УДК 621.382.323 EDN BEDPEB

Обзор эволюции многозатворных полевых транзисторов: от FinFET к GAA MBCFET для технологических норм 5 нм и менее

Кэ Вэйсян*

Томский политехнический университет, проспект Ленина, 30, Томск, 634034, Россия

*E-mail: kwx20262027@163.com

Аннотация. В статье представлен обзор эволюции многозатворных полевых транзисторов от архитектуры FinFET до транзисторов с охватывающим затвором типа GAA MBCFET применительно к технологическим нормам 5 нм и менее. Рассмотрены физические принципы улучшения электростатического контроля за счёт уменьшения естественной длины экранирования, а также аналитические модели, описывающие подавление короткоканальных эффектов. Проанализированы квантово-размерные явления, возникающие при поперечных сечениях канала менее 5 нм, включая расщепление подзон и осцилляции тока стока. Особое внимание уделено сравнению FinFET и GAA-нанопроволок по таким параметрам, как подпороговый наклон, ток утечки, ток включения и отношение I_on/I_off. Показано, что GAA-структуры обеспечивают на порядок меньшие токи утечки, но уступают FinFET в абсолютной величине тока включения. Исследовано влияние основных источников технологической вариабельности – зернистости металлического затвора и шероховатости краёв плавника – на разброс порогового напряжения и тока включения в обеих архитектурах. Обсуждены эффекты температуры, интерфейсных ловушек и саморазогрева. Рассмотрены перспективные канальные материалы и их совместимость с многозатворными структурами. Описаны ключевые технологические этапы изготовления GAA MBCFET, включая эпитаксию чередующихся слоёв Si/SiGe, селективное травление и формирование внутренних спейсеров. Сделан вывод о том, что для узлов 5 нм и менее FinFET сохраняет преимущества по токовой нагрузке, однако GAA и MBCFET являются предпочтительными для сверхмаломощной логики благодаря рекордно низким токам утечки и подпороговому наклону, близкому к идеальному.

Ключевые слова: FinFET, GAA, MBCFET, многозатворные транзисторы, короткоканальные эффекты, квантовое ограничение, подпороговый наклон, ток утечки, вариабельность параметров, зернистость металлического затвора, шероховатость краёв плавника, кремний-на-изоляторе, безпереходные транзисторы, 5-нм технологический узел.

A review of the evolution of multigate field-effect transistors: from FinFET to GAA MBCFET for 5 nm technology nodes and below

Ke Weixiang*

Tomsk polytechnic university, Lenin Avenue, 30, Tomsk, 634034, Russia

*E-mail: kwx20262027@163.com

Abstract. This paper presents a review of the evolution of multigate field-effect transistors from the FinFET architecture to gate-all-around GAA MBCFET devices for technology nodes of 5 nm and below. The physical principles of electrostatic control improvement through reduction of the natural screening length are considered, along with analytical models describing short-channel effect suppression. Quantum confinement phenomena arising at channel cross-sections below 5 nm, including subband splitting and drain current oscillations, are analyzed. Special attention is paid to the comparison of FinFETs and GAA nanowires in terms of subthreshold swing, leakage current, drive current, and I_on/I_off ratio. It is shown that GAA structures provide an order of magnitude lower leakage currents but are inferior to FinFETs in absolute drive current. The impact of the main sources of process variability – metal gate granularity and line edge roughness – on the threshold voltage and drive current spread in both architectures is investigated. The effects of temperature, interface traps, and self-heating are discussed. Promising channel materials and their compatibility with multigate structures are reviewed. Key technological steps for GAA MBCFET fabrication, including epitaxy of alternating Si/SiGe layers, selective etching, and inner spacer formation, are described. It is concluded that for 5 nm nodes and below, FinFETs retain advantages in current drivability, whereas GAA and MBCFETs are preferable for ultra-low-power logic due to record-low leakage currents and subthreshold swing close to the ideal value.

Keywords: FinFET, GAA, MBCFET, multigate transistors, short-channel effects, quantum confinement, subthreshold swing, leakage current, parameter variability, metal gate granularity, line edge roughness, silicon-on-insulator, junctionless transistors, 5-nm technology node.

1. Введение

Плоские МОП-транзисторы долго были основой микроэлектроники, но при длине затвора меньше 15-20 нм у них резко выросли короткоканальные эффекты. Это привело к переходу на многозатворные структуры, где канал управляется полем с двух, трёх или всех сторон. Примеры – FinFET и транзисторы с охватывающим затвором (включая современный MBCFET с нанолистами). Для техпроцессов 5 нм и тоньше потребовалась тщательная оценка этих решений по электростатике, квантовым эффектам, техразбросу и практичности. Ключевым параметром, описывающим электростатический контроль, является естественная длина экранирования λ. Транзистор практически свободен от короткоканальных эффектов, если длина затвора L_G не менее 6λ. В однозатворной структуре λ определяется толщиной подзатворного диэлектрика и диэлектрической проницаемостью канала; в двойном затворе λ уменьшается вдвое, а в цилиндрическом GAA достигает минимальных значений. Именно поэтому многозатворные приборы позволяют масштабировать длину затвора до 5 нм и даже до 3 нм. FinFET стал промышленным стандартом начиная с 22-нм техпроцесса, однако для норм 5 нм и менее трёхсторонний охват канала становится недостаточным, и на смену приходит архитектура GAA/MBCFET.

2. Постановка задачи (Цель исследования)

Целью данной работы является систематический анализ эволюции многозатворных полевых транзисторов от архитектуры FinFET до транзисторов с охватывающим затвором типа GAA MBCFET применительно к технологическим нормам 5 нм и менее.

3. Методы и материалы исследования

В качестве материалов для исследования использованы рецензируемые научные статьи, обзорные публикации и материалы конференций, охватывающие период с 2002 по 2024 год. Основу анализа составили работы, посвящённые физике многозатворных транзисторов, их моделированию и экспериментальной реализации.

4. Полученные результаты

Планарный МОП-транзистор, десятилетиями служивший основой микроэлектроники, при уменьшении длины затвора ниже 20-15 нм столкнулся с непреодолимым ростом короткоканальных эффектов. Решением стало внедрение многозатворных архитектур, в

которых электрическое поле охватывает канал с двух, трёх или со всех сторон [1]. Среди таких структур наиболее известны FinFET, а также транзисторы с охватывающим затвором, в том числе их современная реализация – MBCFET с несколькими нанолистами. Переход к нормам 5 нм и менее потребовал детального анализа этих архитектур с точки зрения электростатики, квантовых эффектов, технологической вариабельности и практической реализуемости. Электростатический контроль в многозатворном транзисторе описывается уравнением Пуассона. Вклад электрического поля в направлении от истока к стоку может быть ослаблен за счёт усиления поперечных составляющих. Ключевым параметром здесь является естественная длина λ, характеризующая проникновение поля от истока и стока в канал. Транзистор практически свободен от короткоканальных эффектов, если длина затвора L_G не менее шести λ. В однозатворной структуре λ определяется толщиной подзатворного диэлектрика и диэлектрической проницаемостью кремния, в двойном затворе λ уменьшается вдвое, а в цилиндрическом GAA достигает минимальных значений. Именно поэтому многозатворные приборы позволяют масштабировать длину затвора до 5 нм и даже до 3 нм [1].

FinFET стал промышленным стандартом начиная с 22-нм техпроцесса. В работе Бина Ю с соавторами был изготовлен двойной затвор FinFET с длиной затвора 10 нм и шириной плавника 12 нм – на тот момент самые миниатюрные из подобных транзисторов [2]. Приборы создавались на кремнии-на-изоляторе с каналами на боковых стенках, имеющих ориентацию. Это обеспечило рекордную подвижность дырок – примерно вдвое выше, чем в планарных транзисторах с ориентацией. При длине затвора 10 нм подпороговый наклон составил 125 мВ/дек для n-канала и 101 мВ/дек для p-канала, а ток в открытом состоянии достиг 446 и 356 мкА/мкм соответственно при напряжении питания 1,2 В. При увеличении длины затвора до 55 нм подпороговый наклон снижался до 64-68 мВ/дек, приближаясь к идеальному [2]. Однако дальнейшее уменьшение ширины плавника приводит к резкому росту паразитного сопротивления и ухудшению управляемости.

Альтернативой классическому инверсионному FinFET стал безпереходный многозатворный транзистор, предложенный Чи-Ву Ли и его коллегами. В таком приборе исток, канал и сток легированы однородно с высокой концентрацией, а p-n-переходы отсутствуют. Это упрощает технологию, снижает вариабельность параметров и улучшает электростатический контроль [3]. Моделирование показало, что безпереходный FinFET с длиной затвора 10 нм имеет подпороговый наклон ниже 80 мВ/дек и DIBL заметно меньше, чем у инверсионного аналога. При масштабировании до 5 нм подпороговый наклон составляет

72 мВ/дек, а ток включения достигает 3000 мкА/мкм [3]. Однако для полного обеднения канала в выключенном состоянии требуется толщина полупроводниковой пластины менее 10 нм, что делает безпереходные приборы чувствительными к флуктуациям размера плавника.

При переходе к технормам 5 нм и менее трёхсторонний охват канала становится недостаточным. На смену приходит архитектура GAA, в которой затвор окружает канал со всех четырёх сторон. В современном варианте MBCFET используется несколько кремниевых нанолистов, расположенных вертикально и полностью окружённых затвором, что увеличивает эффективную ширину канала без расширения площади транзистора [4]. Сравнение FinFET и GAA MBCFET, выполненное Дас с соавторами, показало, что в подпороговой области GAA-приборы имеют на порядок меньший ток утечки и лучшее подавление DIBL. В открытом состоянии, однако, FinFET при одинаковых размерах обеспечивает на 20–58% больший ток включения, что объясняется меньшим квантовым ограничением [4]. При длине затвора 10 нм отношение I_on/I_off у GAA-нанопроволоки достигает 13·10^4, тогда как у FinFET той же длины – лишь около 1·10^4, что делает GAA предпочтительным для сверхмаломощных приложений.

При поперечных сечениях канала менее 5 нм начинают доминировать квантово-размерные эффекты. Носители оказываются сильно ограничены в двух направлениях, энергетический спектр расщепляется на подзоны, а плотность состояний приобретает пикообразный вид. Как отмечал Ж.-П. Колинж, в таких условиях на вольтамперных характеристиках могут наблюдаться осцилляции тока стока при изменении напряжения на затворе, соответствующие последовательному заполнению подзон [1]. Экспериментально эти осцилляции зарегистрированы при комнатной температуре в ультратонких кремниевых нанопроволоках. Кроме того, одномерное квантование увеличивает эффективную ширину запрещённой зоны. Полуметаллы при диаметре нанопроволоки менее 100 нм ведут себя как полупроводники, а в олове можно реализовать транзистор с металлическими истоком и стоком, и полупроводниковым каналом без легирования [1]. Такие переходы «металл–полупроводник» открывают возможности для новых типов приборов, но одновременно усиливают вариабельность характеристик.

Вариабельность становится одной из главных проблем при масштабировании. Основные источники случайных флуктуаций – зернистость металлического затвора и шероховатость краёв плавника. В работе Надя с соавторами проведено прямое сравнение FinFET и GAA-нанопроволоки с длиной затвора 10-25 нм с использованием трёхмерного моделирования Монте-Карло [5]. В подпороговой области FinFET устойчивее к вариациям

MGG и LER, поскольку управление осуществляется боковыми стенками. Однако в открытом состоянии картина меняется: для 10,7-нм FinFET стандартное отклонение тока включения из-за MGG на 44-64% выше, чем у 10-нм GAA. Причина в том, что в GAA электроны сильнее квантово ограничены и в среднем дальше от интерфейса затвор–диэлектрик, поэтому неоднородность работы выхода металла сказывается слабее. Для LER нанопроволочные GAA страдают сильнее из-за меньшей высоты канала: при среднеквадратичной высоте неровностей 0,8 нм вариация тока включения у GAA на 23-39% выше, чем у FinFET. Ориентация канала обеспечивает лучшую устойчивость к обоим типам вариаций по сравнению с ориентацией (100) для обеих архитектур [5].

Важно также учитывать влияние температуры и интерфейсных ловушек. В обзоре Дас с соавторами показано, что повышение температуры приводит к ухудшению подпорогового наклона и снижению порогового напряжения в FinFET, причём для узлов 5 нм и менее эти эффекты становятся более выраженными из-за усиленного саморазогрева в узких плавниках [4]. Кроме того, наличие положительных или отрицательных фиксированных зарядов на границе раздела затвор–диэлектрик может существенно смещать пороговое напряжение и увеличивать токи утечки. В GAA-нанопроволоках из-за полного окружения канала влияние интерфейсных состояний более равномерно распределено, что при определённых условиях делает их менее чувствительными к локальным ловушкам по сравнению с FinFET, где угловые эффекты создают области повышенной плотности тока и уязвимости [4]. Тем не менее, для обеих архитектур требуется тщательная оптимизация подзатворного диэлектрика: использование высоко-K материалов, таких как HfO_2, Al_2O_3 или $ZrTiO_4$, позволяет снизить прямое туннелирование и улучшить управляемость.

Для дальнейшего повышения производительности при масштабировании ниже 5 нм активно исследуются альтернативные канальные материалы. Германий, благодаря более высокой подвижности электронов и дырок, а также узкой запрещённой зоне, рассматривается как замена кремния в FinFET и GAA. В работе, цитируемой в обзоре, показано, что замена Si на SiGe в безпереходном FinFET повышает подвижность дырок на 28%, а электронов – на 9%, при этом ток насыщения возрастает на 38% [4]. Однако германиевые каналы страдают от более высоких токов утечки из-за меньшей ширины запрещённой зоны, поэтому требуют ещё более совершенного электростатического контроля – что как раз обеспечивает GAA-архитектура. Среди соединений III-V наиболее перспективны InGaAs и GaAs. Экспериментально показано, что GaAs-многоканальный FinFET с эффектом механического напряжения демонстрирует увеличение тока включения на 159%, а крутизны – на 252% по сравнению с ненапряжённым

аналогом [4]. Тем не менее, интеграция III-V материалов на кремниевые подложки остаётся технологически сложной из-за рассогласования постоянных решёток и возникновения дислокаций.

Помимо постоянного тока и подпороговых характеристик, для реальных схем важны высокочастотные и шумовые параметры. В аналитическом моделировании FinFET и GAA показано, что транзисторы с охватывающим затвором имеют более низкий уровень фликкер-шума при одинаковых геометрических размерах благодаря меньшей плотности интерфейсных состояний на единицу площади канала. В то же время, из-за более сильного квантового ограничения, в GAA-нанопроволоках наблюдается повышенный уровень случайного телеграфного шума при комнатной температуре, что может ограничивать их применение в аналоговых блоках с высоким отношением сигнал/шум [4]. В цифровых схемах, напротив, GAA демонстрирует преимущества: на его основе построены 6T-ячейки SRAM с площадью, сравнимой с FinFET той же технологии, но с меньшей статической мощностью. В работе, посвящённой 3-нм узлу, сообщается, что кольцевые генераторы на MBCFET работают с меньшей задержкой на элемент по сравнению с FinFET того же масштаба [4].

Технологически переход от FinFET к GAA MBCFET возможен на том же оборудовании, но требует дополнительных операций. Для формирования нанолистов создают чередующиеся слои Si и SiGe, затем селективно удаляют SiGe, оставляя подвешенные кремниевые нанолисты, после чего осаждают подзатворный диэлектрик и металл методом атомно-слоевого осаждения. Критический этап – формирование внутренних спейсеров между нанолистами для изоляции истока и стока от затвора. При оптимизации содержания германия в SiGe достигается селективность травления 150:1 по отношению к кремнию с прямоугольным фронтом травления [4]. GAA MBCFET уже внедрён в серийное производство начиная с 3-нм узла, однако остаются вызовы: контроль размеров нанолистов, однородность работы выхода затвора на всех четырёх сторонах каждого канала и управление саморазогревом, который в многоэтажных структурах усиливается из-за повышенной тепловой изоляции между листами [4]. Кроме того, для литографии на узлах 3 нм и менее требуется экстремальный ультрафиолет, что удорожает производство.

Сравнительный анализ подпорогового наклона, проведённый в обзорной статье, показывает, что FinFET на 14-нм узле имеет SS в диапазоне 65-85 мВ/дек, тогда как GAA-нанопроволока на 10-нм узле достигает 68-71 мВ/дек, а MBCFET с несколькими каналами – значения 63-65 мВ/дек [4]. Что касается порогового напряжения, то у FinFET наблюдается больший разброс из-за угловых эффектов и флуктуаций ширины плавника. В то же время,

туннельные полевые транзисторы на основе SOI демонстрируют SS менее 62 мВ/дек, но их ток включения на два-три порядка ниже, что неприемлемо для высокопроизводительной логики. Таким образом, GAA MBCFET занимает оптимальную нишу: достаточно высокий ток включения при сверхмалых токах утечки.

5. Выводы

Как итог, многозатворные структуры прошли путь от планарного МОП-транзистора через FinFET к GAA и MBCFET. Каждый шаг улучшал электростатический контроль и снижал токи утечки, но ценой усложнения технологии и появления новых физических эффектов. Для узлов 5 нм и менее FinFET сохраняет преимущества в токовой нагрузке и устойчивости к вариациям в открытом состоянии, однако GAA и MBCFET обеспечивают на порядок лучшее отношение I_on/I_off и подпороговый наклон, близкий к идеальному. Дальнейшее развитие, вероятно, будет связано с многомостовыми каналами, использованием материалов с высокой подвижностью и сегнетоэлектрических слоёв для отрицательной ёмкости, что позволит преодолеть предел подпорогового наклона 60 мВ/дек. Перспективными также являются вертикальные GAA-структуры и транзисторы на основе двумерных материалов, которые уже показали подпороговый наклон 63 мВ/дек при токе включения, сравнимом с кремниевыми аналогами [4].

Список литературы

1. Colinge, J.-P. Multigate transistors: Pushing Moore's law to the limit / J.-P. Colinge // Proceedings of the International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). – 2014. – P. 313-316. – DOI: 10.1109/SISPAD.2014.6931626.
2. Das, R.R. FinFET to GAA MBCFET: A Review and Insights / R.R. Das, T.R. Rajalekshmi, A. James // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 1-22. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3384428.
3. Performance estimation of junctionless multigate transistors / C.-W. Lee, I. Ferain, A. Afzalian, R. Yan, N.D. Akhavan, P. Razavi, J.-P. Colinge // Solid-State Electronics. – 2010. – Vol. 54, No. 2. – P. 97-103. – DOI: 10.1016/j.sse.2009.12.003.
4. FinFET Versus Gate-All-Around Nanowire FET: Performance, Scaling, and Variability / D. Nagy, G. Indalecio, A.J. Garcia-Loureiro, M.A. Elmessary, K. Kalna, N. Seoane // IEEE Journal of the Electron Devices Society. – 2018. – Vol. 6. – P. 332-340. – DOI: 10.1109/JEDS.2018.2804383.

5. FinFET Scaling to 10nm Gate Length / B. Yu, L. Chang, S. Ahmed, H. Wang, S. Bell, C.Y. Yang, C. Tabery, C. Ho, Q. Xiang, T.J. King, J. Bokor, C. Hu, M.-R. Lin, D. Kyser// Technical Digest - International Electron Devices Meeting. – 2002. – P. 251-254. – DOI: 10.1109/IEDM.2002.1175825.