная на рис. 7 зависимость стоимости (С) производства УБИС от производительности (П) для двух форм организации производства: стандартного  $\mathcal{E}_1$  и более экономичного  $\mathcal{E}_2$ . Аналогично рассмот-

Таблица 3 Тенденции развития микропроцессов Intel

Характеристики освоения, технолог. параметры	Тип процессора Intel						
	286	386	486	586	686	786	886
Проектирование	1979г.	1982г.	1985г.	1989г.	1990г.	1992г.	1995г.
Разработка	1982г.	1985г.	1989г.	1992г.	1993г.	1995г.	1998г.
Поставка	1983г.	1986г.	1990г.	1993г.	1995г.	1996г.	1999г.
Интеграция, млн. приборов/кристалл	0,13	0,5	1,2	3	7	20	100
Производительность, $10^6$ команд/с (MIPS)	1	5	20	100	175	250	500 - 1000

ренным ранее зависимостям (рис.3) влияние более экономичных производств проявляется в смещении вниз кривой  $C=f(P)$ , т.е. при меньшей стоимости производства  $C(\mathcal{E}_2) < C(\mathcal{E}_1)$  обеспечивается одинаковая  $P(\mathcal{E}_1) = P(\mathcal{E}_2)$  или даже более высокая производительность (табл.5).

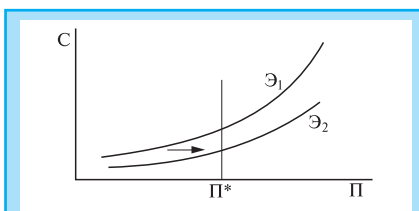


**Рис.6. Эволюционная зависимость прибыли от инвестиций на примере фирмы Intel:**  
 П – приведенная величина прибыли;  
 И – приведенная величина инвестиций

Возможность организации более экономичного, гибкого производства с индивидуальной обработкой пластин по сравнению с групповым производством при ориентации на максимально высокие технические параметры известна с середины 80-х годов. По завершении программы MMST (Научные основы и технология микроэлектронного производства) в середине 90-х годов подобные производства получили реальное воплощение на некоторых предприятиях американской фирмы Texas Instruments [12–14] и ряда японских компаний [15,16]. Переход реализуется на базе кластерных систем, позволяющих повысить точность, снизить техно-

логическую дефектность и сократить цикл изготовления УБИС. В 1993 году Texas Instruments продемонстрировала процесс изготовления 0,35-мкм КМОП ИС с 13 литографиями, используя 100%-ную индивидуальную обработку пластин и контроль в реальном времени. Теоретическое время цикла составило всего 17,5 часов, а чистое время процесса – 9,5 часа.

В работах некоторых американских и японских исследователей [2,15,16] высказывается мнение о якобы недостаточной экономической эффективности организации мини-фабов, производительность которых не превышает 500–1000 пластин в месяц при общей стоимости производства в десятки миллионов долларов по сравне-



**Рис.7. Зависимость стоимости разрабатываемых УБИС от производства с экономикой мегафаба Э<sub>1</sub> и мини-фаба Э<sub>2</sub>**

нию с традиционными мегафабами производительностью до 20000 пластин в месяц и стоимостью в несколько миллиардов долларов. В табл. 5 приведены сравнительные расчетные данные по двум типам производств в процессе перехода от 0,5- к 0,2-мкм технологиям УБИС при использовании на мини-фабах более эффективной БИКМОП/КМОП-технологии и схемотехники. Сравнение показывает высокую конкурентоспособность мини-фабов в изготовлении УБИС (в первую очередь в заказных специализированных ИС) и законченных систем на кристалле со встроенной памятью объемом в десятки и сотни Мбит. Минимальная прибыль, получаемая от превращения 80-долларовой “сырой” пластины, поступающей на мини-фаб, в обработанную 1000-долларовую из 300 микросхем, составляет П=(200-1)х1000 долл. С учетом того, что в месяц на мини-фабе может быть обработана тысяча пластин, месячная прибыль составит десятки миллионов долларов, а годовая – несколько сот миллионов (с уче-

Таблица 5

**Сравнение стандартного массового и гибкого производства БИС**

Параметр	Стандартное массовое производство КМОП-БИС		Гибкое мини-производство КБИ-КМОП/КМОП УБИС	
	Тип обработки пластин	групповой		индивидуальный
Производительность	20000 пластин/мес.		1000 пластин/мес.	
Транспорт пластин	атмосф. кассеты		вакуумные кассеты	
Класс чистых комнат	1		100-1000	
Характер процессов	жидкостные на 30%		практически сухие	
Разбраковка	отбор партий		контроль in situ	
Тип оборудования	смешанное групповое, процессно-ориентированное		кластерное, индивидуальная обработка пластин	
Контроль	пилотное сопровождение пластин		в реальном времени каждой операции	
Сенсоры	измерение на выходе		каждого процесса в реальном времени	
Минимальный литографический размер, мкм	0,5	0,2	0,5	0,2
Стоимость производства, млн. долл.	700	3000	30	<100
Размер кристалла, мм	15x15	30x30	15x15	30 x30
Размер пластин, мм	200	300	200	400
Уровень интеграции, млн. приборов	5	50	5	100
Системная задержка, нс	1	0,5	0,5	0,2
Тактовая частота, МГц	80	300	300	800
Автоматизация пр-ва, %	20	40	90	95
Утилизация оборуд., %	25	45	70	95
Выход годных кристаллов, %	50	70	90	95
Цикл изгот. СБИС, дн.	40	20	4	2
Сравнение	Низкий выход годных, низкая утилизация оборудования, высокая стоимость производства, стандартные параметры		Высокий выход годных, высокая утилизация оборудования, малая стоимость производства, конкурентные параметры	

**Региональные факторы менеджмента производства**

Таблица 4

Страна	Фактор						
	электричество	вода	воздух	земля	оплата труда		налоги
					инженер	оператор	
Япония	100	100	100	100	100	100	100
Калифорния (США)	60	30	40	10	120	80	88
Шотландия (Великобритания)	50	130	30	5	60	50	66
Китай	30	3	70	25	10	10	66
Россия	25	3	30	5	10	10	80

том дополнительных затрат на проектирование новых изделий). Причем цикл реинвестиции для мини-фабов может составлять около двух с половиной—четырёх лет, что не проблематично для модульных, “обновляемых”, настраиваемых на технологический маршрут кластерных производств с пустыми ячейками под опережающие или “экзотические” прорывные процессы изготовления УБИС.

Поскольку субмикронные УБИС достигли такого уровня, когда в одном кристалле может быть воплощена целая радиоэлектронная система, появились новые возможности для взаимодействия разработчиков отдельных блоков в создании конкурентоспособной системы на одном кристалле. Именно в сложнейших системных микроэлектронных разработках на пилотных мини-фабах в дальнейшем будет реализовываться совместный научно-технологический потенциал, сформировать который было бы не под силу ни одному из партнеров в отдельности.

Очевидно, что микроэлектронные системы для супер- и нейрокомпьютеров, новейших поколений систем мультимедиа, создаваемых на основе развития “микропроцессорной ветви” (рис.1) с возрастающими объемом встроенной памяти и системным быстродействием процессорной части, будут обладать более высокими качеством, алгоритмической эффективностью вычислений, суммарной производительностью. В то же время благодаря более высоким темпам интеграции однородных схем памяти по сравнению с микропроцессорами возникают новые симбиозные тенденции двух ветвей развития УБИС (рис.1), а также архитектурные направления, основанные на “приоритете памяти над процессорной логикой”. Увеличение степени интеграции однородных УБИС и удешевление удельной памяти (рис.4) открывают широкие перспективы в разработке новых изделий на стыке двух тенденций развития УБИС (табл.5).

Использование симбиозных технологий глубокого субмикрона, а также интегральных оптических и оптоэлектронных технологий [17,18] позволяет одновременно увеличить производительность и уменьшить стоимость таких перспективных микроэлектронных систем с массовым параллелизмом. В рамках концепций оптомикроэлектронных технологий “система на пластине”, а также трехмерных технологий формирования стопок пла-

стин кардинально улучшается эффективность функционирования и производительность систем с массовым параллелизмом, в которых световые лучи заменяют металлические линии связи. Это открывает дополнительные преимущества микроэлектронных систем для супер- и нейрокомпьютеров, позволяет значительно увеличить степень интеграции, надежность, производительность и “интеллект” схем, изготавливаемых по 0,1–0,2-мкм технологии на мини-фабах будущего.

Таким образом, в середине—конце 90-х годов техноэкономика во всем комплексе взаимосвязанных проблем становится ключевым фактором разработки конкурентоспособных наукоемких изделий для динамично развивающегося рынка микроэлектроники и радиоэлектроники, объем продаж на котором в начале следующего тысячелетия достигнет 0,25 и 0,8 трлн. долл. соответственно. Необходимость преодоления экономических и технологических ограничений в разработке сверхинтегрированных ДОЗУ, микропроцессоров и конкурентоспособных УБИС в виде законченных систем на кристалле и на пластине приводит к возникновению эффективных национальных и международных фирменных альянсов, деятельность которых играет решающую роль в освоении новых секторов мирового рынка высоких технологий.

Мини-фабы УБИС глубокого субмикрона, создаваемые в рамках таких альянсов, обеспечивают получение максимальной прибыли в классе конкурентоспособных КБИКМОП/КМОП УБИС [19–21]. Высокорентабельный мелкосерийный, оперативный, гибкий минифаб привлекателен и как пилотный полигон для обкатки “опережающих” и принципиально новых интегральных технологий “глубокого субмикрона” УБИС, а также систем на пластине (двумерных и трехмерных). Благодаря минимальным срокам изготовления конкурентоспособных наукоемких продуктов (вплоть до десятков часов) на мини-фабах и улучшению их параметров по мере масштабирования УБИС в область “более глубокого субмикрона” можно ожидать сокращения и повышения эффективности цикла реинвестиций. Прибыльность мини-фаба возрастает с каждым реинвестиционным циклом — тенденция, прямо противоположная наблюдаемой для циклов фирмы Intel.

### Представляем авторов статьи

**Бубеников Александр Николаевич.** Доктор технических наук, профессор, действительный член Международной академии информатизации. Главный научный сотрудник Института высокопроизводительных вычислительных систем РАН, директор Центра высоких технологий, зав. кафедрой МФТИ. Специалист в области моделирования и разработки новой элементно-технологической базы УБИС и суперкомпьютеров. Автор 350 научных работ и изобретений, в том числе трех монографий и учебника.

**Бубеников Александр Александрович.** Экономист-международник. Окончил экономический факультет МГУ в 1995 году. Аспирант МГУ, представил к защите диссертацию. Автор 20 научно-технических и экономических публикаций.

### Литература

1. SIA 1995 National Technology Roadmap for Semiconductors. — Semiconductor Industry Association, 1995.
2. Hutcheson D., Hutcheson J. Technology and Economics in the Semiconductor Industry. — Scientific American, v.274, N1, p.54–62.
3. Бурцев В.С. О необходимости создания супер-ЭВМ в России. — Информационные технологии и вычислительные системы, 1995, N 1, с.5–11.
4. Емельянов С.В. О задачах журнала. — Информационные технологии и вычислительные системы, 1995, № 1, с.3–4.
5. Дьяков Ю.Н., Попов А.А., Яковлев А.Т. Основные направления и проблемы развития микроэлектроники в России. — Информационные технологии и вычислительные системы, 1995, № 1, с. 64–73.
6. SIA 1994 National Technology Roadmap for Semiconductors. — Semiconductor Industry Association, 1994.
7. Burger R. et al. The SIA's Roadmap for Semiconductors. — Semiconductor Industry Association, 1994.
8. Nakatsuka H. DRAM Development Alliance. — Proc.ISSM-96, Tokyo, 1996, p.21–24.
9. International DRAM Partnership-TI and Hitachi Experience. — Proc.ISSM-96, Tokyo, 1996, p.25–28.
10. Sasaki H. Strategy of Japanese Semiconductor Industry. — Proc.ISSM-96, Tokyo, 1996, p.3–6.
11. Shimakura K. Mesh Globalization of Semiconductor Manufacturing. — Proc. ISSM-96, Tokyo, 1996, p.18–20.
12. Doering R. et al. The MMST program. An Overview. — Solid state technology, 1994, N 1, p.31–52.
13. Doering R. et al. Exploring the Limits of Cycle Time for VLSI Processing. — 1994 Symp.VLSI, p.31.
14. Watson D. Computer Integrated manufacturing at Texas Instruments: Past, Present and Future. — Proc. ISSM-96, Tokyo, 1996, p.46–49.
15. Fukamoto T. et al. ULSI Fabs-where we are and will go in 2010. — Proc. ISSM-96, Tokyo, 1996, p.15–17.
16. Hayashi Y. Semiconductor equipment in 300 mm Fab. — Proc.ISSM-96, Tokyo, 1996, p. 37–40.
17. Tewkabury S., Hornak L. et al. Co-integration of optoelectronics and submicrometer CMOS. — IEEE Trans., 1993, CИМТ-16, N7, p. 674–685.
18. Campbell M., Toberg S. 3D wafer scale architectures for neural network computing. — IEEE Trans, 1993, v.СИМТ-16, N 7, p. 646–655.
19. Бубеников А.Н., Бубеников А.А. Мировые программы освоения высоких субмикронных технологий конкурентоспособных СБИС. — Зарубежная радиоэлектроника, 1993, №2, с. 75–84.
20. А.Н. Бубеников, А.А. Бубеников. A choice of flexible, ultraclean processing strategy for advanced minifabs of competitive ULSI//Proc. Baltic Electronic Conference. — Tallinn, 1996, p. 125–129.
21. А.Н. Бубеников, А.А. Бубеников, А.А. Соловьев. Основы и особенности гибких ультрачистых производств субмикронных УБИС с индивидуальной обработкой пластин. — Зарубежная радиоэлектроника. 1996. №6.