

NANODARINIŲ FORMAVIMOSI PROCESŲ TYRIMAS

Romas Petrauskas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
El. paštas: romas.petrauskas@yahoo.com

Santrauka. Tiriama šoninio ėsdinimo procesai nanodarinių formavimosi geometrijai modeliuoti Silvaco TCAD programinio paketo ATHENA programa. Modeliuojamas nanodarinių formavimasis esant skirtingoms kaukės selektyvumo vertėms, lygioms 2, 10, 40 ir 100 ėsdinamo sluoksnio atžvilgiu, kai ėsdinimo trukmė 0–180 s. Ėsdinimo greitis pastovus – 1,33 nm/s. Išanalizuota ėsdinamo sluoksnio sisteminės paklaidos priklausomybės nuo jo storio. Kompiuterinio modeliavimo rezultatai yra artimi gautiems taikant analitinius kitų autorių skaičiavimo modelius.

Reikšminiai žodžiai: šoninis ėsdinimas, selektyvumas, SILVACO TCAD, nanodariniai.

Įvadas

Integrinių grandynų ir puslaidininkinių įtaisų gamybos technologijose mikro- ir nanostruktūrų geometrija dažnai keičiama šoninio ėsdinimo procesais (Navickas *et al.* 2004a; Navickas *et al.* 2004b). Šoninio ėsdinimo proceso metu kintančioms kaukių, ėsdinamo sluoksnio geometrijų matematinėms išraiškoms aprašyti yra išvestos analitinės lygtys (Navickas *et al.* 2002), proceso modeliavimui sukurti kompiuteriniai modeliai-programos (Navickas *et al.* 2003).

Technologiniams procesams modeliuoti vienas žinomiausių profesionalių programų rinkinių yra Silvaco TCAD, kurio programa Athena yra skirta 1D/2D vaizdų technologiniams procesams modeliuoti.

Šio darbo tikslas – SILVACO TCAD programinio paketo ATHENA programa ištirti šoninio ėsdinimo procesų metu kintančią kaukės bei ėsdinamo sluoksnio geometriją, jų kitimo priklausomybę nuo medžiagų selektyvumo bei storio ir gautus rezultatus palyginti su kitais esamais analitiniais skaičiavimo modeliais.

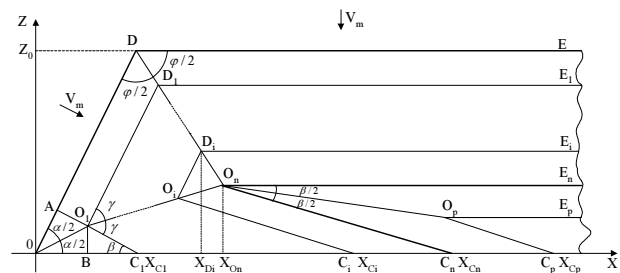
Kaukės geometrijos kitimas

Šoninio ėsdinimo procesas yra izotropinis, t. y. ėsdinimo greičio vektorius lygiagretus ėsdinimo paviršiaus normaliai ir yra vienodas visomis kryptimis (Navickas *et al.* 2003). Tokiu atveju kaukės kampų O ir D taškai nepriklausomai nuo jų pradinės vertės laipsniais bei pradinio kaukės storio per ėsdinimo trukmę t juda atitinkamų kampų pusiauokampinėmis (1 pav.).

Pagrindinis veiksnys, leidžiantis sėkmingai šoninio ėsdinimo būdu formuoti mikro- ir nanostruktūras, yra medžiagų – kaukės bei ėsdinamo sluoksnio – selektyvumas.

Selektyvumas nusako kaukės ėsdinimosi greičio v_k bei ėsdinamo sluoksnio ėsdinimosi greičio v_e santykį $S = v_e / v_k$, t. y. ėsdinamo sluoksnio ėsdinimosi greitis yra S kartų didesnis nei kaukės:

$$v_e = S \cdot v_k \quad (1)$$



1 pav. Kaukės storio ir profilio kitimas šoninio ėsdinimo procesuose

Fig. 1. Variation of mask's thickness and profile in lateral etching processes

Paprastai naudojamos tokios medžiagų poros, kurių $S \gg 1$ (Si-SiO_2 , $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ ir pan.). 1 pav. pavaizduota kaukės profilio evoliucija, kai $1 < S < \infty$.

Iš 1 pav. matome, kad šoninio ėsdinimo proceso metu evoliucionuojant kaukei atsiranda du kritiniai momentai: kampo β atsiradimas bei kampų O ir D susiliejimas į vieną tašką. Kampas β atsiranda po nykstamai mažos laiko Δt trukmės. Taip įvyksta dėl to, kad apatinio ėsdinamo sluoksnio ėsdinimosi greitis yra S kartų didesnis, lyginant su kaukės esdinimosi greičiu (1). Dėl to pradinio α kampo taške O dydis taške O_1 pakinta iki vertės $2\gamma = \alpha + \beta$. Pagal (Navickas *et al.* 2003) kampo β bei taškų O_1, \dots, O_n ir D_1, \dots, D_n vertės yra apskaičiuojamos pagal matematinės formules.

Kampas β apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\tan \beta = \frac{1}{S - \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (2)$$

Taškų O_1, \dots, O_n x ir z koordinatės yra apskaičiuojamos pagal formules:

$$z = \tan\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \cdot x, \quad (3)$$

$$x = v_e \cdot t - z \cdot \cot(\beta).$$

Taškų D_1, \dots, D_n x ir z koordinatės apskaičiuojamos pagal formules:

$$z = z_0 - \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot (x - z_0 \cdot \cot(\alpha)), \quad (4)$$

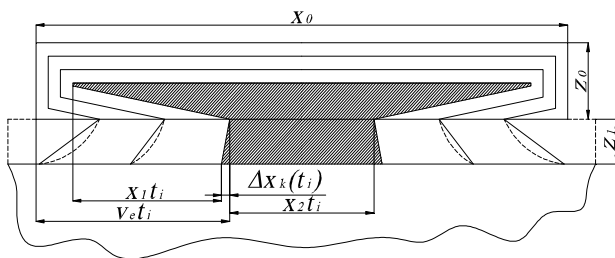
$$z = z_0 - v_k \cdot t.$$

Jeigu taškams O_n ir D_n įgavus vienodą vertę (susiliejęs į vieną tašką) šoninis ėsdinimas vykdomas dar ilgiau, tai taškas O_n juda $\angle E_n O_n C_n$ lygaus β pusiaukampine. Šio taško judėjimas aprašomas lygtimi:

$$z = z_{O_n} + \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot (X_{O_n} - x). \quad (5)$$

Ėsdinamo sluoksnio geometrijos kitimas

Ėsdinamo sluoksnio geometrija kinta priklausomai nuo ėsdinimo būdo, ėsdinamo sluoksnio storio bei ėsdinimo trukmės. Šis kitimo pobūdis yra pavaizduotas 2 pav. punktyrine linija.



2 pav. Ėsdinamo sluoksnio profilio kitimas šoninio ėsdinimo procesuose

Fig. 2. Variation of etching layer in lateral etching processes

Ėsdinamo sluoksnio viršaus ir apačios skirtumas pagal x ašį yra vadinamas sisteminė paklaida. Pagal (Navickas *et al.* 2004a) jis aprašomas pagal formulę:

$$\Delta x_k(t) = v_e \cdot t - \sqrt{(v_e \cdot t)^2 - z_1^2}, \quad (6)$$

čia z_1 žymi ėsdinamo sluoksnio storį.

Ėsdinamo sluoksnio ėsdinimosi gylis, taikomas rasti formuojamos mikrostruktūros matmenis, yra apskaičiuojamas taip:

$$x_1(t) = v_e \cdot t \left(\frac{\cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\sqrt{(v_e \cdot t)^2 - z_1^2} - S} \right). \quad (7)$$

Remiantis šiomis formulėmis (1)–(7), buvo sukurtas kompiuterinis modelis – programa, skirta programinio paketo MATLAB terpėje modeliuoti šoninio ėsdinimo metu vykstančius formavimosi procesus.

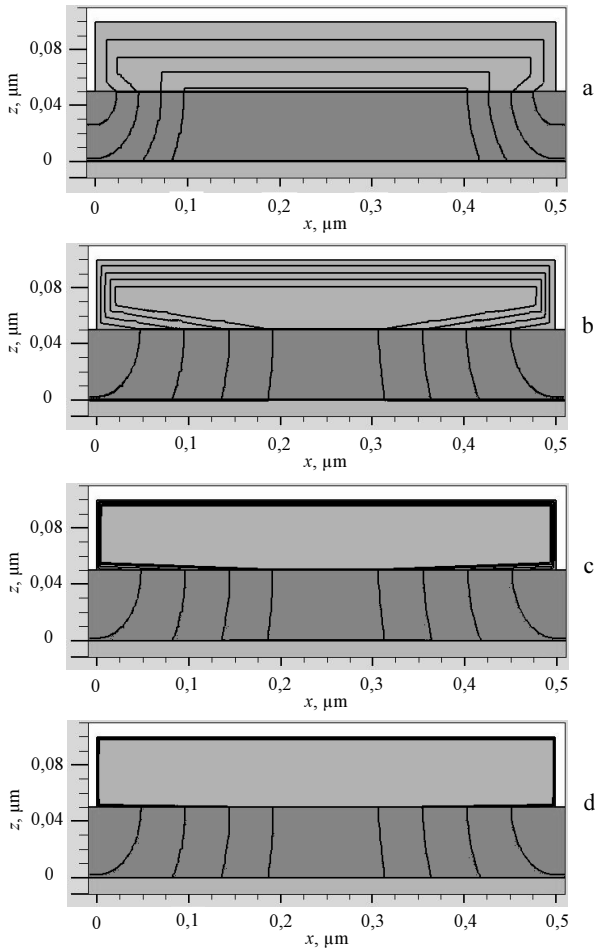
Modeliavimo rezultatai

Tyrimo metu buvo atliktos šoninio ėsdinimo imitacijos SILVACO TCAD programinio paketo ATHENA programa esant skirtingiems kaukės selektyvumams ėsdinamo sluoksnio atžvilgiu, bei esant skirtingiems ėsdinamo sluoksnio storiams. Modeliuojant priklausomybę nuo sluoksnių selektyvumo, buvo priimtos tokios selektyvumo vertės: $S = 2, 10, 40, 100$, ėsdinama pastoviu greičiu $v_e = 1,33$ nm/s. Kaukės plotis – 500 nm, o kaukės bei ėsdinamo sluoksnio storiai – 50 nm. Procesas buvo imituojamas nuo 0 iki 180 s 6-ių sekundžių žingsniu.

Gauta kaukės bei ėsdinamo sluoksnio geometrijos evoliucija pateikiama 3 pav. Rezultatai parodomi tam tikrais laiko momentais. 3 pav. b, c, d (esant $S = 10, 40, 100$) pateikiama struktūros forma 36-tą, 72-ą, 108-tą ir 144-tą sekundėmis. 3 pav. a, kai selektyvumas lygus 2 – atitinkamai 18-tą, 36-tą, 54-tą ir 72-ą sekundėmis. Pastaruoju atveju skaičiavimo žingsnis yra mažesnis, kadangi esant selektyvumui $S = 2$, kaukė visiškai nuėsdinama jau 74-tą sekundę.

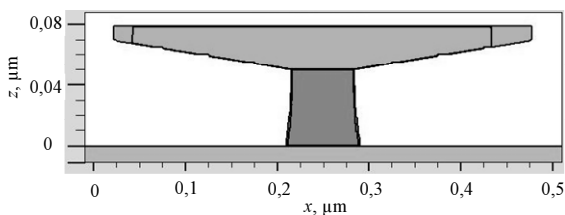
Iš modeliavimo rezultatų paaiškėja, kad visais atvejais po nykstamai trumpo laiko Δt intervalo atsirandantis β kampas priklauso nuo kaukės selektyvumo. Kuo selektyvumas mažesnis, tuo tas kampas β yra didesnis (2). Esant selektyvumo vertėms $S = [2; 10; 40; 100]$, šie kampai atitinkamai yra lygūs $\beta = [45^\circ; 9^\circ; 2^\circ; 0,8^\circ]$. Palyginimui: atitinkamų selektyvumų kampai pagal (2) būtų $\beta = [45^\circ; 6,4^\circ; 1,5^\circ; 0,6^\circ]$, o tai vidutiniškai sudaro 23 % paklaidą. Ši paklaida gali atsirasti dėl matavimo netikslumų, taip pat ir dėl programinio paketo algoritmo netikslaus skaičiavimo. Tokią prielaidą galima daryti ir ieškant taškų O ir D susiliejimo 1 pav. į vieną tašką momento.

Ieškant taškų O ir D susiliejimo į vieną tašką (1 pav.) momento, jo aplinkoje struktūra ėsdinama kas sekundę (4 pav.).



3 pav. Kaukės bei ėsdinamo sluoksnio geometrijos priklausomybė nuo medžiagų selektyvumo bei ėsdinimo trukmės: a – $S = 2$, $t = 18, 36, 54, 72$ s.; b, c ir d – $S = 10, 40, 100$, $t = 36, 72, 108, 144$ s.

Fig. 3. Dependence on geometry of mask and etching layer on material selectivity and etching time: a – $S = 2$, $t = 18, 36, 54, 72$ s.; b, c and d – $S = 10, 40, 100$, $t = 36, 72, 108, 144$ s.



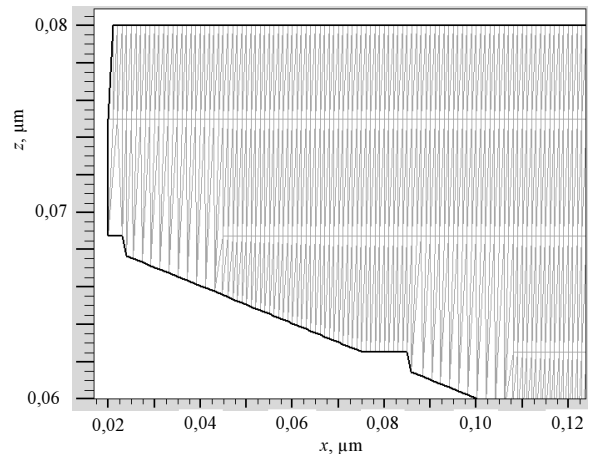
4 pav. Taškų O ir D pagal susiliejimo 1 pav. į vieną tašką vieta
Fig. 4. The plane of fusion of points O and D into one pint

Kaip matyti iš 4 pav., per 1 sekundę ėsdinama kaukė staiga sumažėja nuo 455 nm (161 ėsdinimo sekundė) iki 445 nm (162 sekundė) ir tas šuolis nėra simetriškas. Todėl daroma prielaida, kad modeliavimo algoritmas nėra visiškai tikslus. Tai patvirtina ir 5 pav., kuriame kaukė pavaizduota su segmentuotu tinkleliu.

Kaip matyti iš 5 pav., segmentinis tinklelis išsidėstęs ne visai tolygiai, o tai gali įtakoti modeliavimo paklaidas.

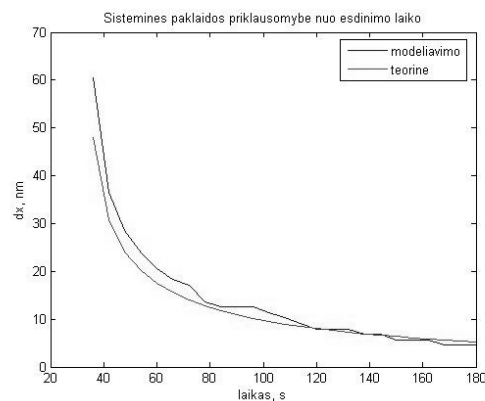
Keičiant kaukės selektyvumą ėsdinamo sluoksnio atžvilgiu, matyti, jog visais atvejais ėsdinamo sluoksnio

sisteminė paklaida tuo pačiu laiko momentu ($t = [36, 54, 72, 90, 108]$ s yra tokia pati ir atitinkamai lygi $\Delta x_k = [48, 20, 14, 11, 9]$ nm), nes ši paklaida priklauso nuo ėsdinamo sluoksnio storio, ėsdinimo laiko bei ėsdinimo greičio (6). Taigi tam tikru momentu rezultatas yra tas pats. 6 pav. yra vaizduojama šios paklaidos priklausomybė nuo ėsdinimo laiko, kartu lyginant su teoriniu rezultatu pagal formulę (6). Šie rezultatai yra labai artimi rezultatams, gautiems (Navickas *et al.* 2004a).



5 pav. Kaukės padidintas vaizdas: segmentavimo tinklelis bei ėsdinimo netolygumai

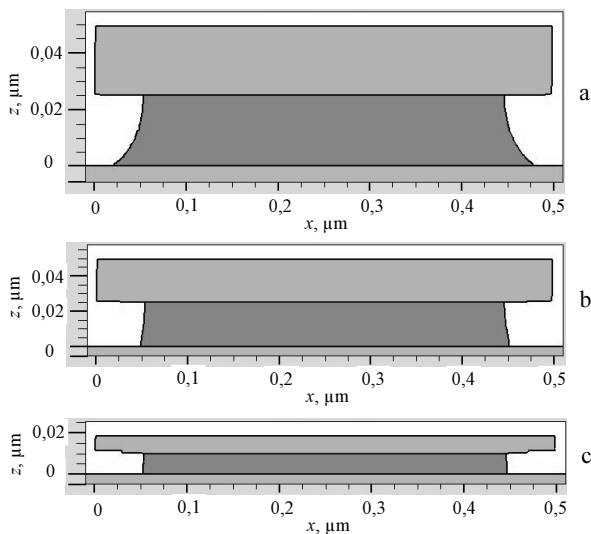
Fig. 5. Expanded scale of the mask: segmentation grid and uneven etching places



6 pav. Ėsdinamo sluoksnio sisteminės paklaidos Δx_k kitimas priklausomai nuo ėsdinimo laiko trukmės

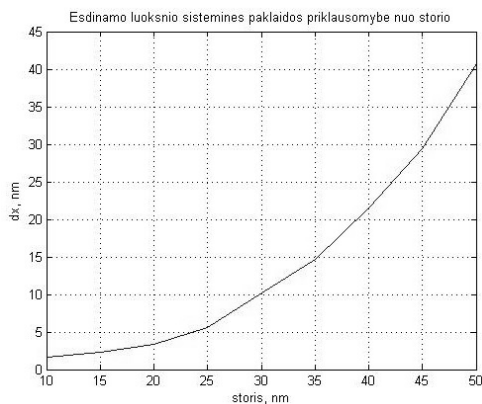
Fig. 6. Variation of systematic error Δx_k of the etching layer depending on etching time duration

Sisteminė ėsdinamo sluoksnio paklaida panašiu dėsniu keičiasi ir keičiant ėsdinamo sluoksnio storį (7 pav.). Buvo paimti 50 nm, 25 nm ir 10 nm sluoksniai bei tuo pačiu laiko momentu stebima, kokia ši paklaida yra. Ėsdinimo greitis – 1,33 nm/s, ėsdinimo trukmė – 40 s.



7 pav. Ėsdinamo sluoksnio sisteminės paklaidos Δx_k kitimas, kai ėsdinamo sluoksnio storis: a – 50 nm, b – 25 nm, c – 10 nm
Fig. 7. Variation of etching layer's systematic error Δx_k if thickness of etching layer is: a – 50 nm, b – 25 nm, c – 10 nm

Gauti rezultatai parodo, kad, mažėjant ėsdinamo sluoksnio storiui, sisteminė paklaida Δx_k greitai mažėja. Sisteminės paklaidos nuo ėsdinamo sluoksnio storio priklausomybė pateikiama 8 pav.



8 pav. Ėsdinamo sluoksnio sisteminės paklaidos Δx_k priklausomybė nuo ėsdinamo sluoksnio storio
Fig. 8. The dependence of the systematic error Δx_k of the etching layer on the thickness of the etching layer

Kaip matyti iš grafiko, mažėjant ėsdinamo sluoksnio storiui, sisteminė paklaida sparčiai mažėja. Ši priklausomybė yra panaši į sisteminės paklaidos priklausomybę nuo ėsdinimo trukmės.

Šoninio ėsdinimo procesai yra labai svarbūs gaminant nanotranzistorinius darinius. Tai leidžia dar labiau sumažinti užtūros, taigi ir kanalo, ilgį, formuoti sudėtingas daugiasluoksnes struktūras.

Išvados

Naudojant Silvaco Athena modeliavimo programą, buvo atliktas modeliavimas su kaukės sluoksnio pradinės struktūros pločiais – 250 ir 500 nm, pradiniais storiiais – 50 ir 20 nm ir ėsdinamo sluoksnio storių 10, 25 ir 50 nm deriniais, kai kaukės sluoksnių selektyvumo vertės kito nuo 2 iki 100, o ėsdinimo greitis buvo pastovus – 1,33 nm/s, trukmė 0–180 s, o pradinės struktūros plotis – 250 ir 500 nm.

Gauti rezultatai yra palyginami su kitais esamais šoninio ėsdinimo formavimosi procesų modeliais. Parodyta, kad rezultatai, gauti modeliuojant Silvaco Athena modeliavimo programą, yra artimi kitiems modeliams, skaičiuojantiems formavimosi procesus.

Literatūra

- Navickas, R.; Čiulada, R. 2002. Design of the Masks for the Self-Alignment Technologies of the Integrated Circuits, *Information Technology and Control* 4(25): 65–68.
- Navickas, R.; Čiulada, R. 2003. Kaukių geometrijos evoliucija ėsdinimo procesuose, *Elektronika ir elektrotechnika* 1(43): 56–60.
- Navickas, R.; Čiulada, R. 2004a. Modelling Geometry of Technological Masks in Lateral Etching Processes, *Solid State Phenomena* 97/98: 235–238.
doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.97-98.235
- Navickas, R.; Kirvaitis, R. 2004b. Basic Self-Formation Processes in the Technologies of the Integrated Circuits, *Solid State Phenomena* 97/98: 229–234.
doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.97-98.229

RESEARCH OF SELF-FORMATION NANOSTRUCTURES

R. Petrauskas

Abstract

Lateral etching processes for the modeling of the geometry of self-formation nanostructures with Silvaco TCAD Athena program are analyzed. Self-formation nanostructures is modeled with different mask selectivity values equal to 2, 10, 40 and 100 with respect to the etching layer, with the etching duration of 0–180 s. The etching rates are constant – 1.33 nm/s. The analysis of the dependence of the etching systematic error on its thickness has been carried out. The computer modeled results are close to the ones produced by means of the application of the analytical calculation models by other authors.

Keywords: lateral etching, selectivity, Silvaco TCAD, nanostructures.