

# СКРЫТЫЙ КРИЗИС МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НА ПОРОГЕ XXI-ГО ВЕКА

*Р.П.Сейсян*

*Санкт-Петербургский Государственный Технический университет*



## 1. ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектроника принадлежит к одному из наиболее сильных, решающих факторов, определивших не только научно-технический прогресс, но и социальную структуру человеческого общества второй половины XX-го века. Ее развитие оказалось столь стремительным, что далеко не сразу и не в полной мере удалось разобраться в закономерностях этого процесса даже тем, кто этот прогресс олицетворял. Только этим можно объяснить тот сенсационный интерес, который вызвал доклад С.Зи, известного физика и специалиста в области электроники, сотрудника фирмы Bell Laboratories прочитанный им в 1982 г. на международной конференции по физике полупроводниковых приборов в Токио [1]. В докладе анализировались статистические данные, посвященные закономерностям эволюции характеристических параметров интегральных схем и элементарных приборов, их составляющих\*. Но особенно неожиданными оказались данные, посвященные общим объемам продаж в

электронике, наряду с анализом долговременных изменений в структуре производительных сил американского общества.

## 2. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ПРОГРЕССА МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Как выяснилось, большинство процессов, связанных с развитием микроэлектроники, носит явно выраженный экспоненциальный характер, а темпы изменений таковы, что подобных им еще не знало человечество на всем протяжении того, что принято называть научно-технической революцией. Это справедливо и для электроники в целом, которая, как предсказывалось С.Зи, развиваясь в течение последнего полувека с темпом 15% годовых, в конце 80-х вышла на уровень товарооборота, превосходящий любую другую отдельно взятую отрасль промышленности США. Такого темпа не знало ни одно из направлений научно-технического прогресса (рис.1а).

Естественно ожидать, что столь быстрое развитие в ограниченной среде не сможет продолжаться сколь угодно долго. Как известно, экспонента — неумолимо крутая функция, и результат здесь (применительно к электронике) будет увеличиваться 2.3 раза относительно предыдущего состояния приблизительно в каждые шесть с половиной лет. (Вспомним известную притчу о шахматной доске и пшеничных зернах.) Тем не менее такой характер развития уже имел место, по-видимому, в течение почти что 50-ти лет. И способ, при помощи которого этот темп оказалось возможным поддерживать, также очевиден из доклада С.Зи. Это становление и развитие микроэлектроники, темп роста которой и вовсе ошеломителен — 25% годовых. Приведем в связи с этим очередное “крылатое” высказывание Гордона Мура, одного из создателей всемирно известной фирмы “Интел”, признанного мирового лидера в области разработки и производства сверх-больших интегральных схем (СБИС) для вычислительной техники и персональных компьютеров. “Если бы автомобилестроение развивалось со скоростью эволюции полупроводниковой промышленности (сейчас это практически то же, что и — микроэлектроники, примечание автора), — сказал он, адресуясь прежде всего к жителям США, — то сегодня Ролс-Ройс мог бы проехать полмиллиона миль на одном галлоне бензина и дешевле было бы его выбросить, чем заплатить за парковку”. Этот образ вполне понятен и нам, означая беспрецедентное снижение энергопотребления сопровождающееся снижением удельной себестоимости до исключительно низких величин. Соответствующие зависимости от текущего времени для работы, затрачиваемой на единицу информации (бит), или же — иначе —

\* Наиболее современный взгляд на тенденции развития микроэлектроники читатель сможет найти в [11]

“параметра качества”,  $A$ , полупроводникового прибора в составе интегральной схемы (ИС), и для себестоимости элементарного микроучастка ИС, предназначенного для обработки этой единицы информации, приводятся С.Зи (см. рис. 1б,в). Они представляют собой падающие экспоненциальные зависимости, что соответствует быстрому относительному удешевлению ИС при одновременном уменьшении удельного энергопотребления. Интересно, что характеристические параметры элементов ИС при этом улучшаются. Происходит это также по экспоненте, о чем свидетельствует такая важная характеристика, как постоянная времени переключения,  $t$ , определяющая быстродействие (рис. 1г). Особенно неожиданным может показаться первоначальный экспоненциальный рост еще и такой консервативной величины, как диаметр кристаллической пластины ( $D$ ) — параллельно с увеличением размера кристалла, на котором располагается каждая отдельная ИС (“чип”),  $B$ , (рис. 1д). Действительно, выращивание кристаллофизически высокосовершенных полупроводниковых монокристаллов кремния большого диаметра при соблюдении высочайшей чистоты (менее одного атома непредусмотренной примеси на десять миллионов атомов кремния) и однородности — сложнейшая задача, требующая одновременного решения целого комплекса научно-технических проблем на каждом сколько-нибудь существенном этапе увеличения диаметра полупроводниковой подложки. (Заметим, однако, что в данных, опубликованных С.Зи, еще не содержалось необходимых подтверждений экспоненциальности исследуемой зависимости, так как функция на рассмотренном интервале времени изменялась меньше, чем на порядок

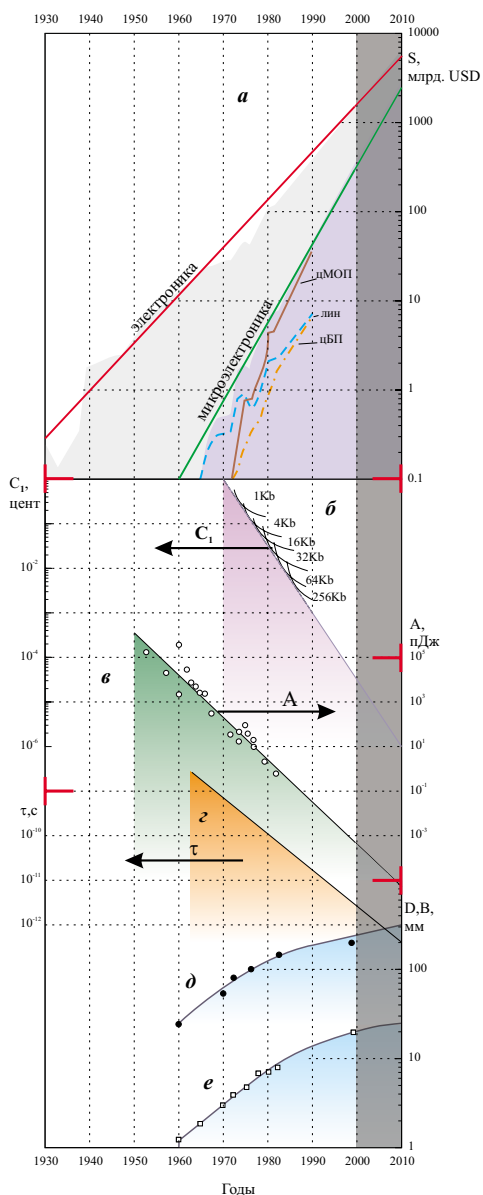


Рис.1 Экспоненциальная эволюция процессов, связанных с развитием микроэлектроники — по Зи, экстраполированная к 2010 году: а — объемы продаж электронных и микроэлектронных изделий, “цМОП” — цифровые ИС на базе структур «металл-окисел-полупроводник (кремний)» “цБП” — цифровые ИС на биполярных транзисторах, “лин” — линейные схемы; б — снижение удельной себестоимости в пересчете на 1 бит; в — параметр качества,  $A$ , или работа на единицу информации; г — время переключения,  $\tau$ ; д — диаметр кремниевой пластины; е — размер стороны “квадратного” чипа.

величины. Только сейчас этот диаметр в массовом производстве наиболее передовых фирм достиг значения больше, чем  $D=200$  мм, и это означает почти 10 раз, если вести отсчет со второй половины 50-х годов, когда он едва доходил до 20-ти мм.) На повестке дня уже следующий уровень — 250 мм и больше. Планируются кремниевые пластины в 300 мм, и даже в 450 мм. Но это уже определенно не экспонента, или же не совсем экспонента.

Одновременно с увеличением диаметра кремниевого монокристалла происходит гигантский рост стоимости всего остального технологического оборудования для изготовления интегральных схем, которое необходимо согласовать по размерам с уже и без того большой величиной диаметра пластины. Интересно, что при этом размер “чипа” вплоть до 80-х растет абсолютно параллельно диаметру, с локальным наклоном, полностью соответствующим наклону зависимости от времени диаметра пластины, оставляя неизменным общее количество “чипов” на пластине: от 400 до 1000.

### 3.МИКРОЭЛЕКТРОНИКА КАК ТЕХНОЛОГИЯ ИНФОРМАЦИИ

Естественно задаться вопросом: не существует ли некоторой общей причины столь стремительного развития, и, если таковая существует, то нет ли соответствующей ключевой зависимости, это развитие

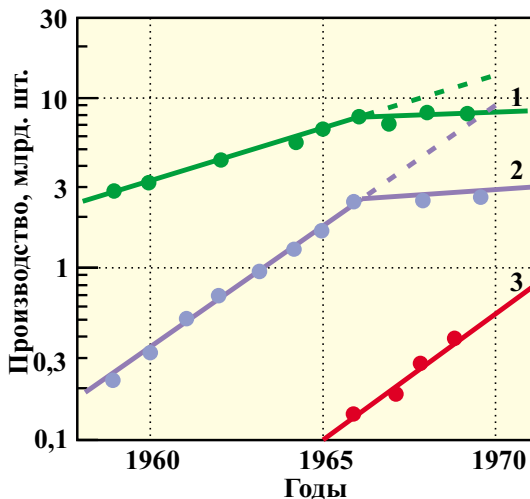


Рис.2 Количество резисторов и конденсаторов (1), транзисторов, диодов и ламп (2), интегральных схем (3), выпущенных промышленностью США за 60-ые годы.

обеспечивающей? Тогда можно было бы попытаться ответить и на следующий вопрос: какой фактор выступит в конце концов ограничительным обстоятельством, или, иначе — что, наконец, остановит стремительную экспоненту?

Этими вопросами пришлось задаться автору статьи еще в конце 60-х, отвечая, в частности, на запрос Госплана СССР относительно прогнозов на новую пятилетку. Для ответа казалось естественным проанализировать тенденции развития элементной базы электроники на основе широкодоступных статистических данных по США. Мы построили зависимость количества выпущенных промышленностью США резисторов и конденсаторов (рис. 2), а также активных элементов и прочих электронных компонентов от времени по годам [2]. И выяснилось, что растут они весьма круто. Как и зависимости, изображенные на рис.1 и впервые продемонстрированные С.Зи более, чем 10 лет спустя, эта зависимость оказалась экспоненциальной. Если считать ее вполне устойчивой и проэкстраполировать на следующие годы, пришлось бы только на выпуск дополнительных резисторов и конденсаторов построить в следующей пятилетке новых заводов столько, сколько их уже существовало до этого. Ответственный вывод! А как быть тогда с прочими компонентами, а также с отраслями промышленности, эти компоненты потребляющими для создания электронной аппаратуры?

Анализ возможных причин такой зависимости приводит нас к выводу о естественной связи количества востребованных электронных компонентов с количеством информации, накопленным человечеством в ходе исторического развития, и с темпами ее дальнейшего пополнения [2]. Проблема эволюционного развития количества информации изучалась “наукометрией” (см., например, [3]). Она накапливается экспоненциально, и именно этот процесс развития естественно рассматривать в качестве главного стимулирующего момента, и полагать, что всякое изменение в количестве электронных компонентов необходимо прежде всего для построения средств получения, обработки, хранения и воспроизведения информации. Именно электронная техника призвана это развитие обеспечить технологически в эпоху компьютеров.

Рассмотрим математический смысл экспоненциальной зависимости. Как известно, экспонента является решением простого линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$dy/dx - ky = 0. \quad (1)$$

Физический смысл зависимости, описываемой таким уравнением, можно было бы свести к простому условию: “скорость” изменения некоторой величины  $y$  по  $x$  пропорциональна (коэффициент пропорциональности —  $k$ ) реализации этой величины. Вспомним известное высказывание Ф. Энгельса в “Набросках к развитию натурфилософии”. “Наука (то же, что и количество накопленной информации, прим. автора) движется вперед пропорционально массе знаний, унаследованных ею от предшествующих поколений: чем дальше, тем быстрее ее развитие”. Обозначая количество информации через  $Q$  и рассматривая ее изменение во времени  $t$ , запишем:

$$dQ/dt = kQ, \quad (2)$$

что и будет обозначать пропорциональную связь скорости накопления новой информации,  $dQ/dt$ , информации уже имеющейся в распоряжении в настоящее время,  $Q$ . Понятно, что закон эволюционного увеличения накопленной информации в таком случае описывается экспонентой:

$$Q = Q_0 \exp(kt). \quad (3)$$

(Энгельс ошибочно полагал, что соответствующий закон описывается параболой и был позже поправлен Луи де Бройлем.) Как выяснено наукометристами, такую зависимость действительно можно проследить, по крайней мере, начиная со времени становления и развития полиграфии — при изучении количества информации, заключенного в научных печатных изданиях [3].

Естественно предположить определенную, хотя и не очень жесткую связь между количеством обслуживаемой информации,  $Q$ , и количеством электронных компонентов,  $N$ , выпускаемых для этого промышленностью. Это вполне объяснило бы экспоненциальный ход зависимости на рис.2, но не давало ответа на вопрос: не надо ли было на самом деле построить в начале 70-х столько заводов по производству электронных компонентов, сколько их уже перед тем существовало? Ответ становится очевиден, если обратить внимание на излом этой зависимости, произошедший в середине 60-х. Рост выпуска дискретных электронных компонентов с этого момента резко замедлился, но одновременно появилось новое производство, а именно производство интегральных схем (ИС). И если эта добавка не составит заметного изменения в общем количестве электронных приборов, то детальный учет интегрированных в каждой ИС электронных компонентов, или же степени интеграции ИС —  $n$ , вновь приведет нас к продолжению исходной экспоненциальной зависимости — без всяких переломов.

## 4. КЛЮЧЕВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ

Крутой рост реализующейся степени интеграции  $n$  явился основанием т.н. “закона Мура” в первоначальной его формулировке: “интеграция увеличивается вдвое каждый год”. Эта закономерность соответствовала действительности несколько более 10-ти начальных лет развития микроэлектроники, но далее, начиная со второй половины 70-х, ход зависимости несколько замедлился, что заставило Мура искать другие формулировки: “два раза в два года” или же, потом, точнее, “четыре раза в три года” (модифицированный закон Мура).

Исследуя проблему темпов роста интеграции ИС, отметим прежде всего, что увеличивать  $n$  выгодно с точки зрения достижения более высокой производительности обработки информации, как ввиду возможности запараллеливания большого количества каналов обработки и использования более емких внутренних резервуаров памяти, так и ввиду увеличения быстродействия всех процессов. Однако реальные возможности всегда ограничены предельно малым размером того конструктивного элемента, из которых строятся все входящие в ИС приборы. Этот минимальный размер,  $a_{min}$ , в свою очередь определяется минимальными физически достижимыми размерами, или же предельной разрешающей способностью того или иного вида микротехники, т.е. техники создания микрорисунка на поверхности полупроводниковой пластины. Формально степень интеграции можно определить как

$$n = (B-b)^2 / k_3 a_{min}^2. \quad (4)$$

Здесь  $b$  — это площадь технологических и контактных полей, не занятая непосредственно под элементы ИС, а  $k_3$  — коэффициент, определяющийся реальной конструкцией элемента ИС, а также зазорами между элементами. Все величины, входящие в (4), в принципе, не являются константами и изменяются во времени. Величина  $b$  составляет обычно малую долю  $B$ , и эта доля уменьшается с увеличением интеграции. Анализ вклада в степень интеграции коэффициента заполнения  $k_3$  весьма поучителен. В первое десятилетие развития микроэлектроники уменьшение этой величины обусловило 21-кратный рост интеграции. К концу первого десятилетия (пределы “классического” закона Мура) вклад  $k_3$  уменьшился в результате применения автоматизированных систем проектирования и понимания важности этого показателя качества топологического рисунка ИС — до 2.1 раза за последовавшие годы. В дальнейшем он будет изменяться слабо, и мы будем считать его константой, большей или равной 10. Таким образом, пренебрегая малым изменением этих величин со временем, мы могли бы получить  $n(t)$ , главным образом, как произведение квадратов только двух временных зависимостей:  $B(t)$  и  $a_{min}^{-1}(t)$ , притом зависимость  $B(t)$  относительно слаба. Таким образом определяющей зависимостью оказывается  $a_{min}(t)$ .

Обратимся теперь к  $c_1$ , т.е. к себестоимости микроучастка полупроводниковой пластины, осуществляющего элементарную логическую операцию в 1 бит. Ее площадь и будет приблизительно равна  $S_1 = k_3 a_{min}^2$ . Значение  $c_1$  можно определить как [4]

$$c_1 = (S_1 / \Pi \eta_{ij}) C_{0j} / \sum N_i S_i. \quad (5)$$

Здесь  $\eta_{ij} = \Pi \eta_0$  является результирующим выходом годных — произведением выхода элементов ( $i$ ) и технологических операций ( $j$ ),  $\sum C_{0j} = C_0$  — себестоимость этих технологических операций, плюс стоимость кремниевой пластины, а  $\sum N_i S_i$  полная полезная площадь пластины, отведенная под элементы ИС. Эта полная полезная площадь равна

$$\sum N_i S_i = mn k_3 a_{min}^2, \quad (6)$$

где  $m$  — это количество “чипов” на полупроводниковой пластине,  $m \approx \pi D^2 / 4B^2$ . Оно составляло, как уже отмечалось, почти постоянную величину 400-1000, затем, с дальнейшим увеличением интеграции стало падать и уменьшилось около 10 раз. Выход годных промышленность стремится удерживать на постоянном уровне. Что же касается технологических затрат на уровне полупроводниковой пластины, то эта величина растет, но относительно медленно. Таким образом, как выясняется,  $c_1$  определяется прежде всего величиной  $(mn)^{-1}$ . Точнее,

$$c_1 = (C_0 / \eta_0) (k_3 a_{min}^2 / m (B-b)^2) \approx (C_0 / \eta_0) (4k_3 a_{min}^2 / \pi D^2). \quad (7)$$

Первое выражение справедливо при постоянстве  $m$ , второе зависит только от диаметра пластины и более подходит для СБИС высокого уровня интеграции. Определяющей эволюцию удельной себестоимости вновь оказывается зависимость  $a_{min}(t)$ .

Что же касается характеристических параметров приборов, входящих в ИС, таких как параметр качества

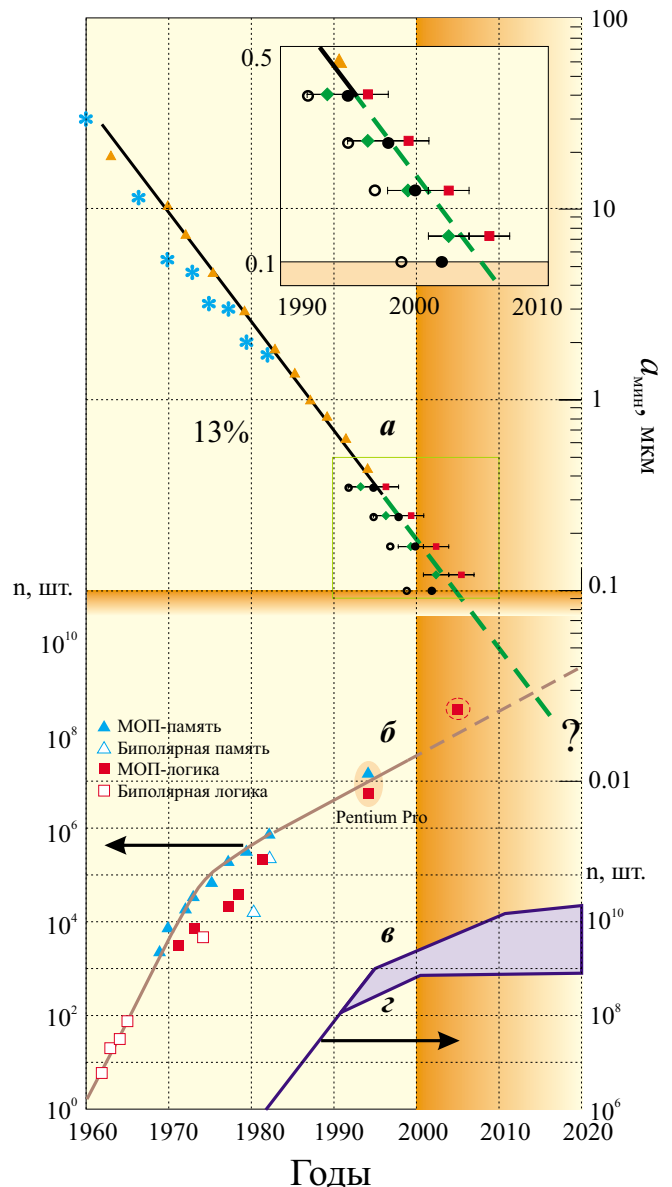


Рис.3 Уменьшение минимального характеристического размера элемента в ИС (а), и рост степени интеграции  $n$ , (б) — по годам.

$A$ , или же  $\tau$ , определяющее быстродействие, то и здесь решающая роль принадлежит  $a_{min}$ . Действительно,  $A$  пропорционально переключаемому заряду и, таким образом, объему активной области прибора, т.е.  $a_{min}^2$  при неизменной ее толщине (на самом деле толщина тоже уменьшается, но медленно). Быстродействие ( $\tau^{-1}$ ) также ограничено временем прохождения носителей заряда между истоком и стоком ( $\tau = a_{min}^2 / \mu U$ , где  $\mu$  — подвижность носителей, а  $U$  — приложенное напряжение; приближение постоянной подвижности), и растет как  $a_{min}^{-2}$  ( $a_{min}^{-1}$  — в режиме насыщения).

Таким образом, у нас имеются все основания считать  $a_{min}(t)$  ключевой зависимостью, предопределяющей основные характерные черты эволюции в микроэлектронике.

## 5. “КРИЗИС” МИКРОТЕХНИКИ И ИНТЕГРАЦИИ

Зависимость  $a_{min}(t)$  изображена на рис.3а и соединяет данные многих авторов, включая план-прогнозы индустриальных фирм, производящих оборудование для микроэлектронной микротехники. Для достаточно длительного периода протяженностью в почти что 40 лет это постоянно падающая зависимость с годовым спадом порядка 13%. Внимательное изучение участка зависимости, принадлежащего 90-ым годам не позволяет обнаружить никаких тенденций насыщения, или даже ослабления темпов спада. В то же время более крутая и производная от нее функция степени интеграции  $n(t)$  имеет явные признаки снижения темпов роста (рис.3б). Прогноз “Интел”, выполненный в конце 80-х годов, согласно которому в 1995 г. должен был появиться микропроцессор 80686 с интеграцией в  $10^8$  транзисторов на кристалл, явно не оправдался. Пентиум Про, выпущенный в середине 90-х, и интегрирующий  $21 \times 10^6$  транзисторов, на самом деле является гибридом, соединяющим два кристалла: собственно процессора на  $5.5 \times 10^6$  элементов, и т.н. “кэш”-памяти второго уровня на  $15.5 \times 10^6$  элементов. Не произошло существенного роста интеграции и в последующих модификациях микропроцессора “Интел” — в “Пентиумах” II и III. Правда, это практически не повлекло за собой снижения темпов роста производительности микропроцессора в целом. Нашлись т.н. “архитектурные” решения, обеспечившие повышение быстродействия и производительности микропроцессора без существенного увеличения интеграции. Что же явилось причиной “кризиса” интеграции? Почему понадобились хоть и весьма эффективные, но обходные, “архитектурные” пути дальнейшего развития?

Учтем, что вплоть до настоящего времени основным и практически единственным приемом микроэлектронной микротехники являлась фотолитография [5]. Настолько, что большинство особенностей и свойств микроэлектронной технологии по сути являются свойствами именно фотолитографии. Последняя сводится к фотопечати микрорисунка слоя ИС с заданным уменьшением или же 1:1 с фотошаблона, содержащего эталонный рисунок, на поверхность полупроводниковой пластины, покрытую специальным химически стойким составом — фоторезистом. Оптический объектив, используемый для проекционной печати в системах высокого разрешения, должен быть широкополюсным широкоапертурным объективом, предназначенным для работы с излучением на длине волны  $\lambda$  (чувствительности фоторезиста). Тогда предельно-малое расстояние между двумя ближайшими разрешаемыми точками рисунка будет определяться дифракционным пределом соответственно критерию Рэлея:

$$a_{min} = 0.61\lambda / NA, \quad (8)$$

где  $NA < 1$  — числовая апертура объектива. Кардинальный путь увеличения разрешающей способности проходит через уменьшение длины волны излучения. Но с приближением к 0.1 мкм, или же к 100 нм, иссякают оптически прозрачные материалы, существующие в природе. Более того, отсутствуют достаточно эффективные источники излучения, а окружающая атмосфера начинает поглощать свет. Так что имеются все физические основания для глобального кризиса микротехники.

## 6. ЗАРЯЖЕННЫЕ ПУЧКИ ИЛИ РЕНТГЕНОВСКИЙ ЛАЗЕР?

До недавнего времени ответ казался простым. Роль электромагнитного излучения в формировании микрорисунка перейдет к заряженным электронным пучкам, при применении которых дифракционный предел отодвигается далеко за пределы значимых величин. Действительно, длина волны электрона по де Бройлю  $\lambda_e = h / (2mE)^{1/2}$  определяется его массой  $m$  и энергией, приобретенной в ускоряющем потенциале. Уже при разности потенциалов в 15кВ  $\lambda_e$  составляет  $10^{-2}$  нм, и соответствующий предел по Рэлею оказывается атомных размеров. Способность электронных пучков разрешать изображения на таком уровне хорошо известна по

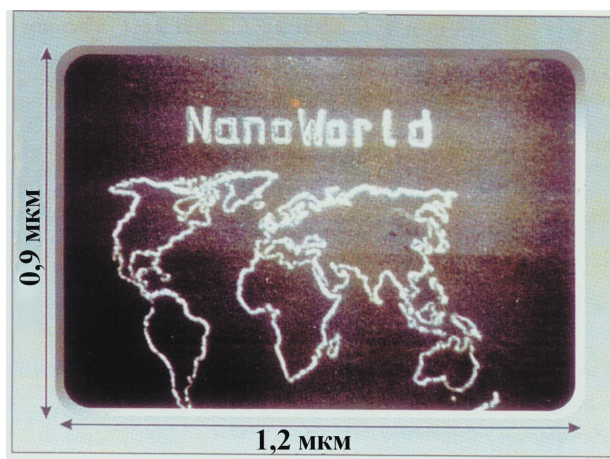


Рис.4 Карта мира, размещенная на тысячной части площади среза человеческого волоса. Сделано методом разложения под электронном пучком пленки  $AlF_3$  в институте Микроэлектронной технологии РАН (Черноголовка, разработчики: Николайчик и Ходос). Любезно предоставлено автору директором института.

электронной микроскопии. Естественно попытаться ее применить и к формированию микрорисунка ИС. На рис.4 мы приводим современный микрорисунок, изготовленный на полупроводниковой пластине электронным пучком по специальной технологии. Ширина линий микрорисунка не превышает 10 нм, а целая карта мира, нарисованная таким образом, умещается на  $0.9 \times 1.2 \text{ мкм}^2$ . Более 1000 таких карт разместится на срезе человеческого волоса! Основная трудность, которую стремились преодолеть разработчики электролитографии, состояла в излишне глубоком проникновении электронов в вещество, приводившем к размытию микрорисунка из-за вторичных процессов в материалах резиста и подложки. Этот недостаток отсутствует у ионных пучков, но их трудно остро сфокусировать, так как сильным оказывается дефокусирующее действие объемного заряда ионов в кроссоверах ионно-оптической системы. Но и это обстоятельство было преодолено техникой ионных пучков в результате создания особо ярких ионных источников типа жидкометаллических [6]. Однако, несмотря на все замечательные достижения, заряженные пучки, по-видимому, не смогут быть применены в микроэлектронике СБИС. Причиной этому становится то, что долгое время могло рассматриваться как преимущество. Пучок “рисует” — в простейшем случае — точку за точкой, например, обходя весь рисунок ИС по растру. Очевидно, что это входит в принципиальное противоречие с крутым графиком роста интеграции. Легко видеть, что создание ИС с интеграцией  $10^8$ — $10^9$  элементов в “чипе” столкнется с совершенно неприемлемыми временами экспонирования даже при реализации теоретического предела чувствительности электронорезистов. Учтем при этом, что каждый активный элемент содержит не менее 20 точек в отдельном слое, а слоев по технологии СБИС понадобится порядка 10-ти. Усовершенствования электролитографии последнее десятилетие и шли, главным образом в направлении разработок новых стратегий построения микрорисунка с максимальным запараллеливанием обхода элементов схемы. Однако реализация этих усовершенствований безнадежно отстает от темпов повышения интеграции.

Естественно вновь обратиться к волновым оптическим методам построения микрорисунка ИС, так как только волновые методы дают возможность печатать всю картину ИС параллельно и одновременно. Притом система должна быть проекционной, так как возможности контактной или теневой печати весьма ограничены и не позволяют достичь необходимого разрешения из-за зазора “шаблон-подложка” и корневой зависимости от длины волны излучения:

$$a_{min} = (2\lambda\delta)^{1/2} \quad (9)$$

До недавнего времени идея проекционной литографии в мягком рентгене или дальнем вакуумном ультрафиолете казалась совершенно безнадежной. Однако ситуация заметно изменилась в результате выполнения в 80-х годах военных программ, известных как СОИ или “звездные войны”. В процессе этих исследований наука и техника вплотную подошли к созданию рентгеновского лазера и его элементы оказываются весьма подходящей основой для построения суперлитографа. Интересно, что существует относительно узкая область длин волн, благоприятная для проникновения в диапазон размеров, меньших 100 нм (см. рис. 5). Это области дальнего вакуумного ультрафиолета и примыкающая к ней наименее жесткая часть рентгеновского излучения. Более

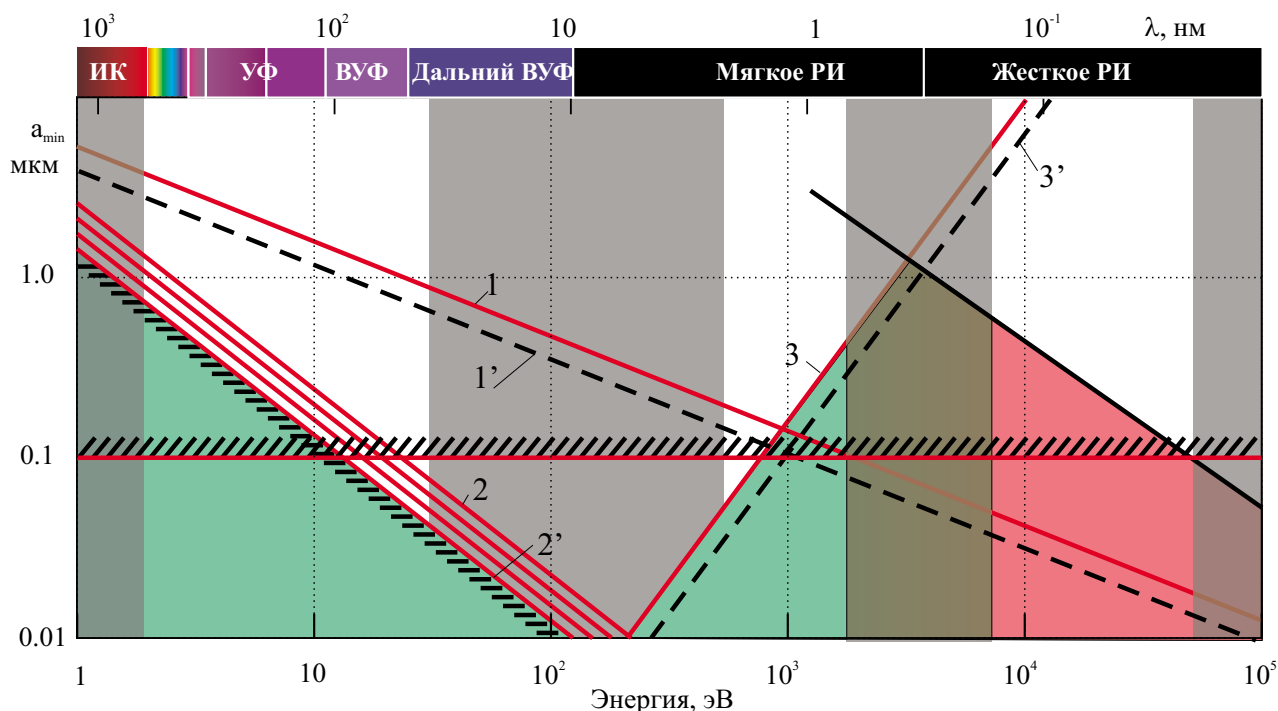


Рис.5 Зависимость предельной теоретической разрешающей способности литографии от длины волны излучения и энергии заряженных частиц. 1 - контактная (теневая) печать, зазор 20 мкм, 1' — то же, но зазор 5 мкм; 2 — проекционная печать, числовая апертура  $NA=0.4$ , 2' — то же, но  $NA=1$ ; 3 — ограничение, связанное с размытием изображения из-за рентгеновских фотоэлектронов; 3' — более высокая плотность материала фоторезиста; 4 — обратно-рассеянные электроны.

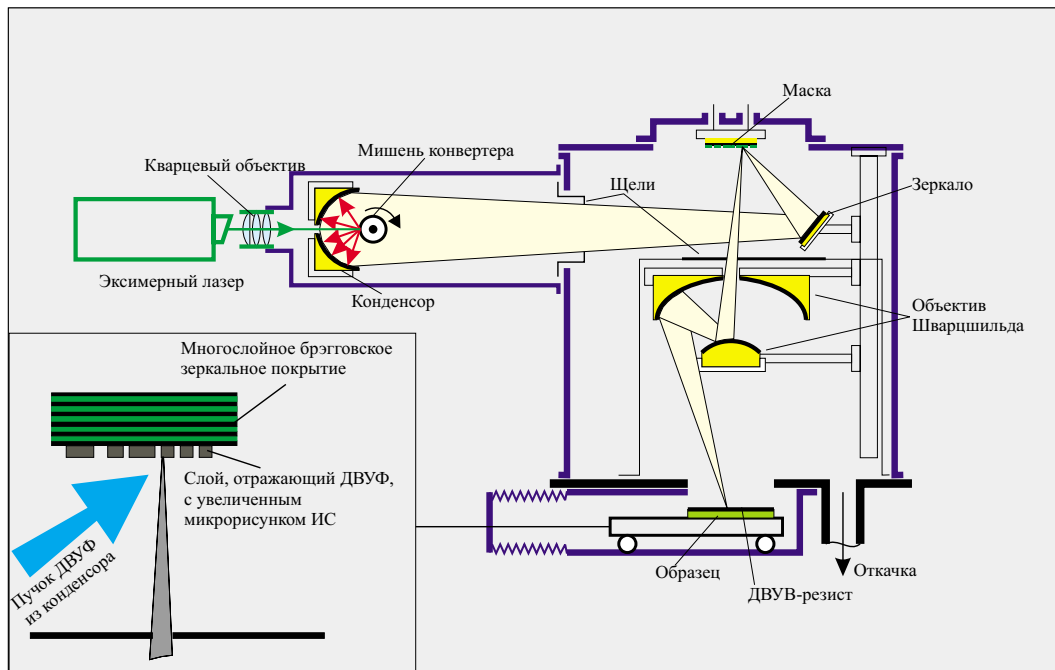


Рис.6 Схематическое изображение простейшего варианта нанолитографа. На вставке слева: сечение отражающих слоев ДВУФ-шаблона.

коротковолновое излучение уже неперспективно из-за активной генерации рентгеновских фотоэлектронов. Применение контактной или теневой литографии также не приводит к успеху (прямая 1 на рис. 5).

## 7. ДВУФ-НАНОЛИТОГРАФ ДЛЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА

Как известно, работу лазера обеспечивают два компонента: среда, способная усиливать генерируемое излучение (среда, в которой создана отрицательная температура), и оптический резонатор, для создания которого нужны эффективные зеркала. И то, и другое оказалось решаемой задачей для некоторого коротковолнового диапазона длин волн, что позволяет приблизительную схему нанолитографа представить в следующем виде (рис. 6). В общих чертах именно такая схема составляет основу ряда национальных проектов, в частности, крупного проекта, выполняемого в США. Мощное импульсное излучение, например, эксимерного лазера, фокусируется при помощи объектива на мишени с покрытием из тяжелых элементов. Образующаяся в результате облучения микроплазма в течение наносекунд после импульса служит эффективным источником коротковолнового излучения, конвертируя единицы процентов энергии первичного излучения в ДВУФ или мягкий рентген на нужной полосе частот. Это излучение поступает в конденсор, который, также как и вся остальная оптическая система, строится по принципам оптики с брэгговским отражательным покрытием. Брэгговское зеркало для столь коротковолнового диапазона частот — это одно из высших научно-технических достижений последнего десятилетия. А один из лучших результатов получен при использовании многослойного покрытия Si-Mo. На нем при почти нормальном падении пучка света с длиной волны  $\lambda = 14$  нм реализуется коэффициент отражения в 60—70% (рис.7). Далее это излучение при помощи поворотного зеркала (например, плоское брэгговское, на ту же длину волны) попадает на ДВУФ-шаблон, представляющий собой также брэгговское зеркало, но покрытое сверху поглощающим слоем, к примеру, пленкой вольфрама. Эта пленка и гравировается предварительно рисунком слоя

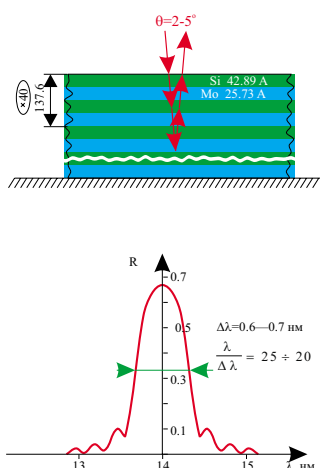


Рис.7 Сечение брэгговского покрытия на рентгеновском зеркале и спектр его отражения.

ИС в необходимом масштабе таким образом, что части шаблона с удаленным слоем будут отражать излучение, тогда как оставшаяся пленка его полностью поглотит. Изготовление ДВУФ-шаблона — это уже задача, вполне достойная применения электронолитографии острого фокусированным пучком. Здесь уже можно допустить длительный цикл изготовления, так как один шаблон может быть затем использован при изготовлении множества ИС. Далее изображение рисунка на шаблоне проецируется в рабочий объектив. На рис. 6 нами изображен простейший двухзеркальный объектив шварцшильдовского типа, уже зарекомендовавший себя в рентгеновской астрономии. Уменьшенное до необходимого масштаба изображение попадает теперь на полупроводниковую пластину, покрытую соответствующим фоторезистом. Таким образом, луч испытывает по крайней мере 5 отражений от брэгговских зеркал, и

проблема повышения коэффициента отражения становится актуальной.

Такова в общих чертах система, разработкой которой нынче заняты ведущие лаборатории мира. Опытные варианты нанолитографа уже показали возможность достижения разрешающей способности на уровне от 50 до 100 нм. Однако еще остаются такие узлы нанолитографа, техническое решение, а возможно и физический замысел которых оставляет желать лучшего. Одна из принципиально трудно-разрешимых проблем — это защита оптического тракта от загрязнений, являющихся результатом микровзрыва при генерации лазерной плазмы. Низок коэффициент конверсии. Имеются трудности в получении высококачественного неискаженного изображения.

## 8. К ИСКУССТВЕННОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ?

Несмотря на существование объективных трудностей, в настоящее время не остается сомнений в том, что ДВУФ-нанолитограф будет создан в ближайшие 5-10 лет и таким образом наметившийся было барьер 100 нм будет успешно преодолен. Более того, существует мнение, что он может быть взят и традиционными методами, но с использованием более коротковолновых эксимерных лазеров, фазосдвигающих масок и оптической коррекции эффектов близости, а также при помощи специальных высококонтрастных резистов и специальных технологических приемов. Предполагается, что так могут быть достигнуты размеры порядка 80—60 нм. Более коротковолновое излучение ДВУФ-нанолитографа, отодвигая дифракционный предел, казалось бы способствует достижению существенно более высокого разрешения. Применяя, однако, формулу Релея для дифракционного предела, и учитывая принципиальную трудность построения уменьшающих изображение широкоапертурных объективов этого диапазона  $\lambda$  на базе брэгговских покрытий, мы вынуждены будем признать, что весь запас разрешающей способности легко и быстро может быть утерян. Так, возьмем  $NA < 0.1$ , полученное в экспериментальных объективах, и мы вернемся к исходному уровню в 150 нм и более, который определенно решается и при применении вполне традиционных приемов\*.

Возникает вопрос, как в принципе долго может быть уменьшаем минимальный размер элемента ИС, и, если предел такой миниатюризации существует, то какой степени интеграции он мог бы соответствовать? И всегда ли будет существовать необходимость в непрерывном сокращении размеров, не войдет ли это в противоречие со здравым смыслом и физическими принципами построения электронных приборов?

Обратим внимание на кривые в нижнем правом углу рис.3. Там приводится известный прогноз Дж.Мейндла из Стенфордского университета США, опубликованный впервые в 1984 г. [7]. Особенностью является насыщение или же тенденция к насыщению в области 2010-2020-х годов. Фактором, приводящим к насыщению, в расчетах Мейндла служит предельно достижимая ширина линии, которая принималась равной 500 нм (кривая “ $\epsilon$ ”), или 250 нм (кривая “ $\delta$ ”). С позиций сегодняшнего дня эти цифры занижены (500 нм — это уже давно пройденный этап, а 250 нм доживает последние дни).

Не придавая большого значения этим несоответствиям и некоторой общей завышенности результатов по максимально достижимой интеграции, отметим, что в общем они правильно отображают имеющуюся тенденцию к насыщению. После сглаживания их можно было бы представить кривыми типа

$$y = A / [1 + \text{Вexp}(-kt)]^q, \quad (10)$$

где  $A$  представляет собой некоторую предельную реализацию, к которой функция стремится при  $t$ , стремящемся к бесконечности, а остальные параметры находятся из начальных условий. В то же время при  $t \rightarrow 0$ , стремящемся к нулю функция превращается в простую экспоненту, характеризующую начальные стадии эволюции. При этом степень выпуклости кривой  $n(t)$  формально регулируется показателем степени  $q$ .

Рассмотрим физический смысл такой зависимости применительно к интеграции  $n$ . Для  $q=1$  она удовлетворяет уравнению:

$$dn/dt = kn(t)[1 - n(t)/n^*], \quad (11)$$

где  $n^*$  есть предельно-достижимая величина интеграции. Решение этого уравнения имеет вид:

$$n(t) = n^* / [1 + \exp(-k(t-t_0))]. \quad (12)$$

Принимая  $\exp(kt_0) = n^* / n_0$ , получим:

$$n(t) = n^* / [1 + (n^* / n_0) \exp(-kt)]. \quad (13)$$

Это выражение легко сводится к «закону Мура» при  $t \ll t_0$ :

$$n(t) = n_0 \exp(kt), \quad (14)$$

где  $n_0$  характеризует исходный уровень интеграции. При сравнении с реальным ходом зависимости  $n(t)$  при  $t \ll t_0$  мы можем оценить “действующие” величины  $n_0$  и  $k$ . Предыдущая формула хорошо описывает выход на уровень насыщения  $n^*$  при  $t > t_0$ , однако ход зависимости  $n(t)$  оказывается существенно круче ее реализации на практике (см. рис. 3). Такая функция может быть несколько сглажена, т.е. “замедлена”, при введении в исходное уравнение (13) показателя степени  $\alpha = 1/q$  у отношения  $(n(t)/n^*)$  в квадратной скобке

---

\* В начале ноября компания Intel объявила о переходе в первом квартале 2001 года к серийному производству процессоров Pentium 4 с использованием техпроцесса 130 нм, а 29 ноября руководство IBM заявило о начале изготовления ИС по этой технологии. В качестве источника актиничного излучения применяется ArF эксимерный лазер. (Прим. ред.)



$$dn/dt = k^* n(t) [1 - (n(t)/n^*)^\alpha], \quad (15)$$

что и приведет результирующее решение к искомому виду:

$$\begin{aligned} n(t) &= n^* [1 + \exp(-\alpha k^* (t - t_0))]^{-1/\alpha} = \\ &= n^* [1 + (n^*/n_0) \exp(-kt)]^{-q}. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь  $\alpha k^* = k$ . В принципе, могут существовать и другие, более сложные виды зависимости для “замедляющей” функции, и применяющаяся здесь  $G(n/n^*) = 1 - (n/n^*)^\alpha$  может рассматриваться как частный случай.

Для  $\alpha=2$ , или же  $q=1/2$ , а также  $n^*=10^9$  и  $n_0=30$ , зависимость (16) хорошо описывает ход  $n(t)$  за все время развития микроэлектроники — с начала 60-х и до конца 90-х годов. Экстраполяция этой зависимости в будущее дает значения  $n=10^9$  к 2020 г. и  $n=1.5 \times 10^8$  в 2006 г., находящиеся несколько ниже прогноза Альберта Ю, старшего вице-президента “Интел”, следующего, по-видимому, “модифицированному закону Мура” ( $n=3.5 \times 10^8$  в 2006 г. [8]). С другой стороны  $a_{min}=70$  нм могло бы соответствовать предельному значению  $n_{max}=10^{10}$  из чисто геометрических соображений (уточним, что  $n_{max}$  — не реализация, а предел, к которому стремится  $n$ .)

Таким образом в ближайшие 20 лет человечеству предстоит выйти на уровень интеграции микропроцессорной СБИС порядка  $10^9 - 10^{10}$  элементов на один кристалл. Учитывая много порядков преимущества в быстродействии, ( $\tau \rightarrow 10^{-13}$  с к 2020 г., см. рис.1), по производительности вычислений это уже может составить конкуренцию человеческим интеллектуальным возможностям.

Скейлинговый анализ последствий общего уменьшения размеров полупроводниковых приборов свидетельствует о возникновении на этом уровне других проблем, в частности, связанных с физическими механизмами работы приборов. Особенно острыми они оказываются для контактных узлов и проводниковых межсоединений. С другой стороны, дальнейшее уменьшение размеров вводит нас в совершенно удивительную область физики, до сих пор исследованную, главным образом, теоретически, мезоскопией. Здесь все привычные представления о процессах, происходящих в проводниках и полупроводниках нарушаются настолько, что не работает даже закон Ома. Хотя ни в коей мере не исключаются приборы, работающие на других, и, в частности, мезоскопических, принципах. Однако же наиболее современные данные различных исследовательских лабораторий мира свидетельствуют о том, что традиционный кремниевый транзистор с изолированным затвором не собирается сдавать своих доминирующих позиций и вполне способен эффективно работать даже при столь ничтожной толщине диэлектрика  $\text{SiO}_2$  как 5 нм и при зазоре «исток-сток» 100 нм. Поэтому не исключено, что, несмотря на множество заманчивых новых физических решений, максимальный уровень интеграции удастся реализовать на традиционных принципах, существующих уже с первых лет становления и развития микроэлектроники.

Что же касается потребности человечества в приумножении полученной информации, то, по убеждению автора, это единственная функция, которой никакие колебания, насыщения или, более того, спады, не угрожают, и она будет оставаться основной движущей силой прогресса микроэлектроники. Согласно наукометрическим представлениям, мы по времени все еще находимся в зоне преобладающего действия полиграфической продукции как основного носителя информации, а компьютерная революция еще не вступила в полную силу, оттеснив, однако, печатное слово с большинства принципиальных позиций, особенно в области оперативной информации. Признаком полного торжества микроэлектроники и вычислительной техники, по-видимому, станет повсеместное использование домашних информационных роботов (машин, ДИМ), появление которых удалось предвидеть еще на заре микропроцессорной техники [9].

## Литература

1. S.M.Sze. VLSI technology Overview and Trends. In: Proc. of the 14-th Conf. on Solid State Devices, Tokyo, 1982; Jap. J. of Appl. Phys., V.22 (1983) Suppl.22-1, pp.3-10
2. Р.П.Сейсян. Основы микроэлектроники. Материалы IV Зимней школы ФТИ. Т.3. Л.: ФТИ, 1971. С.417-437; Техника и технология информации. Материалы VII Зимней школы по физике полупроводников. ФТИ. Л.: 1975. С.200-231.
3. В.В.Налимов. Наукометрия. М.: Наука.1969.
4. Р.П.Сейсян. Принципы микроэлектроники. Ч.1. С.Петербург : ЛГТУ.1991. С.110
5. У.Моро. Микролитография. Ч.1и2. Москва, Мир, 1993
6. К.А.Валиев, А.В.Раков. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике. Москва, “Радио и связь”, 1984.
7. A.Robinson. Science, Vol. 223, 267-268.1984.
8. Альберт Ю. Будущее микропроцессора. On Line, 1997, В7, С.3-5.
9. Р.П.Сейсян и др. Радиоконспект. А/с No 375640 от 5.01.1971;
10. Р.П.Сейсян, М.Л.Выдревич. Что такое ДИМ? Электронная промышленность. В. 1(7), С.28-32, 1972
11. Future Trends in Microelectronics. Eds. S. Luryi, J. Xu & A. Zavadsky. 1999, John Wiley & Sons.

