

Немногие изобретения можно поставить в один ряд с созданием микропроцессора по степени воздействия на весь ход истории человечества. Если в 60-е годы даже в самых развитых странах громоздкие ЭВМ были установлены лишь в немногочисленных государственных научных центрах, исследовательских лабораториях при университетах и в крупнейших корпорациях, то сейчас трудно представить сферу человеческой деятельности, где бы ни использовалась микропроцессорная техника.

УДК 621.37/39.001.5

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

*академик, д-р техн. наук, проф. А.П. ДОСТАНКО, Ю.О. КОРОБКО
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники)*

Рассмотрены тенденции развития технологии изготовления микропроцессоров на основе анализа результатов передовых зарубежных исследований, а также собственных разработок, в том числе по созданию новых материалов для производства микросхем, по усовершенствованию методов проекционной фотолитографии, по разработке принципиально новых моделей транзисторов.

Современные микропроцессоры являются очень сложными электронными устройствами, для изготовления которых требуются сотни технологических операций, в число которых входят литография, ионная имплантация, диффузия и окисление, осаждение, травление, очистка, планаризация и метрология.

Закон Мура, сформулированный изначально в 1965 году как эмпирическое правило, прогнозирующее увеличение каждые два года в геометрической прогрессии количества транзисторов, размещенных на одном кристалле, стал руководством к действию для развития компьютерной индустрии по мере разработки все более мощных микросхем при пропорционально соразмерной стоимости. Отмеченная в нем закономерность наблюдается и в настоящее время все с той же удивительной точностью, являясь основой прогнозирования роста производительности электронных устройств в масштабах всей компьютерной индустрии. Так, за последние 30 лет число транзисторов, размещаемых на одном чипе, возросло более чем в 7000 раз: с 2300 на кристалле 4004, выпущенном в 1971 году, до более 15 миллионов в процессоре **Pentium 4** (рис. 1).

Количество транзисторов

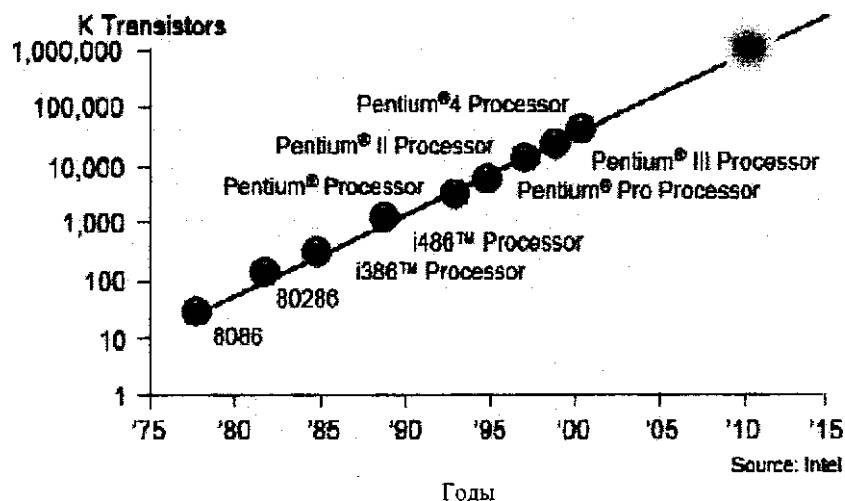


Рис. 1. Динамика изменения числа транзисторов, размещаемых на одном чипе (кристалле) [1]

Высочайшая степень интеграции позволяет год от года наращивать мощность микропроцессоров и выпускать кристаллы памяти, способные хранить миллиарды бит данных.

Качество транзисторов определяется высокой скоростью переключения и током насыщения. Основной метод улучшения их характеристик построен на уменьшении длины канала, поскольку более узкие вентили смогут быстрее переключаться с позиции «включено» в позицию «выключено», увеличивая

Так, согласно сетевому графику развития индустрии, утвержденному полупроводниковой промышленной ассоциацией SIA (Semiconductor Industry Association), в 2002 г. стандартные проектные нормы [2] составили 0,13 мкм, в 2005 г. должны составить 0,1 мкм, в 2008 г. - 0,07 мкм и в 2014 г. - 0,035 мкм (рис. 2). Последние цифры, в частности, означают, что при производстве терабитных микросхем на одном квадратном сантиметре будет расположено до 390 миллионов транзисторов.

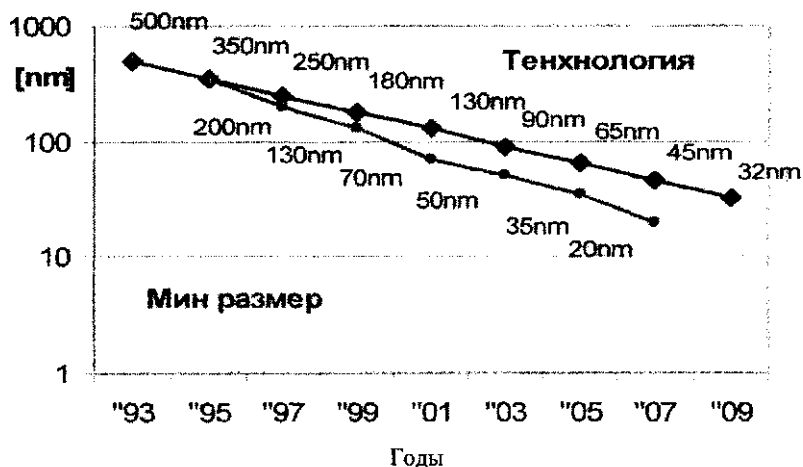


Рис. 2. Динамика изменений ширины затвора транзистора при использовании различных технологических норм [1]

Переход к более высоким степеням плотности приборов на кристалле вызывает пропорциональное масштабирование критических параметров ИС. К таким параметрам относятся минимальные размеры канала в КМОП-транзисторе, точность совмещения слоёв топологии, минимальное расстояние между металлическими трассами, минимальная ширина контакта и др. Миниатюризация касается не только длины и ширины элемента схемы, но и толщины самого кристалла. Каждое новое поколение полупроводниковых приборов производится с параметрами в 1,4 раза меньшими, чем соответствующие параметры изделий предыдущего поколения. Транзисторы и соединения на нем реализуются с помощью серии уровней, в современных микросхемах их может быть пять или шесть.

При этом также увеличивается сложность самих транзисторов (количество слоёв для создания - десятки), а нормативы по контролю критических размеров продолжают оставаться в рамках до 10 % от минимальных размеров элементов. Это приводит к необходимости использования новых материалов и новых конструктивных решений. Тем не менее увеличивать быстродействие процессора, сокращая размеры транзисторов, размещаемых на нескольких квадратных сантиметрах кремния, становится все сложнее. Проблема достижения предела в дальнейшей миниатюризации встает настолько остро, что лаборатории всех крупнейших научных центров и компаний-производителей активно работают над созданием средств усовершенствования современной технологии производства интегральных схем, все активнее обсуждается вопрос о возможных альтернативах транзистору как основе вычислительной техники.

В настоящее время разработки ведутся в следующих направлениях:

- создание новых материалов для производства микросхем;
- усовершенствование методов оптической фотолитографии как главного звена производственного процесса;
- разработка принципиально новых идеологий и моделей транзисторов, в том числе основанных на биологических материалах.

Рассмотрим их подробнее.

Новые материалы в электронной технике

Производство микросхем на базе медных компонентов. Одним из самых перспективных направлений исследований считается замена алюминия медью в металлических проводниках микропроцессора. Медь, как и алюминий, обладает низким емкостным сопротивлением, что является необходимым требованием, предъявляемым к межкомпонентным соединениям высокопроизводительных микропроцессоров [3, 4].

На протяжении последнего десятилетия производители полупроводниковых устройств много экспериментировали с материалами, способными заменить алюминий при изготовлении проводников.

Технология «растянутого кремния». В настоящее время Intel применяет в своих процессорах с нормой проектирования 90 нм технологию так называемого «растянутого кремния» (strained silicon), предусматривающую нанесение слоя кремний-германиевого сплава на слой кремния [8, 9, 10]. Атомы двух веществ стремятся выровняться относительно друг друга, благодаря чему кристаллическая решетка кремния растягивается и открывает больше места для движения электронов без увеличения скорости или потребляемой энергии (рис. 4). В частности, в новой технологии изготовления процессоров предполагается применить изолирующие материалы с низкой диэлектрической проницаемостью и так называемый напряженный кремний (с деформированной кристаллической решеткой, в которой увеличено расстояние между узлами).



Рис. 4. Структурная схема «растянутого кремния»

Кремний-германиевые технологии. Внедрение кремний-германиевых технологий при производстве транзисторов позволит еще более существенно повысить быстродействие и снизить уровень шума в высокоскоростном коммуникационном оборудовании, в частности, в оптических коммутаторах, обрабатывающих данные со скоростью 50 Гбит/с и выше, и на базовых станциях мобильной связи. Применение одновременно кремний-германиевых и КМОП-транзисторов в микросхемах, созданных на базе 90-нм технологического процесса, позволит вдвое уменьшить число полупроводниковых компонентов и процессоров в оптической подсистеме, а также даст возможность подключать компоненты беспроводной связи непосредственно к антеннам без промежуточных элементов, занимающих место и потребляющих лишнюю энергию [5,11].

Подобные коммуникационные микросхемы производства Intel будут как минимум в 2,5 раза компактнее, менее энергоемкими и в 2 раза более производительными. В ближайшем будущем предполагается разработать универсальные коммуникационные чипы, которые смогут применяться как в материнских платах компьютеров, так и в платформах мобильных телефонов. При покупке телефона уже не нужно будет задумываться, обладает ли он возможностью синхронизации с ПК: такая функция будет встроена в него изначально, на уровне микросхемы. Так же как и беспроводная сеть, не будет ставить устройство «в тупик», поскольку поддержка соответствующих стандартов будет дана ему «при рождении».

Усовершенствование методов фотолитографии

Оптическая проекционная литография используется в процессе трафаретной печати на кремниевой подложке тончайших, сложных элементов, определяющих структуру интегральной схемы. Для получения элементов, размеры которых меньше длины волны (иногда в два и более раз), приходится пользоваться методами, которые помогают увеличить разрешающую способность, но при этом требуют ужесточения требований к технологическим операциям, создающим основные погрешности - поддержки дозы экспозиции и стабильности фокусного расстояния.

Непрерывное совершенствование оптической проекционной литографии, в том числе, как показано авторами [12 - 16] (результаты исследований с использованием масок нового типа), позволяет непрерывно уменьшать размеры мельчайших элементов. Так, каждые два года они уменьшаются примерно на 30 %, создавая возможности для изготовления все более мощных, экономичных полупроводниковых устройств. Многочисленные прогнозы указывают на то, что эта технология еще долгое время будет служить основой полупроводниковой индустрии, однако ориентировочно через год-два возникнет необходимость в освоении литографии следующего поколения, основанной на использовании сверхультрафиолетового излучения, с длиной волны в диапазоне от 10 до 14 нм (extreme ultraviolet lithography - EUVL).

При использовании EUVL k_1 -фактор (коэффициент в формуле Релея) близок к единице (рис. 5), что позволяет ослабить нормативные требования при производстве фотосаблонов. При такой технологии отпадает необходимость использования методов, повышающих разрешение оборудования, таких как метод оптической коррекции (OPC) или метод фазовращающих масок (PSM) [17, 18].

Во многих отношениях EUVL сохраняет приемственность в отношении традиционной оптической литографии. Так, например, в современной оптической проекционной литографии применяются те же самые основные оптические средства, что и в EUV-системе проектирования и моделирования изображений. Есть, однако, и весьма существенные отличия. Главное из них заключается в том, что сверхультрафиолетовое излучение очень легко поглощается любыми веществами, даже газообразными. Следовательно, EUV-проекцию изображений необходимо выполнять практически в вакууме. Кроме того, лег-

кость поглощения исключает применение таких преломляющих оптических элементов, как линзы и проводящие маски. Ряд веществ, используемых в микро литографии, обладают чрезвычайно низкой отражательной способностью при близком к нормальному угле падения сверхультрафиолетового излучения. Чтобы отражательная способность стала приемлемой, требуется применить многослойное тонкопленочное покрытие поверхности, известное под названием «распределенный отражатель Брага». Лучшие из такого рода отражателей действуют в диапазоне от 11 до 14 нм. Поскольку существующие оптические фоторезисты легко поглощают сверхультрафиолетовое излучение, для освоения технологии EUVL необходимо разработать новые фоторезисты и способы проявки.

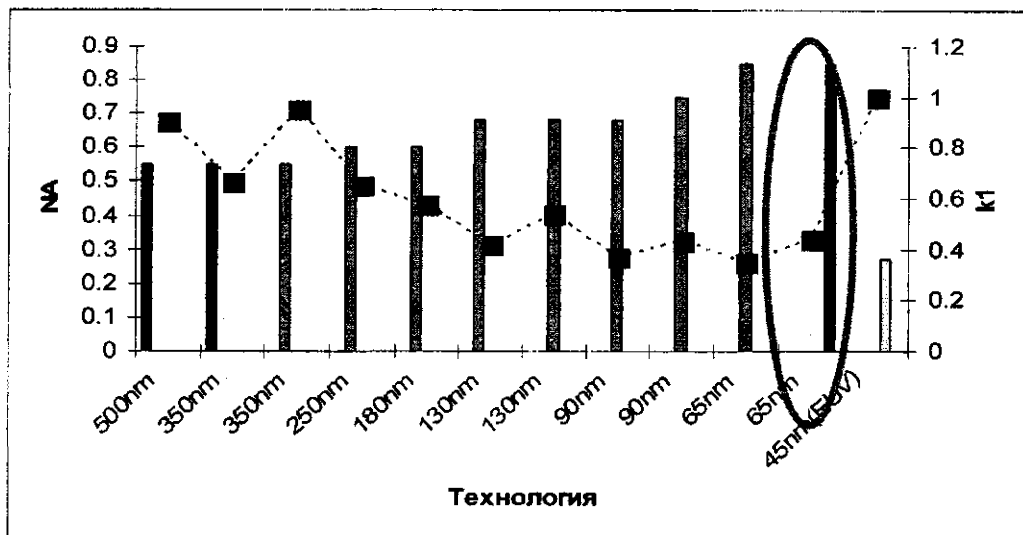


Рис. 5. Соответствие оптических показателей (числовой апертуры NA, k1-фактор) применяемым технологиям [11, 17 – 19]

В связи с тем, что проекция изображений в EUVL осуществляется с помощью сверхкоротких световых волн, получение изображений с ограниченным преломлением потребует чрезвычайно высокой точности обработки поверхности зеркал камеры. Для изготовления столь безупречных зеркал нужны новые шлифовальные и метрологические методики.

Сверхультрафиолетовое излучение, которое раньше также называли мягкими рентгеновскими лучами, исследовано уже вполне достаточно, и результаты позволяют сделать вывод о принципиальной возможности разработки оптических технологий на его основе [18]. С другой стороны, предстоит еще очень многое сделать для адаптации EUV-литографии к промышленным условиям. График освоения EUV-технологии остается пока весьма нечетким, и согласно прогнозам SIA внедрение технологии начнется не ранее 2008 года. Тем не менее исследования в этом направлении идут очень интенсивно, ибо успешное внедрение EUV позволит проекционной фотолитографии остаться в полупроводниковой промышленности доминирующей технологией еще на многие годы.

Разработки новых моделей транзисторов с МОП-структурой

Дальнейшее уменьшение размеров транзистора приведет к возникновению условий, которые способны значительно усложнить процесс миниатюризации. Так, приближение областей проводимости друг к другу на расстояние порядка 100 ангстрем порождает квантовые эффекты, которые повлияют на нормальную работу транзисторов.

Миниатюризация транзистора неизбежно сопровождается усилением электрических полей, и электроны, проходящие через сильное электрическое поле, приобретают очень большую энергию. Это приведет к возникновению лавинообразного электрического тока, способного разрушить схему. Острее стоит вопрос об утечке тока. Структуры на процессоре настолько малы и тонки, что электроны могут «рассеиваться» с поверхности проводов и вентилях, когда микросхема находится в режиме ожидания.

Чем меньше размер транзисторов, чем выше плотность их размещения на процессоре, тем больше увеличивается расход тепловой энергии и снижается эффективность работы устройства. Для того чтобы избежать нежелательных последствий, инженеры прибегают к различным ухищрениям. Разработаны транзисторы, в которых поле может перемещаться в место, где оно не оказывает разрушительного влияния на другие электронные функции. Данные разработки ориентированы на возрастающие скорости переключения схем при дальнейшей миниатюризации. Одним из важнейших требований является постоянство изолирующих свойств таких структур при всё более быстром переключении затвора [6,11].

Одна из интереснейших конструкционных находок - создание трехмерного транзистора. В обычных, так называемых планарных транзисторах, электрические сигналы «движутся», образно говоря, «по плоской и прямой дороге с односторонним движением». Эта схема используется в полупроводниковой индустрии и в настоящее время, начиная с начала 60-х годов XX века.

Однако сегодня, когда транзисторы уменьшились в размерах до миллиардных долей сантиметра, их крошечные проводящие поверхности уже недостаточны для протекающих по ним токов, создана схема трехзатворных транзисторов, что позволяет на чипе того же размера разместить на 20 % больше транзисторов.

В основе транзистора с тройным затвором [20] производства корпорации Intel лежит новаторская трехмерная структура, похожая на приподнятую горизонтальную плоскость с вертикальными стенками. Эта структура позволяет посылать электрические сигналы как по «крыше» транзистора, так и по обеим его «стенам» (рис. 6), что приводит к снижению сопротивления и работе при токе меньшей мощности. Тройной затвор строится на ультратонком слое полностью обедненного кремния, что обеспечивает еще большее снижение тока утечки и позволяет транзистору быстрее включаться и выключаться при значительном снижении энергопотребления.

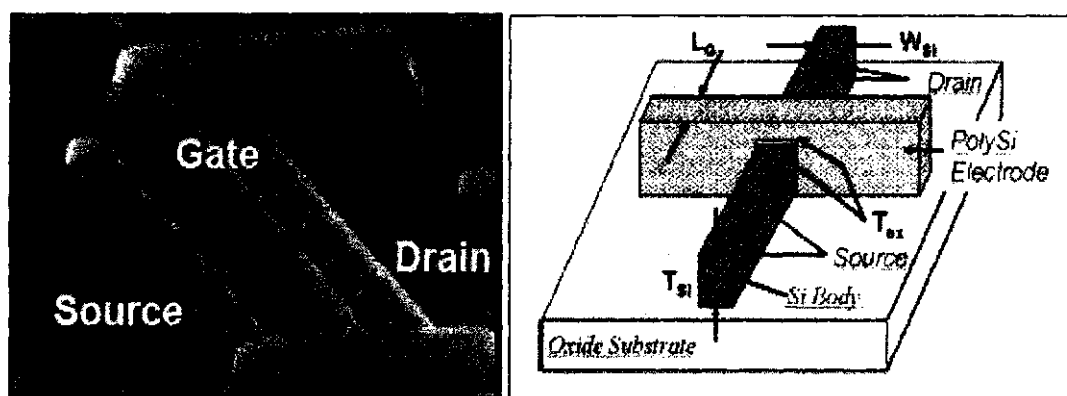


Рис. 6. Трехмерный транзистор [7]

За счет подобной схемы распределения электросигнала эффективно увеличивается площадь, доступная для прохождения тока, а значит, снижается его плотность, вместе с ней уменьшается и ток утечки. Согласно данным, приведенным в [7], транзистор с тройным затвором в микронных геометрических конструкциях работает более эффективно - быстрее, проводя на 20 % больше тока по сравнению с традиционной планарной конструкцией, имеющей аналогичный размер затвора.

Одним из важнейших преимуществ транзисторов с тройным затвором является возможность их производства с помощью существующей в настоящее время литографической технологии, что избавляет от необходимости значительной перестройки производства.

Обзор новых направлений развития микроэлектроники был бы не полным, если не упомянуть о разработках, ведущихся на стыке биологии и физики полупроводников.

Многие исследователи предсказывают [9], что коренные изменения в технологии изготовления, а также в разработке идеологии создания транзисторов наступят, когда длина затвора транзистора достигнет 10 нм. Так, американские ученые - физик Хендрик Шон и химики Женан Бао и Хонг Минг (Bell Lab) - впервые в мире создали мономолекулярные структуры-устройства, способные воспроизводить основные функции полупроводниковых транзисторов [21, 22]. Активным элементом каждой из таких структур является молекула металлоорганического вещества, помещенная между тончайшими золотыми электродами. В одном варианте такая молекула содержит атом кобальта, а в другом - два атома ванадия. Эксперименты подтвердили, что подобные молекулы не только проводят ток, но и изменяют свое сопротивление в зависимости от приложенного электрического потенциала.

Наибольшую трудность при создании нанотранзисторов представлял процесс изготовления электродов, разделенных всего несколькими молекулами вещества, и присоединения к ним электрических контактов. Ученые преодолели эти трудности, применив технику «самосборки» и оригинальный способ их изготовления (в кремниевой подложке было сделано углубление, покрытое слоем золота, - это был один из трех электродов транзистора). Подложка погружалась в раствор тиола и инертного органического вещества, использовавшегося для получения нужной концентрации тиола. После высушивания пластины на золотом электроде оставалась пленка толщиной ровно в одну молекулу. Подби-

рая соотношение количества молекул тиола и инертного вещества, разработчики статистически обеспечивали наличие только одной активной молекулы над золотым электродом. Затем на пленку наносился еще один слой золота, который и служил третьим электродом. Химические технологии самосборки относительно просты, дешевы и в отличие от кремниевых технологий не требуют производственных помещений с высокой степенью чистоты. Из двух нанотранзисторов был собран действующий инвертор - стандартный модуль компьютерных микросхем, преобразующий логический 0 в 1 и обратно. Успешно работающий прототип позволяет предположить, что с помощью молекулярных транзисторов удастся создать микросхемы с плотностью элементов в 1000 раз большей, чем позволяют современные технологии.

Результаты создания молекулярных транзисторов были опубликованы в журналах *Applied Physics Letters* [23] и *Advanced Materials* [24].

Специалисты из Техниона (г. Хайфа, Израиль) использовали особенности структуры молекулы ДНК и электронных свойств углеродных нанотрубок [25, 26]. Сначала исследователи покрыли частицы молекулы ДНК белками бактерии *E. Coli*. Затем покрытые антителами нанотрубки были связаны с молекулой ДНК. Для создания транзистора были также использованы ионы золота и серебра, которые взаимодействовали только с непокрытыми белком частями. Оказалось, что полученная структура ведет себя как нанотранзистор, когда прилагаемое к субстрату напряжение меняется.

Закон Мура, с удивительной точностью позволяющий прогнозировать будущее компьютерной индустрии, открывает перед нами новый мир, размеры которого постоянно уменьшаются, а возможности при этом возрастают. Чтобы сохранить взятый однажды научным миром темп, необходимо постоянно стремиться к новым горизонтам, не ограничиваясь отдельными усовершенствованиями ранее разработанных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sery G. Approaching the One Billion Transistor Logic Product; Process and Design Challenges // SPIE meeting 3/6.-2002. - Vol. 4692, -P. 256 - 261, <http://www.mtel.com/research/silicon/GeorgeSerySPIE0302.htm>
2. SIA roadmap, <http://www.sia.org>
3. Peters L. Advancing Aluminum Interconnect Technology // *Semiconductor International*. - 1998. - № 11. - P. 67.
4. Родерик Э.Х. Контакты металл-полупроводник. - М: Радио и связь, 1982.
5. A Novel CMOS Compatible Polymeric Pattern Transfer Technique for Integrated MEMS / A. Park, et al, ICMAT 2001.
6. Bourianoff A. Nanoenergetics, Nanomaterial, Nanodevices, Nanocomputing, - putting the peices together // *Proc. European Material Research Society*. - 2004. - May, <http://www.intwl.com/research/>.
7. Silicon Nano-transistor for Logic Application / R. Chau, et al. // *N. H Elsevier Magazine, Physica E*. - 2003.-Vol. 19.
8. HufFH., Zeitzoff P. A. Perspective on Enhancing Mobilities // *Solid State Technology Magazine*, Jan. - 2004. - P. 26-28.
9. Breaking Barriers to Moore law / K. Marcyk, et al. // Форум разработчиков Intel (IDF), 2002.
10. Transistor Elements for 30nm Physical Gate Lengths and Beyond / B. Dole, et al. // *Intel Technology Magazine*. - 2002. - Vol. 6, № 2.
11. <ftp://download.intel.com/research/silicon/BourianoffIEEECircuits&Devices0402.pdf>
12. Resolution Limits with 248-nm Strong Phase-shifting Techniques for Contact Patterning Applications / Y.O. Korobko, Mei-Chien Lu, Jesmar Telans, Jeffrey E. Powers // *Proc. SPIE* / Ed. B.J. Grenon, F.E. Abboud. -1998. - Vol. 3546. - P. 594 - 605.
13. Technological Challenges in Implementation of Alternating Phase-shift Mask / Wilman Tsai, Qi-De Qian, Yulia O. Korobko, etal. // *Proc. SPIE* / Ed. B.J. Grenon, G.T. Dao. -2001. - Vol. 4186. - P. 433 - 443.
14. Effects of Soft Pellicle Frame Curvature and Mounting Process on Pellicle Induced Distortions ki Advanced Photomasks / E. Cottle, R. Engelstad, Y.O. Korobko, et al. // *Proc, SPIE*. - 2003. - Vol. 5040. - P. ! 01 - 110.
15. Коробко Ю.О., Ануфриев Л.П., Турцевич А.С. Исследование влияния дефектов топологии на девиацию электрических характеристик элементов интегральных микросхем // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы III междунар. науч.-техн. конф., Новополюцк, 26 - 28 мая 2004 г. - Новополюцк: ПГУ, 2004. - Т. 1. - С, 234 - 237.
16. Достанко А.П., Турцевич А.С., Коробко Ю.О. Особенности применения проекционной фотолитографии при производстве биполярных интегральных схем // Доклады БГУИР. - № 4. - 2004.

17. Lithography Strategy for 65nm Node / Y. Borodovsky, et al. // SPIE Vacus 2002 Photomask Japan, <http://www.intel.com/research/silicon/lithography.htm>
18. Bjorkholm J. EUV Lithography - The Successor to Optical Lithography? // Intel Technology Magazin. - Q 3. - P. 1 - 10, <http://www.intel.com/research/>.
19. Silverman P. EUV Lithography Transition From Research to Commercialization // Photomask, Japan 2003, April, <http://www.intel.com/research/silicon/Hthography>.
20. Kahung A.B., Pati Y.C. Subwave length Optical Lithography: Challenges and Impact on Physical Design, 2002.
21. Hendrik Jan, Hong Meng Schon, Bao Zhenan. Self-assembled Monolayer Organic Field-Effect Transistors // Nature Journal. - 2001. - Vol. 419. - P. 713 - 716.
22. Bao Z. Materials and Fabrication Needs for Low-Cost Organic Transistor Circuits Advanced Materials, Volume 12, Issue 3, Date: February, 2000. - P. 227 - 230,
23. Low-cost All-polymer Integrated Circuits / C.J. Drury, C.M.J. Mutsacs, C.M. Hart, M. Matters, and D.M. de Leeuw // Applied Physics Letters. - 1998. - Vol. 78. - P. 108 - 110.
24. Schroeder R., Majewski L.A. All-Organic Permanent Memory Transistor Using an Amorphous, Spin-Cast Ferroelectric-like Gate Insulator // Advanced Materials. - 2004. - Vol. 16. - № 7. - P. 633 - 636.
25. DNA-Templated Carbon Nanotube Field-Effect Transistor / Kinneret Keren, Rotem S. Berman, Evgeny Buchstab, Uri Sivan, and Erez Braun // Science. - 2003. - № 21. - P. 1380 - 1382.
26. Wechsler D. Nanobiotechnology: Innovationen für Medizin und Technik Nanobiotechnology: Innovations for Medicine and Technics // Vakuum in Forschung und Praxis. - 2004. - Vol. 16. № 5:- P. 245-248.