

of The Printed Circuit, Alphametals Inc. 3. Brown R.: *Microwave Hybrids, A Technical Monograph of ISHM*, Reston, 1991. 4. Gilleo K.: *A New Multilayer Concept Based on Anisotropy*, *Proceedings, NEPCO WEST, Anaheim, Feb. , 26, 1990*. 5. Fursman J.: *Advanced Interconnect - The future of the Hybrid Industry*, *Proc. of the 8th European Hybrid Microelectronics Conference, Rotterdam, 1991*, pp. 425-433. 6. Harper Ch.: *Multichip Modules (MCMs): Market Analysis and Technology Trends*, *SMTnet*, 1999. 7. Harper Ch.: *Electronics Packaging & Interconnection Handbook*, *SMTnet*, 1998. 8. Stoller H.: *Multichip Modules: A Technology in Your Future?* *IBM MicroNews, Vol. 2., No 4. 1998*. 9. Vrana M., Van Calster A., Vanden Berghe R., Allaert K.: *Interconnection Technology for Advanced High Density Thick Films*, *Proc. of the 10th European Microelectronics Conference, Copenhagen, 1995*, pp. 190-198. 10. Barnwell P.: *Alternative Interconnection Technologies - A personal View*, *5th European Hybrid Microelectronics Conference Proceedings, Stressa, Italy, May 22-24, 1985*. 11. Val Ch.: *3D-interconnection applied to microsystems*, *Proc. of the 11th European Microelectronics Conference, Venice, 1997*, pp. 133-139. 12. Cyrusian S.: *Electrical Properties of Thin Film Multilayer Wiring Systems: A Comparison between Polyimide and PCB*, *Proc. of the 10th European Microelectronics Conference, Copenhagen, 1995*, pp. 288-293.. 13. *SOI Technology: IBM's Next Advance in Chip Design*, *IBM materials*, 1999. 14. Streetman: *Molecular Beam Technology*, <http://www.ace.utexas.edu/projects/ece/mrc/groups/mbe.html> 15. Ćwirko R., Rusek M., Marciniak W.: *Układy scalone w pytaniach i odpowiedziach*, *WNT, W-wa*, 1987.

УДК 621.382

**О.З.Готра**

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальної техніки

## **ВЕРИФІКАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕРМОСЕНСОРНИХ ІС**

© О.З.Готра, 2000

Розглянуто алгоритм верифікації температурних моделей р-п переходів транзисторних структур, що використовуються як первинні перетворювачі термосенсорних біполярних інтегральних схем. У процесі верифікації моделей ППП "Spice" можливе досягнення невідповідності між ними та характеристикою реальних структур ІС в межах (-0,8...0,7)% в температурному діапазоні (-50...+100)<sup>0</sup>С.

The algorithm of verification of temperature models of p-n transistor structures that are used as primary transducers of thermosensitive bipolar integrated circuits is shown. In the process of verification of models of "Spice" it is possible to achieve the noncorrespondence between them and characteristic of real structures of IC in the range of (-0,8...0,7)% in the temperature range of (-50...+100)<sup>0</sup>С.

### **Формулювання задачі**

Процес дослідження температурних характеристик вузлів первинного перетворювача та оптимізація його режимів роботи повинні передбачати розробку математичних моделей елементної бази. Такі моделі, спільно з аналітичними та експериментальними дослідженнями, дозволяють підвищити ефективність розробки термосенсорних ІС, зокрема проводити

проміжні дослідження на модельному рівні, сприяти коректнішому узагальненню результатів тощо. Враховуючи високу ефективність схемного моделювання в ППП "Spice" та його значне поширення, поставлена задача верифікації математичних моделей елементної бази, що застосовується в ППП "Spice" [1,2].

У ході проведеного аналізу виявлено необхідність введення в моделі додаткових поправкових коефіцієнтів температурної залежності струму насичення р-n-переходів. Проблема полягає в неадекватному впливі коефіцієнта неідеальності  $m$  р-n-переходів на їх температурні характеристики. Відомо, що коефіцієнт неідеальності  $m$  характеризує вплив на пряму ВАХ р-n-переходів таких чинників, як наявність омичної складової диференційної провідності бар'єрних контактів, нерівномірності рекомбінаційних процесів у глибині та на поверхні напівпровідникової структури тощо. Ці чинники, переважно, призводять до збільшення диференційного опору р-n-переходів та нелінійності напруги на р-n-переході як функції логарифму струму прямого зміщення. У більшості публікацій, присвячених питанням температурних досліджень прямої ВАХ р-n-переходів, коефіцієнт  $m$  не враховують, що робить неможливим використання результатів таких робіт для аналізу реальних структур ІС.

#### Аналіз задачі

У першому наближенні температурний коефіцієнт напруги при прямому зміщенні р-n-переходу постійним струмом становить:

$$\frac{dU_{be}}{dT} = -\left(\frac{E_{G0} - E_{be}}{T} + 3\frac{k}{q}\right) [3].$$

Однак реальні діоди та транзисторні структури ІС, як і відповідні елементи в дискретному виконанні, характеризуються істотно більшою величиною диференціального опору р-n-переходу, ніж це випливає з теорії ідеального діода. Так, при збільшенні на порядок прямого струму в кремнієвому р-n-переході при  $T \approx 300\text{K}$  теоретичне значення зростання прямої напруги становить  $\Delta U_{be} \approx 60\text{mV}$ , а в реальних структурах це зростання знаходиться в межах  $(70...100)\text{mV}$ . Цю невідповідність враховують, замінюючи в експоненті прямої ВАХ р-n-переходу відношення  $U/\varphi_T$  на  $U/m\varphi_T$ . Для реальних структур коефіцієнт неідеальності становить  $m=1.3...1.7$ , що змінює відповідне значення диференційного опору р-n-переходу  $r=m\varphi_T/I$ , де  $I$  - струм прямого зміщення. Очевидно, корекція аналітичного виразу прямої ВАХ призведе до зміни температурного коефіцієнта напруги на р-n-переході. Зокрема, ввівши коефіцієнт  $m$  та виконавши диференціювання прямої ВАХ р-n-переходу, отримуємо:

$$\frac{dU_{be}}{dT} = -\left(\frac{mE_{G0} - U_{be}}{T} + 3\frac{k}{q}\right).$$

Отже, проведена корекція прямої ВАХ р-n-переходу призводить до відповідного зростання модуля  $dU_{be}/dT$ . Саме така процедура корекції передбачена для моделі Гумеля-Пуна транзисторних структур в ППП "Spice" (коефіцієнту  $m$  в ППП "Spice" відповідає параметр моделі NF). Однак в ході верифікації моделей встановлено невідповідність величини  $dU_{be}/dT$  моделі Гумеля-Пуна з даними експериментальних досліджень. Так, при  $T=300\text{K}$ ,  $U_{be}=600\text{mV}$  температурний коефіцієнт прямої напруги моделі р-n-переходу становить  $dU_{be}/dT=-3.4\text{mV/K}$  для  $m=1.3$  та  $dU_{be}/dT=-5.0\text{mV/K}$  для  $m=1.7$ . На противагу цим даним температура залежність прямої ВАХ реальних зразків становить  $dU_{be}/dT=-2,1\text{mV/K}$

для  $m=1.3$  та  $dU_{be}/dT=-1,9\text{мВ/К}$  для  $m=1.7$ . Ця розбіжність даних зумовлює необхідність введення в модель Гумеля-Пуна додаткових поправкових коефіцієнтів.

Можна показати, що некоректне зростання модуля  $dU_{be}/dT$  при збільшенні коефіцієнта  $m$  зникає у разі введення аналогічного коефіцієнта  $m_G$  в експоненту струму насичення переходу:

$$I_S = CT^3 \exp\left(-\frac{E_{G0}}{m_G \phi_T}\right).$$

Тоді

$$\frac{dU_{be}}{dT} = -\left(\frac{E_{G0}m / m_G - U_{be}}{T} + 3\frac{k}{q}\right),$$

що при  $m=m_G$  робить  $dU_{be}/dT$  незалежним від коефіцієнта неідеальності  $p$ - $n$ - переходу.

Однак в ході дослідження моделі Гумеля-Пуна встановлено, що така можливість уникнення залежності  $dU_{be}/dT$  в процесі верифікації моделей ППП "Spice" не передбачається. Натомість є можливою зміна показника степеневі функції температурної залежності струму насичення та ширини забороненої зони напівпровідника. Важливо, що при зміні цих параметрів, а в моделі останні позначені відповідно величинами  $XTI$ ,  $EG$ , відбувається незалежний перерахунок константи  $C$ , так що струм насичення при  $T=T_{ном}$  є незмінним  $I_S=I_s=const$ . Дослідження показали неефективність компенсації залежності  $dU_{be}/dT = F(m)$  показником  $XTI$  - температурна залежність ВАХ набуває неадекватного характеру.

### Алгоритм верифікації

Встановлено, що розв'язання проблеми верифікації полягає у відповідній зміні параметра моделі  $EG=1.11/m_G$ , а процедура складається з таких етапів:

1) експериментально, за приростом  $\Delta U_{be}/\Delta T$  прямої ВАХ переходів визначається коефіцієнт неідеальності

$$m = \frac{\Delta U_{be}}{\Delta I_e} \frac{I_0}{\phi_T};$$

2) за декількома точками ВАХ визначається струм насичення  $I_s$ ;

3) експериментально в межах можливої зміни робочих струмів  $I_e$  визначається залежність  $dU_{be}/dT = F(I_e)$ ; з метою зменшення кількості оброблюваних даних робочі струми доцільно змінювати по експоненті, наприклад,  $I_e=1\text{мкА}$ ;  $10\text{мкА}$ ;  $100\text{мкА}$ ;  $1\text{мА}$ ;

4) описуються параметри моделі Гумеля-Пуна:  $NF=m$ ;  $I_S=I_{0D}$ ;

5) орієнтовно задається  $EG=1.11/m$ ;

6) проводяться температурні дослідження моделі, в ході яких уточнюють величину  $EG$  за критерієм максимального наближення в діапазоні робочих струмів даних  $dU_{be}/dT$ , отримуваних на модельному рівні з експериментальними даними;

7) аналізується пряма ВАХ  $p$ - $n$ -переходу на її відповідність модельним та експериментальним даним.

Приклад результату верифікації температурних залежностей прямої ВАХ  $p$ - $n$ -переходу моделі Гумеля-Пуна наведено в табл.1.

Подальше підвищення точності процесу моделювання полягає в необхідності врахування нелінійності температурного коефіцієнта ВАХ. Причинами такої нелінійності є ряд фізичних механізмів, серед яких – нелінійні залежності від температури, ширини забо-

роненої зони кремнію, коефіцієнтів дифузії, дифузійної довжини носіїв заряду, надійної напруги на омичних ділянках структури тощо. Розглянемо метод, згідно з яким у модель

Таблиця 1

### Результати верифікації температурних залежностей прямих ВАХ р-n-переходу

Дані експерименту	I <sub>e</sub> , мкА	Напруга U <sub>be</sub> , мВ						
		Похибка моделі d <sub>L</sub> , %						
Параметри моделі		-50°C	-25°C	0°C	25°C	50°C	75°C	100°C
Експериментальні дані	1	749	695	642	588	53	476	420
		0	0	0	0	0	0	0
	10	801	755	710	662	615	567	518
		0	0	0	0	0	0	0
	100	862	823	784	745	702	662	621
		0	0	0	0	0	0	0
Параметри моделі (А) "по замовч." IS=1E-16 NF=1.0 EG=1.11	1	744	697	648	599	550	500	449
		-0,7%	0,3%	0,5%	1,8%	3,6%	6,0%	7,0%
	10	789	746	702	658	614	569	523
		-1,5%	-1,3%	-1,2%	-0,7%	-0,2%	0,4%	1,0%
	100	833	795	757	718	678	638	597
		-3,6%	-3,3%	-3,6%	-3,8%	-3,4%	-3,9%	-3,9%
Параметри моделі (В) IS=1E-16 NF=1.39 EG=1.11	1	1035	968	901	833	764	694	624
		28%	27%	25%	25%	25%	32%	25%
	10	1096	1037	976	915	853	791	727
		29%	28%	27%	26%	29%	32%	30%
	100	1158	1105	1052	998	942	887	830
		29%	28%	27%	26%	26%	28%	26%
Параметри моделі (С) IS=1E-13 NF=1.39 EG=1.11	1	850	763	675	586	497	406	316
		12%	9,7%	5,5%	-0,4%	-0,7%	-14%	-26%
	10	912	832	750	669	586	502	418
		12%	9,6%	5,5%	1,1%	-4,8%	-13%	-20%
	100	973	900	826	751	675	599	521
		12%	8,5%	5,2%	0,8%	-3,8%	-10%	-17%
Параметри моделі (D) IS=1E-13 NF=1.39 EG=0.81	1	743	691	638	584	529	473	417
		-0,8%	-0,6%	-0,6%	-0,7%	-0,6%	-0,6%	-0,7%
	10	805	759	713	666	618	569	520
		0,5%	0,5%	0,4%	0,5%	0,5%	0,4%	0,4%
	100	866	828	788	748	707	665	623
		0,5%	0,6%	0,5%	0,4%	0,7%	0,5%	0,4%

вводиться змінний показник  $\theta$  степеневій функції  $T^\theta$ , яка входить в аналітичний вираз струму насичення р-n-переходу. З урахуванням коефіцієнта  $m_G$  цей вираз можна записати так:

$$I_S = CT^\theta \exp\left(-\frac{E_{G0}}{m_G \phi_T}\right).$$

Покажемо вплив зміни показника  $\theta$  на нелінійність температурної залежності ВАХ р-n-переходу. Для цього, підставивши  $I_S$  у вираз ВАХ

$$U = \frac{mkT}{q} \ln \frac{I}{I_S} = \frac{mkT}{q} \ln \frac{I}{CT^\theta} + \frac{m}{m_G} E_{G0},$$

запишемо систему рівнянь

$$\begin{cases} U_1 = \frac{mkT_1}{q} \ln \frac{I}{CT_1^\Theta} + \frac{m}{m_G} E_{G0}, \\ U_0 = \frac{mkT_0}{q} \ln \frac{I}{CT_0^\Theta} + \frac{m}{m_G} E_{G0}. \end{cases}$$

Визначивши з другого рівняння константу

$$C = \frac{I}{T_0^\Theta} \exp \left[ \frac{q}{mkT_0} \left( \frac{m}{m_G} E_{G0} - U_0 \right) \right], \quad \text{знаходимо}$$

$$U_1 = \frac{T_1}{T_0} U_0 + \frac{m}{m_G} E_{G0} \left( 1 - \frac{T}{T_0} \right) - \frac{\Theta mkT_1}{q} \ln \frac{T_1}{T_0}. \text{Нелінійність температурної залежності}$$

ВАХ опишемо абсолютною похибкою

$$\Delta TKU = |U(T_{\max}) - U(T_0)| - |U(T_0) - U(T_{\min})| = 2U(T_0) - U(T_{\min}) - U(T_{\max})$$

з умовою  $dU/dT < 0$ .

Тоді, задавши межі температурного інтервалу симетричними відносно опорної температури  $T_0$ ,

$$T_{\max} = T_0 + \Delta T_m; \quad T_{\min} = T_0 - \Delta T_m,$$

після відповідних перетворень отримуємо

$$\Delta TKU = \frac{\Theta mkT_0}{q} \left[ \left( 1 - \frac{\Delta T_m}{T_0} \right) \ln \left( 1 - \frac{\Delta T_m}{T_0} \right) + \left( 1 + \frac{\Delta T_m}{T_0} \right) \ln \left( 1 + \frac{\Delta T_m}{T_0} \right) \right].$$

Можна показати, що для опорної температури  $t=25^\circ\text{C}$  розрахункова величина нелінійності становить:

$$\begin{aligned} \Delta TKN &= 0.01\theta \text{ (мВ) для } \Delta T_m = 5^\circ\text{C}, \\ \Delta TKN &= 0.03\theta \text{ (мВ) для } \Delta T_m = 10^\circ\text{C}, \\ \Delta TKN &= 0.18\theta \text{ (мВ) для } \Delta T_m = 25^\circ\text{C}, \\ \Delta TKN &= 0.72\theta \text{ (мВ) для } \Delta T_m = 50^\circ\text{C}, \\ \Delta TKN &= 1.64\theta \text{ (мВ) для } \Delta T_m = 75^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

При типових значеннях  $TKU = -2\text{мВ}/^\circ\text{C}$ ;  $\theta = 3$  похибка визначення температури становить  $\Delta t = 0,3^\circ\text{C}$  в температурному інтервалі  $[t] = (0...50)^\circ\text{C}$ , та відповідно:  $\Delta t = 1,1^\circ\text{C}$  в  $[t] = (-25...75)^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t = 25^\circ\text{C}$  в  $[t] = (-50...100)^\circ\text{C}$ .

Отже, у процесі розробки прецизійних термосенсорних ІС та експериментального вимірювання абсолютної похибки  $\Delta TKU$  необхідно визначити і ввести в модель показник степеневі функції  $\theta$ . В ППП "Spice" цей показник позначено як ХПІ, однак методики його визначення в процесі верифікації моделей у літературі не знайдено.

На підставі вищенаведених міркувань пропонується аналітичний вираз, який після експериментального визначення абсолютної похибки нелінійності температурної залежності ВАХ р-n-переходу  $\Delta TKU$  дозволяє визначити показник, який описує цю нелінійність

$$\text{ХПІ} = \theta = \frac{q\Delta TKU}{mkT_0 F_T},$$

де

$$F_T = \left( 1 - \frac{\Delta T_m}{T_0} \right) \ln \left( 1 - \frac{\Delta T_m}{T_0} \right) + \left( 1 + \frac{\Delta T_m}{T_0} \right) \ln \left( 1 + \frac{\Delta T_m}{T_0} \right).$$

Для прикладу у табл.2 наведено результати моделювання температурної залежності ВАХ емітерного р-n-переходу для  $I_e=100\text{мкА}$ ;  $I_s=10^{-16}\text{А}$ ;  $m=1.11$ ;  $\Delta T_m=50^0\text{С}$  при різних значеннях нелінійності цієї характеристики.

Таблиця 2

**Результати моделювання температурної залежності ВАХ  
р-n-переходу при зміні показника  $\theta$**

Показник ХТІ= $\theta$	Напруга, мВ			$\Delta T_{KU}$ , мВ
	-25 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$	75 $^{\circ}\text{C}$	
$\theta=0$	782,9	717,0	651,1	0
$\theta=1$	787,0	717,2	646,7	0,7
$\theta=2$	791,1	717,4	642,2	1,5
$\theta=3$	795,1	717,5	637,8	2,1
$\theta=4$	799,2	717,7	633,3	2,9

Отже, корекція показника  $\theta$  дозволяє проводити адекватний опис нелінійності температурної залежності ВАХ р-n-переходу моделі Гумеля-Пуна, і, що важливо, – оскільки в ППП "Spice" програмно передбачено перерахунок константи  $C$ , – корекція показника  $\theta$  практично не призводить до зміни самої ВАХ р-n-переходу та її усередненого значення температурного коефіцієнта напруги. Оскільки корекція показника  $\theta$ , порівняно, зокрема, з параметрами  $m$ ,  $m_G$ ,  $I_s$  має істотно менший вплив на ВАХ р-n-переходу, цей показник в модель необхідно вводити лише після верифікації всіх інших параметрів моделі.

**Результати аналізу та висновки**

Проведені дослідження температурних характеристик транзисторів та розроблений алгоритм верифікації температурних моделей р-n переходів транзисторних структур, які використовуються як первинні перетворювачі термосенсорних біполярних інтегральних схем, дають змогу зробити такі висновки:

- на відміну від транзисторної моделі Гумеля-Пуна, що застосовується в ППП "Spice" у варіанті "по замовчуванню", диференційний опір прямої ВАХ емітерного р-n-переходу реальних транзисторних структур характеризується на 30...70% більшим значенням і описується коефіцієнтом неідеальності  $NF=m=1.3...1.7$ .

- похибка прямої ВАХ моделі (А) "по замовчуванню" знаходиться в межах декількох процентів і залежить від робочого струму та температури;

- введення в модель коефіцієнта неідеальності ВАХ без зміни інших параметрів - модель (В) призводить до зростання в межах 30% похибки ВАХ;

- одночасна відповідна корекція коефіцієнта  $m$  та струму насичення  $I_s=IS$  р-n-переходу при заданій опорній температурі  $T_0$  - модель (С), дозволяє зменшити похибку ВАХ до 1%, однак температурний коефіцієнт ВАХ  $dU_{be}/dT$  неадекватно зростає, що і зумовлює сумарну похибку характеристики до 30%;

- коректний опис моделей транзисторів в ППП "Spice" забезпечується корекцією трьох основних параметрів  $NF$ ,  $IS$  та  $EG$ , причому параметр  $EG$  відповідає за температурний коефіцієнт ВАХ;

- в ході верифікації моделі можливе досягнення невідповідності між моделлю та ВАХ реальних структур  $IS$  в межах -0,8...0,7% в температурному діапазоні -50...+100 $^0\text{C}$  і робочому струмі (1...100)мкА – модель ( D).

1. Filseth E. SPICE extention dynamically model thermal properties//ED. 1988. Vol.33. №8. P.169-180. 2. Маклауд Д. Программа PSPICE, версия 4 - новое крупное достижение в области смешанного моделирования // Электроника. 1988. №26. С.81-82. 3. Соклофф С. Аналоговые интегральные схемы/Пер. с англ. М., 1988.

УДК 621.382

**О.З.Готра, В.Каліта\***

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальної техніки  
\*Жешувська політехніка, кафедра електронних систем

## **ВИСОКОЧУТЛИВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ОДНОКРИСТАЛЬНИХ ТЕРМОСЕНСОРНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ**

© О.З.Готра, В.Каліта, 2000

**Аналізуються схеми термосенсорних пристроїв з експоненційною характеристикою перетворення. Виготовлені у вигляді однокристальних біполярних ІС, дані пристрої дозволяють отримати гранично високу чутливість в околицях опорної температури при мінімальних структурних затратах. В основі функціонування запропонованих ІС покладено принцип вимірювання та подальшого перетворення струму через прямозміщений рп-перехід при фіксації на ньому заданої напруги, що визначає опорну точку вимірювання температури. Сфера застосування ІС – системи керування термостатами, елементи захисту від перегріву, протипожежна сигналізація.**

**The circuits of thermosensitive devices with exponential transduction characteristic are analysed. Made as single-chip bipolar IC these devices allow to receive maximum sensitivity in the range of reference temperature at minimum structure expenditures. The functioning of proposed IC is based on principle of measuring and further transduction of current through direct biased p-n-junction at fixation on it the defined voltage which determines the reference point of temperature measuring. IC can be used in systems of thermostat controlling, elements of overheating protection, fire-prevention signalling.**

### **Вступ**

Одним із напрямків розвитку сучасної термометрії є створення однокристальних термосенсорних ІС з пороговою характеристикою перемикавання. Серед них – серія функціонально завершених пристроїв регулювання температури Е20, ТС620 фірми Elmwood. За допомогою зовнішніх резисторів в таких ІС можна встановити температуру переходу схем із замкненого в розімкнений стан, і тим самим задати температуру стабілізації або температуру аварійного вимикання об'єкта контролю [1].

У цій роботі аналізується проблема формування проміжної між лінійною та пороговою характеристиками перетворення, що дозволяє поєднати функції як вимірювання температури, так і формування релейного режиму перетворювача. Як функція перетворення