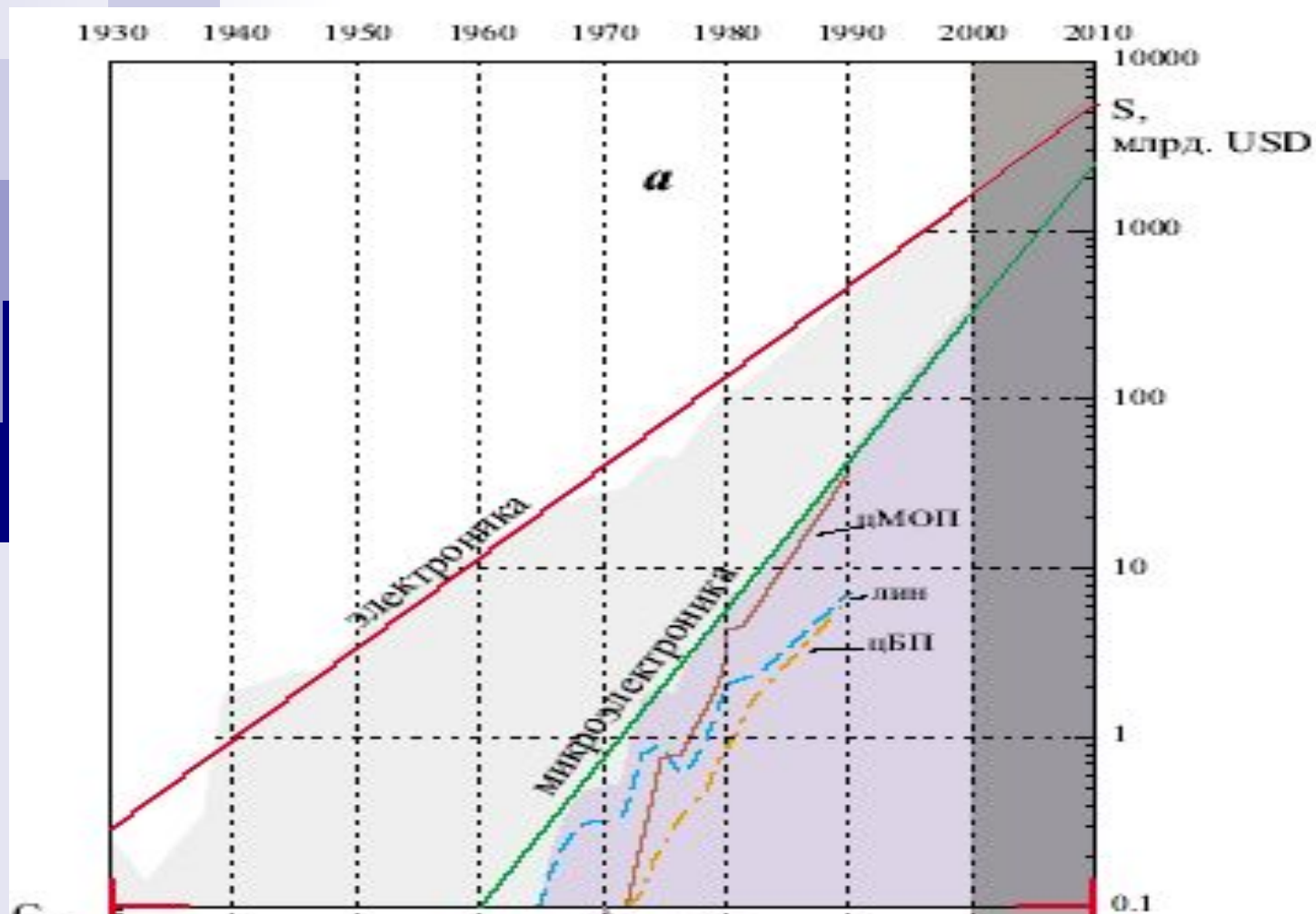


ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ПРОГРЕССА МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

- Микроэлектроника является фактором, определившим научно-технический прогресс, и социальную структуру человеческого общества второй половины XX-го века.
- Темпы развития микроэлектроники определяется темпами развития науки и информации

- Большинство процессов, связанных с развитием микроэлектроники, носит явно выраженный экспоненциальный характер.
- Электроника развивалась 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).

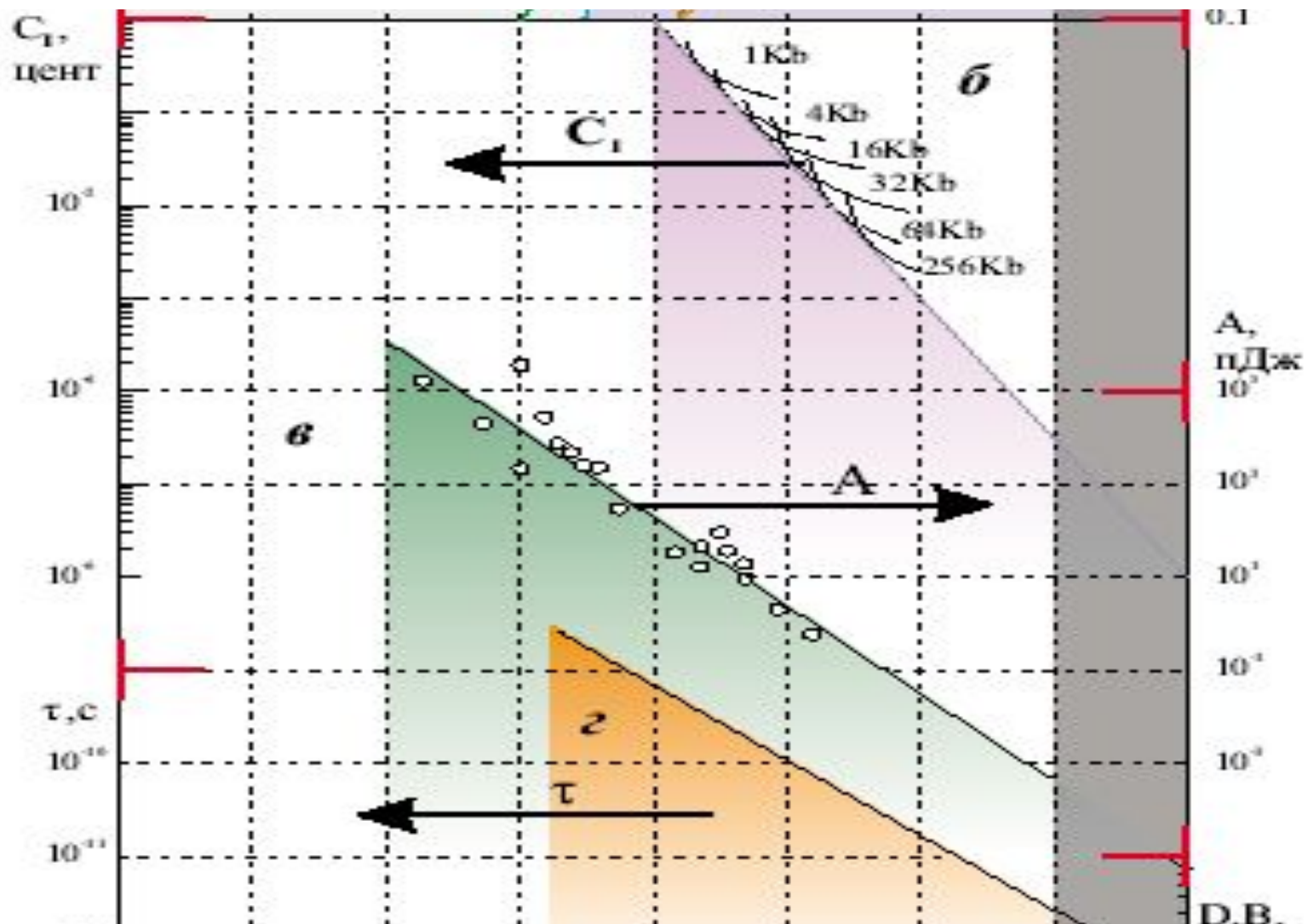
Зависимость темпов роста производства электроники и микроэлектроники от времени.



ЭКСПОНЕНТА

- Объем производства увеличиваться 2.3 раза относительно предыдущего состояния приблизительно в каждые шесть с половиной лет. Это цепная реакция
- Такой характер развития уже имел место, по-видимому, в течение почти что 50-ти лет. Темп роста и развития микроэлектроники, ошеломителен — 25% годовых.
- Гордон Мур, (один из создателей фирмы “Интел”) - Если бы автомобилестроение развивалось со скоростью микроэлектроники - то сегодня Ролс_Ройс мог бы проехать полмиллиона миль на одном галлоне бензина и дешевле было бы его выбросить, чем заплатить за парковку”. Это означает беспрецедентное снижение энергопотребления и снижение удельной себестоимости до исключительно низких величин.

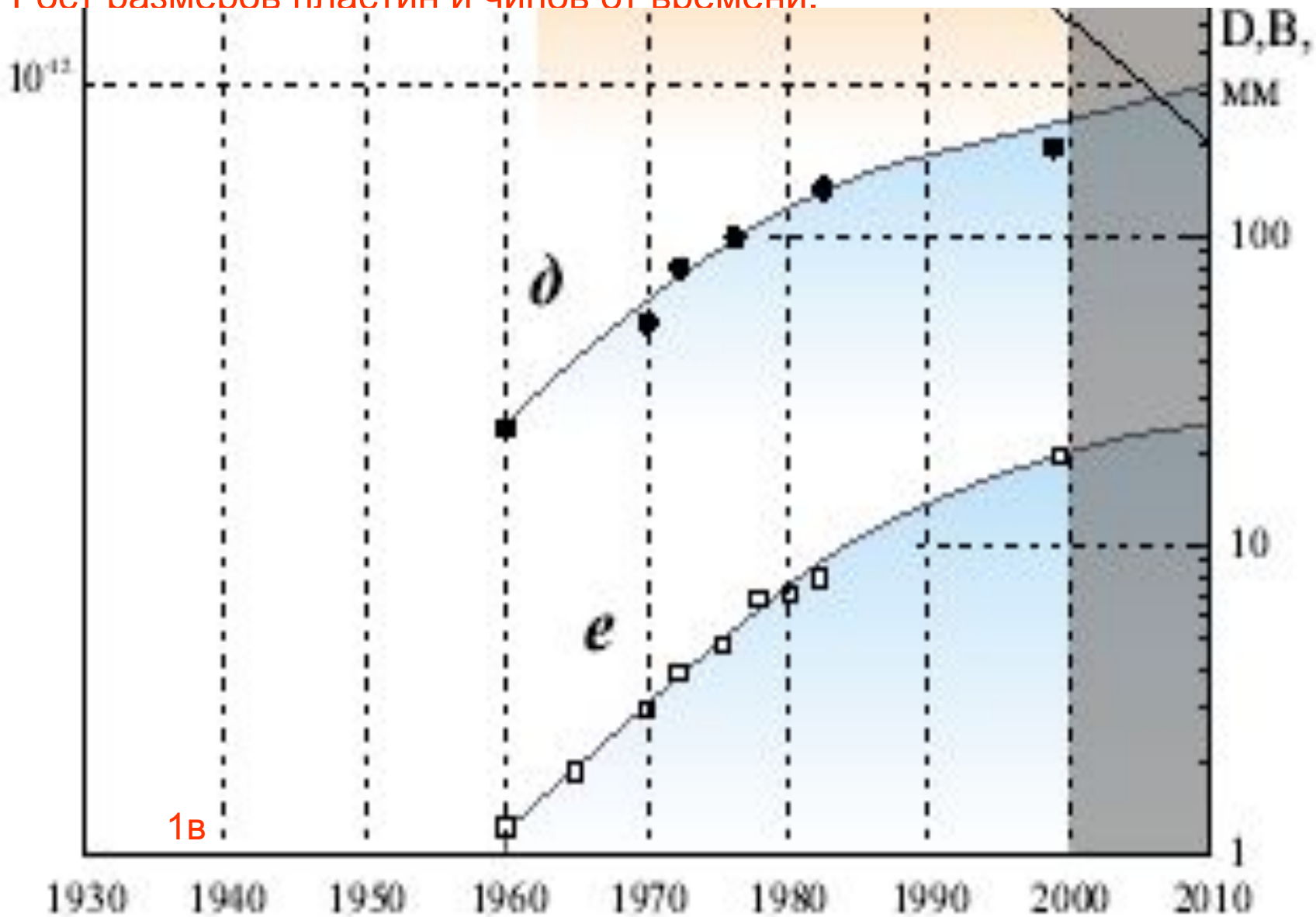
Снижение стоимости (б), энергопотребления (в) и времени задержки на каскад (г) от времени.



экспонента

- Зависимости эффективности (Дж/бит) и себестоимости единицы ИС от времени. Они представляют собой падающие экспоненциальные зависимости, что соответствует быстрому относительному удешевлению ИС.
- Уменьшение энергопотребления на рис 1(в)
- По экспоненте снижается постоянная времени переключения, t определяющая быстродействие

Рост размеров пластин и чипов от времени.



1B

Рост диаметра пластин

- Диаметр кристаллической пластины (D) растет параллельно с увеличением размера кристалла, на котором располагается каждая отдельная ИС (“чип”), V , (рис. 1д).
- Выращивание высокосовершенных полупроводниковых моно-кристаллов кремния большого диаметра:
 - 10^2 дислокаций/см²
 - чистота (менее одного атома фоновой примеси на десять миллионов атомов кремния)
 - однородность — сложнейшая задача, требующая одновременного решения целого комплекса научно-технических проблем на каждом этапе увеличения диаметра полупроводниковой подложки.
 - Сегодня: $D=300$ мм, (это увеличение в 10 раз, т.как в 50-х годах, $D=20$ мм) . Планируются кремниевые пластины в 450 мм.

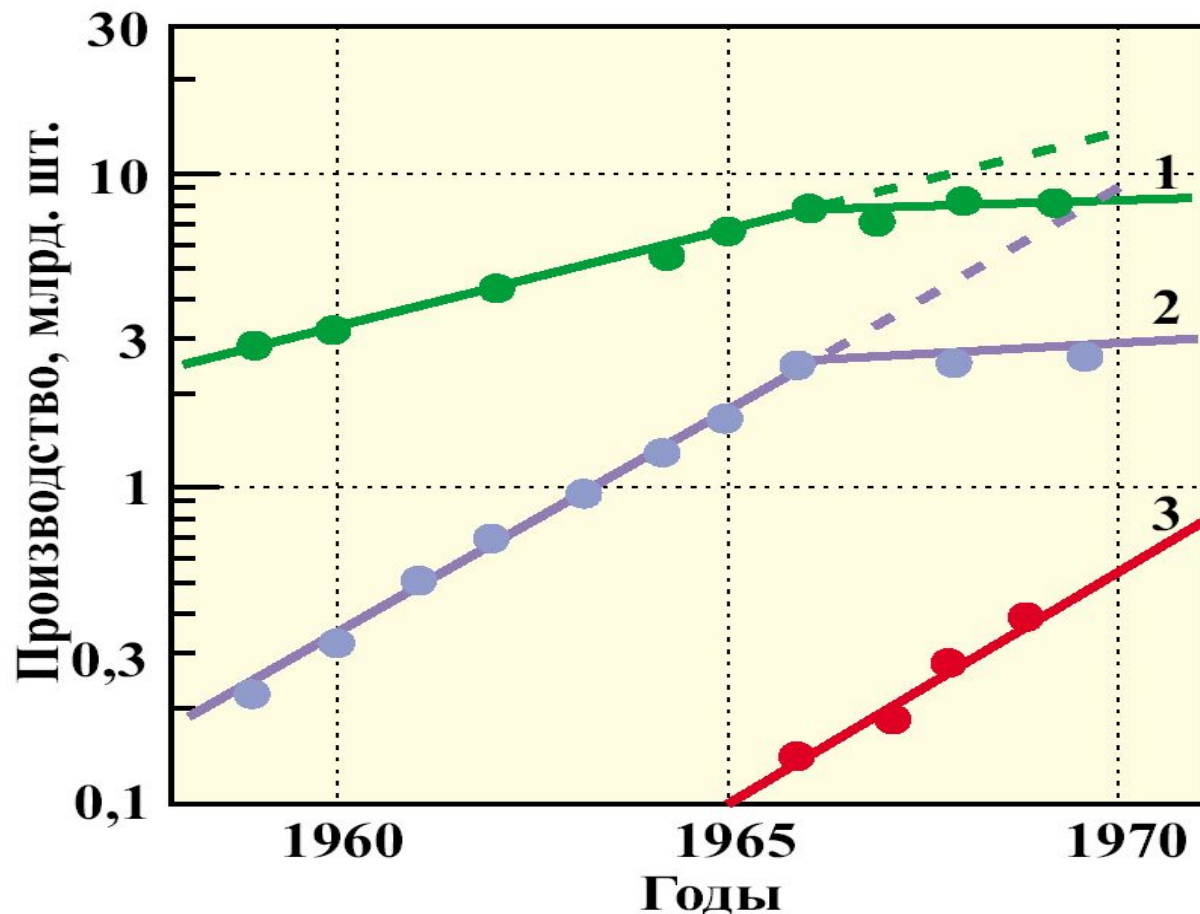
Стоимость производства

- 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.
- Размер “чипа” вплоть до 80-х растет абсолютно параллельно диаметру, с локальным наклоном, полностью соответствующим наклону зависимости от времени 1940 1950 1960 диаметра пластины, оставляя неизменным общее количество “чипов” на пластине: от 400 до 1000.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА КАК ТЕХНОЛОГИЯ ИНФОРМАЦИИ

- Чем определяется такая динамика развития микроэлектроники?
- Какой фактор выступит в качестве ограничителя экспоненциального развития микроэлектроники?
- Эти вопросы интересуют всякого инвестора менеджера, инженера не говоря уже о государственных структурах планирующих бюджет и перспективы развития государства.
- Для этого необходимо проанализировать тенденции развития элементной базы электроники на основе широкодоступных статистических данных по США.
- Зависимость количества выпущенных промышленностью США электронных компонентов приведена на рис 2. [2]. Как и зависимости, изображенные на рис.1 они оказалась экспоненциальной.

Количество резисторов и конденсаторов(1),
транзисторов, диодов и ламп(2), интегральных схем
(3), выпу



Экстраполяция зависимости на следующие годы: только на выпуск дополнительных резисторов и конденсаторов необходимо построить в следующие 5 лет новых заводов столько, сколько их уже существовало до этого.

Информационный взрыв

- Если сравнить темпы роста информации и темпы развития электроники, то окажется, что они близки.
- Действительно информация накапливается экспоненциально, и именно этот процесс развития естественно рассматривать в качестве главного стимулятора производства электронных компонентов для получения, обработки, хранения и воспроизведения информации.

Экспонента в развитии информации

Рассмотрим математический смысл экспоненциальной зависимости.

Как известно, экспонента является решением простого линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$dy/dx = k \cdot y \quad (1)$$

Т.е. скорость изменения некоторой величины y по x пропорциональна (коэффициент пропорциональности — k) самой величине.

Ф.Энгельс “Набросках к развитию натурфилософии”.

“Наука (информация) 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

Закон эволюционного увеличения накопленной информации в таком случае описывается экспонентой:

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

Экспонента в развитии информации

1. При изучении количества информации, заключенного в научных печатных изданиях можно получить зависимость (3) начиная со времени становления и развития полиграфии
2. Естественно предположить определенную, хотя и не очень жесткую связь между количеством обслуживаемой информации, Q , и количеством электронных компонентов, N , выпускаемых для этого промышленностью.

КЛЮЧЕВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ

- **Закона Мура:** Степень интеграции n увеличивается вдвое каждый год (n — число электронных компонентов в каждой ИС)

Эта закономерность выполнялась первые 10 лет развития микроэлектроники, но далее, со второй половины 70-х, ход зависимости несколько замедлился, “два раза в два года” и далее, “четыре раза в три года”

Исследуя проблему темпов роста интеграции ИС, отметим:

- увеличивать n выгодно с точки зрения достижения более высокой производительности обработки информации, ввиду возможности запараллеливания большого количества каналов обработки и использования более емких внутренних резервуаров памяти 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} , определяется минимальными физически достижимыми размерами, или же предельной разрешающей способностью того или иного вида микротехники, т.е. техники создания микрорисунка на поверхности полупроводниковой пластины.

Степень интеграции

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,

k_3 —коэффициент, определяющийся реальной конструкцией элемента ИС, а также зазорами между элементами.

a_{\min} - определяется минимальными физически достижимыми размерами, или же предельной разрешающей способностью. техники создания микрорисунка на поверхности полупроводниковой пластины.

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.

Определяющая зависимость a_{\min}

- В первое десятилетие развития микроэлектроники уменьшение k_3 обусловило 21-кратный рост интеграции.
- К концу первого десятилетия вклад k_3 уменьшился 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: $V(t)$ и $a_{\min}(t)$, притом зависимость $V(t)$ относительно слаба.
- Таким образом определяющей зависимостью оказывается a_{\min}

Себестоимость определяется зависимостью $a_{min}(t)$.

Себестоимость микроучастка полупроводниковой пластины, осуществляющего элементарную логическую операцию в 1 бит C_1 .

Полная полезная площадь равна

$$N_{Si} = mn \cdot k_3 (a_{min})^2 \quad (6)$$

где m — это количество “чипов” на полупроводниковой пластине, n — число элементов в чипе, ($m = \pi D^2 / 4B^2$).

($m \approx 400-1000$, 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 $(mn)^{-1}$.

Величина, определяющая динамику себестоимости определяется зависимостью $a_{min}(t)$.

Характеристические параметры приборов, входящих в ИС, таких как параметр качества A , или же t , определяются значением a_{min} .

Быстродействие

Быстродействие (t) ограничено временем прохождения носителей заряда между истоком и стоком ($t = a_{min} / \mu U$),

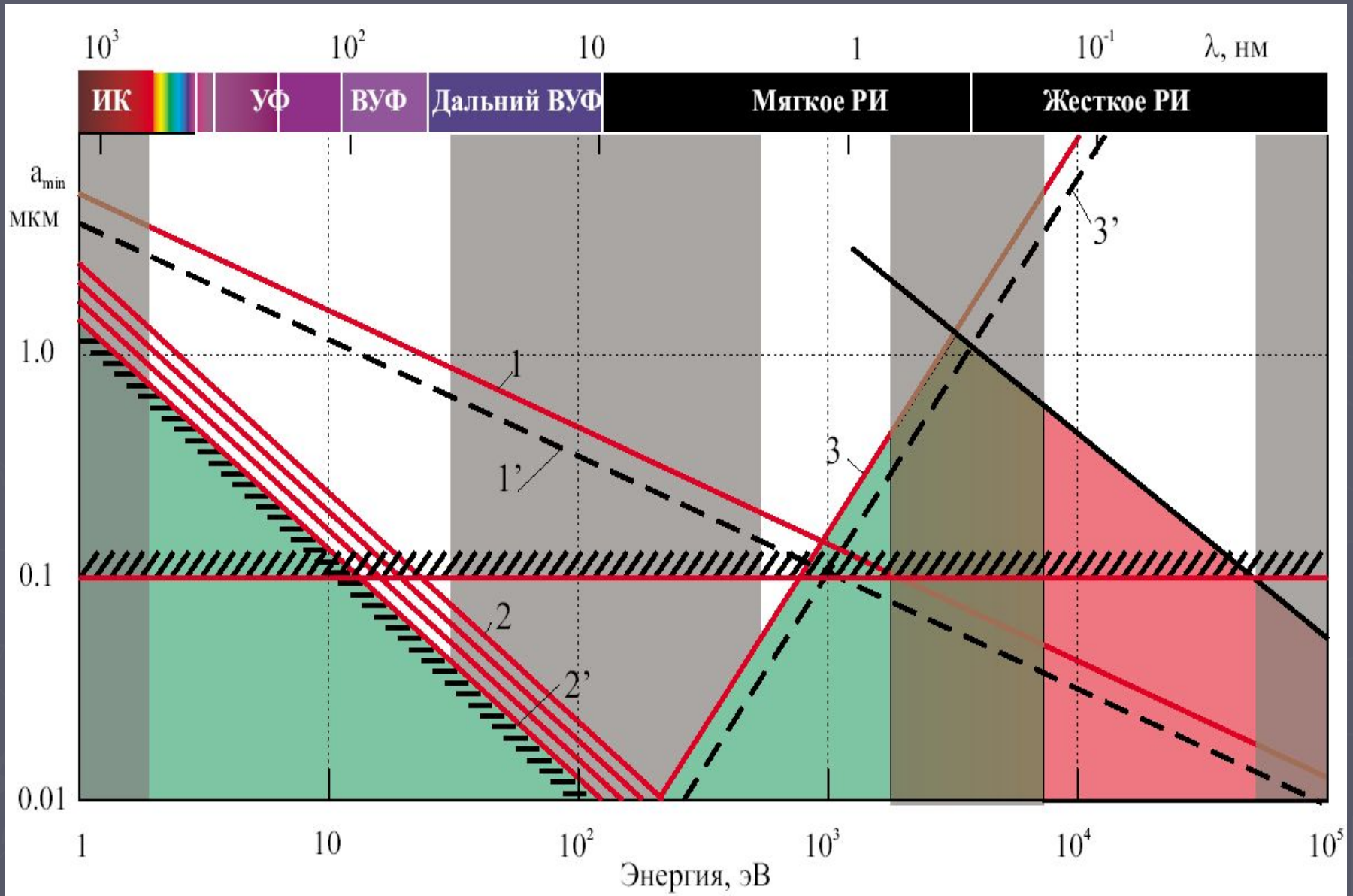
где μ - подвижность носителей, а U — приложенное напряжение; приближение постоянной подвижности), и растет как a_{min}^{-2} (a_{min}^{-1} — в режиме насыщения).

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

“КРИЗИС” МИКРОТЕХНИКИ И ИНТЕГРАЦИИ

- Зависимость $a_{min}(t)$ изображена на рис.3а и объединяет данные многих авторов, включая план - прогнозы индустриальных фирм, производящих оборудование для микроэлектронной промышленности.
- Для достаточно длительного периода протяженностью в почти что 40 лет наблюдается постоянно падающая зависимость с годовым спадом порядка 13%.

Зависимость предельной теоретической разрешающей способности литографии от длины волны излучения и энергии заряженных частиц.



«Замедление»

Внимательное изучение участка зависимости, принадлежащего 90-м 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 108 транзисторов на кристалл, явно не оправдался. Пентиум Про выпущенный в середине 90_х, и интегрирующий 21106 транзисторов, на самом деле является гибридом, соединяющим два кристалла: собственно процессора на 5.5106 элементов, и т.н. “кэш”_памяти второго уровня на 15.5106 элементов. Не произошло существенного роста интеграции и в последующих модификациях микропроцессора “Интел” — в “Пентиумах” II и III.

Фотолиитография

До настоящего времени единственным приемом микроэлектронной микротехники являлась фотолиитография [5].

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 широкополевым широкоапертурным объективом, предназначенным для работы с излучением на длине волны - (чувствительности фоторезиста). Тогда предельно_малое расстояние между двумя ближайшими разрешаемыми точками рисунка будет определяться дифракционным пределом соответственно критерию Рэлея:

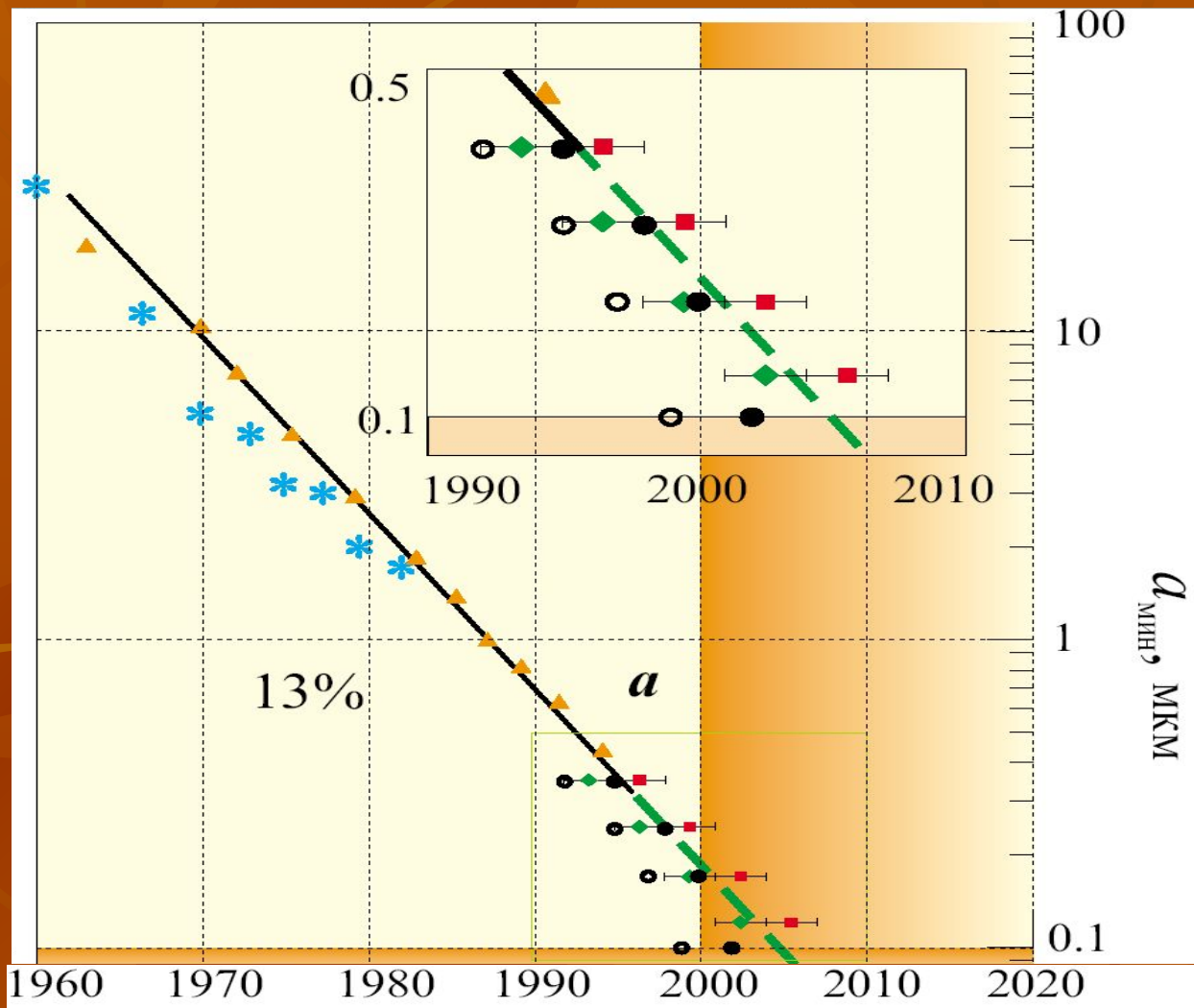
$$a_{min} = 0.61 \lambda / NA, \quad (8)$$

где $NA < 1$ — числовая апертура объектива.

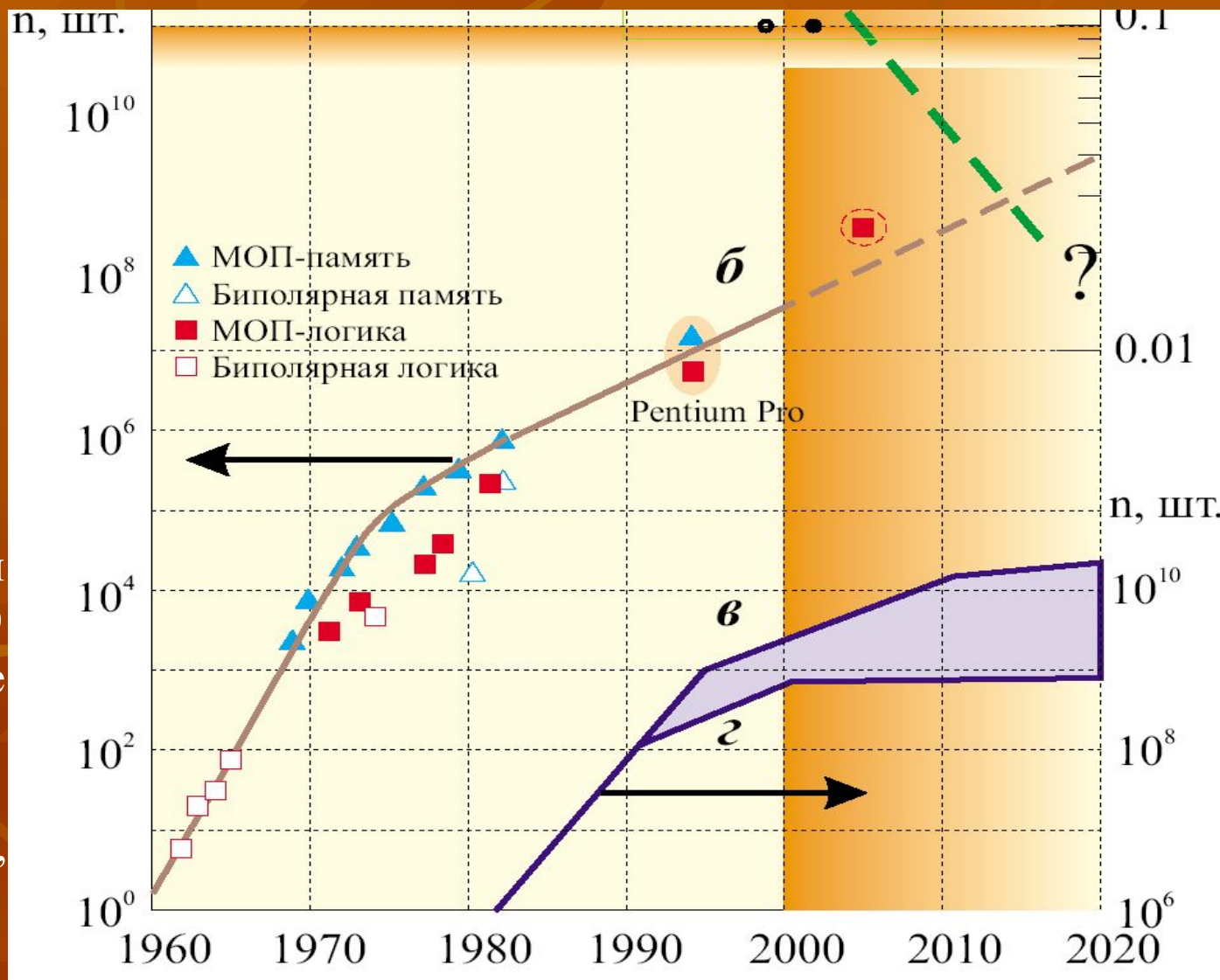
Кардинальный путь увеличения разрешающей способности проходит через уменьшение длины волны излучения. Но с приближением к 0.1 мкм, или же к 100 нм, иссякают оптически прозрачные материалы, существующие в природе. Более того, отсутствуют достаточно эффективные источники излучения, а окружающая атмосфера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

Зависимость $a_{min}(t)$ объединяет данные многих авторов, включая план - прогнозы индустриальных фирм, производящих оборудование для микроэлектронной промышленности. Для достаточно длительного периода протяженностью в почти что 40 лет наблюдается постоянно падающая зависимость с годовым спадом порядка 13%. Нет никаких тенденций насыщения, или даже ослабления темпов спада

Зависимость a_{min} от времени



Рост степени интеграции по годам



Производная от степени интеграции $n(t)$ имеет явные признаки снижения темпов роста (в, г).

Кризис интеграции

- Какова причина “кризиса” интеграции?
- Сегодня основным и практически единственным приемом микроэлектронной микротехники является фотолитография (это фотопечать микрорисунка слоя ИС с заданным уменьшением) на поверхность полупроводниковой пластины, покрытую фоторезистом.
- Оптический объектив, используемый для проекционной печати в системах высокого разрешения, должен быть широкополевым широкоапертурным объективом, предназначенным для работы с излучением на длине волны - (чувствительности фоторезиста).

Замедление темпов

- Прогноз “Интел”, выполненный в конце 80_х годов, согласно которому в 1995 г. должен был появиться микропроцессор
- 80686 с интеграцией в 108 транзисторов на кристалл, явно не оправдался.
- Пентиум Про выпущенный в середине 90_х, и интегрирующий 21106 транзисторов, на самом деле является гибридом, соединяющим два кристалла: собственно процессора на 5.5106 элементов, и т.н. “кэш”_памяти второго уровня на 15.5106 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.

Кризис интеграции

- Предельно-малое расстояние между двумя ближайшими разрешаемыми точками рисунка будет определяться дифракционным пределом соответственно критерию Рэля:

$$a_{min} = 0.61L/NA$$

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 материалы, существующие в природе.
- Кроме того, отсутствуют достаточно эффективные источники излучения, а окружающая атмосфера начинает поглощать свет. Так что имеются все физические основания для глобального кризиса микротехники.

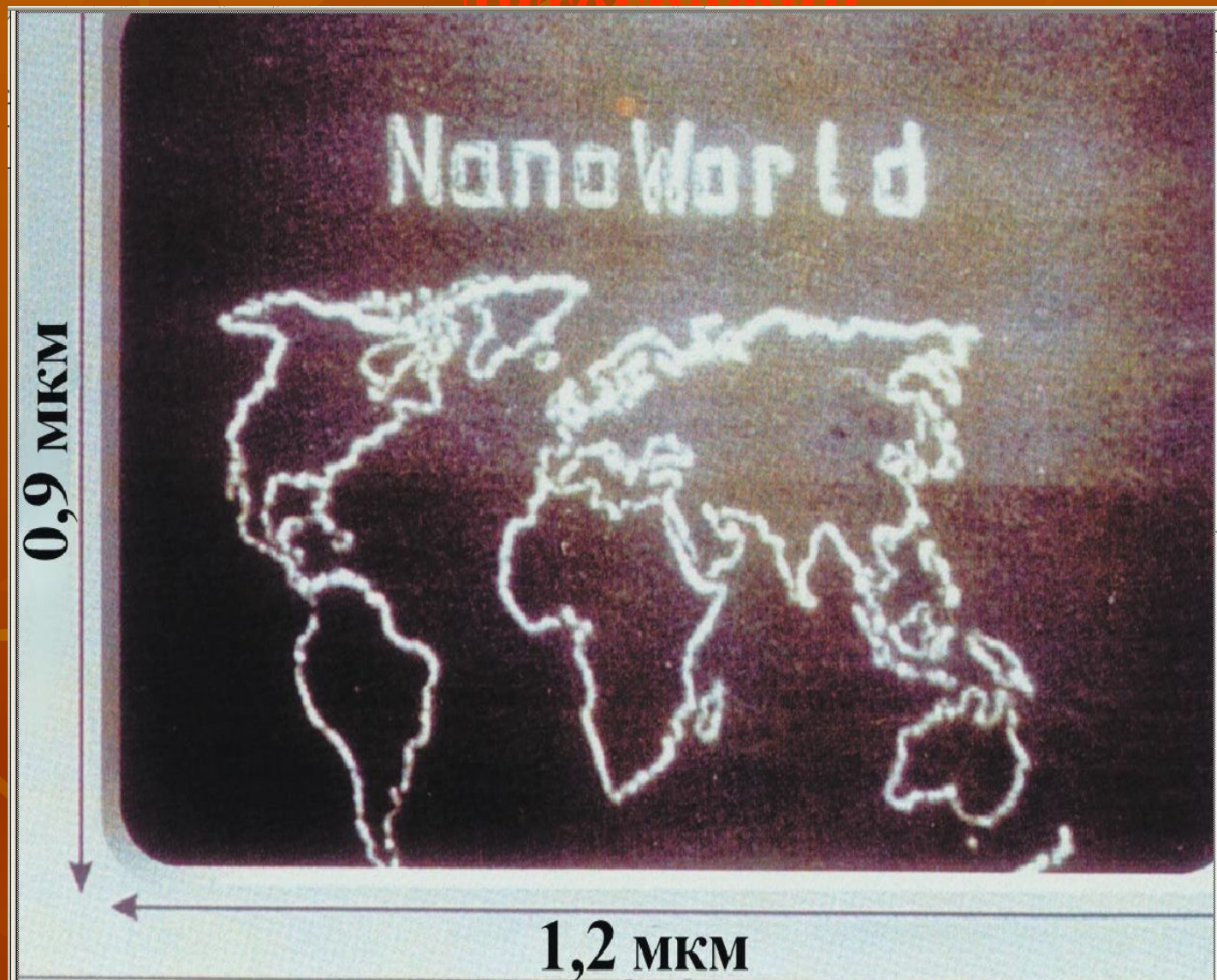
Проблемы литографии

- Электромагнитное излучение при формировании микрорисунка можно заменить электронным пучком.
- При этом дифракционный предел отодвигается далеко за пределы значимых величин.
- При разности потенциалов в 15кВ λ составляет 10^{-2} нм и соответствующий предел по Рэлею оказывается атомных размеров.

Пример высокоразрешающей литографии

- На рис.4 мы представлен микрорисунок, изготовленный на полупроводниковой пластине электронным пучком.
- Ширина линий микрорисунка не превышает 10 нм, а целая карта мира, нарисованная таким образом, уместается на площадке $0.9 \times 1.2 \text{ мкм}^2$.

Пример электронной карты



Более 1000
таких карт
разместится
на срезе
человеческо
го волоса!

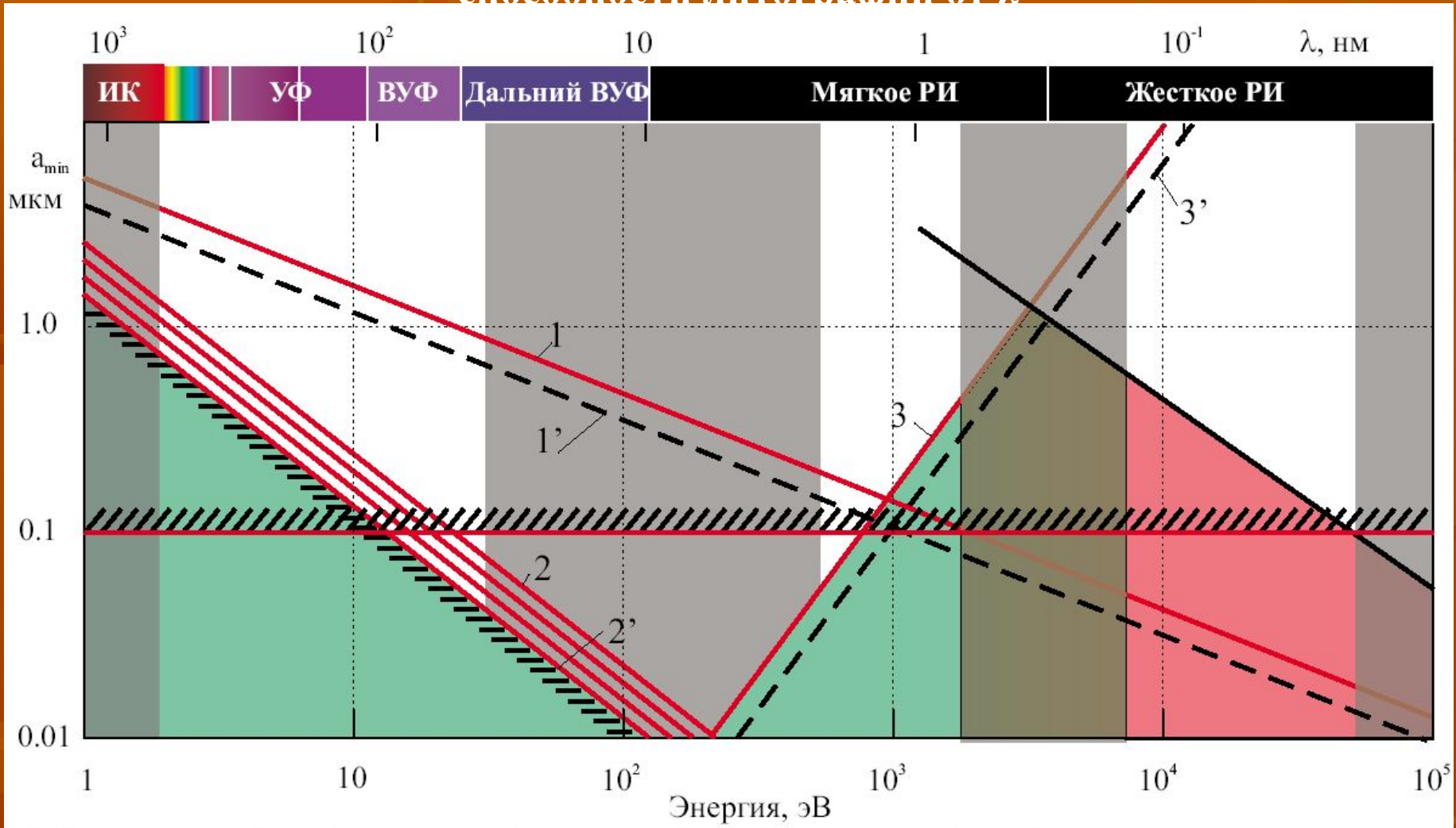
Проблемы лучевых технологий

- Основная трудность состоит 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. Этот недостаток был преодолен за счет использования жидкометаллических источников ионов.
- Главный недостаток лучевых технологий в том, что пучок “рисует” точку за точкой, обходя весь рисунок ИС по растру. При этом 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 более 20 точек в отдельном слое, а слоев по технологии СБИС понадобится порядка 10-ти.

Пути выхода из кризиса

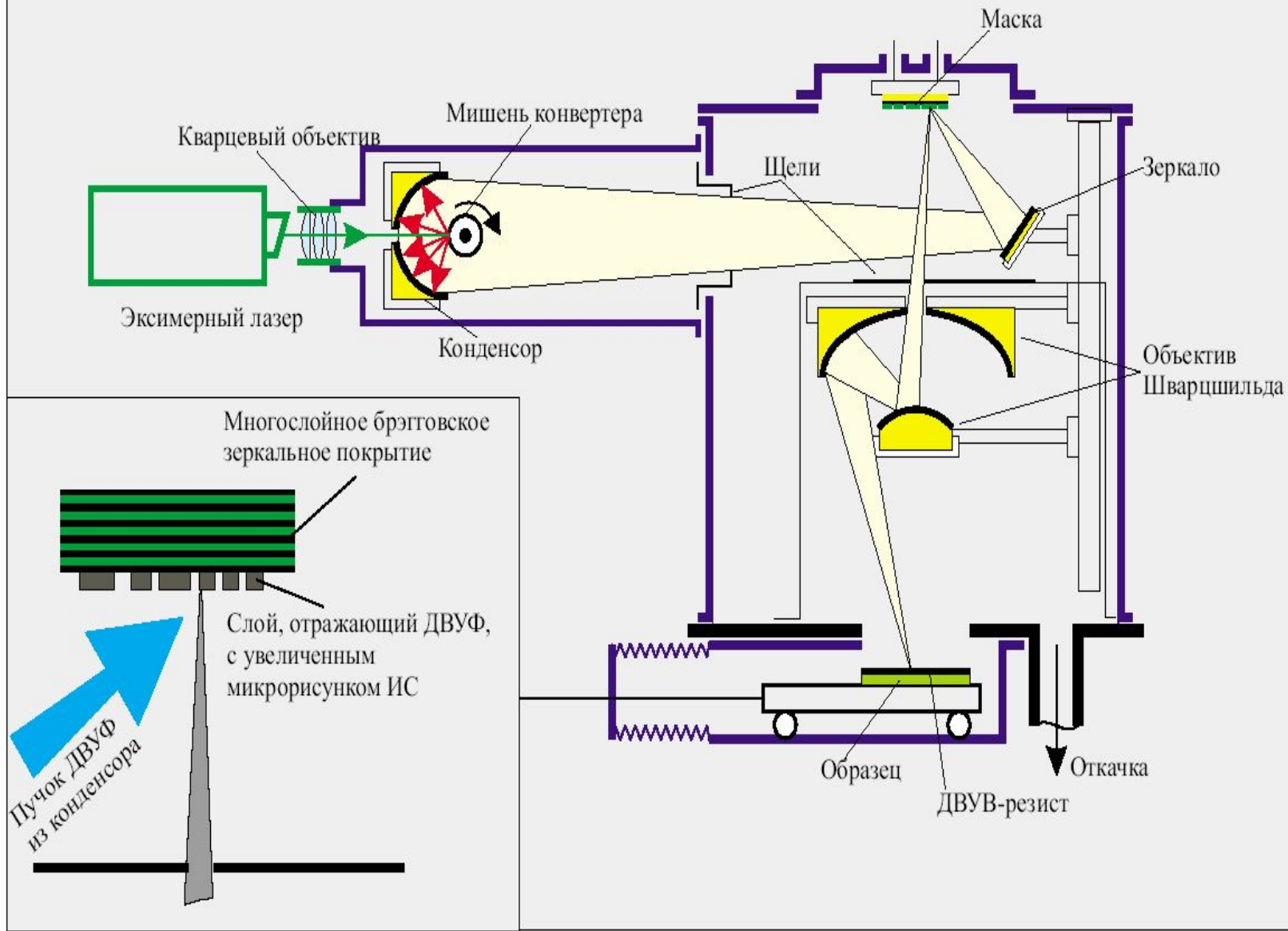
- Только волновые методы дают возможность печатать всю картину ИС параллельно и одновременно. При этом система должна быть проекционной, так как возможности контактной или теневой печати весьма ограничены и не позволяют достичь необходимого разрешения из-за зазора “шаблон_подложка” .
- Идея проекционной литографии в мягком рентгене или дальнем вакуумном ультрафиолете реализовалась в результате выполнения в 80-х годах военных программ, известных как СОИ или “звездные войны” (синхротрон и рентгеновский лазер)
- В процессе этих исследований наука и техника вплотную подошли к созданию рентгеновского лазера и его элементы оказываются весьма подходящей основой для построения суперлитографа.
- Существует узкая область длин волн, благоприятная для проникновения в диапазон размеров, меньших 100 нм Это области дальнего вакуумного ультрафиолета и наименее жесткая часть рентгеновского излучения.

«Зависимость предельной теоретической разрешающей способности литографии от λ »



1- контактная (теневая) печать зазор 20 мкм, 1' - зазор 5 мкм, 2 проекционная печать, числовая апертура NA=0.4, 2' то же NA=1; 3- ограничение, связанное с размытием изображения из-за рентгеновских фотоэлектронов; 3' - более высокая плотность материала фоторезиста; 4- обратно-рассеянные электроны

«ДВУФ» - нанолитограф



На вставке слева: сечение отражения фотошаблона

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,
- 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.

ДВУФ-литограф

- 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%
- Далее это излучение при помощи поворотного зеркала 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 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 задача, вполне достойная применения электролитографии остросфокусированным 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

ДВУФ-наноитограф

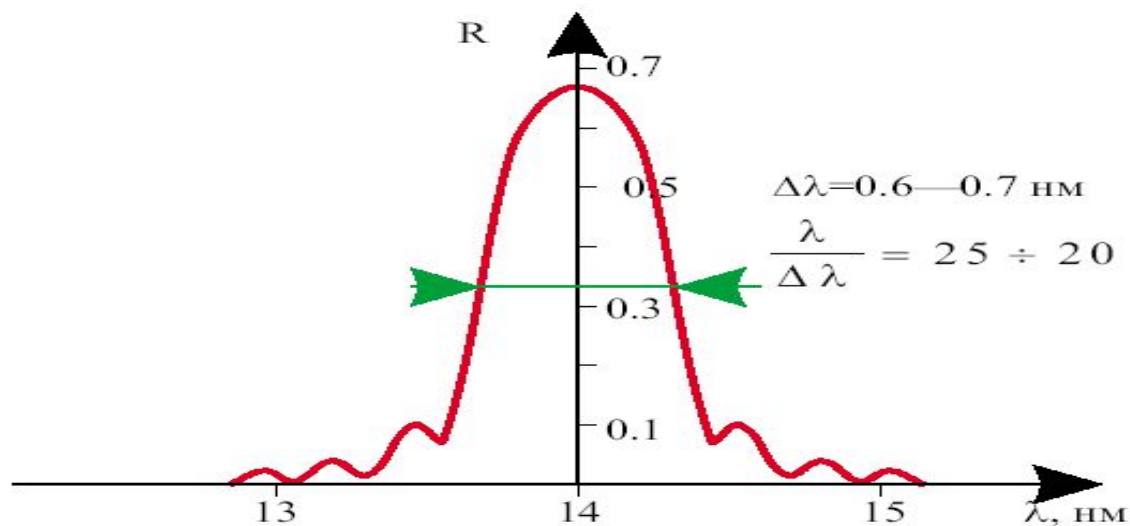
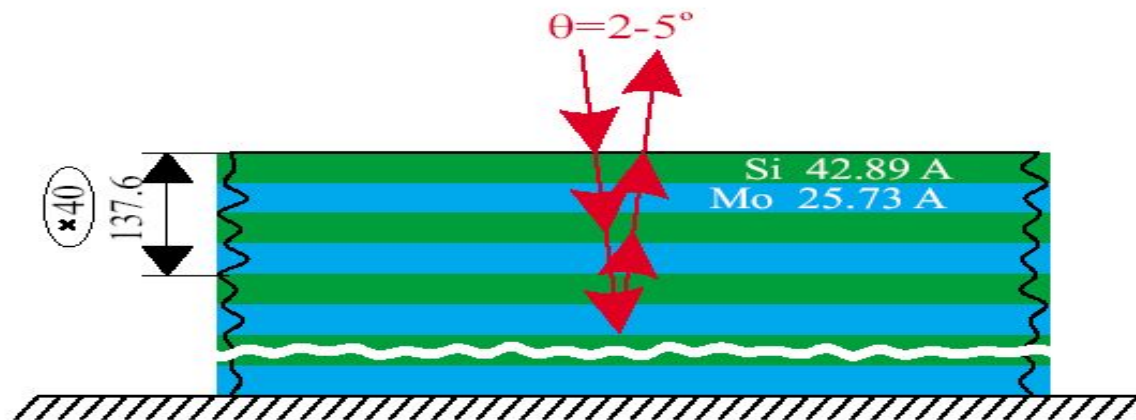
- Уменьшенное до необходимого масштаба изображение попадает теперь на полупроводниковую пластину, по-крытую резистом.
- Опытные варианты наноитографа уже показали возможность достижения разрешающей способности на уровне от 50 до 100 нм

ПРОБЛЕМЫ:

- Луч испытывает много отражений от брэгговских зеркал, и проблема повышения коэффициента отражения становится актуальной.
- Одна из принципиально трудно_разрешимых проблем - это защита оптического тракта от загрязнений, являющихся результатом микровзрыва при генерации лазерной плазмы.
- Имеются трудности в получении высококачественного неискаженного изображения.

Сечение брэгговского покрытия на рентгеновском Зеркале и спектр его отражения.

- Брэгговское зеркало с использованием многослойного покрытия Si-Mo.
- На нем при нормальном падении пучка света с длиной волны $\lambda=14\text{нм}$ реализуется коэффициент отражения в 60—70%



К ИСКУССТВЕННОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ?

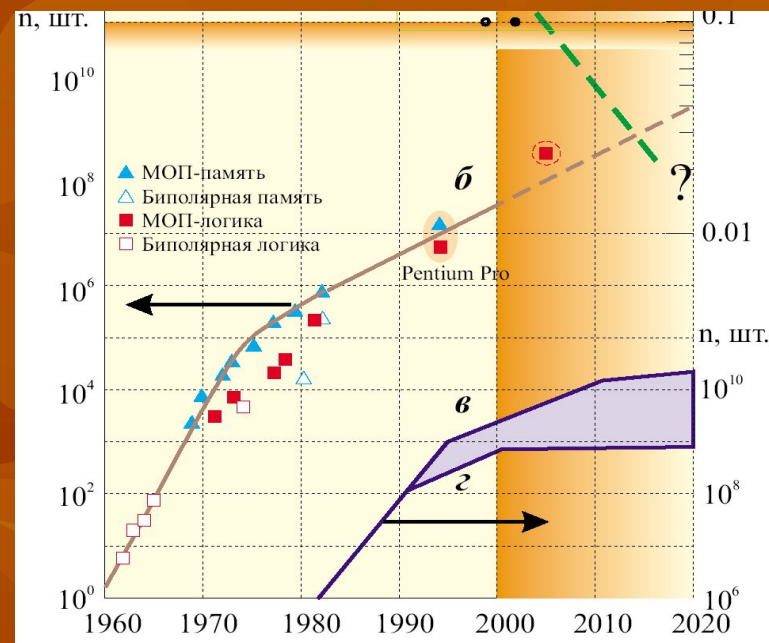
- Несмотря на существование объективных трудностей, в настоящее время не остается сомнений в том, что ДВУФ_нанолиитограф будет создан в ближайшие 5_10 лет и барьер 100 нм будет успешно преодолен.
- Более того, существует мнение, что он может быть взят и традиционными методами, но с использованием более 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_нанолиитографа, 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 на базе брэгговских покрытий, необходимо признать, что весь запас разрешающей способности легко и быстро может быть утерян.
- При $NA < 0.1$, полученное в экспериментальных объективах, достигается уровень 150 нм и более, который определенно решается и при применении вполне традиционных приемов*.

Каков предел уменьшения a_{\min}

- Как долго может быть уменьшаем a_{\min} ?
- Каков предел степени интеграции?
- Всегда ли будет существовать необходимость в непрерывном сокращении размеров?
- Каковы физические ограничения построения электронных приборов?

Конкуренция человеческим интеллектуальным возможностям.

- На кривых в нижнем правом углу слайда видно насыщение в области 2010-2020-х годов. (1984 г. [7]).
- $a_{min} = 70$ нм могло бы соответствовать предельному значению $n_{max} = 10^{10}$
- В ближайшие 20 лет человечеству предстоит выйти на уровень интеграции $10^9—10^{10}$ элементов на один кристалл.
- Учитывая динамику быстродействия, ($\sim 10^{-13}$ с к 2020 г., см. рис.1), по производительности вычислений это уже может составить конкуренцию человеческим интеллектуальным возможностям.



- Анализ уменьшения размеров n/p приборов свидетельствует о возникновении других проблем, связанных с физическими механизмами работы приборов. Особенно острыми они оказываются для контактных узлов и межсоединений.
- Дальнейшее уменьшение размеров приводит в область физики, которая называется мезоскопией. Здесь все привычные представления о процессах, происходящих в проводниках и полупроводниках нарушаются настолько, что не работает даже закон Ома

Литература

- 1. S.M.Sze. VLSI technology Overviews and Trends. In: Proc. of the 14th 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. Радиокомплекс. 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.

Примечание

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