

нированные методы на общую задачу нелинейного программирования, т. е. для оптимизации

$$\min_{x \in Q} \Phi(x), Q = \{x \in E_n : g(x) = 0, h(x) \leq 0\},$$

где $g(x)$, $h(x)$ — вектор-функции ограничений соответственно типа равенства размерности l и неравенств размерности m .

Функция $\Phi(x)$ и ограничения $g_i(x) = 0 (i = \overline{1, l})$ участвуют непосредственно в формировании матрицы невязок как отклонения $\Phi(x)$ и $g_i(x)$ от нуля. Ограничения вида $h_j = x_i - p_i \leq 0$ и $h_{j+1} = p_i - x_i \leq 0$ для i -го оптимизируемого параметра x_i включаются в двусторонние ограничения на этот параметр, предусмотренные функционально для указанных методов минимизации. С каждым из оставшихся k ограничений типа неравенств общего вида $h_i(x)$ ($i = \overline{1, k}$) следует поступать так: а) если оно не удовлетворяется, т. е. $h_i(x) > 0$, то величина $h_i(x)$ берется в качестве невязки; б) если удовлетворяется, т. е. $h_i(x) \leq 0$, то невязка генерируется случайным образом на интервале $[-\varepsilon/2, \varepsilon/2]$. Рекомендуемое значение $\varepsilon = E/n$, где E — задаваемая точность определения минимума $\Phi(x)$.

Этот прием позволяет, с одной стороны, привести в процессе счета к выполнению данного ограничения, с другой — при его выполнении ликвидировать возможную особенность матрицы невязок.

Условием применения комбинированных методов для общей задачи нелинейного программирования является равенство

$$1 + l + k = n. \quad (4)$$

В качестве примера приведем одну из решенных тестовых задач [3]:

$$\begin{aligned} \Phi(x) &= (x_1 + 3x_2 + x_3)^2 + 4(x_1 - x_2)^2 \quad (n=3); \\ g_1 &= x_1 + x_2 + x_3 - 1 \quad (l=1), \\ h_i(x) &= -x_i \quad (i=1, 2, 3), \quad h_4 = 3 - 4x_3 - 6x_2 + x_1^3 \\ & \quad (m=4), \quad x^0 = (0, 1; 0, 7; 0, 2) \text{ т. } E = 10^{-6}. \end{aligned}$$

Ограничения $h_i = -x_i (i = 1, 2, 3)$ были включены в двусторонние ограничения на каждом параметре ($0 \leq x_i \leq \infty$). Таким образом, $k=1$, поэтому условие (4) выполняется. Полученное решение $x_1=0, x_2=0, x_3=1$ более точное, чем в [3], поскольку $\Phi(x)=1$, а не 1,83, как в [3]. Время счета составило несколько секунд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безносков Г. П., Ефименко В. В., Загоруйко А. С., Стукалин Ю. А. Обобщенный метод хорд в задачах моделирования на ЭВМ статики и динамики нелинейных схем. — В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. [Материалы конф.]. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1974.
2. Загоруйко А. С. Результаты сравнения релаксационных методов многомерной минимизации на ЭВМ. — Автометрия, 1979, № 5.
3. Евтушенко Ю. Г., Жадан В. Г. Двойственный метод решения общей задачи нелинейного программирования. — В кн.: Исследование операций. Вып. 5, М.: изд. ВЦ АН СССР, 1976.

Поступило в редакцию 29 мая 1979 г.

УДК 621.382.8.001.57 : 681.3

В. Б. ЦЫТЕНКО
(Новосибирск)

ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ МДП-ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Основными функциями автоматизированной системы проектирования интегральных схем (ИС) являются разработка и модернизация принципиальных электрических схем ИС с использованием ЭВМ для проведения их анализа и оптимизации.

При этом проводятся расчеты по математическим моделям ИС, основными элементами которых являются модели компонентов микросхем (в частности, МДП-транзистора). От сложности моделей компонентов существенно зависят затраты машинного времени при расчетах электрических схем ИС, поэтому важное значение имеет упрощение формы моделей.

При моделировании статических характеристик МДП-транзистора обычно решают одномерное уравнение Пуассона. Используя затем некоторые упрощения и аппроксимации, не снижающие существенно точности модели, можно получить простые выражения для описания крутой области вольт-амперных характеристик (ВАХ) МДП-транзистора [1].

Как известно, в пологой области ВАХ МДП-транзистора (области насыщения) нарушается условие плавной аппроксимации канала, поэтому решение одномерного уравнения Пуассона для этой области некорректно. Известные двумерные модели для области насыщения сложны, попытки упростить их приводят к снижению точности и к необходимости введения эмпирических параметров [1, 2]. Использование отдельных моделей для крутой и пологой областей ВАХ МДП-транзистора значительно усложняет расчеты, так как необходимо обеспечить сшивание решений на границе этих областей. В то же время в пологой области ВАХ наблюдается относительно небольшой рост тока (для МДП-транзистора с длиной канала несколько микрометров ток стока увеличивается в пологой области ВАХ всего на несколько процентов). Кроме того, неточное определение значений параметров моделей может свести на нет преимущество сложных моделей в точности. Поэтому зачастую усложнение моделей неоправданно, особенно в тех случаях, когда они используются для расчетов, не требующих высокой точности.

Предлагаемая модель МДП-транзистора позволяет описать крутую и пологую области ВАХ при помощи единого аналитического выражения

$$I_D = \frac{B}{h} (V_G - V_T)^2 \left[1 - \exp \left(-h \frac{V_D - V_S}{V_G - V_T} \right) \right]. \quad (1)$$

Здесь I_D — ток стока; V_G , V_D , V_S , V_T — напряжения на затворе, стоке, истоке (все — относительно подложки) и пороговое соответственно; $B = B_0 / (1 + \Theta |V_G - V_T|)$ — крутизна ВАХ МДП-транзистора, где $B_0 = WC_0 \mu_0 / L_{эф}$ (W — ширина канала; C_0 — удельная емкость подзатворного диэлектрика; μ_0 — подвижность носителей заряда в канале при напряжении на затворе, близком к пороговому; $L_{эф}$ — эффективная длина канала); h , Θ — эмпирические параметры. Для того чтобы учесть влияние напряжения на истоке на величину тока стока в пологой области ВАХ, предлагается рассчитывать V_T по приближенному выражению

$$V_T = V_{T0} + kV_S,$$

где V_{T0} — значение порогового напряжения при $V_S = 0$; k — параметр, отражающий влияние обедненного слоя подложки на ВАХ МДП-транзистора при $V_S \neq 0$ и зависящий от степени легирования подложки и емкости подзатворного диэлектрика (обычно для p -канального транзистора $k \approx 1,4$, для n -канального — $k \approx 2,7$). При малых значениях $|V_D - V_S|$ из (1) получается известное выражение для описания начального участка крутой области ВАХ МДП-транзистора

$$I_D \approx B(V_G - V_T)(V_D - V_S). \quad (2)$$

Для области насыщения $h(V_D - V_S)/(V_G - V_T) \gg 1$ имеем

$$I_D \approx (B/h) (V_G - V_T)^2. \quad (3)$$

Таким образом, предлагаемая модель МДП-транзистора очень проста по форме, близка к известным моделям для крутой области ВАХ, а в пологой области соответствие экспериментальным характеристикам обеспечивается путем подбора параметра h . В модели учитывается также зависимость крутизны ВАХ транзистора от напряжения на затворе. Отметим, что, несмотря на простоту модели в ней учтены все основные эффекты, оказывающие влияние на статистические характеристики МДП-транзисторов. Большинство параметров модели имеет ясный физический смысл и соответствует определенным электрофизическим и геометрическим параметрам МДП-транзистора.

Рассмотрим методы расчета параметров модели с использованием экспериментальных ВАХ тестовых МДП-транзисторов с разными фотолитографическими длинами каналов ($L_{ф}$). Упрощенный метод расчета параметров модели можно получить следующим образом. Для начального участка ВАХ, описываемого выражением (2), определяются экспериментальные значения тока стока для трех значений напряжения на затворе, охватывающих весь рабочий диапазон изменения V_G (напряжения на стоке и истоке постоянны). Приравниваем далее расчетные выражения (2) соответствующим экспериментальным значениям тока стока и получаем 3 уравнения. Разрешив их относительно трех неизвестных V_T , Θ , B_0 , найдем простой алгоритм расчета данных параметров. Используя экспериментальные ВАХ тестовых транзис-

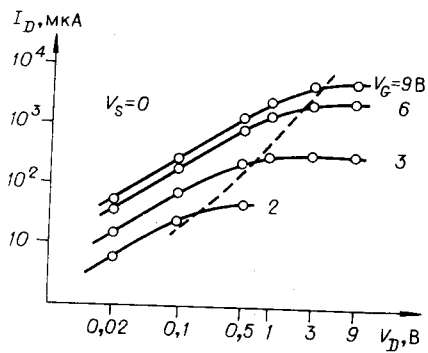
Рассчитанные значения параметров модели для тестовых n -канальных МДП-транзисторов

Метод расчета	Канал	Параметры					
		$L_{эф}$, мкм	V_T , В	Θ , В ⁻¹	ΔL , мкм	μ_0 , см ² /В·с	h (безразмерная величина)
Простой метод	Длинный	24	1,44	0,03	6	700	4,1
	Короткий	4	1,35	0,045	6	700	3,6
Оптимизация	Длинный	23,6	1,42	0,02	6,4	708	4,25
	Короткий	3,6	1,39	0,051	6,4	708	3,72

торов, расположенных в непосредственной близости на кристалле, можно по рассчитанным значениям их крутизны определить эффективные длины каналов и уход длины $\Delta L = L_{ф} - L_{эф}$. Полагая W и C_0 известными и определив B_0 и $L_{эф}$, рассчитываем значение параметра μ_0 . Вычислив пороговое напряжение исходя из экспериментальных характеристик для двух значений напряжения на истоке ($V_S = 0$ и $V_S \neq 0$), можно получить значения параметров V_{T0} и k . Из выражения (3), используя экспериментальные значения тока стока для пологой области ВАХ, проводится расчет параметра h . Результаты расчета параметров модели МДП-транзистора по данному методу приведены в таблице. В качестве экспериментальных данных для расчета параметров использовались усредненные по 15 кристаллам характеристики тестовых транзисторов с фотолитографическими длинами каналов 30 и 10 мкм (среднеквадратичный разброс экспериментальных характеристик составил примерно 6%).

Другой метод расчета параметров модели — оптимизация — заключается в автоматическом поиске значений параметров по критерию наилучшего соответствия расчетных и экспериментальных характеристик. Отметим, что для большей достоверности такого расчета необходимо выполнять оптимизацию параметров по наибольшему числу точек семейства ВАХ для всего диапазона изменения напряжений V_G , V_D , V_S . Полученные в результате оптимизации значения параметров модели МДП-транзистора находятся в хорошем соответствии со значениями, рассчитанными по первому методу (см. таблицу). В оптимальной точке среднеквадратичное отклонение расчетных значений тока стока от экспериментальных находилось на уровне 6% (см. рисунок). Как видно из таблицы, результаты расчетов свидетельствуют о различии значений ряда параметров V_T , Θ , h у транзисторов с длинным и коротким каналами, что можно объяснить влиянием двумерных краевых эффектов на характеристики короткоканального МДП-транзистора.

Моделирование характеристик и расчет параметров модели МДП-транзистора, а также автоматизированные сбор и обработка экспериментальной информации проводятся при помощи комплекта программ для ДЭС ЭВМ М-6000. Характеристики тестовых транзисторных структур измеряются при помощи автоматических измерителей типа «Интеграл» с выдачей результатов на перфоленту (в дальнейшем предполагается передавать информацию в ЭВМ по каналу связи). Затем с помощью ЭВМ осуществляются предварительная обработка экспериментальных данных с целью контроля и уплотнения информации, статистическая обработка, расчет значений параметров модели. Получаемые экспериментальные характеристики МДП-транзисторов используются для проверки и усовершенствования модели МДП-транзистора, а рассчитанные значения параметров модели являются исходными данными для программ анализа принципиальных электрических схем ИС.



Сравнение расчетных (сплошные линии) и экспериментальных (кружки) характеристик n -канального МДП-транзистора с длиной канала $L_{\phi} = 10$ мкм (справа от штриховой линии — область насыщения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов Ю. Р., Петросянец К. О., Шилин В. А. Математические модели элементов интегральной электроники. М.: Сов. радио, 1976.
2. Кобболд Р. С. Теория и применение полевых транзисторов: Пер. с англ. М.: Мир, 1975.

Поступило в редакцию 27 декабря 1979 г.

УДК 681.332 : 621.386.12

А. О. БАКРУНОВ, И. В. ЩУКИН

(Москва)

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРООБЪЕКТОВ

Решение ряда задач материаловедения, электронной техники и биологии связано с анализом структуры микрообъектов. В настоящее время для этих целей наряду с техникой цифровой обработки [1] и телевизионными методами [2] применяются когерентно-оптические методы [3]. Последние основаны на анализе пространственного спектра изображений микрообъектов, что позволяет реализовать инвариантность к параллельным переносам микрообъекта (и, следовательно, проводить анализ движущегося изображения); инвариантность к ориентации объектов; малую чувствительность к нарушениям фокусировки микроскопа [4].

Важно также отметить, что в ряде случаев анализ изображений когерентно-оптическими методами связан с реализацией алгоритмов значительно более простой структуры, чем в случае применения цифровых и телевизионных методов [4].

Разработанный нами фурье-микроскоп (ФМ) в отличие от обычного светового микроскопа позволяет получать не только увеличенное изображение микрообъекта, но также в требуемом масштабе изображение пространственного спектра микрообъектов, находящихся в поле зрения. Пространственный спектр (ПС) может анализироваться либо визуально, либо при помощи оптических фильтров пространственных частот совместно с фотоприемником. Принцип работы ФМ основан на том, что микрообъектив микроскопа при освещении объекта когерентным светом формирует в плоскости выходного зрачка фурье-спектр объекта. Это позволяет использовать один и тот же объектив для получения увеличенного изображения объектов и формирования ПС. Основная трудность, возникающая при разработке ФМ,— одновременное удовлетворение двум требованиям: необходимости визуального наблюдения микрообъектов при требуемом увеличении и получе-

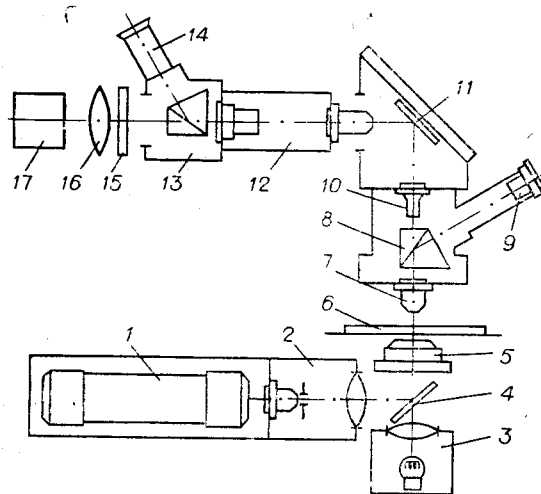


Рис. 1. Схема фурье-микроскопа:

1 — гелий-неоновый ОКГ, 2 — узел когерентного освещения, 3 — некогерентный осветитель, 4 — полупрозрачное зеркало, 5 — конденсатор микроскопа, 6 — препарат с микрообъектами, 7 — микрообъектив, 8 — узел разделения каналов наблюдения изображения и пространственного спектра, 9 — окуляр, 10 — узел оптического выноса ПС, 11 — зеркало, 12 — микропроектор ПС, 13 — светоделительная призма, 14 — визуальная трубка для наблюдения ПС, 15 — фильтр пространственных частот, 16 — коллектор, 17 — фотоприемник.