

Վ.Շ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Տ.Հ. ՇԱՀԻՅԱՆ, Բ.Է. ԲԱՂՄԱՅԱՆ

ԳԵՐՄԵԾ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՀԱՐԹԱԿՆԵՐԻ
RC ՄՈՂԵԼԻ ԱՐՏԱԾՄԱՆ ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ՄԵԹՈԴ

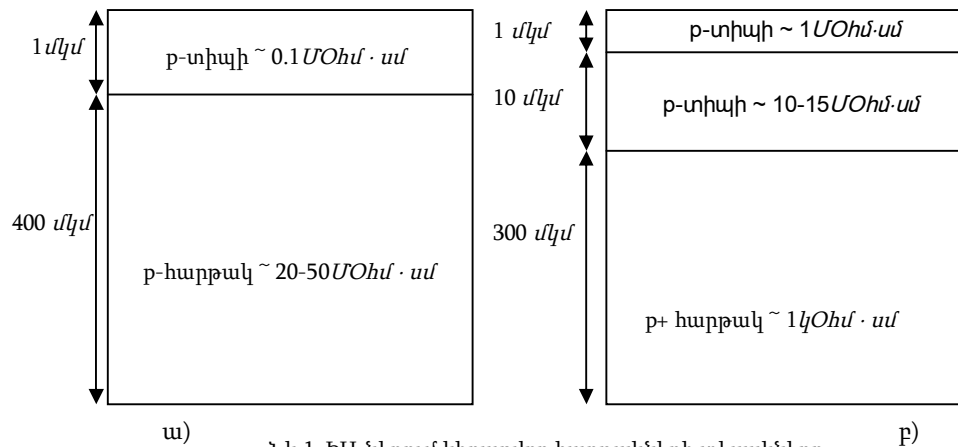
Խառը ազդանշանային ինտեգրալ սխեմաների տարբեր հատվածների հարթակի միջոցով փոխազդեցությունների վնասագերծման ամենաարդյունավետ տարբերակը սխեմայի նախագծման փուլում մոդելավորման միջոցով դրանց հաշվի առնումն է: Այդ նպատակով մոդելավորման ժամանակ օգտագործվում է նաև հարթակի մոդելը: Հարթակի միջոցով տարածվող աղմուկների մոդելավորման նպատակով վերջինիս մոդելի արտածման առաջարկվող համակցված մեթոդը հնարավորություն է ընձեռում գործնական հաշվարկների տեսանկյունից մեքենայական ժամանակի ընդունելի ծախսերով դուրս բերել հարթակի RC մոդելը:

Առանցքային բառեր. ինտեգրալ սխեմա, աղմուկ, հարթակի մոդել, համակցված մեթոդ:

Նախաբան. Ժամանակակից ինտեգրալ սխեմաների (ԻՄ) աշխատանքային հաճախականությունների և ինտեգրացիայի աստիճանի մեծացմանը [1] զուգընթաց հարթակների միջոցով սխեմայի տարբեր հատվածների փոխազդեցությունները դարձել են որոշիչ [2-10]: Վերջինների անտեսումը ԻՄ-ների նախագծման գործընթացում մեծ հավանականությամբ կարող է հանգեցնել նույնիսկ արտադրվող ԻՄ-ների անաշխատունակության [4]: ԻՄ-ի տարբեր հատվածների միջև փոխանջատման աղմուկների փոխանցման հիմնական պատճառը հարթակի ոչ զրոյական էլեկտրահաղորդականությունն է: Հարթակի միջոցով ԻՄ-ի տարբեր հատվածների փոխազդեցության մոդելավորման խնդիրը ներկայումս ակտիվ հետազոտությունների առարկա է, քանի որ ԻՄ-ների արտադրման 90%-ը և ավելի նոր տեխնոլոգիաների դեպքում շեշտակիորեն մեծացել է նշված փոխազդեցությունների դերը ԻՄ-ի գործունեության վրա: Օգտագործվող մոդելները խիստ կախված են կիրառվող տեխնոլոգիական գործընթացից և կարիք ունեն մշտական զարգացման: Իրականացվող հետազոտությունների մեծ քանակը [2-10] պայմանավորված է նրանով, որ հարթակի տարբեր մասերի փոխազդեցությունների մոդելավորումը կատարվում է հարթակի մոդելի արտածման միջոցով: Խնդիրը բարդանում է ինտեգրացիայի աստիճանի և սխեմաներում տարբեր քանակի մեծացմանը զուգընթաց: Մյուս կողմից, հարթակի մոդելը պետք է լինի բավականին ճշգրիտ և արտածման համար պահանջվող մեքենայական ժամանակի ծախսերը գործնական նախագծման տեսանկյունից պետք է լինեն ընդունելի: Այդ պատճառով, անհրաժեշտություն է առաջացել այնպիսի մոդելների մշակման, որոնցում կապահովվի ժամանակակից ԻՄ-ների նախագծման տեսանկյունից ընդունելի փոխզիջում հարթակի մոդելի արտածման արագության և ճշտության միջև:

Ժամանակակից ԻՄ-ներում կիրառվում են երկու հիմնական տիպերի [3]՝ բարձր և ցածր դիմադրությամբ, հարթակներ (նկ.1): Առաջին դեպքում (նկ.1ա) հարթակները կազմված են 200...400 մկմ հաստությամբ ցածր լեգիրման աստիճանով տեղամասից և ավելի բարձր լեգիրման աստիճանով բարակ

Էպիտաքսիալ շերտից: Ցածր տեսակարար դիմադրությամբ հարթակը (նկ.1բ) բաղկացած է բարձր լեգիրման աստիճանով p կամ n տիպի, հարթակի վրա աճեցված, քիչ լեգիրված p կամ n տիպի առաջին էպիտաքսիալ շերտից: Վերջինիս վրա աճեցվում է երկրորդ էպիտաքսիալ շերտը:



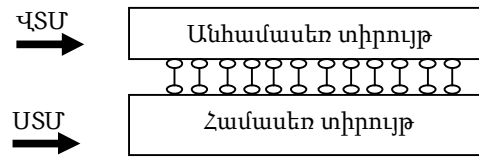
Նկ.1. ԻՄ-ներում կիրառվող հարթակների տեսակները
 ա- բարձր դիմադրությամբ հարթակ,
 բ- ցածր դիմադրությամբ հարթակ

Հարթակների մոդելների առկա բազմազանությունը կարելի է դասակարգել երկու խմբերի. ա) ստատիկ՝ միայն դիմադրություններից բաղկացած, բ) դինամիկ՝ դիմադրություններից և ունակություններից կազմված:

Այն դեպքերում, երբ ռեակտիվ ունակային բաղադրիչը ակտիվի նկատմամբ այնքան փոքր է, որ այն կարելի է անտեսել, իհարկե, կիրառվում են հարթակի ստատիկ մոդելներ: Սակայն, բնականաբար, աշխատանքային հաճախականության մեծացմանը զուգընթաց, ռեակտիվ ունակային բաղադրիչի ազդեցությունը մեծանում է [5]:

Հարթակի մոդելի արտածման համար, որը պահանջում է Լապլասի հավասարման լուծում, հիմնականում կիրառվում են վերջավոր տարբերությունների (ՎՏ) և սահմանային տարրերի (ՄՏ) մեթոդները: Գոյություն ունեցող դինամիկ մոդելների դեպքում օգտագործում են ՎՏ մեթոդի վրա հիմնված տարբեր եղանակներ [6,7], որոնք մեծ թվով տարրեր պարունակող ԻՄ-ների դեպքում դանդաղագործության պատճառով կիրառելի չեն: Ի տարբերություն ՎՏ-ի դասի՝ ՄՏ մեթոդները շատ ավելի արագագործ են [8,9]: Սակայն ՄՏ-ի դասի մեթոդները կիրառելի են միայն համասեռ տիրույթների դեպքում: Իսկ ԻՄ-ների հարթակում գոյություն ունեցող անհամասեռ տիրույթների մոդելի դուրս բերման համար, այնուամենայնիվ, օգտագործվում են դանդաղագործ ՎՏ դասի մեթոդները: Այդ պատճառով, հաճախ [10] կիրառվում են համակցված մեթոդները, որոնցում համասեռ տիրույթների համար օգտագործվում է ՄՏ-ի, իսկ անհամասեռների համար՝ ՎՏ-ի մեթոդները (նկ.2):

Error!



Նկ.2. ՎՏ և ՄՏ մեթոդների համակցման սխեման

ԻՄ-ների հարթակի համասնեո և անհամասնեո տիրույթներում միաժամանակ ՄՏ-ը և ՎՏ-ը համակցող առաջարկվող մեթոդը. Առաջարկվում է հարթակի RC մոդելի արտաձման համակցված մեթոդ, որը, ի տարբերություն [6,7]-ի, դիմադրությունների և ունակությունների հաշվարկման համար միաժամանակ կիրառում է ՄՏ-ի և ՎՏ-ի մեթոդները ԻՄ-ների հարթակի համապատասխանաբար համասնեո և անհամասնեո տիրույթների համար:

Հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ տվյալ հարթակում ինչ որ r շառավղից մեծ կոնտակտների հեռավորությունների դեպքում դրանց միջև փոխազդեցությունը այնքան փոքր է, որ կարելի է անտեսել: Օգտագործելով այդ հատկությունը՝ առաջարկվող մեթոդում դիտարկվում է միայն r -ից փոքր կամ հավասար հեռավորությունների վրա գտնվող կոնտակտների փոխազդեցությունը: r -ի արժեքը ընտրվում է՝ ելնելով հաշվարկների պահանջվող ճշտությունից: Դա ապահովում է զգալի շահում արագագործության մեջ՝ ճշտության շատ չնչին կորուստների պարագայում:

ՎՏ-ի մեթոդի դեպքում հարթակը բաժանվում է բազմաթիվ տարրական խորանարդների: Դիտարկելով կայուն հոսանքների քվադիստատիկ ռեժիմը և կիրառելով Մաքսվելի հավասարումները, ստացվում է՝

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla E) + \frac{1}{\rho} (\nabla E) = 0, \quad (1)$$

որտեղ ρ -ն և ε -ը համապատասխանաբար ծավալի տեսակարար դիմադրությունն ու դիէլեկտրիկ թափանցելիությունն են: Այս հավասարումը վերջավոր տարրերով դիսկրետացված համակարգի դեպքում կարող է իրականացվել՝ կիրառելով Գաուսի օրենքը և, այնուհետև, դիվերգենցիայի թեորեմը խորանարդի V ծավալում.

$$\int_V \nabla E dV = \int_S E dS = \int_V \frac{\rho}{\varepsilon} dV, \quad (2)$$

որտեղ S -ը V -ի մակերևույթի մակերեսն է: Հատկանշական է, որ տարրական խորանարդի կողի չափը, որից, բնականաբար, կախված է V ծավալը, փոփոխական մեծություն է և ընտրվում է՝ ելնելով տվյալ տիրույթի համար պահանջվող ճշտությունից:

Խորանարդի V ծավալը համարելով համասնեո՝ ստացվում է՝

$$\sum_j E_{ij} S_{ij} = \frac{\rho}{\varepsilon} V_{\text{isotropic}}, \quad (3)$$

որտեղ E_{ij} -ն i և j հանգույցներով անցնող խորանարդի կողմի մակերևույթին տարված էլեկտրական դաշտի նորմալն է, իսկ $V_{\text{ստացվող}}$ -ը՝ մոտարկման արդյունքում ստացվող V -ի արժեքը: Հետևաբար՝

$$\nabla E = \frac{\sum_j E_{ij} S_{ij}}{V_{\text{ստացվող}}} : \quad (4)$$

Կիրառելով $E_{ij} = \frac{V_i - V_j}{l_{ij}}$ մոտարկումը, որտեղ l_{ij} -ն i և j հարևան հանգույցների միջև հեռավորությունն է, իսկ V_i -ն և V_j -ն՝ այդ հանգույցների պոտենցիալները, ստանում ենք.

$$\sum_j \left[G_{ij} (V_i - V_j) + C_{ij} \left(\frac{\partial V_i}{\partial t} - \frac{\partial V_j}{\partial t} \right) \right] = 0, \quad (5)$$

որտեղ $G_{ij} = \sigma \frac{S_{ij}}{l_{ij}}$ և $C_{ij} = \varepsilon \frac{S_{ij}}{l_{ij}}$, իսկ σ -ն խորանարդի տեսակարար

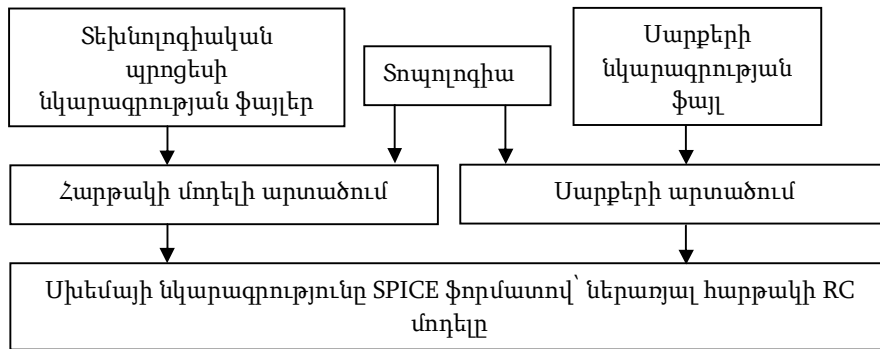
հաղորդականությունն է: ՎՏ-ի մեթոդում օգտագործվում են բազմաթիվ կոորդինատային ցանցերի ալգորիթմը [6], իսկ մատրիցների լուծման համար՝ փոխկապված գրադիենտների խտերացիոն մեթոդը: ՄՏ-ի մեթոդի դեպքում գոյություն ունի Գրինի ֆունկցիան, որը բավարարում է հարթակի սահմանային պայմաններին (Դիրիխլեի կամ/և Նյումանի): Չնայած հաղորդականության և դիէլեկտրիկ թափանցելիության ֆիզիկական բնույթների տարբերությանը, դրանց հաշվարկման համար կիրառվում է նույն մաթեմատիկական հենքը [8,9]: Դիմադրությունների հաշվարկման համար Գրինի $G(x_f, y_f, z_f, x_s, y_s, z_s)$ ֆունկցիան ներկայացնում է (x_s, y_s, z_s) կետում ինժեկցված միավոր հոսանքի կողմից ինդուկցված պոտենցիալը՝ դիտարկվող (x_f, y_f, z_f) կետում [8], իսկ ունակությունների՝ համար՝ (x_s, y_s, z_s) կետում գտնվող կետային լիցքի կողմից ինդուկցված պոտենցիալը՝ դիտարկվող (x_f, y_f, z_f) կետում [9]: Դիմադրությունների և ունակությունների հաշվարկման համար անհրաժեշտ է լուծել հետևյալ հավասարումների համակարգերը՝

$$\{I\} = \{G\}\{U\}, \quad (6)$$

$$\{Q\} = \{C\}\{U\}, \quad (7)$$

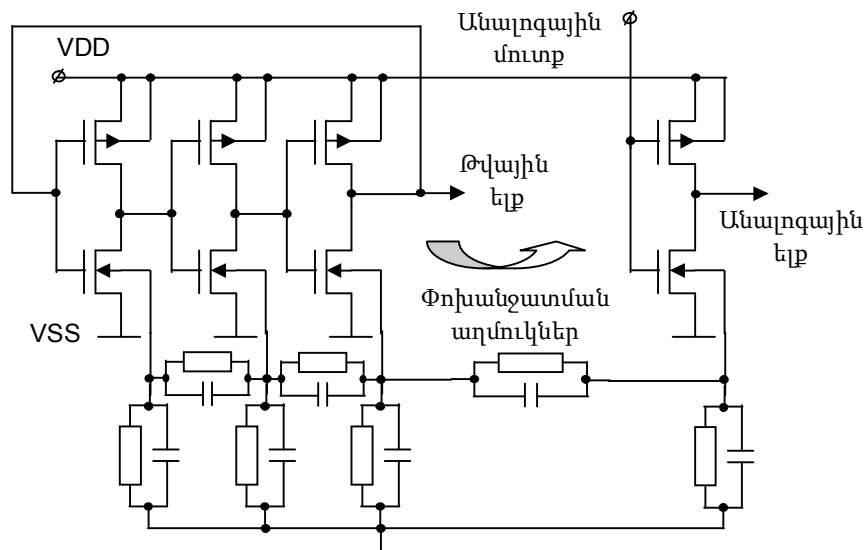
որտեղ $\{U\}$ -ն կոնտակտներին կիրառված լարումներն են: Տվյալ կոնտակտի փոխազդեցությունը մնացած կոնտակտների հետ հաշվարկման ժամանակ դրա լարումը ընդունվում է հավասար 1 Վ, իսկ մնացածներինը՝ 0 Վ-ի: Երբ հայտնի է դիմադրության և ունակության հաշվարկման համար Գրինի ֆունկցիանները, հաշվարկվում են $\{I\}$ և $\{Q\}$ մատրիցները, այնուհետև $\{G\}$ և $\{C\}$ մատրիցները [8,9]:

Առաջարկվող մեթոդը իրականացվել է SUBRCX ծրագրային փաթեթում (նկ.3):



Նկ.3. SUBRCX ծրագրի մուտքային և ելքային տեղեկությունների ցանկը

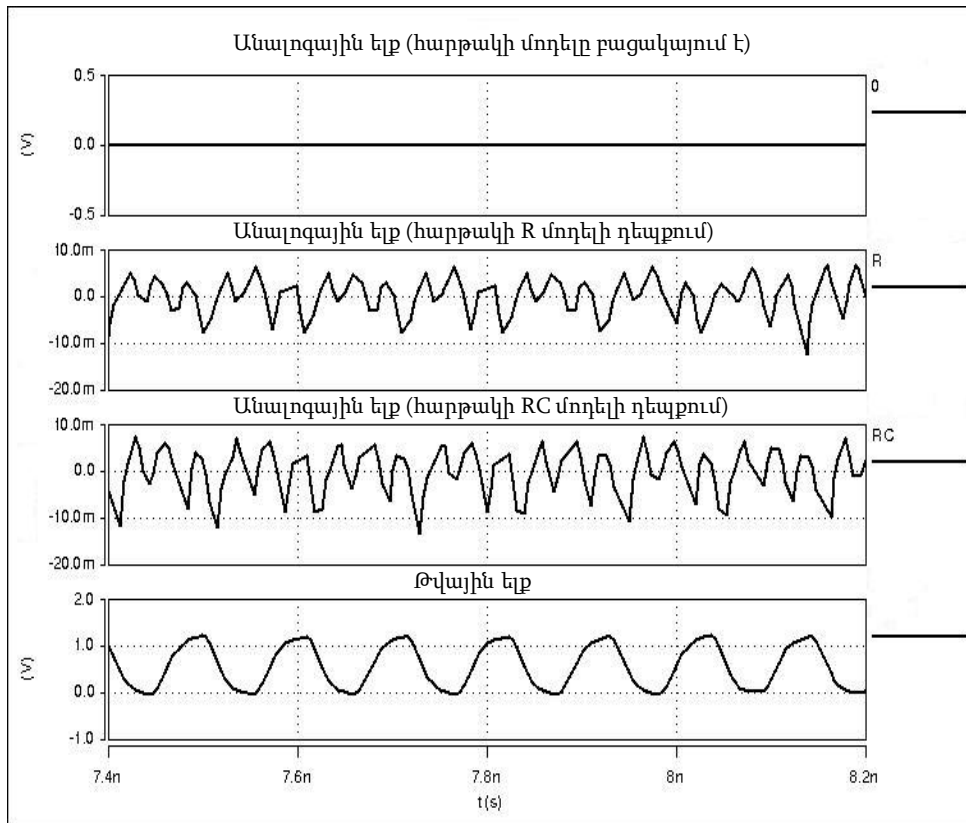
Համակցված մեթոդի փորձարկման արդյունքները



Նկ.4. Փորձարկվող սխեմա
(Պարզության համար բոլոր պարագիտային կապերը պատկերված չեն)

SUBRCX-ը փորձարկվել է նկ.4-ում բերված սխեմայի օրինակի վրա, որը նախագծվել է 65nm տեխնոլոգիայով: Ազդանշանների օղակաձև գեներատորի հաճախականությունը ստացվել է 9.6ԳՀց: Ստացվել են նաև SUBRCX ծրագրով արտաձված սխեմայի (ներառյալ հարթակի մոդելը) մոդելավորման արդյունքները սխեմատիկական մոդելավորման հայտնի SPICE ծրագրով (նկ.5): Սխեմայի մոդելավորումը կատարվել է երեք դեպքերում՝ առանց հարթակի մոդելի, հարթակի ստատիկ մոդելով, հարթակի դինամիկ մոդելով: Ստացված գրաֆիկներից երևում է,

որ դինամիկ մոդելի դեպքում աղմուկի արժեքը մեծանում է մինչև 30%: Բնականաբար ավելի մեծ հաճախականությունների դեպքում այդ ցուցանիշը ավելի կմեծանա:



Նկ.5. Անալոգային ելքի տեսքը մուտքի հաստատուն 1' արժեքի, և հարթակի մոդելի բացակայության, R և RC մոդելների դեպքում

Կատարվել է համեմատություն ըստ հարթակի մոդելի արտաձման արագագործության և մոդելի ճշտության առաջարկվող կոմբինացված մեթոդի և լիովին ՎՏ-ի մեթոդի միջև (աղյուսակ):

Առաջակվող մեթոդի համեմատությունը լիովին ՎՏ մեթոդի հետ

	Լիովին ՎՏ մեթոդ	Առաջարկվող կոմբինացված մեթոդ
Հարթակի RC մոդելի արտածման ժամանակը (վ)	87	3
Աղմուկի ամենամեծ արժեքը (մՎ)	12	11
Հարաբերական սխալը (%)	0	9

Եզրակացություն. Առաջարկվող ՄՏ-ը և ՎՏ-ը համակցող մեթոդի փորձարկման արդյունքները թեստային սխեմայի օրինակի վրա ցույց են տալիս, որ առաջարկված մեթոդը լիովին ՎՏ-ի մեթոդի համեմատությամբ ավելի արագ է 10...30 անգամ, ճշտության՝ 10%-ը չգերազանցող կորստի դեպքում: Փաստորեն, գործնական հաշվարկների տեսանկյունից լրիվ բավարարվող ճշտությունը ապահովվում է մեկ կարգը գերազանցող արագությամբ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. International Technology Roadmap for Semiconductors <http://www.itrs.net>
2. **Briaire J., Krisch K.S.** Principles of Substrate Crosstalk Generation in CMOS Circuits // IEEE transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. -2000. -Vol. 19, N.6.– P.645-653.
3. **Merrill R.B., Young W.M., Brehmer K.** Effect of Substrate Material on Crosstalk in Mixed Analog- Digital Integrated Circuits // IEEE. -1994. -P.1721-1724.
4. **Henry H., Chan Y., Zeljko Zilic.** Substrate Coupling Fault Testing in System-on-a-Chip Digital Circuits // IEEE. -2002. –Vol. 1. -P 160-163.
5. **Pfost M., Rein H., Holmarth T.** Modeling substrate effects in the design of high- speed Si-Bipolar IC's // IEEE J. Solid-State Circuits. -1996. -Vol. 31. -P.1493-1501.
6. **Silveira L. Miguel, Vargas Nuno.** Multilevel finite difference methods for the characterization of substrate coupling in deep sub-micron designs // IEEE Design & Test of Computers. -2002. –P.4–15.
7. **Silva J.M.S., Silveira L.M.** Dynamic Models for Substrate Coupling in Mixed-Mode Systems. - 2003. - P.345-351.
8. **Costa J.P., Chou Mike, Silveira L. Miguel.** Efficient techniques for accurate modeling and simulation of substrate coupling in mixed-signal IC's // IEEE transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. -1999. -Vol. 18, N. 5. -P.597-607.
9. **Xu C., Gharpurey R., Fiez T.S., Mayaram K.** A Green Function-Based Parasitic Extraction Method for Inhomogeneous Substrate Layers // DAC Conference. -2005. -P.141-146.
10. **Schrik E., van der Meijs N.R.** Combined BEM/FEM substrate resistance modeling // Proc. 39th Design Automation Conference. -2002. -P.771 – 776.

ՀՊՃՀ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 20.02.2007:

В.Ш. МЕЛИКЯН, Т.О. ШАГИНЯН, Б.Э. БАГРАМЯН

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА RC МОДЕЛИ ПОДЛОЖЕК СВЕРХБОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Самым экономичным методом обезвреживания взаимовлияний различных частей смешанно-сигнальных интегральных схем через подложку является их моделирование в процессе проектирования схемы. С этой целью в процессе моделирования используется также модель подложки. Предложенный комбинированный метод синтеза модели подложки позволяет синтезировать RC модель подложки при приемлемых, с точки зрения практических расчетов, расходах машинного времени.

Ключевые слова: интегральная схема, шум, модель подложки, комбинированный метод.

V.Sh. MELIQYAN, T.H. SHAHINYAN, B.E. BAGHRAMYAN

COMBINED EXTRACTION METHOD OF RC MODEL OF SUBSTRATES OF VERY LARGE INTEGRATED CIRCUITS

The most efficient method of neutralizing substrate couplings in mixed-signal integrated circuits simulates them during circuit design. For this purpose a substrate model is also used during circuit simulation, suggested combined extraction method of model of substrate (for simulating substrate noise couplings), gives an opportunity to extract RC model of substrates, with acceptable waste of machine time.

Keywords: integrated circuit, noise, substrate model, combined method.