

ОГЛЯДИ

УДК 621.3.049.771.12

ОТ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ К НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Руденко Н.Н., Силакова Т.Т.

Представлен краткий обзор литературы в области нанoeлектроники, который отражает анализ фундаментальных ограничений уменьшения размеров элементов интегральных схем, их числа на одном кристалле, повышения быстродействия и функциональных возможностей.

Слова «нанoeлектроника», «нанотехнология» стали в настоящее время «притчей во языцах». Что скрывается за этими словами? В какой мере они определяют дорогу в будущее электроники, и всего общества?

Бурное развитие микроэлектроники, более тридцати лет тому назад предсказанное «законом Мура», который сформулировал [1] вице-президент компании "Intel", гласит: "Функциональные возможности интегральных схем (ИС) будут удваиваться каждые двенадцать месяцев". Этот закон с небольшими оговорками выполняется все это время. Создание в 1947 году транзистора, получение патента на маскирующие свойства SiO_2 в 1956 году, создание первой интегральной схемы на германии в 1958 году, переход на «групповую технологию» изготовления приборов на кремнии в 1959 году и создание МОП транзистора в том же году - вот те предварительные вехи, которые определили будущее развитие кремниевой микроэлектроники. В основе ее лежало уменьшение размеров приборов, увеличение числа приборов на чипе-кристалле, увеличение размеров чипа и как итог, повышение быстродействия и функциональных возможностей. Именно «масштабирование» - уменьшение размеров приборов вывело вперед МОП, а затем КМОП ИС, которые на начальной стадии развития уступали по быстродействию биполярным ИС. И как всегда одной из главных движущих сил развития была экономика, которая заставляла увеличивать размеры кремниевых пластин с целью увеличения числа изготавливаемых ИС и уменьшения их себестоимости, а, следовательно, и цены.

Несмотря на всеобъемлющее применение полупроводниковых приборов и ИС во всех, практически без исключения, областях промышленности и повседневной жизни, основным барометром их прогресса остается область компьютерных технологий, основу которых в значительной мере определяют процессор и устройства памяти.

В конце 80-х годов XX столетия, оценивая темп развития микроэлектроники, журнал "Nature" сравнивал ее с авиацией: - «Если бы за последние 25 лет авиация развивалась также как полупроводники и вычислительная техника, то Боинг-767 можно было бы приобрести за 500 \$ и облететь на нем земной шар за 20 минут, истратив 19 литров бензина».

Еще более парадоксальные выводы следуют из сравнения темпов роста мирового продукта, роста продаж продукции электроники и полупроводниковой электроники, согласно [2], и аппроксимированные до момента по-

льного поглощения электроники полупроводниковой микроэлектроникой. Продолжая указанный процесс, легко дойти до времени, когда весь мировой продукт будет представлен микроэлектроникой. Абсурдность этого очевидна. В то же время эти зависимости показывают с одной стороны огромную роль информационных технологий в наступающем веке, но с другой неизбежность замедления их экспансии. Вопрос об ограничениях в развитии микроэлектроники вставал уже достаточно давно и связывался как с ростом затрат, обусловленных стоимостью все более совершенного оборудования, так и ограничениями физического и технологического порядка. Совсем недавно стоимость завода субмикронной технологии составляла 3 миллиарда долларов. Сейчас она приближается к 5 миллиардам.

Что же скрыто за этими баснословными цифрами? Где пределы развития ИС? Чего ожидают и прогнозируют на ближайшие годы?

Анализ фундаментальных ограничений уменьшения размеров элементов ИС и их числа на одном кристалле [3] основан на соотношении неопределенности (1) и тепловом пороге (2)

$$dE\tau > h \quad (1)$$

$$dE = p\tau > kT, \quad (2)$$

где dE - энергия переключения, p - расходуемая мощность акта переключения в ИС, τ , - время переключения, h - деленная на 2π постоянная Планка, k - постоянная Больцмана, T - температура.

В соответствии с этим анализом предельное быстродействие ЭВМ при 300 K может достигнуть $2 \cdot 10^{16}$ операций в секунду при временах переключения больших $2 \cdot 10^{-15}$ с. Однако желание увеличить число параллельно работающих процессоров от 10^5 до 10^{12} будет сопровождаться увеличением времени переключения с $2 \cdot 10^{-15}$ с до 10^{-6} с. Известно, что мощность p , выделяемая в устройстве, возрастает с уменьшением τ , что создает проблему интенсивного охлаждения ИС. В конечном счете, именно минимизация произведения $p \cdot \tau$ позволяет увеличивать быстродействие.

Одним из очень интересных выводов, который делается в работе, является заключение о необходимости увеличивать число параллельно работающих процессоров, имеющих минимальное p даже ценой увеличения τ . Именно по этому принципу работает человеческий мозг, имеющий 10^{12} нейронов со временами переключения около десяти миллисекунд. Пока эти пределы достаточно далеки. Минимальная мощность переключения в настоящее время больше 10^{-7} Вт, а известное число параллельно работающих процессоров меньше 10^5 . Поэтому, вероятнее всего, ограничения в прогрессе ИС будут определяться "менее фундаментальными" причинами.

Таковыми причинами в первую очередь являются технология и экономика. Но параллельно необходимо решать и физические задачи. Уменьшение размеров приборов за пределы области объемного заряда и длины свободного пробега носителей заряда требует пересмотра граничных условий и перехода к описанию баллистического движения носителей заряда, к разработке новой теории приборов [4], которая формируется.

Масштабирование МОП транзисторов включает не только уменьшение топологических размеров канала. Одновременно это требует уменьшение толщины диэлектрика при сохранении напряженности электрического поля для исключения эффекта пробоя, а также повышения концентрации в подзатворной области. Таким образом, пропорционально будут уменьшаться смещение, ток, емкость и возрастать сопротивление.

Несмотря на вынужденное повышение концентрации примеси в подзатворной области МОП транзистора с 10^{16} см⁻³ до 10^{17} и выше, число атомов примеси уменьшается с сотен при длине затвора порядка микрометра до единиц при длине затвора порядка 0,1 микрометра. Флуктуации этого числа приводят к флуктуации порогового напряжения транзисторов и затрудняют проектирование работы всей схемы. Дальнейшее повышение степени легирования приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны кремния и повышению собственной концентрации носителей заряда, что тоже очень неприятно. Уменьшение толщины подзатворного диэлектрика увеличивает вероятность туннелирования через него и изменяет физику работы прибора. Уменьшение длины канала транзистора приводит к разогреву электронов и туннелированию на ловушки в диэлектрике, что связано с ухудшением параметров МОП транзистора и деградацией всей ИС. Анализ показывает, что при уменьшении отношения смещения на затворе к его длине заметно уменьшается ток насыщения и крутизна прибора [5]. И все же на ближайшие 15 лет прогнозируется развитие традиционной кремниевой электроники с уменьшением размеров длины канала МОП транзистора и увеличением числа приборов на чипе-кристалле. Число транзисторов на чипе приблизится к 10^{11} , а длина затвора уменьшится до 20 нм.

Свои проблемы у ИС динамической памяти с произвольной выборкой (*DRAM*). В этом случае минимальные размеры половины характеристической области должны уменьшиться до 35 нм. В этом случае емкость МОП транзистора с SiO_2 в качестве подзатворного диэлектрика становится меньше емкости канала, в который передается заряд. Это требует «профилирования» - формирования МОП транзистора в вытравленных ямках, общая поверхность которых больше планарной площади.

Следующий шаг - переход на новые диэлектрики, такие как Ta_2O_5 и BST ($(Ba_xSr_{1-x})TiO_3$) с большими, чем у оксида и оксинитрида кремния значениями диэлектрической проницаемости. У BST это значение достигает 2000, но в пленках удалось реализовать 200, что уже само по себе не мало. Беда, что этот материал взаимодействует с Si и требуются буферные слои для предотвращения этого [6].

Еще одной важнейшей проблемой является процесс литографии. В конце 80-х в одном из американских журналов было заявлено: - «Если мы уйдем из фотолитографии, мы уйдем из промышленности». В случае использования в фотолитографии источников ультрафиолетового излучения с длиной волны 365 нм ограничения, связанные с дифракцией, начинаются уже при размерах в фотошаблонах порядка 0,5 мкм. Использование в про-

екционной фотолитографии «фотошаблонов с фазовым сдвигом», предложенных Левинсоном [7], с участками прозрачности, закрытыми «полуволновыми пленками», меняющими фазу проходящего света на 180° , позволяет спуститься до 0,35 мкм. Использование дорогих проекционных установок с внеосевым освещением и источников излучения с длинами волн 196 нм еще немного сдвигает границу. Но дальше? Дальше электронно-лучевая, ионно-лучевая и рентгеновская литографии [8,9,10]. Первая и вторая малопроизводительны, но необходимы и целесообразны при создании шаблонов-масок, третья достигается экспонированием в окнах дорогих ускорителей, но хотя и весьма продуктивна, требует усложнения масок напылением слоев вольфрама или золота, непрозрачных для рентгеновских лучей. Новые методы "printing" и "inking" [2] - непосредственной «печати» только начинают разрабатываться.

Минимальные размеры полосок шаблонов 7 нм удастся сформировать сканирующим силовым микроскопом [11], но он, скорее всего, будет использоваться для контроля и ремонта шаблонов.

Это далеко не полный перечень проблем, стоящих перед «кремниевой наноэлектроникой». Многие из них не имеют на данный момент полного решения, но ясно одно, что здесь проблемы экономики будут играть не последнюю роль. Примером этого является необходимость ухода от «групповой пластиночной технологии», когда технологический процесс изготовления ИС проводится на серии в несколько десятков пластин диаметров до 200 мм в течение более месяца. Прогнозируемое увеличение диаметра пластин до 450 мм к 2014 году [2] требует перехода на «контролируемую технологию отдельной пластины», так как стоимость пластины резко возрастает.

Анализируя вышесказанное, естественно поставить вопрос: - «Какова же роль шумовых процессов в развитии ИС?»

Одним из основных преимуществ цифровых интегральных схем являются достаточно высокие пороги переключения сигналов, что уменьшает роль шумовых процессов при их рассмотрении. Достаточно давно было известно, что МОП транзисторы обладают худшими шумовыми характеристиками, чем их аналоги с управляющим $p-n$ -переходом [12]. Вероятно, поэтому шумам в МОП транзисторах уделялось меньше внимания и в монографиях (исключением является [13]). Существует два подхода к природе шумов в МОП транзисторах - флуктуации подвижности носителей заряда в канале и флуктуация числа носителей [14].

Переход к нанотехнологиям, определившим процесс масштабирования в МОП ИС и создание приборов на квантово-размерных структурах, поставил вопрос о низкочастотных шумах типа $1/f$ в таких приборах. Формула Хоухе [15] для спектральной плотности мощности (СПМШ) S_R для однородного материала имеет вид $S_R/R^2 = \alpha/(fN)$, где R -сопротивление образца, α - постоянная Хоухе (первоначально определенная, как $2 \cdot 10^{-3}$), f -частота, N -общее число носителей заряда (электронов) в образце. Естественно, что уменьшение размеров приводит к уменьшению N , а, следовательно, к воз-

растанию шума типа $1/f$. В девяностых годах были сделаны попытки проанализировать изменение фликкер-шума при уменьшении числа ловушек в подзатворной области от 10^4 до 1 [16,17]. Экспериментальное исследование приборов с длиной канала от 0,35 до 0,1 мкм показало, что с уменьшением длины канала увеличивается разброс значений для мощности шума на частоте 10 Гц для приборов на одной пластине и для минимального размера достигает 10^6 при идентичных вольт-амперных характеристиках. Более того, для последних четко проявляется "телеграфный сигнал" (*random telegraph signal*), связанный с захватом и выбросом носителей заряда на отдельную ловушку. [12].

Результаты последних исследований МОП-транзисторов с длиной канала L от 0,35 до 0,1 мкм подтверждают указанные закономерности. Более того, анализ шумовых процессов усложняется для приборов, изготовленных по технологиям *SOI* и *SIMOX*, существенным влиянием ловушек не только в окисле под верхним затвором, но и в нижнем окисле и непосредственно в толще полупроводникового слоя. Кроме того, определяющую роль начинают играть ловушки вблизи стока в случае коротко-канальных транзисторов, вследствие захвата ими "горячих" носителей заряда [17]. Экспериментальное исследование МОП-транзисторов с L от 10 до 0,18 мкм и аморфными кремниевыми затворами показало, что, если пороговые смещения для них практически остаются постоянными как для n - так и для p -канальных, то для первых определяющей является вариация концентрации электронов, а для вторых вариация подвижности дырок [18]. При этом уровень шума в p -канальных МОП транзисторах оказывается меньше на порядок, чем для n -канальных, как в случае приповерхностного, так и в случае заглубленного канала [19].

Уменьшение линейных размеров требует и уменьшения толщины оксида. Исследования на ряде приборов с различной технологией изготовления показали, что уменьшение толщины оксида от 16 нм до 3,5 нм уменьшает приведенное значение СПМШ почти в 4 раза [20]. В то же время, замена двуоксида кремния на оксинитрид, обладающий лучшими диэлектрическими характеристиками, в МОП транзисторе с $L = 0,18$ мкм и толщиной диэлектрика 3,5 нм, как и ожидалось, привело к повышению шумового сигнала при 10 Гц на порядок, так как концентрация ловушек в оксинитриде значительно выше [21]. Наконец, сравнение МОП-транзисторов с поликремниевым затвором и затвором на основе поликристаллических пленок *Si-Ge* с $L = 0,18$ мкм и толщиной оксида 3,5 нм показало, что последние имеют более низкий уровень шума [22]. Одним из основных выводов, который содержится в большинстве статей, является положение о шумовой спектроскопии как о методе прогнозирования надежности приборов.

Все, что сказано, далеко не исчерпывает понятие нанoeлектронки, ибо затрагивает в основном топологические размеры.

В 1962 году Л.Келдыш обратил внимание на периодические структуры, размеры которых соизмеримы с длиной волны де-Бройля, а соответственно

проявляющие квантово-механические свойства [23]. Однако, настоящий интерес они привлекли в 1970 году, когда Эсаки "не удалось" создать на них еще один туннельный диод [24]. К тому времени интенсивно разрабатывались методы молекулярно-лучевой (пучковой) (МЛЭ) и парофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС ПФЭ), позволяющие формировать гетероэпитаксиальные пленки с толщиной вплоть до монокристаллического слоя. Указанные методы в сочетании с ионно-лучевым методом легирования и избирательного травления позволили формировать квантовые ямы, сверхрешетки (двумерные структуры), квантовые проволоки (одномерные структуры) и, наконец, квантовые точки-боксы (нульмерные структуры). В настоящее время это обширная область исследования физических явлений и приборного применения в наноэлектронике и оптоэлектронике [25,26]. Благодаря указанным технологиям удалось создать субмиллиметровые лазеры, модуляторы оптического излучения, диоды и транзисторы на резонансном туннелировании, одноэлектронные транзисторы [27, 28]. Часть указанных приборов уверенно захватывает рынок практического применения, часть требует изменения схемотехнического подхода или работает только при криогенных температурах [2]. Публикаций, посвященных этой области наноэлектроники и роли шумовых процессов настолько велик, что требует специального обзора.

Твердотельной наноэлектронике принадлежит будущее. Навстречу ей движется молекулярная электроника - в основе которой лежат большие молекулы, чьи размеры также составляют единицы и десятки нанометров.

Литература

1. По Т., Okazaki S. Pushing the Limits of Lithography/ Nature 2000 V.406 N31. P.156-160
2. Technology Roadmap for Nanoelectronics/European Commission IST programme Future and Emerging Technologies //Edit R.Compano Second Edition, November 2000
3. Okuto Y. Fundamental Performance Limit of Integrated Systems/Jpn. J.Appl.Phys.1996. V.35.P.612-615
4. Transport in Submicrometer Devices O.K.Ferry.R.O.Grondm / Ch. 12 VLSI Electronics Microstructure Science V.9 // Ed. N G.Einspruch 1985 Acad.Press.FNC. N.Y.
5. Keyes R.W. THE PHYSICS OF VLSI SYSTEMS/ Ch.4, 7,8 1987 Addison-Wesley Co Wokingham, England
6. Peercy P.S. The drive to miniaturization / Nature 2000 V.406 P. 1023-1026
7. Levinson M.D. Extending the Lifetime of Optical Lithography Technologies with Waveform Engineering /Jpn.J Appl.Phys. 1994. V.33 P.6756-6773
8. An Electron Beam Nanolithography System and its Application to Si Nanofabrication/K.Kurihara, K.Iwadate, H.Namatsu and others //Jpn/J/ Appl/phys 1995 V.34 Part.1 N.12B. p.6940-6946
9. Intense Focused Ion Beams for Nanostructuring / S Kalbitzer, Ch.Wilbertz, Th.Miller // Nanolithography: A Borderland between STM, EB, IB, and X-Ray Lithography Ed. M.Gentili, C.Giovanella, S.Selcy //Kluwer Acad.Publ. London. P. 137-148
10. Smith H.I., Schattenburg M.L. X-Ray Nanolithography: Limits, and Application to SUB-100 NM Manufacturing / см. 9. P. 103-119
11. Dagata J.A. STM Nanolithography and Characterization of Passivated Silicon and Gallium Arsenide // см.9. P. 189-196
12. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах. / М.Мир. 1986 Гл.5.
13. Жалуд,В., Кулешов В. Шумы в полупроводниковых устройствах/М. Сов. радио 1977.

14. McWhorter A.L., in "Semiconductor Surface Physics" Ed/R.H.Kingston 1956 Univ. Pensilv.Press Philadelphia.
15. Impact of Scaling Down on Low Frequency Noise in Silicon MOS Transistors /G.Ghibaude, O.Roux, J.Brini // Proc. Intem.Conf.24.11-27.111991 Kyoto, Japan Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations Ed/.T.Musha,S.Sato,M.Yamomoto 1991. Omsha Ltd. P.229-232
16. Low Frequency Fluctuations and 1/f Noise in Scaled Down Silicon CMOS Devices//Proc. 13th Intem.Conf. Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations 29.5-3.6.1995 Palanga Lithuania //Ed V.Bareikis, R.Katilius//World Scientific 1995. London P. 404-409
17. Lukyanchikova N. Lorentzian Components in Low-Frequency Noise Spectra of SOI MOSFETS Proc. 16* Intem.Conf. Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations //Ed G.Bosman World Scientific.2001 London P127-132 .
18. Low Frequency Noise Characterization in 0.18 mkm Technology N and P Channel MOSFETS./ Y. A.Allogo, M.Marin, M.DeMurcia and othrer//CM. [17] P. 137-140
19. Park N.. Kenneth K.O. A comparison of 1/f Noise of 0.25 mkm NMOS and PMOS Transistors from Deep-Subthreshold to Strong Inversion // см.[17] P.153-156
20. Fantini P., Vendrame L., Riccardi D. Low Frequency Noise in CMOS Transistors: an Experimental and Comparative Study on Different Technologies //см. [17], P. 145-152.
21. Flicker Noise in Submicron MOSFETS with 3.5 run Nitrided Gate Oxide /E.Simoen, M.Da Rold, C.Clayes and others //CM. [17] P. 177-184
22. Low Frequency Noise in Poly-Si and Poly SiGe-Gated MOSFETS // J.A.Johansen, H.Figenschau, X.Chen and others // см.' [17] P.161-164
23. Келдыш Л В. О влиянии ультразвука на электронный спектр кристалла ФТТ 1962. Т.4. С.2265-2267.
24. Esaki L Tsu R. Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors /IBM J. Res. And Dev. 1970 V. 14 P.61-65
25. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. //УМ. Мир 1989. 240 С.
26. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчии В.А. Основы наноэлектроники. Новосибирск 2000. 331 С
27. Гуляев А.М. Оптоэлектронные приборы на структурах с квантово-размерном эффектом / Итоги науки и техники Электроника ВИНТИ Т.20 1988. С. 129-159
28. Гуляев А.М. приборы на основе структур с квантово-размерным эффектом / Итоги науки и техники Электроника ВИНТИ Т.27.1990. С. 129-159

Руденко Н.М., Сілакова Т.Т.	Rudenko N.M., Silakova T.T.
Від мікроелектроніки до наноелектроніки	From microelectronics to nanoelectronics
Наведено стислий огляд літератури в галузі наноелектроніки, який відображає аналіз фундаментальних обмежень зменшення розмірів елементів інтегральних схем, їх кількість на одному кристалі, збільшення швидкодії й функціональних можливостей	The brief review of the literature in area nanoelectronics is submitted which reflects the analysis of fundamental restrictions of reduction of the sizes of elements of the integrated circuits, their number in one crystal, increase of speed and functionalities.