

УДК 621.382

И.И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск,
Республика Беларусь

ПРОБЛЕМЫ И ПРИНЦИПЫ ФИЗИКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.

III. Численное моделирование в рамках полуклассического подхода

В данной части работы выделены и рассмотрены проблемы и принципы численного моделирования в рамках полуклассического подхода приборных структур микроэлектроники.

Введение

Можно выделить два качественно различных подхода к построению и реализации моделей отмеченных классов в рамках третьего метода синтеза [1, 2] — **метод региональных приближений и методы численного моделирования**. Возможна, конечно же, и их комбинация. Метод региональных приближений традиционно используется при построении известных упрощенных моделей и основывается на принципе суперпозиции [3, 4]. Учитывая обширную литературу по применению этого метода, в данной части работы сосредоточим внимание на вопросах численного моделирования приборных структур микроэлектроники.

Анализ показывает, что с численным моделированием элементов связано четыре комплекса проблем, а именно [5]: 1) физические; 2) математические; 3) разработки программного обеспечения; 4) определяемые вычислительной техникой, оборудованием, идентификацией параметров моделей и заданием исходных данных. Рассмотрим эти проблемы и принципы моделирования, следуя, в основном, работе [5] с учетом произошедших перемен в анализируемой области.

Физические проблемы

Так как строгие методы полуклассического подхода практически не реализуемы, то традиционным стал переход к кинетическому уравнению Больцмана (КУБ) [2]. Это упрощение может считаться "началом отсчета" своеобразной "системы координат" следующей (после неполноты описа-

ния) важной проблемы моделирования элементов ИС — **проблемы компромисса "адекватность — реализуемость" модели (AP-проблема)** [5]. С одной стороны, желательна наибольшая степень адекватности и универсальности модели. С другой стороны, хотелось бы иметь модель с приемлемой экономичностью, которая является количественной характеристикой реализуемости модели. Ранее [1] уже отмечалась противоречивость этих требований. Поэтому одной из ключевых проблем численного моделирования приборных структур и является достижение приемлемого для конкретного случая (случаев) компромисса между адекватностью, универсальностью и реализуемостью (экономичностью) модели.

Анализируя рассмотренные классы моделей [2], можно прийти к выводу, что численные (дискретные) модели верхних иерархических уровней обычно характеризуются большей адекватностью и, как правило, меньшей экономичностью, а часто вообще трудно реализуемы. При этом видно, что даже для исходных моделей верхних иерархических уровней свойствен ряд по существу вынужденных физических предположений. В моделях же нижних иерархических уровней, в частности диффузионно-дрейфовых, используется много допущений. В связи с этим у неискушенного читателя может возникнуть естественный и простой вопрос: как тогда достигаются на практике результаты, характеризующиеся достаточной адекватностью и точностью? Ответить на него не просто.

Для ответа полезно привлечь понятие "**грубости модели**", введенное А. А. Андроновым. Так, с математической точки зрения, то, что описано в [2], называется редукцией, т. е. сведением системы дифференциальных уравнений, содержащей большое число уравнений (неизвестных), к более простой системе уравнений, содержащей меньшее число уравнений. Редуцированная система уравнений называется базовой, если она удовлетворяет следующим требованиям [6]:

- система должна описывать основные черты изучаемого явления;
- система должна содержать минимальное число переменных и параметров;
- система должна быть "грубой" по А. А. Андронову, т. е. при малом изменении параметров и небольшом расширении базовой системы уравнений решения должны меняться слабо.

Вследствие физической обоснованности введенных предположений системы уравнений исходных моделей рассмотренных классов [2] должны удовлетворять основным требованиям базовой системы уравнений, т. е. характеризоваться опре-

деленной структурной устойчивостью или грубостью. Таким образом, *главная цель, которой необходимо добиваться при упрощении сложной системы уравнений и получении базовых моделей, — количество информации необходимо сократить, но не потерять при этом действительно ценную!* Именно это утверждение можно считать одним из основных принципов моделирования элементов.

Имеющийся опыт моделирования приборных структур микроэлектроники показывает, что исходные модели отмеченных классов и многие их следствия [2] действительно являются *базовыми моделями* в указанном выше смысле. С их помощью и были установлены (или подтверждены) основные физические закономерности функционирования самых разнообразных полупроводниковых приборов и структур, которые согласуются с многочисленными экспериментальными данными. Это очень важно!

Понятно, что ту или иную модель применяют в зависимости от цели моделирования и возможностей исследователя. Главной при этом является отмеченная АР-проблема. Она усугубляется тем, что ввиду большого числа примененных приближений и допущений, иногда не осознаваемых, в общем случае нам не известна заранее точность используемой в каждом конкретном случае модели, а следовательно, неясна степень ее адекватности (*проблема оценки адекватности модели*). Заметим, что в [2] были даны лишь общие оценки для подходов. Настройка или "подгонка" параметров моделей на конкретные экспериментальные результаты, к сожалению, также в полной мере не отвечает на данный вопрос. Наиболее грамотный ответ на вопрос о степени адекватности модели может быть получен после ее одновременного сравнения с моделью заведомо более высокой адекватности моделирования и с экспериментальными данными. Хотя и это далеко не идеальный выход из положения.

Итак, оценка адекватности конкретных моделей осложняется следующими причинами [5, 7]: 1) наиболее адекватные кинетические модели и методы Монте-Карло — труднореализуемы; 2) применяется достаточно большое число приближений и в общем случае неясна их корреляция; 3) нет полной уверенности в учете в модели всех наиболее важных факторов; 4) существуют неопределенности в зависимостях параметров моделей от различных факторов; 5) не простым является процесс идентификации параметров моделей; 6) имеются погрешности в задании исходных данных и др.

Причины 1 и 2 достаточно хорошо понятны из предыдущего рассмотрения.

Проанализируем причины 3 и 4. Действительно, в каждом конкретном случае теоретического исследования приборной структуры нет полной уверенности в учете всех важных факторов в модели. Это проистекает, прежде всего, из приближенного характера даже исходных уравнений для каждого класса моделей. Имеются неопределенности

при задании граничных условий (*проблема граничных условий*). Многое также зависит от условий замыкания и других вспомогательных соотношений (*проблема замыкания*), которые могут быть различными [2]. Хотя эти вопросы достаточно неплохо в настоящее время отработаны для диффузионно-дрейфовых моделей, однако даже для них не всегда ясно, все ли важные нюансы взаимодействия с окружающей средой учтены. Так, даже при использовании достаточно общих физических принципов при построении граничных условий на контактах и границах раздела на практике, как правило, применяются дополнительные допущения. Например, при рассмотрении границ раздела двух сред в законе Остроградского—Гаусса часто полагается отсутствие поверхностного заряда. Разногласия могут вызвать условия замыкания в диффузионно-дрейфовых (тепловых) и квазигидродинамических (тепловых) моделях, описывающих плотности мощности. Для гидродинамических и квазигидродинамических моделей, методов Монте-Карло частиц сложности возникают при задании граничных условий на контактах. В гидродинамических моделях серьезные возражения вызывает условие замыкания для потока теплоты (см. 16) в [2]), в связи с чем даже предлагается использовать более строгое уравнение для третьего (и выше) момента функции распределения несмотря на не менее сложную и в этом случае проблему замыкания [8]. В целом, в литературе дискуссию вызывает определенная несогласованность, связанная с эффективной массой, электронной температурой и потоком теплоты традиционных (только для электронов) гидродинамических моделей в случае непараболических зонных структур. Таким образом, возражения вызывают часто используемые законы Фурье и Видемана—Франца. Серьезный недостаток предлагаемых модификаций, однако, заключается в усложнении моделей, иногда существенном [8], даже для одного типа носителей — электронов. Более сложные соотношения выводятся и для плотностей токов в квазигидродинамическом приближении в условиях сильного электронно-дырочного рассеяния.

Значительные неопределенности могут также вносить зависимости параметров моделей от некоторых факторов (*проблема вспомогательных моделей и электрофизических параметров*). Наиболее удовлетворительна здесь опять же ситуация для диффузионно-дрейфовых моделей приборных структур, в частности, на кремнии [3—5, 7]. Ситуация менее удовлетворительна для других материалов, а также при описании свойств поверхностей раздела различных сред. Модели кинетических коэффициентов и ряда других электрофизических параметров (прежде всего времен релаксации) гидродинамических и квазигидродинамических моделей разработаны еще хуже. С физической точки зрения это вполне понятно. Так, подвижности в гидродинамической и квазигидродинамической моделях должны быть функциями средней энергии носите-

лей, а точнее, функционалами функции распределения, а не локального электрического поля, как в диффузионно-дрейфовых моделях. Кроме того, предполагается, что температура носителей отлична от решеточной. Следовательно, модели ряда коэффициентов должны быть, строго говоря, модифицированы в указанных моделях по сравнению с применяемыми в диффузионно-дрейфовых. В связи с этим для моделей повышенной адекватности часто используются параметры, определенные для однородных полей и материалов с помощью методов Монте-Карло, что вызывает справедливые сомнения в корректности их применения в некоторых случаях (сильные поля, неоднородности и др.) для приборных структур. В работе [9] предложен перспективный подход к возможному решению этой проблемы, однако авторы при этом используют, хотя и подобные уравнения, но уже квантовой гидродинамики (не полуклассический подход). Значительные усилия прикладываются и для уточнения аппроксимаций для зонных структур и таких параметров, как скорости рассеяния по различным механизмам для методов Монте-Карло.

Важно обратить внимание на то, что предпочтение в диффузионно-дрейфовых моделях отдается эмпирическим моделям параметров, а не теоретическим. Аналогичный подход, как правило, приводит к неплохим результатам в моделях повышенной адекватности, в частности, в гидродинамических, квазигидродинамических и комбинированных методах Монте-Карло частиц.

Причины 5 и 6 будут более глубоко понятны из последующего рассмотрения. Здесь лишь заметим, что чем выше точность исходных данных (геометрические размеры, профиль легирования и др.), тем меньше неопределенности в них скажутся на точности моделирования реальных приборных структур. Процесс же идентификации параметров чрезвычайно важен и, в сущности, часто компенсирует как погрешности, вызванные сделанными в моделях допущениями на всех этапах их построения и реализации, так и неточности в исходных данных.

Таким образом, *заранее обычно допустима лишь общая оценка типа: адекватность модели данного класса будет выше, чем другого, более низкого иерархического уровня*. Учитывая отмеченные проблемы и неопределенности, это возможно далеко не в каждом конкретном случае, поэтому и полезны общие оценки, указанные в [2].

В то же время при анализе элементов зачастую не может быть установлено четких границ: для одних характеристических размеров необходимо использовать полуклассический подход, а для других — квантовомеханический. Так, даже в обычных, не с субмикрометровыми размерами, элементах кремниевых интегральных схем могут существовать локальные области, где важны квантовомеханические эффекты. Это было установлено давно в МОП-структурах в условиях сильной инверсии.

В результате могут быть ощутимые погрешности в расчете концентрации подвижных носителей заряда и поверхностного потенциала [10].

По изложенным причинам *адекватность модели обычно оценивают при описании внешних электрических характеристик, пренебрегая возможными локальными возмущениями в описании внутренних*. Именно данному способу, по-видимому, в большей степени и соответствуют указанные в [2] общие оценки.

Тем не менее, несмотря на отмеченные сложности были предприняты значительные усилия по оценке адекватности моделей разнообразных приборных структур на различных материалах. Литература по данному вопросу обширна, поэтому здесь приведем только основные оценки и рекомендации.

Рассмотрим сначала результаты для приборных структур на кремнии. Здесь привлекались модели различных классов, а именно: методы Монте-Карло частиц, гидродинамические, квазигидродинамические, диффузионно-дрейфовые и комбинированные. Так, в работах [11—14] было показано, что для биполярных транзисторов с толщиной базы $W_6 \in [30 \text{ нм}, 150 \text{ нм}]$ результаты расчета внешних (интегральных) характеристик по диффузионно-дрейфовой, квазигидродинамической, комбинированной моделям и методу Монте-Карло обычно отличаются не более, чем на 10 %. В худшем случае при $W_6 = 30 \text{ нм}$ отличие по току коллектора составляет около 25 % [11]. Аналогичные оценки получены в [14] при расчете времени переноса через базу. Отметим, что в указанных работах исследовались основные внешние электрические характеристики биполярных транзисторов, а именно: ток коллектора, коэффициент усиления β , граничная частота f_T , время переноса через базу. Подобные результаты были получены и для диодов. Следовательно, для кремниевых биполярных структур приведенный в [2] диапазон целесообразного применения диффузионно-дрейфового приближения ($L_{\text{хар}} \geq 0,1 \text{ мкм}$) корректен в соответствии с принятым способом оценки.

Ситуация более сложна для субмикрометровых униполярных элементов кремниевых интегральных схем. Это связано с двумя основными причинами [5, 7]:

- перенос носителей заряда осуществляется в очень узкой приповерхностной области;
- для структур характерны большие электрические поля.

Так как канал МОП-транзистора в условиях сильной инверсии является, по существу, двумерным (2D) электронным газом, то ставится вопрос о необходимости разработки квантовомеханических моделей расчета ряда характеристик МОП-структур. В то же время с использованием моделей только полуклассического подхода из отмеченной иерархии не удалось убедительно подтвердить принципиальную необходимость учета ряда кине-

тических эффектов при расчете вольт-амперных характеристик (ВАХ) самых разнообразных элементов даже при длине канала $L_k \approx 0,1 \dots 0,3$ мкм.

Убедительные результаты, подтверждающие последнее утверждение, приведены в статье [15]. Так, максимальное отличие результатов, полученных с помощью диффузионно-дрейфовых моделей и моделей более высокого уровня адекватности, по току стока I_c составляет около 27 % при очень малой длине канала в 0,1 мкм. Еще меньшее отличие получено (до 20 %) для n - и p -канальных МОП-транзисторов в работах [16, 17]. Очевидно, что это приемлемая для практики точность. Аналогичные погрешности (до 30 %) получаются при расчете крутизны и граничной частоты f_T [16]. Исключением, по-видимому, являются случаи расчета токов, обусловленных ударной ионизацией. В таких случаях, однако, корректировка диффузионно-дрейфовой модели может быть с успехом осуществлена с использованием более адекватных моделей скорости ударной ионизации и некоторых других параметров [18]. В связи с этим уместно подчеркнуть, что даже в традиционных диффузионно-дрейфовых моделях эффекты горячих носителей заряда все же частично учитываются путем включения зависимостей подвижности от напряженности электрического поля и добавления скорости ударной ионизации в модель рекомбинации — генерации.

В чем же секрет того, что диффузионно-дрейфовые модели обеспечивают приемлемую точность расчета тока стока для МОП-транзисторов со сверхмалыми длинами канала? Оказывается, что в области отсечки канала вклад эффекта всплеска скорости в ток I_c во многом компенсируется дополнительным падением концентрации подвижных носителей заряда в ней же [19].

Важно подчеркнуть, что диффузионно-дрейфовые модели с успехом использовались при создании и анализе первых реальных МОП-транзисторов с длинами каналов и затворов в диапазоне 70—130 нм [20—22]. Как отмечают авторы этих статей, без применения известных программ FIELDAY и MINIMOS, в основу которых положены двумерные численные диффузионно-дрейфовые модели, разработка таких МОП-структур была бы крайне затруднительна. Опыт использования диффузионно-дрейфовых моделей положителен и при синтезе новых приборных структур на основе кремния с экстремально малыми длинами затвора. Так, в работе [23] диффузионно-дрейфовая модель с модификацией для учета туннельного тока применялась для исследования элемента с длиной канала $L_k \approx 16$ нм. Это уже выход на указанный в [2] предел. Заметим, что авторами [23] отмечалось, что вклад туннельного тока не столь существенен относительно тока, который получен с помощью только диффузионно-дрейфовой модели, и составляет около 15 %.

Таким образом, **диффузионно-дрейфовые модели допустимо использовать для получения количественной информации о внешних электрических ха-**

рактеристиках приборных структур на кремнии с длинами $L_{хар}$ до 0,1 мкм. Полезные качественные и полуквантитативные оценки могут быть получены вплоть до $L_{хар}$ в несколько длин волн де Бройля λ_B .

В чем же причины того, что диффузионно-дрейфовые модели продолжают "работать"? Наиболее важными из них являются:

- возможное подобие моделей полуклассического и квантовомеханического подходов [2];
- в настоящее время показано, что с использованием более адекватных моделей для кинетических коэффициентов точность расчета плотности тока с помощью диффузионно-дрейфовых моделей может быть повышена вплоть до уровня кинетического моделирования. В целом, расширение диапазона справедливости диффузионно-дрейфовых моделей часто достигается с помощью более адекватных моделей подвижностей, скорости ударной ионизации, эффектов сильного легирования и др.;
- детальные исследования показывают [24], что в кремниевых биполярных и униполярных приборных структурах существуют области с ограничением плотности тока, которые неплохо описываются уравнениями для плотности тока диффузионно-дрейфовой модели;
- принципы, используемые при задании граничных условий в различных моделях полуклассического подхода, — аналогичны, носят достаточно общий характер и, как правило, не нарушают существенным образом адекватность моделей.

Следовательно, **исходная диффузионно-дрейфовая модель [2] обладает приемлемой грубостью при описании внешних электрических характеристик приборных структур микроэлектроники на кремнии.**

Тем не менее, необходимо сделать несколько замечаний. Проведенные исследования показали, что для более адекватного описания **внутренних характеристик** учет эффекта всплеска скорости и других эффектов горячих носителей заряда желателен уже при $L_{хар} \leq 0,2-0,3$ мкм для МОП-транзисторов. Может также понадобиться учет в различных моделях полуклассического подхода разнообразных механизмов рассеяния и даже введение квантовомеханических коррекций. Без них, в частности, невозможен расчет тока затвора, обусловленного не только термоэлектронной эмиссией, но и туннелированием носителей заряда, а также ВАХ затвора для ультратонких диэлектриков. Случаями, требующими дополнительного повышенного внимания, являются также пониженные температуры окружающей среды и сверхбыстрые переходные процессы.

Таким образом, **для моделирования физических процессов в приборных структурах на кремнии целесообразно использование диффузионно-дрейфовых (с возможной корректировкой моделей ряда параметров) и комбинированных моделей. Именно с помощью моделей данных двух классов наиболее удачно компромиссно разрешается AP-проблема.** В ком-

бинированных моделях не простыми задачами, однако, являются выделение областей необходимого применения моделей повышенной адекватности и задание соответствующих граничных условий для "сшивки" моделей.

Подобные исследования по оценке адекватности моделей были проведены для приборных структур на GaAs и других полупроводниках. При этом с помощью методов Монте-Карло частиц, гидродинамических, квазигидродинамических, диффузионно-дрейфовых и комбинированных моделей анализировался широкий спектр приборов, а именно: диоды (типа $n^+ - n - n^+$, лавинно-пролетные, с двойной инжекцией и др.), биполярные транзисторы, транзисторы с проникаемой базой, гетероструктурные биполярные транзисторы, полевые транзисторы со структурой металл — полупроводник, гетероструктурные полевые транзисторы с селективным легированием и др. Исследовалось влияние на характеристики следующих кинетических эффектов и явлений: разогрева и охлаждения носителей заряда, всплеска дрейфовой скорости, ударной ионизации, междолинных переходов, термоэлектронной эмиссии, квазибаллистического и баллистического транспорта. Результаты показывают, что отмеченные кинетические эффекты имеют гораздо более существенное влияние на приборные структуры на GaAs, InP и других материалах с более легкими, чем у кремния, эффективными массами. В частности, эффект всплеска скорости для GaAs важно учитывать для элементов с субмикрометровыми размерами с $L_{\text{хар}} \leq 1$ мкм при $T = 300$ К. Полезные количественные оценки при расчете внешних электрических характеристик с помощью диффузионно-дрейфовых моделей могут быть, по-видимому, получены в диапазоне до $L_{\text{хар}} \approx 0,5 - 1$ мкм при корректировке моделей ряда параметров с помощью экспериментальных данных или методов Монте-Карло, а также путем разбиения плотности тока электронов на несколько составляющих.

В целом, для приборных структур на GaAs и других полупроводниковых материалах с более легкими эффективными массами, нежели у Si, целесообразные диапазоны учета указанных кинетических эффектов для $L_{\text{хар}}$, в 2–5 раз больше по сравнению со структурами на кремнии. Наиболее удачные компьютерные решения AP-проблемы для приборных структур на основе соединений типа $A^{III}B^V$ с активными областями субмикрометровых размеров достигаются с помощью гидродинамических, квазигидродинамических и комбинированных моделей, в которых используются методы Монте-Карло.

Математические проблемы

Применяемые математические методы в значительной степени определяют реализуемость распределенных дискретных (численных) моделей. Практика показывает, что использование стан-

дартных численных методов редко приводит к получению успешных результатов. Поэтому **выход может быть найден в разработке специальных численных методов**, являющихся предметом изучения науки, именуемой вычислительной физикой. В нашем случае речь идет о вычислительной микро- и наноэлектронике.

Так как различные классы моделей порождают **специфические системы уравнений**, то для каждого из них должны быть разработаны свои методы. Проблема усложняется еще тем, что в рамках даже одного класса решаемые системы уравнений иногда значительно различаются [2]. В результате этого и иных причин эффективность и надежность методов может в сильной степени зависеть от конкретной постановки задачи, вида элементов, режимов работы и многих других факторов. Следовательно, **для различных классов моделей должен быть разработан спектр численных методов** и в идеальном случае должны быть установлены условия целесообразного применения каждого из них, что, к сожалению, недостижимо на практике. Заметим, что при разработке методов ряда классов, к счастью, есть и общие эффективные направления и принципы. Рассмотрим их также.

В настоящее время наиболее разработаны численные методы реализации диффузионно-дрейфовых моделей, причем в одно-, двух- и трехмерном случаях. В связи с этим представляется возможным выделить комплекс основных характерных проблем, которые возникают или встретятся при большей разработанности классов моделей более высоких иерархических уровней.

Проблемы начинаются с исследования существования и единственности решения фундаментальной системы уравнений (ФСУ) [25], составляющей основу диффузионно-дрейфовых моделей [2]. Они связаны с тем, что ФСУ — сильно нелинейная система уравнений, поэтому исследование существования и единственности решения в общем случае при заданных либо токах, либо напряжениях на контактах элемента не представляется возможным [25]. К сожалению, исследования проведены лишь в ряде упрощенных случаев. В то же время такой анализ чрезвычайно важен, поскольку позволил бы в каждом конкретном случае ответить на вопрос о целесообразности поиска численного решения вообще, а следовательно, и об адекватности описания физического объекта в целом исходной непрерывной моделью.

Другие математические проблемы связаны с процессами [25]: построения дискретных моделей; реализации дискретных моделей; обработки результатов моделирования и оценки адекватности моделирования. Все они усложняются чрезвычайно ограниченными возможностями строгих математических исследований применимости тех или иных математических методов. Так, при анализе методов построения дискретных диффузионно-дрейфовых моделей не представляется возможным

детально исследовать такие важнейшие математические свойства получаемых разностных схем, как их устойчивость и сходимость [25, 26]. Подобные проблемы возникают и при анализе сходимости математических методов реализации этого класса моделей [25, 27].

В целом, основные проблемы на этапах построения и реализации дискретной модели возникают при разработке следующих методов и алгоритмов [25]:

- аппроксимации ФСУ и граничными условиями;
- выбора сетки пространственной дискретизации;
- выбора шага по времени;
- решения системы нелинейных уравнений дискретной модели;
- выбора начальных приближений;
- решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Практика показывает, что **наиболее значительные успехи в разработке эффективных численных методов и алгоритмов достигаются при интенсивном использовании физических принципов, законов и предположений о возможности построения и реализации дискретных моделей на максимально допустимом числе этапов.**

При аппроксимации ФСУ с граничными условиями традиционно применяются либо метод конечных разностей, либо метод конечных элементов. Было показано [28], что применяя соответствующие аппроксимации и разбиения областей, с помощью обоих методов могут быть получены практически одни и те же уравнения дискретной модели, как в одномерном, так и в многомерном случаях. В настоящее время **считается целесообразным использовать** так называемых **физических подходов к построению дискретных моделей** [7, 25, 28]. При конечно-разностной аппроксимации применяются либо метод интегрирования на ячейке (box integration method) [7, 25, 28], либо метод интегрального тождества Марчука [7, 25] в рамках интегро-интерполяционного подхода Тихонова—Самарского в сочетании с использованием физически согласованных приближений на ячейке сетки пространственной дискретизации. Методы данного типа предложены как для уравнений непрерывности (методы Шарфеттера—Гуммеля и др. [7, 25, 28]), так и для уравнения Пуассона [7, 25].

Непростым является построение сетки пространственной дискретизации, особенно в методе конечных элементов. В целом, применяются три способа построения сетки [7, 25]:

- на основе равномерного распределения ошибки усечения;
- эмпирический;
- табличное задание.

В настоящее время наиболее распространен второй способ. Данная проблема, к счастью, не столь критична для отмеченных физических конечно-разностных формулировок [7, 25].

При аппроксимации по времени предпочтение обычно отдается неявным методам, причем с оценкой локальной погрешности усечения для автоматического выбора шага интегрирования по времени в процессе счета [25]. Иногда достаточно эффективно используются полунеявные разностные схемы [25, 27].

Для решения получаемой после аппроксимаций системы нелинейных алгебраических уравнений, составляющей дискретную модель, возможно применение нескольких подходов в рамках принципа последовательных приближений (итераций). Обычно для реализации дискретных диффузионно-дрейфовых моделей используются два итерационных подхода [7, 25]:

- метод Ньютона или его модификации;
- итерационные методы последовательного типа.

Численное решение всех нелинейных алгебраических уравнений модели методами первого типа осуществляется одновременно (**одновременная концепция**). Анализ и выделение типичных составных этапов и особенностей, возникающих при построении и реализации дискретной модели с использованием **последовательной концепции** (методы второго типа), позволил сформулировать **системный подход** [7, 29] к решению систем дифференциальных уравнений в частных производных, составляющих диффузионно-дрейфовые модели. Основная идея введения такого подхода заключалась в том, что в его рамках становится более глубоко понятен смысл разрабатываемых системных методов, а также их отличие друг от друга. Кроме того, легко может быть проведена классификация специализированных методов последовательной концепции [7, 25]. Первым методом данного типа являлся метод Гуммеля. Его принципиальный момент — линеаризация уравнения Пуассона с учетом статистики Больцмана (ключевое физическое предположение метода).

В настоящее время разработаны самые разнообразные методы решения уравнений дискретной модели (см. например [7, 25, 27, 28]), характеризующиеся различной универсальностью, эффективностью и надежностью. **Считается, что при не сильной нелинейности задачи предпочтительнее методы последовательной концепции, а для сильной — одновременной.** Однако часто это бывает не так. Многое зависит от выбора начального приближения, моделируемого элемента и ряда других факторов. Анализ показывает, что **наибольшую перспективу для дальнейшего развития представляют комбинированные методы** [7, 25]. Их сущность состоит в чередовании известных методов, перестановке или замене их этапов и применении некоторых других принципов. С помощью комбинированных методов часто может быть повышена гибкость (включая улучшение надежности сходимости) традиционных методов одновременной и последовательной концепций, уменьшены требуемые затраты машинного времени.

Выбор начального приближения имеет чрезвычайно важное значение в процессе реализации дискретной модели, прежде всего, в стационарном случае, так как от его качества зависит эффективность расчетов, а в ряде случаев — и надежность сходимости итераций. **Общепризнанным является необходимость выбора начального приближения с использованием физических предположений.** Возможны два подхода к решению этой задачи [7, 25]:

- выбор начального приближения пошаговым, последовательным способом;
- выбор начального приближения для всей задачи при заданных смещениях.

Эффективным при решении задачи выбора начального приближения часто оказывается применение комбинированных методов [7, 25].

Необходимо сделать замечание по поводу критерия завершения внешних итераций. Основная проблема здесь хорошо известна в вычислительной математике. Для полностью достоверной оценки нам нужно знать заранее решение задачи, которое мы ищем. Наиболее часто в рассматриваемой задаче используются следующие критерии завершения итераций [3, 4, 7, 25]:

- по минимизации невязки с требуемой точностью;
- по уменьшению изменения электростатического потенциала с требуемой точностью;
- по выполнению свойства консервативности плотности полного тока с требуемой точностью.

Каждый из отмеченных критериев имеет свои достоинства и недостатки, поэтому целесообразно применять одновременно несколько из них, например, второй и третий критерии [7, 25].

При решении СЛАУ, возникающих при реализации дискретных моделей, используется широкий ассортимент известных прямых и итерационных методов, а именно: прогонки, инвариантного погружения, последовательной верхней и нижней релаксации, Чебышева (циклический), переменных направлений, Зейделя, различные варианты блочных методов, Булеева, Федоренко, Стоуна, неполного разложения Холецкого с сопряженными градиентами и др. При относительно небольших размерах СЛАУ (до 1000, т. е. в одно- и двумерном случаях) весьма эффективным может быть использование прямых методов [25, 27]. **При больших размерностях, т. е. в двух- и трехмерном случаях, предпочтение отдается итерационным методам,** которые менее чувствительны к влиянию ошибок округления [7, 25, 27]. Заметим, что в трехмерном случае размерность СЛАУ может достигать 10^5 и более. Поэтому разработка алгоритмов решения СЛАУ повышенной эффективности является актуальной задачей, так как их свойства во многом и определяют общую вычислительную эффективность реализуемой дискретной модели. Использование информации о физике исследуемых элементов полезно при разработке критериев завершения итераций и в данном случае.

Ряд специфических математических проблем встречается в процессе обработки и оценки адекватности результатов моделирования [25].

При обработке результатов моделирования главные проблемы вызваны необходимостью обработки значительных массивов информации и вычислением электрических характеристик элементов. В первом случае традиционно более или менее эффективно используются различные методы визуализации. Во втором случае трудности связаны со сложностью вычисления на ЭВМ разности почти одинаковых чисел. Здесь, по существу, обязательна разработка специальных методов расчета токов (например, на основе принципа консервативности плотности полного тока [3, 4, 25]) и других выходных параметров [3, 4, 30]. В противном случае может значительно падать эффективность методов реализации модели при расчетах в области малых токов и некоторых других случаях. Следовательно, при решении проблем обработки информации должны также использоваться физические принципы, законы и предположения.

Вследствие того, что в настоящее время невозможно прямая экспериментальная проверка результатов моделирования по основным переменным (концентрации подвижных носителей заряда, электростатический потенциал и др.) в элементах микроэлектроники, она должна быть опосредованной и комплексной. В идеальном случае в нее необходимо включить определенную последовательность процедур [25]:

- исследование существования и единственности решения;
- теоретическая оценка адекватности дискретной модели исходной непрерывной;
- экспериментальное исследование дискретной модели путем вариации ее различных числовых параметров (числа узлов сетки пространственной дискретизации, шагов по времени, параметров и критериев сходимости итерационных методов и т. д.);
- сравнение результатов реализации дискретной модели с экспериментальными данными по интегральным параметрам и с исследованиями других авторов;
- сопоставление дискретной модели с моделями других классов.

Естественно, такая проверка порождает значительные проблемы и обычно проводится, к сожалению, в сильно усеченном виде.

Ряд проблем, подобных рассмотренным, возникает и при построении и реализации дискретных моделей других классов. Аналогичны и принципы их компромиссного разрешения. Имеющиеся данные подтверждают это утверждение. Поэтому остановимся на наиболее важных моментах. Отметим, что некоторые выделенные ранее принципы, подходы и методы с успехом обобщаются.

Гидродинамические и квазигидродинамические численные модели обычно разрабатываются в од-

но- и двумерном случаях. Это имеет оправдание. Во-первых, эффекты горячих носителей, для описания которых в основном и используются данные модели, часто возникают в структурах с очень малыми размерами активных областей с доминирующим транспортом в одном или двух измерениях. Во-вторых, разработка этих численных моделей более сложна по сравнению с диффузионно-дрейфовыми моделями. Однако вполне может оказаться, что неучет трехмерных эффектов в некоторых приборных структурах будет оказывать гораздо более существенное влияние на их электрические характеристики по сравнению с эффектами горячих носителей. Более того, трехмерные механизмы, возможно, могут оказывать влияние и на проявление самих эффектов горячих носителей заряда. Подобные примеры известны для диффузионно-дрейфовых моделей [7].

При построении дискретных гидродинамических и квазигидродинамических моделей применяется метод конечных разностей или метод конечных элементов. С учетом опыта разработки дискретных диффузионно-дрейфовых моделей физические подходы использовались при построении численных гидродинамических и квазигидродинамических моделей с самого начала в рамках обоих методов [31, 32]. Рядом авторов подчеркивается более высокая степень сложности построения дискретных гидродинамических моделей по сравнению с численными диффузионно-дрейфовыми моделями, вызванная следующими факторами [19, 33]:

- возросшей жесткостью уравнения для момента;
- резкими изменениями члена ($\vec{E}\vec{J}$) в уравнении баланса энергии (13) в [2];
- влиянием температуры.

Отметим также просто увеличение числа уравнений. Еще большие проблемы могут возникнуть при усложнении вида гидродинамической модели [8], так как физические подходы в данных случаях фактически не разработаны. Использование же стандартных методов к построению разностных схем может приводить к численным неустойчивостям [8].

При реализации дискретных гидродинамических и квазигидродинамических моделей применяются методы одновременной и последовательной концепций. В более сложном двумерном случае предпочтение отдается методам последовательной концепции. В работах [7, 34, 35] описан многоступенчатый метод реализации обобщенной гидродинамической модели [2]. Многие известные методы последовательной концепции для более простых моделей могут интерпретироваться как частные случаи данного метода. При выборе начального приближения также используются физические предположения. Для построения и реализации гидродинамических и квазигидродинамических моделей может применяться макрочастичный подход, который, однако, на практике широкого распространения не получил [36].

Таким образом, *методы построения и реализации дискретных гидродинамических и квазигидродинамических моделей разработаны в гораздо меньшей степени по сравнению с соответствующими методами диффузионно-дрейфовых моделей*. Тут еще многое предстоит сделать.

Методы Монте-Карло частиц при моделировании приборных структур, к сожалению, характеризуются крайне низкой эффективностью по сравнению с рассмотренными моделями, а следовательно, алгоритмы их реализации нельзя признать удовлетворительными. Поэтому значительное внимание здесь уделяется различным ускоряющим процедурам [37]. Отмеченный существенный недостаток, как правило, усугубляется следующими факторами и ситуациями:

- низкими полями, большими концентрациями примесей в некоторых областях;
- инъекцией через барьеры, в частности, при больших обратных смещениях;
- рекомбинацией—генерацией;
- граничными условиями на контактах;
- учетом квантовых эффектов (вырождение и др.);
- рассеянием носитель—носитель и др.

Кроме того, методы Монте-Карло для случая анализа малых сигналов фактически не разработаны. Следовательно, и здесь предстоит еще многое сделать.

По изложенным причинам в настоящее время интенсивно разрабатываются комбинированные модели, с помощью которых очень часто удается получить наиболее приемлемые компромиссные решения AP-проблемы с позиции эффективности численных методов построения и реализации моделей. Анализ показывает, что комбинированные модели с успехом разрабатываются и применяются уже давно. Отметим лишь следующие методы и подходы, используемые при синтезе этого класса моделей:

- метод региональных приближений;
- метод матрицы рассеяния;
- гибридный подход;
- методы построения физических разностных схем.

Первый и четвертый уже рассматривались.

В гибридном подходе к построению комбинированных численных моделей, например, в качестве базовой модели используется диффузионно-дрейфовая модель, а метод Монте-Карло частиц применяется в отдельных локальных областях. Интересную альтернативу прямым численным методам в области моделирования элементов микроэлектроники может составить метод матрицы рассеяния*, в частности, для неявного решения кинетического уравнения Больцмана. Было показано [38], что результаты, полученные с помощью этого метода, хорошо согласуются с расчетами по методу

* Данный метод, как известно, широко используется при анализе устройств СВЧ электроники.

Монте-Карло частиц, однако при более высокой эффективности.

Таким образом, *наиболее удачные компромиссные решения AP-проблемы для приборных структур микроэлектроники в настоящее время достигаются с помощью классов диффузионно-дрейфовых или комбинированных моделей, численные методы построения и реализации которых в целом характеризуются удовлетворительной эффективностью и надежностью.*

Проблемы разработки программ

Реальные возможности моделирования в значительной степени определяются именно имеющимся в наличии программным обеспечением (ПО). При анализе данного комплекса проблем будем в основном следовать работам [3—5, 25, 39]. Наиболее развито в настоящее время ПО, базирующееся на различных диффузионно-дрейфовых моделях. Его классификация дана в [5, 39]. Рассмотрим ее кратко.

Выделяются два класса ПО численного моделирования приборных структур ИС, а именно: ПО элементов и ПО фрагментов. К первому классу относятся три вида ПО: специализированные программы; комплексы программ с упрощенной моделью; программы общего назначения. Наибольшей универсальностью среди ПО данного класса характеризуются программы общего назначения, которые предназначены для расчета элементов различных видов. К ним могут быть отнесены: АЛЬФА, ПАРИС, FIELDAY, TRANAL, BAMBI, PISCES, SIMBA, HFIELDS, BIUNAP, KFSM и др. В зарубежной литературе они называются "general purpose programs".

ПО отмеченного класса в общем случае не позволяет моделировать более сложные структуры СБИС и УБИС, представляющие собой разнообразные фрагменты: логические элементы; схемы, состоящие из нескольких элементов, и т. д. Анализ таких приборных структур становится все более целесообразным с повышением степени интеграции интегральных схем. В этом случае необходимо использовать ПО второго класса, включающего следующего вида ПО: программы схемотехнического моделирования; программы двухуровневого моделирования по маршруту "элемент — схема"; программы смешанного моделирования; универсальные программы численного моделирования элементов и фрагментов. Наибольшей универсальностью среди ПО данного класса характеризуются программы последнего вида, к которым могут быть отнесены [25, 39]: PNAHL, UNTEMP и TREADS.

Каждый из отмеченных классов и видов ПО имеет свои достоинства и недостатки [5, 39]. Интересно заметить, что все виды ПО указанных классов перечислены в соответствии с порядком их появления во времени. В целом, ПО соответствующего вида занимает свою "экологическую нишу" при практическом решении AP-проблемы. Так,

программы, характеризующиеся наименьшей адекватностью моделирования, интенсивно разрабатывались на ранних стадиях развития ПО, основанного на диффузионно-дрейфовых моделях. Это во многом определялось возможностью практической реализации моделей, т. е. вычислительной техникой, математическими методами и т. д. По мере их совершенствования повышалась адекватность моделирования и осуществлялся переход к ПО новых видов.

Отмеченные причины во многом привели к тому, что развитие ПО, реализующего модели более высоких иерархических уровней, т. е. других разновидностей, происходит по подобному "сценарию". Главное внимание пока уделяется разработке ПО элементов (первого класса). В основном это программы одномерного и двумерного анализа. Популярный путь — это модернизация программ, основанных на дискретных диффузионно-дрейфовых моделях. В двумерном случае известными примерами являются: для гидродинамических и квазигидродинамических моделей — модифицированные программы GALENE, MINIMOS, HFIELDS, а для комбинированной (диффузионно-дрейфовая и метод Монте-Карло частиц) модели — программа PISCES-MC. К сожалению, программы DAMOCLES, APSIS и др. [37], реализующие метод Монте-Карло частиц, предназначены для использования на векторных и многопроцессорных вычислительных системах и характеризуются огромными затратами времени даже этих высокопроизводительных систем. В связи с этим данный инструментарий пока нецелесообразно применять в инженерных приложениях [37].

Таким образом, *несмотря на большое разнообразие ПО численного моделирования приборных структур микроэлектроники каждый из рассмотренных классов, видов и разновидностей ПО, т. е. по отдельности, имеет свои достоинства и недостатки.*

Большинство программ численного моделирования — программы двумерного анализа. В то же время даже простейшие элементы СБИС и УБИС характеризуются трехмерной структурой. Результатом могут быть значительные погрешности расчетов по программам двумерного анализа [7]. Кардинальное решение проблемы — разработка программ трехмерного моделирования, однако они, к сожалению, требуют больших вычислительных ресурсов ЭВМ. В связи с изложенным *желательно наличие иерархического ряда программных средств, состоящего из ПО одномерного, двумерного и трехмерного анализа, причем различных классов, видов и разновидностей.* Один из возможных компромиссных вариантов решения рассматриваемой проблемы предложен и реализован в комплексе программ численного моделирования приборных структур микроэлектроники NASD [7, 40, 41].

Значительные сложности возникают в процессе разработки ПО, которые усугубляются рассмот-

ренными ранее многочисленными проблемами. К основным факторам, определяющим проблемы создания ПО, следует отнести [5, 25]:

- длительный срок, приводящий к целесообразности использования **принципа последовательной разработки ПО** [25] многомерного численного моделирования, характеризующегося определенной универсальностью;
- недостаточное число квалифицированных разработчиков ПО данного типа;
- вариации численных методов и алгоритмов;
- сложность тестирования программ, что приводит к необходимости разработки многошаговых процедур тестирования [25];
- отсутствие вычислительной техники требуемой повышенной производительности;
- большие потоки выходной информации;
- значительные финансовые затраты на разработку ПО.

В результате, **качественный уровень (по надежности, точности, эффективности и др.) ПО численного моделирования приборных структур микроэлектроники еще далек от достигнутого для программ схемотехнического моделирования.** При этом инструментарий очень часто является научно-исследовательским и, следовательно, не предназначен для широкого использования. Система моделирования приборов ATLAS компании Silvaco является, по-видимому, одним из наиболее успешных примеров коммерциализации в данной наукоемкой области. По ряду из отмеченных причин известный консорциум SEMATECH прикладывает серьезные усилия в области стандартизации, способствующей более успешному распространению и эксплуатации ПО численного моделирования приборных структур микроэлектроники.

Проблемы, определяемые вычислительной техникой, оборудованием, идентификацией параметров моделей и заданием исходных данных

Проблемы, вызванные недостаточным быстродействием ЭВМ, удается смягчить с помощью многопроцессорных вычислительных систем, спецвычислителей и др. Максимальный эффект при этом достигается путем разработки программ, реализующих методы и алгоритмы параллельных вычислений. Здесь лишь отметим следующие известные программы моделирования приборных структур микроэлектроники, в которых реализован такой подход: DAMOCLES, McPOP, версии MINIMOS, CADDETH, PISCES и др. В целом отмеченные подходы представляют несомненную ценность, особенно для реализации моделей повышенной адекватности. Очевидно, что высокоадекватная модель, требующая огромных затрат вычислительных ресурсов ЭВМ, не может широко использоваться, т. е. часто является фактически бесполезной. Ситуация, конечно же, будет улучшаться по мере дальнейшего повышения количественных и качественных показателей вычислительной техники.

Значительные проблемы могут возникать при идентификации параметров моделей и задании исходных данных. Это связано с тем, что в идеальном случае исходная информация сама должна быть предметом математического моделирования. Так, при задании электрофизической структуры элемента, строго говоря, необходимо моделирование технологического маршрута изготовления интегральных схем (ИС), состоящего из десятков и сотен технологических операций. Несмотря на большие усилия и успехи по разработке моделей, по крайней мере, базовых технологических операций изготовления кремниевых ИС, здесь еще многое предстоит сделать [42]. Во многом, поэтому консорциум SEMATECH инициировал дорогостоящие работы по созданию и поддержке единой базы данных экспериментальных профилей легирования [42]. При задании параметров моделей приходится считаться и с недостатком устоявшихся моделей для различных материалов для таких важных параметров, как подвижность, время жизни, время релаксации, сужение ширины запрещенной зоны и др.

Что же делать в такой ситуации имеющихся неопределенностей, часто весьма значительных? На помощь приходят два важных свойства моделей — их адекватность и грубость, а также то, что **на практике обычно используются эмпирические модели электрофизических параметров с дополнительной экспериментальной идентификацией параметров этих моделей.** В результате модель элемента ИС может быть согласована с экспериментальными данными. Отмеченные неопределенности, однако, отразятся на числовых значениях параметров, т. е. они становятся в некотором смысле эффективными (подгоночными). Таким образом, получаем: изменение физического содержания параметра, что может приводить к сложности сопоставления моделей различных классов; понижение универсальности модели. В целом, **процесс идентификации параметров моделей, по существу, направлен на ослабление одной из фундаментальных проблем моделирования — проблемы неполноты описания модели** [1].

Процесс идентификации параметров моделей элементов ИС подробно рассмотрен в работах [3, 4], поэтому здесь отметим наиболее важные для нас моменты. Прежде всего, наличие методики идентификации параметров является важным условием эффективного использования модели на практике. При этом процесс идентификации параметров очень существенно различается для электрических и физико-топологических моделей приборных структур микроэлектроники. Тем не менее, выделяются всего лишь два качественно различных метода идентификации параметров моделей, применяемых при их настройке на экспериментальные данные [3, 4]: прямые измерения; на основе оптимизационных процедур.

Для многомерных численных моделей биполярных и МОП-транзисторов ситуация облегчается тем, что, согласно современным представлениям,

некоторые из электрофизических параметров, как правило, слабо зависят от технологии изготовления и конструктивных особенностей элементов. Для диффузионно-дрейфовых моделей к ним относятся [3, 4, 25]: параметры эффектов сильного легирования; подвижности; коэффициенты Оже-рекомбинации. Вопрос оказывается сложнее при задании рекомбинационных параметров (времена жизни) и параметров, характеризующих поверхности (скорость поверхностной рекомбинации, плотность состояний на границе раздела Si—SiO₂ и др.), так как они в большей степени зависят от технологии изготовления ИС. Часто здесь достаточно эффективно используется оптимизационный метод идентификации небольшого числа (нескольких) параметров [3, 4].

Необходимо отметить, что методики идентификации параметров моделей повышенной адекватности, по существу, только начинают разрабатываться. Проблемы здесь обостряются недостаточностью наших физических познаний, необходимостью применения сложного дорогостоящего оборудования, как правило, увеличением числа параметров по сравнению с диффузионно-дрейфовыми моделями. Хотя ситуация более или менее удовлетворительна для приборных структур на кремнии, особенно для диффузионно-дрейфовых моделей, однако и здесь не все так гладко и безмятежно. Достаточно отметить, что уже в течение нескольких десятков лет* постоянно осуществляется модернизация моделей подвижностей для МОП-транзисторов в известной программе MINIMOS, в частности, их адаптация, или "эволюция", как называли сами авторы, для моделирования элементов ИС, изготовленных по новым технологиям с уменьшающимися проектными нормами.

По изложенным причинам в системах многоуровневого моделирования по маршруту "технология — элемент — схема" [3, 4, 39], разрабатываемых, как правило, в ведущих корпорациях электронной промышленности мира, очень серьезное внимание уделяется процедурам идентификации параметров моделей. В качестве примера отметим лишь одну из первых систем подобного рода — МЕССА [43].

Таким образом, по мере повышения адекватности моделей потребуется использование все более мощной измерительной техники, необходимой для идентификации параметров, а также разработка соответствующих методик измерения, во многом зависящих от моделей элементов.

Проведенный анализ основных проблем моделирования приборных структур микроэлектроники позволяет сделать вывод о том, что *серьезный успех может достигаться лишь при комплексном подходе к компромиссному разрешению рассмотренных ранее проблем в рамках поставленных целей. При этом особое внимание необходимо уделить*

подходам, моделям, методам, алгоритмам и программам, характеризующимся повышенной универсальностью. Одним из стратегических направлений должно быть создание интегрированных интеллектуальных систем автоматизации научных исследований и систем автоматизированного проектирования элементов на основе спектра моделей различных классов. Достижения в данных направлениях, бесспорно, будут способствовать углублению наших познаний чрезвычайно интересного "мира" приборных структур микроэлектроники.

Список литературы

1. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. Часть I. Основные положения // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 8. С. 34—37.
2. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. Часть II. Модели полуклассического подхода // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 9. С. 26—36.
3. **Абрамов И. И.** Курс лекций "Моделирование элементов интегральных схем": Учеб. пособие. Мн.: БГУ, 1999. 92 с.
4. **Абрамов И. И.** Лекции по моделированию элементов интегральных схем. Москва-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2005. 152 с.
5. **Абрамов И. И., Харитонов В. В.** Проблемы моделирования элементов кремниевых интегральных схем // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1991. Вып. 5. С. 3—9.
6. **Чернавский Д. С.** Синергетика и информация: Динамическая теория информации. М.: Наука, 2001. 244 с.
7. **Абрамов И. И.** Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. Мн.: БГУ, 1999. 189 с.
8. **Guo L., Cheng M.-C., Luo Y., Fithen R. M.** Four-moment hydrodynamic modelling of a submicrometre semiconductor device in a non-parabolic band structure // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. V. 31. N 7. P. 913—921.
9. **Cai J., Cui H. L.** Semiconductor device simulation with the Lei-Ting balance equations // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. N 11. P. 6802—6813.
10. **Hsing C. T., Kennedy D. P., Sutherland A. D., van Vliet K. M.** Quantum mechanical determination of the potential and carrier distributions in the inversion layer of metal-oxide-semiconductor devices / Phys. Status Solidi (a). 1979. V. 56. N 1. P. 129—141.
11. **Cook R. K.** Numerical simulation of hot-carrier transport in silicon bipolar transistors // IEEE Trans. 1983. V. ED-30. N 9. P. 1103—1110.
12. **Park Y.-J., Navon D. H., Tang T.-W.** Monte Carlo simulation of bipolar transistors // IEEE Trans. 1984. V. ED-31. N 12. P. 1724—1730.
13. **Ou H.-H., Tang T.-W.** Numerical modeling of hot carriers in submicrometer silicon BJT's // IEEE Trans. 1987. V. ED-34. N 7. P. 1533—1539.
14. **Baccarani G., Jacoboni C., Mazzone A. M.** Current transport in narrow-base transistors // Solid-State Electron. 1977. V. 20. N 1. P. 5—10.
15. **Tomizawa M., Yokoyama K., Yoshii A.** Nonstationary carrier dynamics in quarter-micron Si MOSFET's // IEEE Trans. CAD-7. N 2. P. 254—258.
16. **Venturi F., Smith R. K., Sangiorgi E. C., Pinto M. R., Riccò B.** A general purpose device simulator coupling Poisson and Monte Carlo transport with application to deep submicron MOSFET's // IEEE Trans. 1989. V. CAD-8. N 4. P. 360—369.
17. **Ершов М. Ю., Ершова Ю. В., Рыжий В. И.** Сравнение дрейфово-диффузионного и кинетического подходов к моделированию кремниевых р-МОП транзисторов // Микроэлектроника. 1993. Т. 22. Вып. 1. С. 80—86.
18. **Hwang C. G., Dutton R. W.** Improved physical modeling of submicron MOSFET's based on parameter extraction using 2-D simulation // IEEE Trans. 1989. V. CAD-8. N 4. P. 370—379.
19. **Kosina H., Langer E., Selberherr S.** Device modelling for the 1990s // Microelectron. J. 1995. V. 26. N 2. P. 217—233.
20. **Design and experimental technology for 0,1- μ m gate-length low-temperature operation FET's** / G. A. Sai-Halasz, M. R. Wordeman, D. P. Kern, E. Ganin, S. Rishton, D. S. Zicherman,

* Сообщение о первой версии MINIMOS появилось в 1980 г.

H. Schmid, M. R. Polcari, H. Y. Ng, P. J. Restle, T. H. P. Chang, R. H. Dennard // IEEE Electron Dev. Letters. 1987. V. EDL-8. N 10. P. 461–466.

21. **Shahidi G. G., Antoniadis D. A., Smith H. I.** Electron velocity overshoot at room and liquid nitrogen temperatures in silicon inversion layers // IEEE Electron Dev. Letters. 1988. V. EDL-9. N 2. P. 94–96.

22. **Sai-Halasz G. A., Wordeman M. R., Kern D. P., Rishton S., Ganin E.** High transconductance and velocity overshoot in NMOS devices at the 0,1- μm gate — length level // IEEE Electron Dev. Letters. 1988. V. EDL-9. N 9. P. 464–466.

23. **Proposal of pseudo source and drain MOSFET's for evaluating 10-nm gate MOSFET's** / H. Kawaura, T. Sakamoto, T. Baba, Y. Ochiai, J. Fujita, S. Matsui, J. Sone // Jpn. J. Appl. Phys. Part 1. 1997. V. 36. N 3B. P. 1569–1573.

24. **Assad F., Banoo K., Lundstrom M.** The drift-diffusion equation revisited // Solid-State Electron. 1998. V. 42. N 3. P. 283–295.

25. **Абрамов И. И., Харитонов В. В.** Численное моделирование элементов интегральных схем. Мн.: Высш. шк., 1990. 224 с.

26. **Markowich P. A.** The stationary semiconductor device equations. Wien, New York: Springer-Verlag, 1986. 193 p.

27. **Польский Б. С.** Численное моделирование полупроводниковых приборов. Рига: Зинатне, 1986. 168 с.

28. **Engl W. L., Dirks H. K., Meinerzhagen B.** Device modeling // Proc. IEEE. 1983. V. 71. N 1. P. 10–33.

29. **Абрамов И. И., Харитонов В. В.** Численный анализ явлений переноса в полупроводниковых приборах и структурах. Ч. 1. Общие принципы построения методов решения фундаментальной системы уравнений // Инженерно-физический журнал. 1983. Т. 44. № 2. С. 284–293.

30. **Бубенников А. Н., Садовников А. Д.** Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. М.: Радио и связь, 1991. 288 с.

31. **Tang T.-W.** Extension of the Shafetter-Gummel algorithm to the energy balance equation // IEEE Trans. 1984. V. ED-31. N 12. P. 1912–1914.

32. **Forghieri A., Guerrieri R., Ciampolini P., Gnudi A., Rudan V., Baccarani G.** A new discretization strategy of the semiconductor equations comprising momentum and energy balance // IEEE Trans. 1988. V. CAD-7. N 2. P. 231–241.

33. **Numerical modeling of advanced semiconductor devices** / W. Lee, S. E. Laux, M. V. Fishetti, G. Baccarani, A. Gnudi, J. M. C. Stork, J. A. Mandelman, E. F. Grabbé, M. R. Wordeman, F. Odeh // IBM J. Res. Develop. 1992. V. 36. N 2. P. 208–232.

34. **Abramov I. I.** Hierarchy of models for small semiconductor device simulation // In: Physics, chemistry and application of nanostructures. Minsk, 1995. P. 257–259.

35. **Abramov I. I., Dobrushkin V. A., Tsurko V. A., Zhuk V. A.** Numerical "renaissance" procedure of device and process parameters for integrated circuits // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2005. V. 8. N 3. P. 296–301.

36. **Рыжий В. И., Баннов Н. А.** Математическое моделирование субмикронных элементов интегральных схем: состояние и проблемы // Микроэлектроника. 1987. Т. 16. № 6. С. 484–496.

37. **Kosina H., Nedjalkov M., Selberherr S.** Theory of the Monte Carlo method for semiconductor device simulation // IEEE Trans. 2000. V. ED-47. N 10. P. 1898–1908.

38. **Das A., Lundstrom M. S.** A scattering matrix approach to device simulation // Solid-State Electron. 1990. V. 33. N 10. P. 1299–1307.

39. **Абрамов И. И., Харитонов В. В.** Анализ программного обеспечения многомерного численного моделирования элементов и фрагментов кремниевых СБИС и УБИС // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1992. Вып. 1. С. 28–32.

40. **Абрамов И. И., Харитонов В. В.** Комплекс программ одномерного, двумерного и трехмерного численного моделирования элементов и фрагментов СБИС // САПР БИС: Проблемы разработки и применения. Межвузовский сб. научных трудов. М.: Изд-во МИЭТ, 1990. С. 185–190.

41. **Абрамов И. И., Харитонов В. В.** Комплекс программ одномерного, двумерного и трехмерного численного моделирования полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1991. Вып. 1. С. 68–79.

42. **International Technology Roadmap for Semiconductors: 1999 edition.** Austin, TX: International SEMATECH, 1999; 2001 edition, 2002 update; 2003 edition, 2004 update; 2005 edition.

43. **Process and device modeling** / Ed. by W.L. Engl. Amsterdam: Elsevier Science Publ., 1986. 462 p.

УДК 621.335.2:621.3.049.77

Ю. Б. Рогаткин, канд. техн. наук, доц.
Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ В АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ С ПОРАЗЯДНЫМ УРАВНОВЕШИВАНИЕМ

Представлен универсальный метод автоматической коррекции аппаратных ошибок в высокоразрядных аналого-цифровых преобразователях с поразрядным уравниванием.

Одним из наиболее часто встречаемых сложно-функциональных блоков (СФ-блоков), используемых в СБИС типа "система-на-кристалле", является СФ-блок для аналого-цифрового преобразования. В то же время, поскольку реализация СБИС "типа система-на-кристалле", которая может содержать как сложные цифровые, так и сложные аналоговые блоки, не подразумевает выполнения каких-либо специфических технологических операций для реализации аналоговой части проекта, например, специальных подстроек номиналов элементов, возникают определенные трудности с обеспечением требуемой точности в аналоговых блоках. Одним из решений данной проблемы является использование автоматической коррекции ошибок в СФ-блоках аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

Преобразователь с поразрядным уравниванием является наиболее распространенным вариантом последовательных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). В основе работы этого класса преобразователей лежит принцип дихотомии, т. е. последовательного сравнения измеряемой величины с половиной, четвертью, одной восьмой и так далее от максимального значения полной шкалы преобразователя. Это позволяет для N -разрядного АЦП выполнить весь процесс преобразования за N последовательных шагов (итераций). В то же время статическая погрешность этого типа преобразователей, определяемая в основном используемым в нем цифроаналоговым преобразователем (ЦАП), может быть очень малой, что позволяет реализовать высокую разрешающую способность.

Структурная схема АЦП подобного типа приведена на рис. 1. АЦП работает синхронно по сигналу CLK с периодом T_{CLK} следующим образом (рис. 2). При подаче сигнала $START$ длительностью T_{START} по первому за ним фронту сигнала CLK начинается преобразование, одновременно с задержкой T_{BUSYR} выставляется сигнал $BUSY$, низкий уровень которого, по сути, соответствует го-