

ԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ, ՄԻԿՐՈԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ ԵՎ
ՆԱՆՈԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ

ՀՏԴ 621.3:004

Ա.Գ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Հ.Ժ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ն.Ս. ՎԱՂԱՐՇԱԿՅԱՆ
ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆՄԱՆԵՐԻ ՏԱՐՐԵՐԻ ՏԵՂԱԲԱՇԽՈՒՄԸ ԶԵՐՄԱՅԻՆ
ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ

Առաջարկվել է ինտեգրալ սխեմաների (ԻՍ) տարրերի ջերմային տեղաբաշխման նոր մոտեցում, որում օգտագործված է համալիր չափանիշ՝ հիմնված տարրերի կապվածության և սպառվող հզորությունների հավասարաչափ բաշխման միաժամանակյա հաշվառման վրա:

Առանցքային բառեր. ինտեգրալ սխեմայի ջերմային հուսալիություն, ջերմային դաշտի տոպոլոգիական համահարթեցում, տարրերի ջերմային տեղաբաշխում:

Ներածություն: Համաձայն կիսահաղորդիչների միջազգային տեխնոլոգիական ցուցիչ՝ ժամանակակից ԻՍ-երի բացարձակ էներգասպառումը հասնում է 100...150 Վտ-ի, իսկ միջին տեսակարար էներգասպառումը՝ 0,5...0,75 Վտ/մմ²-ի: Առաջիկա տասնամյակում կանխատեսվում է տեսակարար էներգասպառման աճ մինչև 1,35 Վտ/մմ²: Արագագործ պրոցեսորային ԻՍ-երում ջերմաստիճանը կարող է հասնել ավելի քան 100^oC-ի, իսկ կիսահաղորդչային բյուրեղի տարբեր տեղամասերի տեղային ջերմաստճանների տարբերությունը՝ 10...20^oC-ի [1]:

Այս պայմաններում խիստ կարևորվում է նախագծվող ԻՍ-երի ջերմային հուսալիության ապահովումը: ԻՍ-երի ֆիզիկական նախագծման ժամանակ, ջերմային հուսալիության բարձրացման արդյունավետ ճանապարհ կարող է հանդիսանալ կիսահաղորդչային բյուրեղի տարբեր տեղամասերում ջերմաստիճանային տարբերությունների նվազեցումը: Սա, առաջին հերթին, վերաբերում է տարրերի տեղաբաշխման փուլին: Տեղաբաշխման փուլում ջերմային դաշտի տոպոլոգիական համահարթեցումը կնպաստի բյուրեղի տաք տեղամասերի ջերմու նանոկառու իջեցմանը, որոնք ջերմային հուսալիության առումով առավել վտանգավոր են: Միևնույն ժամանակ, բյուրեղի համեմատաբար սառը տեղամասերում կնկատվի ջերմաստիճանի որոշակի բարձրացում, քանի որ դրանք կկատարեն յուրօրինակ միկրոհովացուցիչների ֆունկցիա:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Ինչպես հայտնի է, ԻՍ-երի տարրերի անխափան աշխատանքի միջին ժամանակի կախվածությունը ջերմաստիճանից որևէ i –րդ տարրի համար բնութագրվում է Բլեյքի օրենքով [2].

$$\bar{t}_i(T_i) = AJ^{-m} \exp\left(\frac{E}{kT_i}\right), \quad (1)$$

որտեղ A պարամետրը կախված է տեխնոլոգիական միկրոկառուցվածքից, J -ն հոսանքի խտությունն է; m ցուցիչը $J = (0.2, \dots, 2.0)10^6$ Ա/սմ² սահմաններում ընդունում է $m = 1, \dots, 2$ արժեքը; E -ն ակտիվացման էներգիան է, որը կախված է օգտագործվող նյութերի տեսակից և, այլոմինե միջմիացումներով կիսահաղորդչային իՍ-երի դեպքում ընդունում է $E = 0.5, \dots, 0.6$ eV արժեքը, k -ն Բոլցմանի հաստատունն է, իսկ T -ն՝ իՍ-ի բացարձակ ջերմաստիճանը, °K:

Բնական է, որ իՍ-ի առավելագույն հուսալիության ապահովման պայմանից հետևում է՝

$$\sum_{i=1}^n \bar{t}_i(T_i) = \sum_{i=1}^n AJ^{-m} \exp\left(\frac{E}{kT_i}\right) \rightarrow \max \quad (2)$$

պայմանը, որտեղ n -ը իՍ-ի տարրերի թիվն է:

Հաշվի առնելով, որ միևնույն տեխնոլոգիական պրոցեսով ստացված և նույն կիսահաղորդչային բյուրեղի վրա տեղաբաշխված բոլոր տարրերի համար (2)-ում առկա բոլոր պարամետրերը, բացի ջերմաստիճանից, կարող ենք ընդունել հաստատուն, իՍ-ի առավելագույն հուսալիության ապահովման համար, անհրաժեշտ է հնարավորինս իջեցնել լրկալ բարձր ջերմաստճանային տեղամասերի ջերմաստիճանները: ԻՍ-երի տեղաբաշխման փուլում դրան կարելի է հասնել ջերմային դաշտի տոպոլոգիական համահարթեցման պայմանով, որը կարելի է ներկայացնել հետևյալ կերպ՝

$$\sum_{i=1}^n |T_i - \bar{T}| \rightarrow \min, \quad (3)$$

որտեղ \bar{T} -իՍ-ի տարրերի միջին ջերմաստիճանն է:

Ընդունելով, որ իՍ-ի կիսահաղորդչային բյուրեղում ջերմափոխանակությունը հիմնականում կատարվում է ջերմահաղորդականության ճանապարհով, որը հաստատված ջերմային ռեժիմում բնութագրվում է Ֆուրյեի օրենքով, որևէ i -րդ տարրի ջերմաստիճանը որոշվում է՝ ելնելով տարրերի փոխադարձ ջերմային ազդեցության՝ սուպերպոզիցիայի պայմանից [3]՝

$$T_i = T_0 + \sum_{j=1}^n P_j R_{ji}, \quad (4)$$

որտեղ T_0 –միջավայրի ջերմաստիճանն է; P_j -ն՝ j -րդ տարրի հզորությունը; R_{ji} -ն՝ j -րդ և i -րդ տարրերի տեղադրման դիրքերի միջև ջերմային դիմադրությունը:

Ընդունելով, որ R_{ji} ջերմային դիմադրությունը առաջին մոտավորությամբ ուղիղ համեմատական է j -րդ և i -րդ տարրերի դիրքերի միջև եղած d_{ij} հեռավորությանը, ինչպես նաև T_0 ջերմաստիճանի հաստատունությունը բոլոր տարրերի համար, հաշվի առնելով (4)–ը, ԻՍ-ի ջերմային դաշտի տոպոլոգիական համահարթեցման (3) պայմանը կարող ենք ներկայացնել հզորությունների տարբերությունների տեսքով՝

$$F_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1; \\ i \neq j}}^n |P_i - P_j| d_{ij} \rightarrow \min : \quad (5)$$

Ստացված (5) պայմանի մաթեմատիկական տեսքը ներկայացնում է $\Delta \bar{P}_{ij}$ և \bar{d}_{ij} վեկտորների սկալյար արտադրյալ, որտեղ $\Delta \bar{P}_{ij}$ վեկտորի բաղադրիչներ են տարրերի հզորությունների փոխադարձ տարբերությունները, իսկ \bar{d}_{ij} վեկտորի՝ տարրերի համապատասխան զույգերի միջև հեռավորությունները: Մատրիցների տեսությունից հայտնի է, որ երկու վեկտորների սկալյար արտադրյալը ձգտում է մինիմումի այն ժամանակ, երբ նրանց բաղադրիչների արժեքները ձգտում են հակադարձ դասավորության՝

$$\min \Delta \bar{P}_{ij} \times \bar{d}_{ij} = \{ \dots P_{ij} \dots \} \times \{ \dots d_{ij} \dots \}, \quad (6)$$

որտեղ P_{ij} աճում է (նվազում է), իսկ d_{ij} նվազում է (աճում է):

Ստացված պայմանը նախագծողի տեսանկյունից նշանակում է, որ հզորությունների տարբերությունների ավելի մեծ արժեքներ ունեցող տարրերը անհրաժեշտ է տեղադրել հնարավորինս իրար մոտ: Սա իր հերթին կնպաստի կիսահաղորդչային բյուրեղի վրա ջերմային դաշտի տոպոլոգիական համահարթեցմանը և հետևաբար՝ առավել վտանգավոր, բարձր ջերմաստիճանային տիրույթների ջերմաստիճանի իջեցմանը՝ ի հաշիվ ցածր ջերմաստիճանային տիրույթների որոշակի տաքացման:

Ըստ տարրերի կապվածության՝ տեղաբաշման ավանդական ալգորիթմներում որպես հիմնական չափանիշ օգտագործվում է միջմիացումների գումարային երկարության նվազարկման պայմանը, որի ընդհանուր տեսքը հետևյալն է [4]՝

$$F_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1; \\ i \neq j}}^n r_{ij} d_{ij} \rightarrow \min, \quad (7)$$

որտեղ r_{ij} -ն i -րդ և j -րդ տարրերի միջև կապերի թիվն է:

Համադրելով (5) և (7) պայմանները՝ ակնհայտ է դառնում, որ տարրերի տեղադրման մոտիկությունը ենթադրում է ինչպես դրանց հզորությունների տարբերության, այնպես էլ կապվածության մեծացում: Հաշվի առնելով վերը շարադրվածը, ինչպես նաև F_1, F_2 -ի արժեքները նորմավորելով մաթեմատիկայում հայտնի մեթոդներից մեկով՝ որպես տարրերի տեղաբաշխման համալիր չափանիշ, որը հաշվի է առնում ինչպես տարրերի կապվածությունները, այնպես էլ ԻՍ-ի ջերմային ռեժիմը, առաջարկվում է հետևյալ չափանիշը՝

$$F = a_1 \bar{F}_1 + a_2 \bar{F}_2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

որտեղ \bar{F}_1 -ը և \bar{F}_2 -ը F_1 և F_2 մեծությունների նորմավորված արժեքներն են; a_1 -ը և a_2 -ը՝ քաշի գործակիցները:

Նախագծման ժամանակ, կախված ներկայացվող պահանջներից, նախագծողը կարող է տալ a_1 և a_2 գործակիցների արժեքները:

Տեղաբաշխման որակի գնահատման համար անհրաժեշտ է գնահատել ինչպես տեղաբաշխման արդյունքում ստացված միջմիացումների գումարային երկարությունը, այնպես էլ հզորությունների տեղաբաշխման համահարթեցման աստիճանը:

Հզորությունների տուրբուլոգիական բաշխման որակի գնահատումը կատարվել է ԻՍ-ի բյուրեղի լոկալ ջերմային տեղամասերի առավելագույն և նվազագույն տեսակարար հզորությունների տարբերությամբ: Ակնհայտ է, որ որքան փոքր է այդ տարբերությունը, այնքան ավելի մեծ է հզորությունների տեղաբաշխման համահարթեցումը: Լոկալ ջերմային տեղամասերի չափսերի ընտրությունը կատարվում է փորձնական ճանապարհով՝ հիմնվելով ջերմափոխանակության տեղային ազդեցության սկզբունքի վրա: Համաձայն դրան՝ ջերմային դաշտի ցանկացած տեղային գրգռումը ջերմափոխանակության տեսակետից տեղային է և չի տարածվում դաշտի հեռու կետերի վրա: Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ

ստանդարտ բջիջների տեղաբաշխման դեպքում լոկալ ջերմային տեղամասերի չափսերը կարելի է վերցնել 4-ական հարևան տարրերից կազմված տեղամասերի չափով [5]:

Եթե դիտարկվող տեղաբաշխումը կազմված է m հատ լոկալ ջերմային տեղամասերից, ապա որևէ i -րդ տեղամասում (L_i) տեղաբաշխված տարրերի տեսակարար հզորությունը գնահատվում է հետևյալ կերպ՝

$$K_{L_i} = \left(\frac{\sum_{i \in L_i} P_i}{\sum_{i \in L_i} S_i} \right); i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

Տեղաբաշխման ընդհանուր որակը հզորությունների համահարթեցման տեսանկյունից կգնահատվի հետևյալ կերպ՝

$$K_L = \left(\frac{\max K_{L_i} - \min K_{L_i}}{\max K_{L_i}} \right) 100\%; i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

Հետազոտության արդյունքները: Հիմնվելով առաջարկվող (8) չափանիշի վրա՝ կատարվել է ISCAS 85 սերիայի մի քանի թեստային սխեմաների տարրերի տեղաբաշխում՝ օգտվելով պարզագույն հաջորդական տեղաբաշխման ալգորիթմից a_1 և a_2 գործակիցների տարբեր արժեքների համար: Որպես տարրային հենք օգտագործվել է Սինոփսիս Արմենիա ՓԲԸ ուսումնական դեպարտամենտում մշակված թվային ստանդարտ բջիջների գրադարանը [6]: Տեղաբաշխման արդյունքում ստացված հզորությունների տոպոլոգիական բաշխման և միջմիացումների գումարային երկարության համեմատական տվյալները բերված են աղյուսակում: Միջմիացումների գումարային երկարությունը գնահատվել է կիսապարազծային մոդելով [4]:

Աղյուսակ

Թեստային սխեմաների տարրերի տեղաբաշխման համեմատական տվյալները

Սխեմայի անվանումը	Տարրերի քանակը	$\min K_{L_i} / \max K_{L_i}$ Ն.Վ.Կ/ՄՀԳ* մկսՔ			Միջմիացումների գումարային երկարությունը մկմ		
		$a_1=1;$	$a_1=0;$	$a_1=0,5;$	$a_1=1;$	$a_1=0;$	$a_1=0,5;$
		$a_2=0$	$a_2=1$	$a_2=0,5$	$a_2=0$	$a_2=1$	$a_2=0,5$
C499	202	0,9/2,0	0,7/5,1	0,7/2,7	5226	2594	2991
C3540	1669	2,2/10,2	1,6/18,8	1,8/13,5	52621	28966	31957
C5315	2307	1,8/7,2	1,4/12,0	1,4/8,5	153931	76142	80130

Ինչպես երևում է աղյուսակից, $a_1=a_2=0,5$ դեպքի համար հզորությունների համահարթեցման K_L գործակիցը, համեմատած առանց հզորությունների հաշվառմամբ տեղաբաշխման դեպքի ($a_1=0$; $a_2=1$) հետ, նվազել է 4-ից 12 %-ով, իսկ միջմիացումների գումարային երկարությունը, համեմատած առանց միջմիացումների հաշվառմամբ տեղաբաշխման դեպքի ($a_1=1$; $a_2=0$) հետ, նվազել է 36-ից 45 %-ով:

Եզրակացություն: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ տարրերով սպառվող հզորությունները՝ որպես տեղաբաշխման լրացուցիչ չափանիշ, հաշվի առնելը դրանց նախնական տեղաբաշխման փուլում հնարավորություն է տալիս ստանալ տարրերի այնպիսի տեղաբաշխում, որը էականորեն չմեծացնելով միջմիացումների գումարային երկարությունը, ապահովում է կիսահաղորդչային բյուրեղի մակերեսի վրա ջերմության ավելի հավասարաչափ բաշխումը՝ դրանով իսկ բարձրացնելով ԻՍ-երի ջերմային հուսալիությունը: Ընդ որում, անհրաժեշտության դեպքում մեծացնելով a_1 և a_2 գործակիցների հարաբերակցությունը՝ կարելի է ապահովել հզորությունների համահարթեցման K_L գործակիցի 13-ից 31% նվազում՝ ի հաշիվ միջմիացումների գումարային երկարության աճի:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) - 2013.
2. **Vijay R.** Introduction to semiconductor reliability// 2003 International reliability physics symposium.- Hyatt regency Dallas, Texas.- 2003.-topic 111. -P. 1-74.
3. **Дульнев Г. Н.** Теория тепло- и массообмена. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.
4. **Sherwani N.** Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Intel Corporation.- Kluwer Academic Publishers, 2007.- 572 p.
5. **Kyoung Keun Lee, Edward J., Sung Kyu Lim.** Thermal-driven Circuit Partitioning and Floorplanning with Power Optimization Georgia Institute of Technology by KK Lee. - 2003. -P. 7.
6. Digital Standard Cell Library.- SAED_EDK90_CORE DATABOOK.- © 2008 SYNOPSYS ARMENIA Educational Department.- Yerevan, 2008. - 96 p.

Ա.Գ. ԱՐՄԻՈՆՅԱՆ, Օ.Ջ. ԱՐՄԻՈՆՅԱՆ, Ն.Տ. ՎԱԳՐՏԱԿՅԱՆ

РАЗМЕЩЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Предложен новый подход к размещению элементов интегральных схем, в котором использован комплексный критерий, основанный на одновременном учете связанности элементов и равномерности распределения потребляемых мощностей.

Ключевые слова: тепловая надежность интегральной схемы, топологическое уравнивание теплового поля, тепловое размещение элементов.

A.G. HARURYUNYAN, H.J. HARUTYUNYAN, N.S. VAGHARSHAKYAN
PLACEMENT OF ELEMENTS OF INTEGRATED CIRCUITS IN VIEW
OF A THERMAL MODE

A new approach to the placement of elements of integrated circuits, which uses a complex criterion based on simultaneous consideration of the elements connectivity and the uniformity of distribution of the consumed power is proposed.

Keywords: thermal reliability of the integrated circuit, a topological adjustment of the thermal field, thermal placement of elements.

ՀՏԴ 621.3:004

Ա.Գ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Կ.Յ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ն.Տ. ՎԱԿԱՐՏՅԱՆ,
Տ.Ա. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ
ԵՌԱԶԱՓ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆԵՄԱՆԵՐԻ ՏԱՐՐԵՐԻ ՋԵՐՄԱՅԻՆ
ՏԵՂԱԲԱՇԽՈՒՄԸ

Իրագործված է եռաչափ ինտեգրալ սխեմաների (ԻՍ) տարրերի տեղաբաշխման մեթոդ, որն ապահովում է ջերմային դաշտի համահարթեցում: Մեթոդը հիմնված է սխեմայի, ըստ էլեկտրական կապվածության, առանձին մակարդակների մասնատման և յուրաքանչյուր մակարդակում տարրերի ջերմային տեղաբաշխման վրա:

Առանցքային բաներ. եռաչափ ինտեգրալ սխեմա, սխեմայի մասնատում, ջերմային տեղաբաշխում:

Ներածություն: ԻՍ-երի ինտեգրման անընդհատ աճի պայմաններում դրանց երկչափ տեխնոլոգիայի հետագա զարգացումը սահմանափակվում է մի շարք տեխնոլոգիական և ֆունկցիոնալ գործոններով: Ուստի ներկայումս կիրառվում են ԻՍ-երի ինտեգրման կառուցվածքային նոր լուծումներ, որոնք ենթադրում են մեկից ավելի կիսահաղորդչային բյուրեղների ինտեգրումը մեկ պատյանի մեջ:

Լուծումներից մեկը եռաչափ ԻՍ-ն է, որը թույլ է տալիս մեկ պատյանի մեջ ունենալ մեկից ավելի բյուրեղ, որոնք դասավորված են ուղղահայաց առանցքի երկայնքով և միմյանցից տարանջատված են մեկուսչի շերտերով: Եռաչափ ԻՍ-երը թույլ են տալիս իրագործել ավելի բարդ ֆունկցիոնալությամբ համակարգեր՝ առանց մեծացնելու բյուրեղի չափերը: Եռաչափ ԻՍ-երին առավելությունների հետ բնորոշ են նաև թերություններ, որոնցից ամենակարևորը ջերմային խնդիրն է:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Ընդհանուր դեպքում, եթե եռաչափ ԻՍ-ը կազմված է k հատ բյուրեղներից, որոնցից յուրաքանչյուրը սպառում է P_i ($i=1,2,\dots,k$) հզորություն, պատենավորումից հետո, ԻՍ-ի գումարա-