

И. С. КОНДРАШЕНКОВ

Россия, г. С.-Петербург, НПО «Прибор»
E-mail: ak2000@mail.ru

Дата поступления в редакцию
09.11 2005 г.

Оппонент к. т. н. В. А. ЛАЙНЕ
(НПО "Прибор", г. С.-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Предлагается метод моделирования тепловых режимов активных компонентов электронных модулей радиоэлектронных средств на этапе схемотехнического проектирования.

Схемотехническое проектирование высоконадежных электронных модулей (ЭМ) радиоэлектронных средств [1] требует учета множества различных воздействующих факторов. Одним из таких факторов является повышенная температура, оказывающая существенное влияние на параметры полупроводниковых приборов [2] и, следовательно, на характеристики ЭМ и аппаратуры в целом. Поэтому актуальной задачей является анализ тепловых режимов активных компонентов — биполярных и полевых транзисторов — на основе моделирования температурного поля конкретного ЭМ уже на этапе его схемотехнического проектирования.

Точное моделирование температурного поля ЭМ на этапе его проектирования невозможно, т. к. неизвестны его конструктивные параметры [3]. Поэтому целью настоящей работы является получение проектной тепловой модели ЭМ — тепловой модели его активных компонентов.

Для оценки тепловых воздействий воспользуемся собственными перегревами активных компонентов (АК) ϑ . Соответствующую теплофизическую математическую модель получим на основе комплексной тепловой модели ЭМ [4, с. 61], используя следующие условия:

- источник теплоты считается плоским, т. к. топологические размеры в плоскости ЭМ, выполненных по планарной технологии, существенно превышают глубину залегания активных тепловыделяющих областей АК ($p-n$ -переходов и каналов);

- верхняя и боковые поверхности кристалла и корпуса АК являются адиабатическими;

- на нижней поверхности корпуса или кристалла заданы граничные условия первого рода;

- источником теплоты для биполярного транзистора является коллекторный $p-n$ -переход, а для полевого транзистора — канал; размеры источников теплоты определяются размерами области эмиттера и канала, соответственно;

- выделяемая мощность и удельный тепловой поток зависят от режима работы АК и являются функ-

цией их электрических параметров (тока базы I_b и напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ — для биполярного транзистора, напряжений затвор-исток $U_{зи}$ и сток-исток $U_{си}$ — для полевого транзистора), что позволяет организовать прямое взаимодействие теплофизического и схемотехнического проектирования;

— рассматриваем стационарный или квазистационарный тепловой режим (в случае высокочастотных гармонических или импульсных сигналов с малой скважностью [2]), т. к. здесь достигаются максимальные перегревы АК.

Тогда для описания тепловых процессов в АК имеем следующую краевую задачу:

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \frac{d^2\vartheta}{dy^2} + \frac{d^2\vartheta}{dz^2} = 0; \quad (1)$$

$$-\lambda \left. \frac{d\vartheta}{dz} \right|_{z=0} = q(I, U); \quad (2)$$

$$\vartheta(x, y, B_z) = \vartheta_s(x, y, B_z); \quad (3)$$

$$\left. \frac{d\vartheta}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{d\vartheta}{dx} \right|_{x=B_x} = \left. \frac{d\vartheta}{dy} \right|_{y=0} = \left. \frac{d\vartheta}{dy} \right|_{y=B_y} = 0, \quad (4)$$

где λ — эффективный коэффициент теплопроводности системы "кристалл—корпус";

$q(I, U)$ — плотность теплового потока источника теплоты, зависящая от электрических параметров режима работы АК;

B_x, B_y, B_z — размеры корпуса АК или кристалла (для бескорпусных АК);

ϑ_s — заданное значение перегрева, определяемое особенностями конкретного АК (например, тепловыми сопротивлениями "корпус—радиатор" и "радиатор—среда" для мощных транзисторов, тепловым сопротивлением подложки для бескорпусных АК), в простейшем случае $\vartheta_s = 0$.

Полученную систему уравнений (1)–(4) решаем методом интегральных преобразований [5]. Используя для заданных граничных условий конечное косинус-преобразование Фурье с собственными функциями $\cos(m\pi x/B_x)$ и $\cos(m\pi y/B_y)$ [5, с. 158], получаем выражение для температурного поля кристалла:

$$\vartheta(x, y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_{mn} \cos(m\pi x/B_x) \cos(n\pi y/B_y) \operatorname{sh}[\gamma(B_z - z)]}{\gamma \lambda \operatorname{ch}(\gamma B_z) \operatorname{ch}(\gamma z) [1 - \operatorname{th}(\gamma B_z) \operatorname{th}(\gamma z)] B_x B_y K_n K_m}, \quad (5)$$

$$\text{где } q_{nm} = \int_0^{B_x} \int_0^{B_y} q(I, U) \cos(n\pi x / B_x) \cos(m\pi y / B_y) dx dy; \quad (6)$$

$$\gamma = [(n\pi x / B_x)^2 + (m\pi y / B_y)^2]^{1/2};$$

$$K_n = 1 \text{ при } n=0; K_n = 0,5 \text{ при } n > 0;$$

$$K_m = 1 \text{ при } m=0; K_m = 0,5 \text{ при } m > 0.$$

Для расчета перегрева конкретного типа АК необходимо определить распределение плотности потока источника тепла по (6) в различных режимах работы АК, что позволит учитывать неоднородность тепловыделения в активных областях, связанную с такими эффектами как вытеснение тока эмиттера в биполярном транзисторе, отсечка канала в полевом транзисторе и т. д. [2].

Рассмотрим решение такой задачи для МДП-транзисторов [2]. При этом считаем, что в крутой области характеристик источник теплоты (ИТ) имеет размеры канала, а в пологой — разбиваем канал на два ИТ, соответствующих свободной и перекрытой частям. Выражения для тока стока МДП-транзистора для крутого и пологого участков стоквых характеристик имеют вид [2, с. 216; 6]

$$I_c = b(2U_{\text{си}}(U_{\text{зи}} - U_0) - U_{\text{си}}^2); \quad (7)$$

$$I_c = b(U_{\text{зи}} - U_0)^2 L / L_s, \quad (8)$$

где b — удельная крутизна;

U_0 — пороговое напряжение;

L — топологическая длина канала;

L_s — эффективная длина канала — $L_s = (L - \Delta L)$;

ΔL — длина участка отсечки канала.

При работе МДП-транзистора в крутой области, когда величина $U_{\text{си}}$ меньше значения насыщения $U_{\text{си,нас}} = U_{\text{зи}} - U_0$, размеры ИТ равны длине L и ширине W канала, а плотность потока тепла $q = I_c U_{\text{си}} / (LW)$, где I_c определяется по (7). В крутой (активной) области падения напряжения по длине канала неравномерно [2, 6]: на участке L_s оно равно $U_{\text{си,нас}}$, а на участке отсечки ΔL равно $(U_{\text{зи}} - U_{\text{си,нас}})$. Поэтому для более адекватного моделирования представим в данном случае канал в виде двух ИТ. Первый ИТ — с размерами $(L_s \times W)$ и плотностью теплового потока $q = I_c U_{\text{си,нас}} / (L_s W)$, а второй ИТ, соответствующий участку перекрытия канала, имеет размеры $(\Delta L \times W)$ и $q = I_c (U_{\text{зи}} - U_{\text{си,нас}}) / (\Delta L W)$, где I_c определяется по (8).

Проводя интегрирование (6) с учетом (7), получаем изображение плотности потока ИТ при работе транзистора в крутой области:

$$q_{nm} = 4b(2U_{\text{си}}^2(U_{\text{зи}} - U_0) - U_{\text{си}}^3) B_x B_y \cos(n\pi x_0 / B_x) \times \cos(m\pi y_0 / B_y) \sin(0,5nL) \sin(0,5mW) / (\pi^2 nmLW), \quad (9)$$

где x_0, y_0 — координаты центра ИТ.

Для определения размеров ИТ при работе транзистора в крутой области воспользуемся выражением для эффективной длины канала [6, с. 97], на основании которого получим:

$$\Delta L = [2\epsilon_0 \epsilon_x (U_{\text{си}} - U_{\text{зи}} + U_0) / (qN)]^{1/2}, \quad (10)$$

где ϵ_0, ϵ_x — диэлектрическая проницаемость вакуума и материала подложки, соответственно;

q — заряд электрона;

N — концентрация легирующей примеси.

С учетом (8) и (10) после интегрирования имеем для двух ИТ следующие зависимости:

$$q_{nm}^1 = 4b(U_{\text{зи}} - U_0)^2 U_{\text{си,нас}} L B_x B_y \cos(n\pi x_{01} / B_x) \times \cos(m\pi y_0 / B_y) \sin(0,5nL_s) \sin(0,5mW) / (\pi^2 nmL_s^2 W);$$

$$q_{nm}^2 = 4b(U_{\text{зи}} - U_0)^2 (U_{\text{зи}} - U_{\text{си,нас}}) L B_x B_y \cos(n\pi x_{02} / B_x) \times \cos(m\pi y_0 / B_y) \sin(0,5n\Delta L) \sin(0,5mW) / (\pi^2 nm\Delta L W).$$

Здесь координаты центров ИТ по оси X являются функцией управляющих напряжений и определяются с учетом (10):

$$x_{01} = x_n + 0,5(L - \Delta L);$$

$$x_{02} = x_n + L - 0,5\Delta L,$$

где x_n — координата начальной точки канала у истока.

Таким образом, при работе в активной области температурное поле кристалла будет суперпозицией полей, создаваемых каждым ИТ:

$$\vartheta(x, y, z) = \vartheta(x, y, z, q^1) + \vartheta(x, y, z, q^2).$$

Подобный подход может применяться и для полевого транзистора с управляющим p - n -переходом.

Предложенные модели позволяют проводить расчет температурных полей активных компонентов электронных модулей, используя в качестве исходных данных информацию об электрическом режиме работы модуля, после моделирования на ЭВМ электрических схем. Это позволяет организовать интеграцию моделирования электрических схем и расчета температурных полей активных компонентов схем с дальнейшим проведением схмотехнического и уточненного теплофизического проектирования.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ Р 52003 – 2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения.
2. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Шерин К. Ю. Синтез типоразмерных рядов базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств. — СПб: СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2000.
4. Лутченков Л. С., Лайне В. А. Моделирование и анализ тепловых режимов аппаратуры многоканальной связи. — СПб: СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1995.
5. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. — М.: Высшая школа, 1985.
6. Проектирование СБИС / М. Ватанабэ, К. Асада, С. Кани, Т. Оцуки. — М.: Мир, 1988.