

Р.А. ТОВМАСЯН

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С
ВЕРТИКАЛЬНЫМ P-N ПЕРЕХОДОМ**

Разработан метод расчета коэффициента полезного действия (КПД) солнечной батареи с вертикальным p-n переходом. Показано, что формула КПД вертикальной батареи отличается от формулы КПД горизонтальной батареи геометрическим коэффициентом, прямо пропорциональным глубине p-n перехода.

Ключевые слова: солнечный элемент, вертикальный p-n переход, преобразователь, поверхностная рекомбинация, радиальный переход.

R.A. TOVMASYAN

**EVALUATING THE EFFICIENCY OF SOLAR CELLS WITH A
VERTICAL P-N JUNCTION**

A method for calculating the efficiency of a solar battery with a vertical p-n junction has been developed. It is shown that the work efficiency formula of a vertical battery differs from that of a horizontal battery by a geometric coefficient directly proportional to the depth of the p-n junction.

Keywords: solar cell, vertical p-n junction, surface recombination, radial junction.

ՀՏԴ 621.382

Ա.Օ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

**ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆԵՄԱՆԵՐՈՒՄ ՀԱՂՈՐԴՄԱՆ ԳԾԵՐԻ ԾՐԱԳԾՄԱՆ
ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ**

Տեսականորեն և մոդելավորման հիման վրա հետազոտվել են ինտեգրալ սխեմաներում հաղորդման գծերի (միջմիացումների) ծրագծման առանձնահատկությունները: Ներկայացվել են միջմիացումներում հապաղման ժամանակի հաշվարկի անալիտիկ արտահայտություններ, կատարվել են դրանց նվազարկման եղանակների վերլուծություն և ֆիզիկական նախագծում, բերվել են մոդելավորման արդյունքները:

Առանցքային բառեր. ինտեգրալ սխեմա, հաղորդման գիծ, մետաղների մակարդակ, ծրագծում:

Ներածություն: Ժամանակակից ինտեգրալ սխեմաների (ԻՍ) միջմիացումների ծրագծման ժամանակ մետաղական մակարդակների թիվը գերազանցում է 15-ը [1-3]: Ավելի է կարևորվում համապատասխան մակարդակի մետաղի ճիշտ ընտրությունը, ընդ որում, պետք է հաշվի առնվեն մեծ թվով պարամետրեր (փոխադարձ փոխձածկում, միջմիացման մետաղի երկարությամբ պայմանավորված ժամանակային հապաղում): ԻՍ-ում միջմիացումները բավականին լուրջ

խնդիր կարող են դառնալ մեծ խտությամբ տարրերի տեղաբաշխման դեպքում: Անհրաժեշտ է կատարել տարբեր տեխնոլոգիական նորմերի համար մետաղների ունակությունների և դիմադրությունների հաշվարկ՝ կախված նախագծի տարբեր խտություններից: Այս հետազոտության արդյունքները կարող են օգտակար լինել ծրագծման նախագծման համար, ինչը թույլ կտա կատարել ճիշտ կանոնների սահմանում նախագծողի կողմից:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Աշխատանքի նպատակն է կատարել հաղորդման գծերում ծրագծման խնդիրների վերլուծություն, որոնց հիման վրա կարելի է մշակել ծրագծման ճիշտ կանոնների մոտեցումներ:

Տեսական հետազոտության արդյունքները: ԻՍ-երի նախագծման տեխնոլոգիական նորմերի փոքրացմանը զուգընթաց տարրերի միջմիացումները փոքրանում են, իսկ դրանց լայնության և գծերի միջև հեռավորության փոքրացման պատճառով դիմադրությունները և ունակությունները մեծանում են:

Միջմիացումների վրա ռեզիստիվ-ունակային հապաղման τ_{RC} ժամանակի հաստատունը որոշվում է հետևյալ բանաձևով [4].

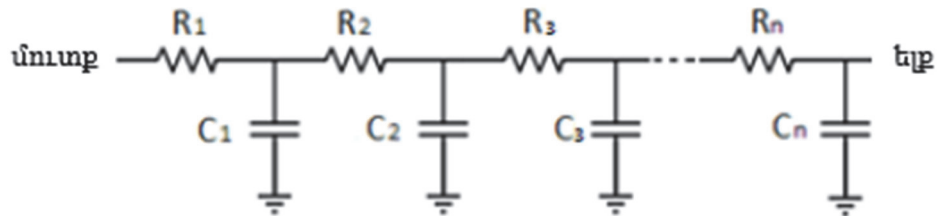
$$\tau_{RC} = \rho_{Me} \frac{L}{W \cdot t_{Me}} \cdot k \varepsilon_0 \frac{L \cdot W}{t_{ox}} = \rho_{Me} \frac{k \varepsilon_0 L^2}{t_{Me} t_{ox}},$$

որտեղ ρ_{Me} , L , W , t_{Me} –ն համապատասխանաբար հաղորդիչների տեսակարար դիմադրությունը, երկարությունը, լայնությունը և հաստությունն են, t_{ox} –ը՝ միջշերտային դիէլեկտրիկի հաստությունը, ε_0 –ն՝ վակուումի դիէլեկտրիկական թափանցելիությունը, k –ն՝ նյութի դիէլեկտրիկական հաստատունը:

Բերված արտահայտությունից երևում է, որ հապաղման ժամանակի հաստատունը հաղորդչի երկարությունից ունի քառակուսային կախում, ընդ որում, բազմաշերտ մետաղապատման կիրառությունը թույլ է տալիս ծրագծման ժամանակ էապես փոքրացնել միջմիացումների երկարությունը: Ինչպես նշվեց, գերմեծ ինտեգրալ սխեմաներում միջմիացումների մետաղապատման մակարդակների թիվը ներկայումս հասնում է 15-ի: Այդ դեպքում առաջին երկու շերտերը հիմնականում ունեն հաղորդիչների բավական փոքր հաստություն և նվազագույն քայլ, քանի որ հաստ մետաղական թաղանթներում դժվար է խաճատել բարակ շերտեր նվազագույն քայլով: Հաջորդ շերտերում հաղորդիչների քայլը և երկարությունը մեծանում են:

Միջմիացումների ժամանակային հապաղումների փոքրացմանը կարելի հասնել ավելի որակյալ նյութերի օգտագործումով (օրինակ, պղնձյա միջմիացումները թույլ են տալիս նվազեցնել բազմաբյուրեղային սիլիցիումի դիմադրությունը): Ունակության փոքրացման համար ավելի լայն կիրառություն են գտնում փոքր դիէլեկտրիկական k հաստատունով միջշերտային դիէլեկտրիկները:

Երկար միջմիացումների վերլուծության համար անհրաժեշտ է մշակել դրանց անալիտիկ մոդելը: Նկ. 1-ում բերված է բախշված RC կառուցվածքներով n սեկցիաներից բաղկացած էլմորի հապաղման հաշվարկի մոդելը [1]:



Նկ.1. Էլմորի հապաղման հաշվարկի մոդելը

Ընդունենք միջմիացման երկարությունը L , որի համարժեք դիմադրությունը հավասար է R_{wire} , իսկ համարժեք ունակությունը՝ C_{wire} : Միջմիացումը բաժանենք $l=L/n$ երկարությամբ n մասերի, իսկ r -ը և c -ն միավոր երկարության դիմադրությունը և ունակությունն են: Յուրաքանչյուր մասի դիմադրությունը և ունակությունը համապատասխանաբար կլինեն rL/n և cL/n :

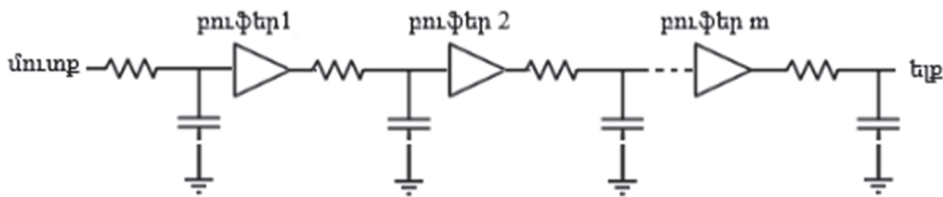
Օգտվելով հապաղման համար էլմորի բանաձևից՝ միջմիացման T_D հապաղման համար կստանանք [1].

$$T_D = R_1 C_1 + (R_1 + R_2) C_2 + (R_1 + R_2 + R_3) C_3 + \dots + (R_1 + R_2 + \dots + R_n) C_n = \\ = (L/n)^2 (rc + 2rc + \dots + nrc) = rcL^2 (n + 1) / (2n):$$

Երբ n -ի արժեքը ձգտում է անսահմանության, ապա հավասարումն ընդունում է ավելի պարզ տեսք՝

$$T_D = rcL^2 / 2 = R_{wire} C_{wire} / 2:$$

Վերջին բանաձևում միջմիացման հապաղումը կարելի է փոքրացնել երեք պարամետրերի՝ դիմադրության R_{wire} և ունակության C_{wire} ու միջմիացման L երկարության փոքրացմամբ: Դիմադրության փոքրացման համար կարելի է մեծացնել միջմիացման լայնական հատույթը՝ մեծացնելով դրա լայնությունը և հաստությունը: Ունակությունը հիմնականում բաղկացած է հարթակի հետ մետաղի կապի և միջմիացումների մետաղների միջև ունակություններից: Ունակության փոքրացման համար կարելի է օգտագործել միացման ավելի բարձր մակարդակի մետաղ կամ մետաղի կողային մակերեսի փոքրացում: Միջմիացման L երկարության փոքրացման համար կարելի է այն բաժանել սեգմենտների՝ ավելացնելով բուֆերներ (նկ. 2), հաշվի առնելով դրանց հապաղումը [1-3]:



Նկ. 2. Հապաղման հաշվարկի մոդելը բուֆերի ավելացման դեպքում

Ինչպես երևում է նկ.2-ից, m բուֆերների ավելացման դեպքում միջմիացումը բաժանվում է յուրաքանչյուր հաղորդչի t հապաղմամբ m+1 սեգմենտի՝

$$t = rcL^2/[2(m + 1)^2]$$

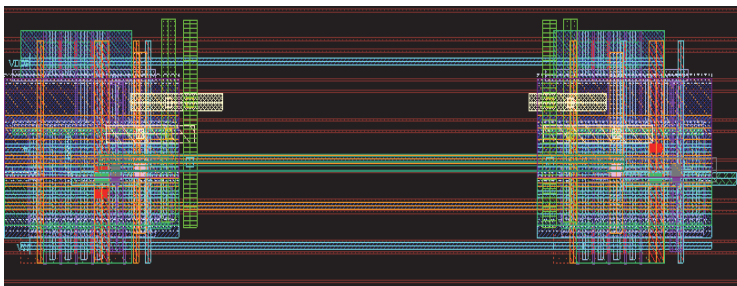
Ընդունելով, որ բուֆերի հապաղումը հավասար է t_b -ի, m բուֆերի դեպքում ընդհանուր T հապաղումը կորոշվի հետևյալ բանաձևով.

$$T = mt_b + (m + 1)t = mt_b + rcL^2/[2(m + 1)] \geq \\ \geq 2(rcL^2t_b/2)^{1/2} - t_p = 2(T_D t_b)^{1/2} - t_b,$$

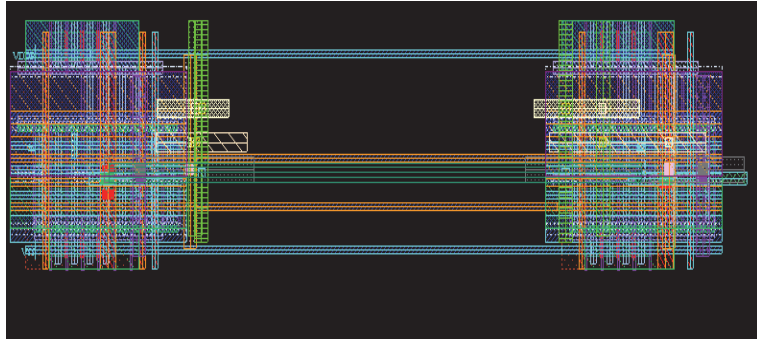
որտեղ T_D -ն բուֆերի սկզբում միջմիացման հապաղումն է, երբ՝

$$m = (T_D t_b)^{1/2} - 1:$$

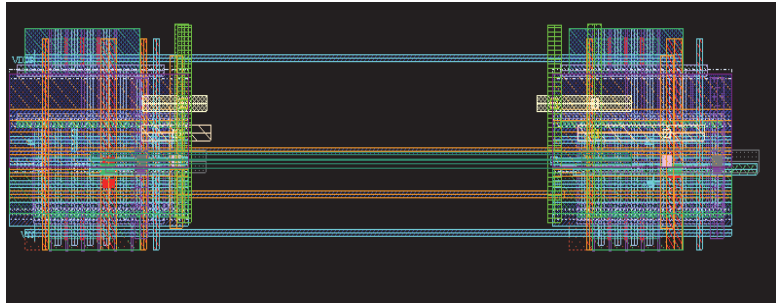
Մոդելավորման արդյունքները: Աշխատանքում հետազոտությունները կատարվել են ինվերտոր - բուֆեր, ինվերտոր - ԵՎ-ՈՉ և ինվերտոր - ԿԱՄ-ՈՉ հանգույցների համար՝ օգտագործելով տասը մետաղական շերտեր: Հանգույցների միջև հեռավորությունն ընտրվել է 1, 2 և 3 մկմ: Հետազոտությունները կատարվել են 14 նմ տեխնոլոգիական նորմերով՝ Custom Compiler և HSPICE ծրագրային գործիքներով 0,9Վ սնման լարման, 25°C ջերմաստիճանի, տիպային պրոցեսի և մուտքային ազդանշանի 50 պվ ճակատների տևողության դեպքում: Արդյունքները ներկայացված են նկ. 3-5-ում և աղ. 1-3-ում):



Նկ. 3. Ինվերտոր - բուֆեր հանգույցների փոպոլոգիան



Նկ. 4. Ինվերտոր – ԵՎ-ՈՉ հանգույցների տրոպիչոգիան



Նկ. 5. Ինվերտոր – ԿԱՄ-ՈՉ հանգույցների տրոպիչոգիան

Աղյուսակ 1

Ինվերտոր – բուֆեր հանգույցների մոդելավորման արդյունքները

Միջմիացման երկարությունը	Մետաղ	Աճի ճակատ (սվ)	Նվազման ճակատ (սվ)	Հոսանք (մկմ)	Միջմիացման ունակությունը (նՖ)
1	2	3	4	5	6
1 մկմ	M2	1.02	0.72	3.57	1.346
	M4	1.13	0.79	3.69	1.651
	M6	1.21	0.99	3.77	1.679
	M8	1.38	1.06	3.74	1.764
	M10	1.46	1.14	3.76	1.808
2 մկմ	M2	1.11	0.79	3.59	1.417
	M4	1.2	0.83	3.74	1.799
	M6	1.35	1.01	3.74	1.793
	M8	1.43	1.08	3.77	1.863
	M10	1.49	1.15	3.78	1.889
3 մկմ	M2	1.2	0.87	3.61	1.483
	M4	1.26	0.87	3.79	1.944
	M6	1.4	1.03	3.77	1.887
	M8	1.46	1.09	3.8	1.939
	M10	1.51	1.15	3.8	1.937

Աղյուսակ 2

Ինվերտոր – ԵՎ-ՈՉ հանգույցների մոդելավորման արդյունքները

Միջմիացման երկարությունը	Մետաղ	Աճի ճակատ (սվ)	Նվազման ճակատ (սվ)	Հոսանք (մկմ)	Միջմիացման ունակությունը (նՖ)
1 մկմ	M2	1.25	0.83	2.69	1.358
	M4	1.28	0.87	2.7	1.392
	M6	1.44	1.07	2.72	1.412
	M8	1.5	1.13	2.74	1.466
	M10	1.6	1.2	2.78	1.511
2 մկմ	M2	1.35	0.91	2.72	1.429
	M4	1.34	0.89	2.73	1.46
	M6	1.47	1.05	2.74	1.465
	M8	1.53	1.12	2.76	1.518
	M10	1.6	1.2	2.78	1.563
3 մկմ	M2	1.44	0.97	2.75	1.495
	M4	1.38	0.91	2.75	1.524
	M6	1.5	1.04	2.75	1.514
	M8	1.55	1.1	2.77	1.563
	M10	1.62	1.18	2.79	1.605

Աղյուսակ 3

Ինվերտոր – ԿԱՄ-ՈՉ հանգույցների մոդելավորման արդյունքները

Միջմիացման երկարությունը	Մետաղ	Աճի ճակատ (սվ)	Նվազման ճակատ (սվ)	Հոսանք (մկմ)	Միջմիացման ունակությունը (նՖ)
1 մկմ	M2	1.38	0.73	2.68	1.358
	M4	1.42	0.77	2.71	1.402
	M6	1.58	0.94	2.71	1.415
	M8	1.65	1	2.73	1.465
	M10	1.71	1.07	2.75	1.361
2 մկմ	M2	1.45	0.82	2.71	1.429
	M4	1.44	0.8	2.73	1.47
	M6	1.59	0.95	2.73	1.465
	M8	1.64	1.02	2.75	1.516
	M10	1.72	1.09	2.77	1.357
3 մկմ	M2	1.52	0.9	2.74	1.495
	M4	1.47	0.84	2.76	1.533
	M6	1.58	0.98	2.75	1.511
	M8	1.65	1.03	2.77	1.562
	M10	1.72	1.1	2.79	1.609

Եզրակացություն.

1. Տեսականորեն և մոդելավորմամբ կատարված հետազոտությունների հիման վրա կարելի է առաջարկել ծրագրման ճիշտ կանոնների մշակման համար մոտեցումներ:

2. Մոդելավորմամբ ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ 1մկմ երկարության միջմիացման դեպքում աճման և նվազման ճակատների ցրվածությունը ավելի մեծ է, քան 2, 3 մկմ-ի դեպքում: Հաշվի առնելով մետաղների փոխձածկումը՝ այդ շեղվածությունները կմեծանան: Օգտագործված տեխնոլոգիայի դեպքում ցանկալի է միջմացումներն իրականացնել 2...3 մկմ միջակայքում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Xu Huang, Kun Liu, Xiao-zong Huang and Zheng-rong He.** An Effective Method for Interconnect Delay Optimization of ASIC's // 2018 3rd International Conference on Electrical, Control and Automation Engineering. - 2018. - P. 255-258.
2. **Zhu Zhang-Ming, Qian Li-Bo and Yang Yin-Tang.** A novel interconnect-optimal repeater insertion model with target delay constraint in 65 nm CMOS // Chin. Phys. March.- 2009. – Vol. 18, No 3. - P. 1188-1193.
3. **Bei Yu, Derong Liu, Salim Chowdhury and David Z. Pan.** TILA: Timing-Driven Incremental Layer Assignment // 2015 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design. – 2015. - P.110-117.
4. **Цветков Ю.Б.** Процессы и оборудование микротехнологии. Часть 1. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 168 с.

А.О. ПЕТРОСЯН

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗАДАЧ ТРАССИРОВКИ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

Теоретически и на основе моделирования исследованы особенности трассировки линий передач (межсоединений) в интегральных схемах. Приведены аналитические выражения для расчета времени задержки в межсоединениях, выполнены анализ способов их уменьшения, физическое проектирование и представлены результаты моделирования.

Ключевые слова: интегральная схема, линия передачи, уровень металла, трассировка.

A.O. PETROSYAN

**ANALYSIS OF THE FEATURES OF THE TRANSMISSION LINE
TRACING PROBLEM IN INTEGRATED CIRCUITS**

Theoretically, and on the basis of modeling, the features of tracing of transmission lines (interconnections) in integrated circuits are studied. Analytical expressions for calculating the delay time in interconnections are given, an analysis of ways to reduce them, physical design, and simulation results are presented.

Keywords: integrated circuit, transmission line, metal level, tracing.

ՀՏԴ 621.382

Կ.Ա. ՄԵԼԻՔՅԱՆ

**ՄՈՒՏՔ/ԵԼՔ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԱՐԱԳԱԳՈՐԾՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ
ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Ժամանակակից գերմեծ ինտեգրալ սխեմաներում կարևոր խնդիր է մուտք/ելք հանգույցների արագագործության բարձրացումը: Հետազոտվել են մուտք/ելք հանգույցների արագագործության բարձրացման միջոցները, բերվել են դրանց համապատասխան կատարված մոդելավորումների արդյունքները:

Առանցքային բառեր. մուտք/ելք հանգույց, արագագործություն, ինտեգրալ սխեմա, ազդանշանի ճակատ:

Ներածություն: Ժամանակակից գերմեծ ինտեգրալ սխեմաներում (ԻՍ) տարրերի չափերի փոքրացմանը զուգընթաց բարձրացել է նաև արագագործությունը հանգույցներում, ինչը թույլ է տալիս ապահովել ինֆորմացիայի փոխանցման ավելի մեծ արագություն [1]: Այնուամենայնիվ, արագագործության բարձրացմանը զուգընթաց անհրաժեշտ է ապահովել մի շարք կարևորագույն չափանիշներ, ինչպիսիք են արտադրողականությունը, ցրման հզորության նվազումը և այլն:

Արագագործության բարձրացումը ժամանակակից ԻՍ-երի համար հանդիսանում է կարևորագույն խնդիր, որի լուծման միջոցով հնարավորություն է ստեղծվում ինֆորմացիայի փոխանցումն արագացնել նվազագույն կորուստների հաշվին:

Արդի մուտք/ելք հանգույցներում արագագործության բարձրացման որակյալ միջոցներն ունեն կարևոր նշանակություն, քանի որ հապաղումների պատճառով կարող են առաջանալ աղավաղումներ և անհամաձայնեցումներ հանգույցներում, ինչը կարող է առաջացնել ընդհուպ մինչև ազդանշանի կորստի: