3. Elektroninė litografija

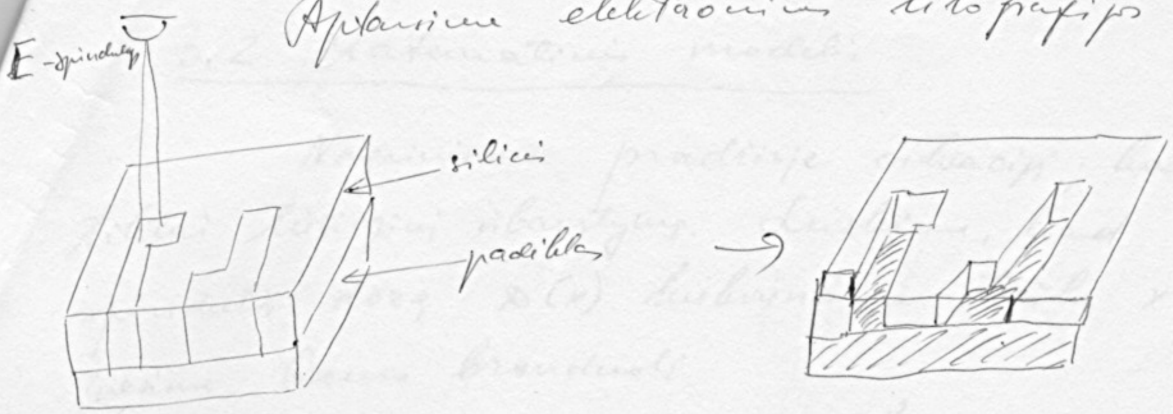
3.1. Įvadas

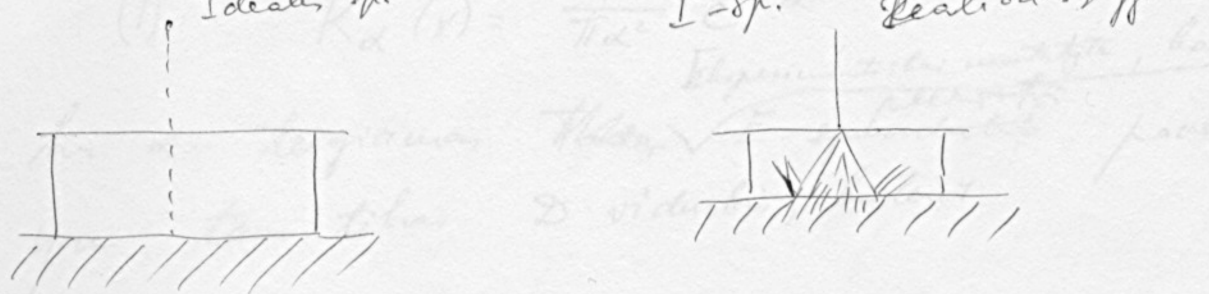
Puslaidininkių technologijos vaidmuo darosi vis svarbesnis kompiuterių, jutiklių, kontrolės prietaisų gamyboje. Puslaidininkinių plokštė (čipas) paprastai yra stačiakampis, kurio kraštinės nuo 0.1 mm iki 1 cm. Joje yra daug (iki milijono) taip vadinamų ~~taip vadinamų~~ tranzistorinių prietaisų, kuriuos toliau vadinsime tiesiog tranzistoriais. Tranzistoriai yra įvairių formų, sujungti laidžiom jungtim ir visumoje sudaro labai didelę integruotą grandinę (VLSI), skirtą spręsti tam tikram ~~apibrėžtam~~ uždaviniui. VLSI konstrukcija užsiima elektronikos inžinieriai. Jie naudoja CAD tam, kad gauti reikiamas tranzistorinių prietaisų konfigūracijas, kurios ~~padalini~~ / ~~Bendras~~ ~~prietaiso~~ ~~vaiz plokštės~~ ~~vaizdas~~ turi būti atspausdintas silicio plokštelėje.

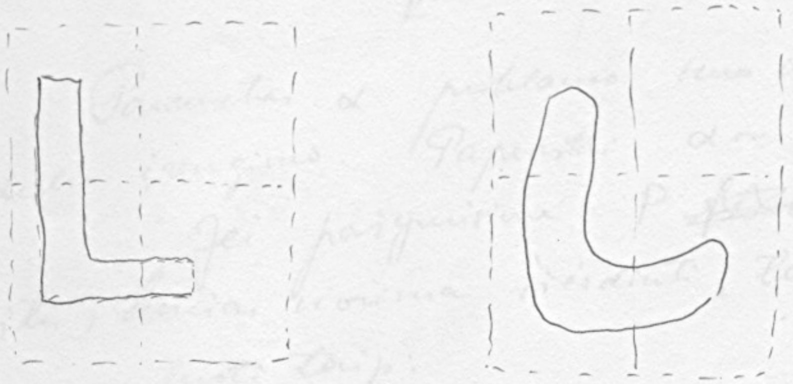
Pirmiausiai silicio plokštelė yra padengiama nelaidžiu polimero sluoksniu. Tada elektron~~ų~~ spinduliu, naudojant kompiuterinio dizaino programas, yra apšvitinamos reikalingos vietos plokštelėje. Po to yra atliekama cheminio „ėsdinimo" procedūra, po kurios lieka pageidaujamas plokštės padalas ~~vaizdas~~, sudarytas iš erdvių ir kanalų. Miniatiūriniai tranzistoriai yra patalpinami tose erdvėse ir sujungiami jungtim.

Aprašytas procesas yra vadinamas elektronine litografija. Šalia ~~jos~~ yra naudojama optinė litografija (lazerio spinduliai), naudojamos vaizdo kameros ~~tam~~, kad valdyti spindulį. Mikroplokščių gamyba yra sparčiai ~~į~~ besivystanti pramonės šaka, joje visą laiką yra išrandami ir tobulinami vis nauji jos gamybos metodai.

Aptarsime elektroninės litografijos efektyvumą.







Norimas vaizdas

Gaunamas vaizdas

Gaunamo vaizdo nuokrypį nuo norimo sąlygoja elektroninio spindulio išbarstymas (tiesioginis ir grįžtamasis) forward backward)

3.2. Matematinis modelis

Nagrinėsime pradžioje situaciją, kai turime tiktai tiesioginį išbarstymą. Laikysime, kad naudojame spindulių dozę $D(x)$ kiekviename taške $x=(x_1,x_2)$. Įvesime Gauso branduolį

$$(1)\quad K_\alpha(x)=\frac{1}{\pi\alpha^2}\,e^{-\frac{|x|^2}{\alpha^2}}$$

kur α – teigiamas. ~~Tada~~ Eksperimentiškai nustatyta, kad $\sqrt{E}$ – ~~spinduliuotės~~ resisto poveikis yra tam tikras D vidurkis, būtent

$$(2)\quad E(x)=\int_{R^2}K_\alpha(x-y)\,D(y)\,dy$$

Parametras α priklauso nuo medžiagos ir nuo E-spindulio įrenginio. Paprastai $\alpha \sim 0.1-0.2\ \mu m$.

Jei pažymėsime P ~~[illegible]~~ plokštelei sritį, kurią norima išėsdinti, tai uždavinį galima suformuluoti taip:

$$(3)\quad \text{Rasti tokią funkciją } D(x), \text{ kad } E(x)=\begin{cases}1, & \text{kai } x\in P\\ 0, & \text{kai } x\notin P\end{cases}$$

Jeigu įskaitysime ir grįžtamąjį su parametru β išbarstymą, gausime

$$(4)\quad E(x)=\frac{1}{1+\eta}\iint_{R^2}\left[K_\alpha(x-y)+\eta K_\beta(x-y)\right]D(y)\,dy\ ,$$

kur η – ~~[illegible]~~ tiesioginio ir grįžtamojo išbarstymo intensyvumų santykis, $\beta \sim 2-3\ \mu m$, $0<\eta<1$

Kaip ir anksčiau, pagrindinis uždavinys yra formuluojamas 3 pav.

Lygtys (2) ir (4) yra vadinamos aproksimacijos efekto lygtimis.

3.3. Šilumos laidumo lygtis

Tegul turime (2) lygtį, t. y. $E(x)=\int_{R^2} K_\alpha(x-y)\,\mathcal{D}(y)\,dy$

Bet kuriai aprėžtai funkcijai $f(x)$ apibrėžkime

$$(5)\qquad u(x,t)=\int_{R^2}\frac{1}{4\pi t}\,e^{-\frac{|x-y|^2}{4t}}\cdot f(y)\,dy$$

Tada

$$(6)\qquad E(x)=u(x,t)\;,\ \text{jei}\ t=\frac{\alpha^2}{4}\,,\quad f(y)\equiv\mathcal{D}(y)$$

ir (3) uždavinys tada formuluojamas taip:

$$(7)\qquad u(x,t)\Big|_{t=\frac{\alpha^2}{4}}=\chi_P(x)\,,$$

kur χ_P yra srities P charakteringoji funkcija.

$$\chi_P(x)=\begin{cases}1, & x\in P\\ 0, & x\notin P\end{cases}$$

(5) integralas konverguoja, kai $f(x)$ aprėžta. Toliau ~~daugiau sprendimui~~ leisime, kad $f(y)$ yra tolydi uždaroje srityje (reiškia, aprėžta).

<u>1. Uždavinys:</u> Įrodyti, kad (5) lygtimi duota funkcija $u(x,t)$ tenkina lygtį

$$(8)\qquad \frac{\partial u}{\partial t}=\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2}$$

(8) lygtis yra vadinama šilumos laidumo lygtimi.

Yra žinoma, kad

~~T~~emperatūra kūno $D \subset R^n$ viduje tenkina lygtį

(9) $u_t = \Delta u$, kur $\Delta u = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}$

$\forall\, n \geq 1$ funkcija

(10) $$u(x,t) = \int_{R^n} \frac{1}{(4\pi t)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{|x-y|^2}{4t}} f(y)\, dy$$

tenkina šilumos laidumo lygtį (9).

Teorema. (10) formule duota funkcija $u(x,t)$ ~~tenkina~~ taip pat tenkina sąlygą

$$\lim_{t\to 0} u(x,t) = f(x)$$

Žodynas savarankiškam darbui

Nagrinėsime uždavinį:

išspręsti lygtį

(11) $\frac{\partial u}{\partial t} = \Delta u$, $x \in R^n$, $t > 0$

su pradinėmis sąlygomis

(12) $u(x,0) = f(x)$, $x \in R^n$.

Taigi, kalbame apie pradinį (Koši) uždavinį šilumos laidumo lygčiai

2 Teorema. Egzistuoja vienintelis Koši uždavinio (11) (12) sprendinys.

4. Elektroninės litografijos uždavinio formulavimas

~~Fmm~~ Suformuluosime ~~šiuo~~ mūsų uždavinį taip:

Rasti tokią pradinę sąlygą f, ~~kuri~~ uždavinio (11),(12), laiko intervale $0 < t \leq T$, kur $T = \frac{\alpha^2}{4}$, kad

$$(14) \qquad u(x, T) = \chi_p(x)$$

Kitais žodžiais tariant, reikia išspręsti šilumos laidumo lygtį su atvirkštiniu laiku.

Toliau nagrinėsime vienmatį atvejį, ir ~~pa~~ parodysime, kaip galima pritaikyti Furjė eilutes to uždavinio sprendimui.

Taikydami kintamųjų atskyrimo metodą, gauname, kad tuo ~~kai~~ atveju, kai pradinė sąlyga yra periodinė (2π-periodo) lyginė, turime

$$u(x,t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{1}^{\infty} a_n e^{-n^2 t} \cos nx$$

$$u(x,0) = \frac{a_0}{2} + \sum_{1}^{\infty} a_n \cos nx = f(x),$$

kur

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \cos nx \, dx$$

Toliau eilutėse imsime baigtinį skaičių (salyga, $N=10$) dėmenų. Tuo būdu, jeigu ekspozicijos funkcija

$$E(x) = \frac{1}{2} e_0 + \sum_1^{\infty} e_n \cos nx,$$

tai imsime jos artinį

$$E_N(x) = \frac{1}{2} e_0 + \sum_1^{N} e_n \cos nx$$

Dozės artinys, atitinkamai, bus

$$D_N(x) = \frac{1}{2} d_0 + \sum_1^{N} d_n \cos nx,$$

kur

$$d_0 = e_0$$

$$d_n = e_n e^{n^2 t}$$

$$D_N(x) = \frac{1}{2} e_0 + \sum_1^{N} e_n e^{n^2 t} \cos nt$$

Jeigu ~~įjungsime~~ įstatysime grįžtamąjį išbaustymą, gausime formules

$$e_n = \frac{1}{1+\eta} d_n e^{-n^2 t_1} + \frac{\eta}{1+\eta} d_n e^{-n^2 t_2} = \left(\frac{e^{-n^2 t_1}}{1+\eta} + \frac{\eta}{1+\eta} e^{-n^2 t_2} \right) d_n$$

arba

$$d_n = \frac{1+\eta}{e^{-n^2 t_1} + \eta e^{-n^2 t_2}} e_n, \quad \text{kur } t_1 = \frac{\alpha^2}{4}, \quad t_2 = \frac{\beta^2}{4}$$

Taigi, bendra procedūra būtų tokia:

1) kai $0 \le n \le N$ apskaičiuojame

$$e_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} E(x) \cos nx \, dx$$

2) apskaičiuojame d_n pagal anksčiau užrašytas formules

Tada gauname

$$D_N(x) = \frac{1}{2} d_0 + \sum_1^{N} d_n \cos nx$$