

ԳՄԻՍ պիտանիության գնահատման մաթեմատիկական մոդելները

Վազգեն Ս. Կարապետյան

Ռուս-Հայկական պետական համալսարան
e-mail vazgen.karapetyan@pontesolutions.com

Ամփոփում

Այս աշխատանքը բաղկացած է երկու հիմնական մասից. մասի մերկայացված է պիտանի ելքի (yield) խնդիրը ժամանակակից գեր-մեծ ինտեգրալային սխեմաների (ԳՄԻՍ) արտադրությունում: Այնուհետև մերկայացվում են արտադրական խտանի տեսակարար կշռի գնահատման մաթեմատիկական վիճակագրական մոդելները: Աշխատանքում հիմնական ուշադրությունը դարձվում է անկանոն դեֆեկտների առկայությանը պայմանավորված խտանին:

Նախաբան

Պիտանի ելք (ՊԵ) ԳՄԻՍ արտադրության մեջ կարելի է սահմանել որպես արտադրության արդյունքում ստացված օգտակար միկրոսխեմաների տոկոսը ընդհանուր արտադրանքի մեջ: Ամենամեծ խնդիրներից մեկը, որին դեռ են առնում կիսահաղորդչային ընկերությունները այսօր՝ ՊԵ բարձրացումն է: Քանի որ ՊԵ ուղիղ առնչություն ունի շահույթի հետ, շատ մեծ կարևորություն է ստանում այդ խնդրի լուծումը ԳՄԻՍ նախագծման փուլում՝ մինչև արտադրություն սկսելը: ՊԵ ճիշտ գնահատելու և լավացնելու խնդիրը դառնում է էլ ավելի կարևոր տեխնոլոգիական պրոցեսների զարգացմանը զուգընթաց. իրավիճակը հետևյալն է՝ ժամանակակից 90 մանոմետր և փոքր տեխնիկական պրոցեսով արտադրվող միկրոսխեմաների համար ՊԵ չի գերազանցում 50%: Շարունակաբար փոքրացնելով ԳՄԻՍ ուղեգծման և տարրական ելմանների չափերը՝ աճում է կիսահաղորդչի և մետաղական միացումների զգայունությունը արտադրական դեֆեկտների նկատմամբ: Հաշվի առնելով բարձր արտադրական ծախսերը և գերմեծ ծավալները՝ ՊԵ նույնիսկ չնչին աճը կարող է լինել չափազանց կարևոր: Այս միտումը ստիպում է ԳՄԻՍ ավտոմատ նախագծման համակարգեր մշակող ընկերություններին կատարել մոր ուսումնասիրություններ և ստեղծել համապատասխան միջոցներ այդ խնդիրը լուծելու համար: ԳՄԻՍ էլեկտրական խափանման հիմնական պատճառներից մեկն է համդիսանում արտադրական պրոցեսում տարբեր տիպի դեֆեկտների առկայությունը: Դրա արդյունքում կարող է առաջանալ կամ ավելորդ նյութ, կամ պակասող՝ պատճառ համդիսանալով համապատասխանաբար կարճ միացմանը կամ րաց շղթայի:

Համառոտ ակնարկ ԳՄԻՍ արտադրության մեջ խտանմի առաջացման պատճառների մասին.

Միկրոսխեմաների ստուգման փուլում հայտնաբերված բոլոր անաշխատունակ օրինակները կարելի է բաժանել երկու հիմնական դասի.

- կատաստրոֆիկ խափանումներ (catastrophic failures), երբ միկրոսխեման չի աշխատում ընդհանրապես,
- և պարամետրիկ խափանումներ (parametric failures), երբ արտադրված օրինակը աշխատում է բայց չի համապատասխանում մախատեցված որակական բնութագրերին: Դա կարող է արտահայտվել օրինակ ջերմային կամ էլեկտրական բնութագրերի խախտմանը, աշխատանքային հաճախականության նվազմանը, ևն: Չմայած այն բանի, որ տվյալ արտադրանքը սկզբունքորեն կարող է գործել (թե այլ, ավելի թույլ աշխատանքային նորմերին համապատասխան), այնուամենայնիվ այն համարվում է արտադրական կորուստ, քանի որ չի կարող օգտագործվել կամ վաճառվել որպես մախատեցված հատկություններով օժտված արտադրանք:

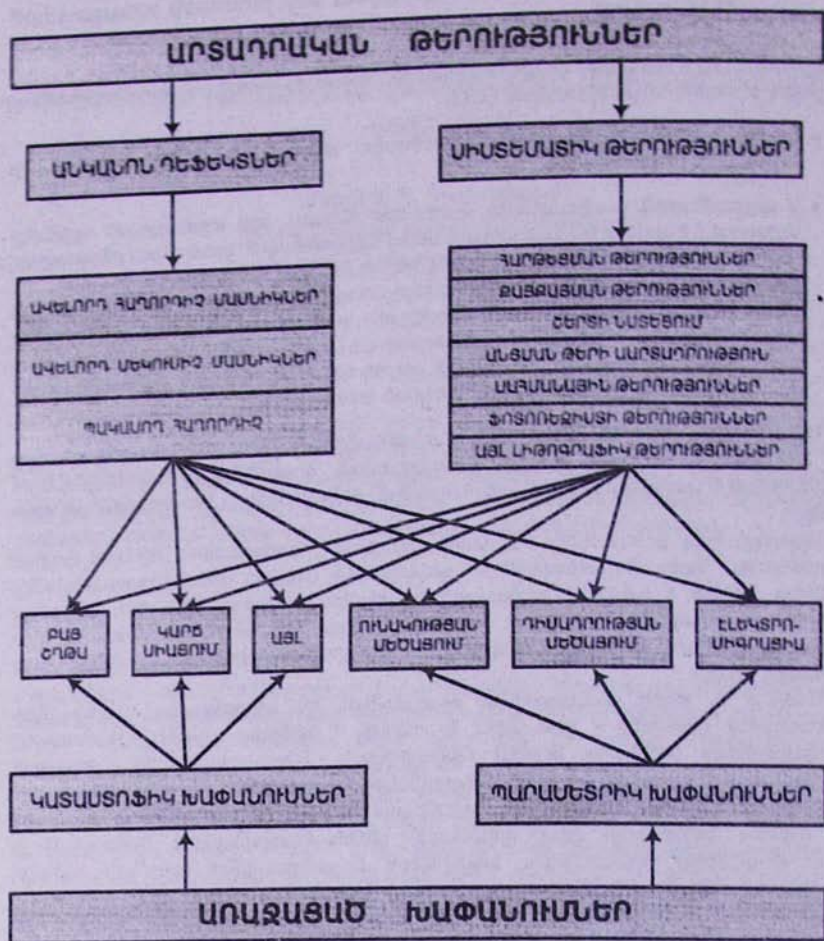
Ե՛ւ՝ պարամետրիկ և կատաստրոֆիկ խափանումների առաջացման պատճառ կարող են հանդիսանալ տարբեր բնույթի արտադրական գործոններ: Պատկեր 1.1-ում պատկերված է տարբեր այդպիսի արտադրական երևույթների և խափանումների միջև կապը:

Արտադրական կորուստների մեծ մասի պատճառ է հանդիսանում այսպես կոչված պատահական մանր փոշեհատիկների - դեֆեկտների (random defects) առկայությունը: Դեֆեկտ կարելի է անվանել ցանկացած ֆիզիկական անոմալիայի, որի գոյացման արդյունքում առաջանում է շղթայի խափանում: Սրա մեջ են մտնում մետաղի կամ մեկուսիչի ավելորդ կտորների արդյունքում առաջացած կարճ միացումները, բաց շղթաները և այլն:

Մակայն ոչ բոլոր արտադրական կորուստներն են պատահական դեֆեկտների առկայության հետևանք - դրա մյուս պատճառն է այսպես կոչված սխեմատիկ խափանումների (systematic defects) առկայությունը. Սխեմատիկ են համարվում արտադրական պրոցեսի յուրահատկությունների արդյունքում կամ օգտագործվող սարքավորումների անկատարության պատճառով առաջացած կորուստները: Այդպիսին են օրինակ ֆոտոմյուլթի վատ կիրառման, քիմիա-մեխանիկական հարթեցման և այլն արդյունքում միացումների, անցումների և տեղադրված քլիջների ոչ-ճիշտ արտադրությունը: Ի տարբերություն պատահական դեֆեկտների, այս տիպի խնդիրները անկանոն չեն բաշխված միկրոսխեմայի մակերևութին, այլ խիստ կապված են տոպոլոգիաների խտությունից, արտադրական պնակի (chip wafer) վրա տվյալ օրինակի գտնվելու տեղից և այլն:

Հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ այս երկու երևույթների առկայությունը կապված է արտադրական պրոցեսից, օգտագործվող սարքավորումներից, միջավայրից և այլն. Բացի դրանից, հայտնի է մահ որ դրանց վնասարար ազդեցությունը մոտավորապես հավասար է. կախված տեխնոլոգիական պրոցեսի հաստությունից, ԻՍ մակերեսի մեծությունից, մրա խտությունից և այլն, կարող է գերակշռել կա՛մ սխեմատիկ, կա՛մ անկանոն դեֆեկտներով սահմանափակված խտանմի քանակը:

Աշխատունակ միկրոսխեմաների արտադրությունը իր մեջ ներառում է շատ բարդություններ: Ամեն անգամ մոտ տեխպրոցեսի ամցնելիս կամ մույնիսկ մոտ արտադրանք սկսելիս պիտանի ներքին տեղանքը սովորաբար ցածր է: Այդ պատճառով



Պատկեր 1: Արտադրական բերությունների և առաջացած խափանումների կախման աղյուսակ

արտադրությունը սկսելուն զուգահեռ սկսվում է մաև մեկ այլ պրոցես - խոտանի ուսումնասիրությունը և արտադրության լավացումը (yield learning): Մա շարունակական հետազոտական և փորձնական աշխատանք է, որի ընթացքում հայտնաբերվում և ուղղվում են արտադրական թեքություններն ու խնդիրները՝ արդյունքում բարձրացնելով պիտանի արտադրանքի տոկոսը: Այդ ընթացքում կատարված շտկումների արդյունքում նկատելի կերպով նվազում է հատկապես սխտեմատիկ խափանումների քանակը: Ի տարբերություն սխտեմատիկի, անկանոն դեֆեկտներով պայմանավորված խոտանը հանդիսանում է դժվար կառավարելի և գործնականում գոյություն չունեն դրա դեմ պայքարի էֆեկտիվ միջոցներ: Այդ իսկ պատճառով մուլմիսկ հասում ԻՄ արտադրական պրոցեսում անկանոն դեֆեկտներով պահմանված խոտանը հանդիսանում է գերակշիռ: Այդ տարբերությունը հատկապես զգալի է գեր-մեծ մակերես ունեցող ԻՄ-ների համար, քանի որ սխտեմատիկ դեֆեկտները, անկայությունը գրեթե անկախ է մակերեսից, մինչդեռ անկանոն դեֆեկտների պատահական բաշխման շնորհիվ դրանցով որոշված կորուստը մակերեսի մեծացման հետ աճում է աստիճանային կարգով:

Ինչ վերաբերվում է անկանոն դեֆեկտներով առաջացած խնդիրներին, ապա դրանք կարելի է դասակարգել հետևյալ երկու տիպերի՝ ներ-շերտային (intralayer) և միջ-շերտային (interlayer): Ներ-շերտային դեֆեկտները որպես կանոն առաջանում են լիթոգրաֆիկ պրոցեսի ընթացքում անջատված մասնիկների շնորհիվ և երբեմն կոչվում են ֆոտոլիթոգրաֆիկ դեֆեկտներ: Այդպիսին են, օրինակ, պակասող կամ ավելորդ մետաղական (կամ դիֆուզիոն, պոլիսիլիկոն) կտորները: Միջ-շերտային են համարվում, օրինակ, խափանված անցումները երկու հարևան մետաղական շերտերի (կամ մետաղ-պոլիսիլիկոն, և այլն) միջև, ինչպես նաև կարճ միացումները տարբեր մետաղական, պոլիսիլիկոն և այլն շերտերի միացումների միջև:

Պիտանի արտադրանքի տեսակարար կշռի հաշվման մեթոդների մասին.

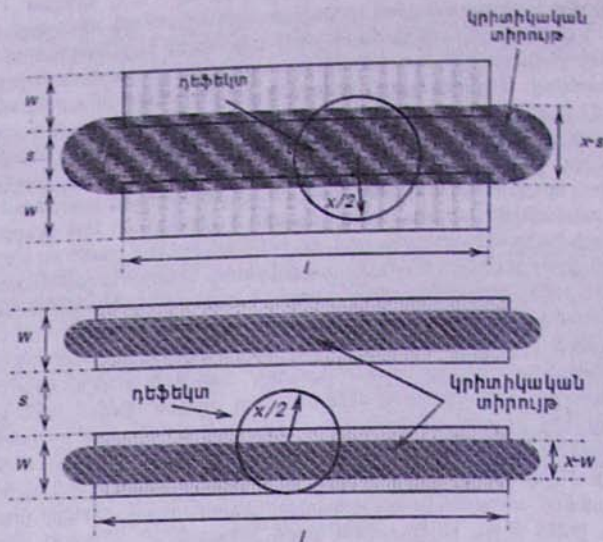
Ամիրաժեշտ է տարբերել արտադրական դեֆեկտների գոյությունը և շղթաների (և հետևաբար ինտեգրալ սխեմաների) խափանումը: Ոչ բոլոր դեֆեկտներն են առաջացնում ԻՄ կատաստորֆիկ խափանում. կարճ միացում կամ բաց շղթա առաջացնելու համար դեֆեկտը պետք է բավականաչափ մեծ լինի, որպեսզի միացնի երկու տարբեր շղթաներին պատկանող մետաղական միացումները, կամ անջատի մի ամբողջական միացման կտոր: Դեֆեկտի չափերից բացի, շղթայի խափանում առաջացնելու համար կարևոր է նաև նրա գտնվելու երկրաչափական տեղը¹:

Դեֆեկտների վնասարար հատկությունը գնահատելու համար ներմուծենք կրիտիկական տիրույթի հասկացությունը:

Սահմանում: Բոլոր այն կետերի երկրաչափական միավորումը, ուր ընկնելով x տրամագծով դեֆեկտ կառաջացնի շղթայի խափանում կնշանակենք $CA_d(x)$ և կանվանենք x տրամագծով d տիպի դեֆեկտի կրիտիկական տիրույթ (critical area - CA)²: Պատկերում նկարագրված է x տրամագծով «կարճ միացում» և «բաց շղթա» տիպի դեֆեկտի կրիտիկական տիրույթը:

¹Սյուսեետև հարմարության համար կենթադրվի որ դեֆեկտները շրջանի տեսք ունեն:

²Դեֆեկտի ինչ-որ կետում ընկնելը նշանակում է դրա երկրաչափական կենտրոնը գտնվում է այդ կետում:



Պատկեր 2: x տրամագծով ղեֆեկտի կրիտիկական տիրույթ

Ինչ վերաբերվում է կրիտիկական տիրույթի հաշվման եղանակներին, ապա գոյություն ունեն գնահատման զանազան մեթոդներ, մենք կուսումնասիրենք համեմատաբար ճգրիտ երկրաչափական եղանակը, որը "կարճ միացում" տիպի ղեֆեկտների համար կայանում է հետևյալում. տրված w հաստությամբ և l երկարությամբ երկու մետաղական միացումների միջև s հեռավորության դեպքում x տրամագծով ղեֆեկտի առաջացրած կրիտիկական տիրույթը - $CA_{short}(x)$ կարելի է հաշվել հետևյալ բանաձևի օգնությամբ (տես Պատկեր).

$$CA_{short}(x) = \begin{cases} (x-s) \cdot l + \frac{(x-s) \cdot \sqrt{x^2 - s^2}}{2}, & x \geq s \\ 0, & x < s \end{cases}$$

Հաճախ, նպատակ ունենալով արագացնել կրիտիկական տիրույթի արտաձույնը գեր-մեծ ինտեգրալ սխեմաների պիտանի ելքը գնահատելիս, և հաշվի առնելով այն հանգամանքը, որ $l \gg s$ բանաձևի բառակուսային մասը անտեսվում է և ստացվում է գծային կախում ղեֆեկտի x տրամագծից: Նմանապես, կարելի է տալ "բաց շղթա" տիպի ղեֆեկտների ստեղծած կրիտիկական տիրույթը որպես

$$CA_{open}(x) = \begin{cases} (x-w) \cdot l + \frac{(x-w) \cdot \sqrt{x^2 - w^2}}{2}, & x \geq w \\ 0, & x < w \end{cases}$$

Այժմ տանք ևս մի քանի նշանակում ու սահմանում և նկարագրենք այն մեթոդները, որոնց միջոցով տրվում է արտադրական ղեֆեկտների ազդեցության բանակական

քննությանը:

Սահմանում: Նշանակենք d տիպի դեֆեկտի խտության բաշխման ֆունկցիան դեֆեկտի տրամագծից $f_d(x)$ -ով: Փորձնական արդյունքները ցույց են տալիս, որ $f_d(x)$ ֆունկցիայի վարքը կարելի է նկարագրել հետևյալ տեսքով

$$f_d(x) = \begin{cases} \frac{k}{x^p}, & x_0 \leq x \leq x_M \\ 0, & \end{cases}$$

որտեղ x_0 դա փոքրագույն դեֆեկտի չափն է (այն սովորաբար համապատասխանում է լիթոգրաֆիկ պրոցեսի քայլին), x_M համապատասխանում է մեծագույն դեֆեկտի չափին: k -ն մի գործակից է, որը տրվում է

$$k = \frac{(p-1)x_0^{p-1}x_M^{p-1}}{x_M^{p-1} - x_0^{p-1}}$$

քանակով: Սովորաբար x_M և p պարամետրերը որոշվում են փորձնական ճանապարհով՝ համապատասխան գործարանի մոնիթերի ուսումնասիրության արդյունքում: Ներմուծենք ևս մեկ գաղափար.

Սահմանում: միջին կամ կշռված կրիտիկական տիրույթ (weighted critical area - WCA) որևէ դեֆեկտի տիպի համար, որը իրենից ներկայացնում է կրիտիկական տիրույթ՝ ընդհանրացրած այդ տիպի դեֆեկտի բոլոր հնարավոր x չափերով: Նշանակելով d տիպի դեֆեկտի կշռված կրիտիկական տիրույթը WCA_d , սահմանման համաձայն կարող ենք գրել

$$WCA_d = \int_{x_0}^{x_M} CA_d(x) \cdot f_d(x) dx$$

Սահմանում: $POF_d(x)$ -ով նշանակենք x տրամագծով d տիպի դեֆեկտի՝ շղթայի խափանում առաջացնելու հավանականության ֆունկցիան:

Սահմանում: POF_d -ով նշանակենք ընդհանրապես d տիպի կամայական չափի դեֆեկտների՝ շղթայի խափանում առաջացնելու հավանականությունը:

Պնդում: Սահմանման համաձայն կարելի է գրել

$$POF_d = \int_{x_0}^{x_M} POF_d(x) \cdot f_d(x) dx$$

Սահմանում: Նշանակենք ԻՍ մակերեսը A_{chip} -ով իսկ ամբողջ արտադրական պնակի մակերեսը՝ A_{wafer} :

Պնդում: Այժմ ենթադրելով, որ d տիպի դեֆեկտները հավասարաչափ են բաշխված միկրոսխեմայի մակերևույթի վրա, կարող ենք գրել.

$$POF_d = \frac{WCA_d}{A_{chip}}$$

Այս արտահայտության միջոցով կապ է ստեղծվում որևէ տիպի դեֆեկտների առաջացրած կրիտիկական տիրույթի և դրա պատճառով հնարավոր խափանման հավանականության միջև:

Սահմանում: Նշանակենք D_d -ով d տիպի դեֆեկտների միջին քանակը միավոր մակերեսի վրա (d տիպի դեֆեկտների խտությունը): Այն սովորաբար տրվում է գործարանի կողմից:

Սահմանում: ANF_d -ով նշանակենք d տիպի դեֆեկտների պատճառով առաջացած խափանումների միջին քանակը միկրոսխեմայի վրա: Կարելի է գրել

$$ANF_d = POF_d \cdot A_{chip} \cdot D_d = WCA_d \cdot D_d$$

Ենթադրելով, որ d տիպի դեֆեկտները հավասարապես են բաշխված ամբողջ միկրոսխեմայի մակերևույթին, հավանականությունը այն բանի, որ միկրոսխեմայի վրա կլինի այդպիսի k հատ խափանում կարելի էլինի ներկայացնել

$$P(k) = \frac{e^{-ANF_d} \cdot ANF_d^k}{k!}$$

Հաշվի առնելով այն փաստը, որ որպեսզի միկրոսխեման պիտանի լինի՝ ամիրաժեշտ է որ k -ն լինի 0, և Նշանակելով d տիպի դեֆեկտներով պայմանավորված պիտանի ելքի տեսակարար կշիռը Y_d -ով, կարելի է գրել

$$Y_d = P(0) = e^{-ANF_d} = e^{-WCA_d D_d}$$

Ստացված արտահայտությունը կոչվում է դեֆեկտներով սահմանափակված պիտանի ելքի զմահատման Պուասոնի պարզեցված մոդել: Իրականում ուսումնասիրությունները ցույց են տալիս, որ դեֆեկտները հավասարաչափ չեն բաշխված միկրոսխեմայի մակերևույթին, այլ առաջանում են խմբերով: Այդ պատճառով Պուասոնի պարզեցված մոդելը աշխատում է համեմատաբար փոքր չափի ԻՍՄ-ների համար, մեծերի համար սովորաբար տալով սխալ (ավելի փոքր) զմահատական:

Խմբավորման կամ կլաստերիզացիայի աղեկցությունը նկարագրելու համար ամիրաժեշտ է ներմուծել խափանումների միջին քանակի (ANF) պատահական լինելու մասին գաղափարը: Օգտվելով գամմա բաշխման ֆունկցիայից այս պատահական մեծության հավանականության բաշխումը տալու համար և վերցնելով Y_d վերը նկարագրված մոդելը, կարող ենք գրել

$$Y_d = \left(\frac{1 + ANF_d}{\alpha} \right)^{-\alpha}$$

որտեղ α -ն հանդիսանում է խմբավորման երևույթը նկարագրող պարամետրեր և գտնվում է փորձնական ճանապարհով: Այս արտահայտությանը ամփամուտ են ՊԵ նկարագրման Պուասոնի բաղադրյալ մոդել: Գոյություն ունեն այլ մոդելներ կախված բաշխման ֆունկցիայի ընտրությունից, սակայն դրանք հիմնականում բերվում են այս մոդելի մասնավոր դեպքի:

Պետք է նշել Պուասոնի մոդելի աղիտիվության հատկության մասին. երբ նկարագրված են $d_1, d_2, \dots, d_n$ տարբեր տիպի դեֆեկտները, ապա կարելի է գրել

$$ANF = \sum_{i=0}^n ANF_{di} = \sum_{i=0}^n WCA_{di} \cdot D_{di}$$

և հետևաբար

$$Y_r = e^{-ANF} = e^{-\sum_{i=0}^n WCA_{di} \cdot D_{di}} = \prod_{i=0}^n e^{-WCA_{di} \cdot D_{di}} = \prod_{i=0}^n Y_{di}$$

որտեղ Y_{di} -ն di տիպի, իսկ Y_r -ն ընդհանրապես բոլոր տիպի դեֆեկտներով պայմանավորված պիտանի ելքի տեսակարար կշիռն է:

Այժմ փորձենք տալ ՊԵ ընդհանրացված գնահատական. Եթե հաշվի առնենք նաև սխտեմատիկ թերությունների հետևանքով առաջացած խոտանը և դրանով պայմանավորված պիտանի ելքի կշիռը մշակակենք Y_s , ապա կստանանք հետևյալ արտահայտությունը

$$Y = Y_r \cdot Y_s$$

որին անվանում են պիտանի ելքի ամբողջական մոդել:

Եզրակացություն

Աշխատանքում ներկայացված է ՊԵ խնդիրը ժամանակակից ԳՄԻՍ արտադրության մեջ և տրվում է դրա գնահատման արկա մոտեցումների ամբողջական պատկեր: Դա կատարվում է անկամոն դեֆեկտներով պայմանավորված ՊԵ հաշվման ամբողջական մաթեմատիկական մոդելի կառուցմամբ: Այս տիպի մոդելները հնարավորություն են տալիս ՊԵ գնահատման ծրագրային համակարգերի առաջացմանը և ինժեներներին ի գործունեում դարձնում գնահատել խոտանի չափը և այն օգտագործել որպես ԻՍ կարևորագույն հատկություններից մեկը՝ մակերեսի մեծության, ժայռամակային սահմանափակումների, հզորության հետ զուգահեռ:

Գրականություն

- [1] Albert V. Ferris-Prabhu. "Introduction to Semiconductor Device Yield Modeling". Artech House Publishers, 1992.
- [2] Israel Koren. "Defect Tolerance in VLSI Circuits: Techniques and Yield Analysis". *Proceedings of the IEEE*, Vol 86, No 9:1817-1836, September, 1998.
- [3] Ch. Weber, V. Sankaran, K.W. Tobin, and G. Scher. "Quantifying the Value of Ownership of Yield Analysis Technologies". *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol 15, No 4:411-419, November, 1998.

Mathematical Models of Yield Prediction in Modern VLSI Design

V. Karapetyan

Abstract

This paper consists of two parts. First the problem of yield in contemporary VLSI manufacturing process is presented. The second part covers the methodology of yield modeling and yield computation technique.

The main focus in this paper is put on the random defect limited yield modeling.