

ПРОЕКТУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРІВ

SENSORS DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 621.382, PACS 85.45.-W

ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОЕМІСІЙНИХ МІКРОКАТОДІВ

А. О. Дружинін¹, В. І. Голота², І. Т. Когут², Ю. М. Ховерко¹

¹ НУ “Львівська політехніка”, 79013 м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12, druzh@polynet.lviv.ua, (0322)-258-21-53, druzh@polynet.lviv.ua

² Прикарпатський НУ ім. В. Стефаника, 76025 м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57, тел. (0342)-71-48-48, kre@pu.if.ua

ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОЕМІСІЙНИХ МІКРОКАТОДІВ

А. О. Дружинін, В. І. Голота, І. Т. Когут, Ю. М. Ховерко

Анотація. Застосовано комплексний підхід до електронно-оптичного моделювання кремнієвих автоемісійних мікрокатодів. В рівнянні Фаулера-Нордгейма враховано форму потенціального бар'єру для зони провідності і валентної зони. Отримано апроксимацію рівняння Лапласа для розрахунку потенціалів методом скінчених різниць. Показано результат розрахунку потенціалу і електричного поля мікрокатода. Встановлено вплив просторового заряду на рух електронів і показано їх траєкторії. Отримано оцінку чутливості фоторезисту для цифрової літографії

Ключові слова: автоемісія, кремнієвий мікрокатод, електронна оптика, траєкторія електронів

ELECTRON-OPTICAL MODELLING OF FIELD EMISSION MICROCATODES

A. A. Druzhinin, V. I. Holota, I. T. Kogut, Yu. M. Khoverko

Abstract. The complex approach to electron-optical simulation of silicon field emission microcathodes is applied. In Fowler-Nordheim equation the shape of potential barrier for conductance band and valence band is considered. It is received approximation of Laplace equation for potentials calculation by finite-difference method. The result of calculation of potential and an electric field of the microcathode is shown. Influence of space charge on electron motion is established and their trajectories are shown. It is received an estimation of sensitivity of photoresist for digital lithography.

Keywords: field emission, the silicon microcathode, an electron optics, electron trajectory

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОЭМИССИОННЫХ МИКРОКАТОДОВ

А. А. Дружинин, В. И. Голота, И. Т. Когут, Ю. М. Ховерко

Аннотация. Применен комплексный подход к электронно-оптическому моделированию кремниевых автоэмиссионных микрокатодов. В уравнении Фаулера-Нордгейма учтена форма потенциального барьера для зоны проводимости и валентной зоны. Получено аппроксимацию уравнения Лапласа для расчета потенциалов методом конечных разностей. Показан результат расчета потенциала и электрического поля микрокатада. Установлено влияние пространственного заряда на движение электронов и показаны их траектории. Получено оценку чувствительности фоторезиста для цифровой литографии.

Ключевые слова: автоэмиссия, кремниевый микрокатод, электронная оптика, траектория электронов

Вступ

Електронно-оптичне моделювання є важливим етапом в розробці автоемісійних мікрокатодів [1]. Піксели плоских дисплеїв і фоторезист на кремнієвих пластинах експонуються електронними пучками які випромінюються мікрокатадами. Електронно-оптична система мікрокатада керує, модулює та фокусує такі електронні пучки. Траєкторії та енергія електронних пучків повинні забезпечувати однорідну та достатню експозицію областей фоторезисту, а іонних пучків — запобігати тепловому руйнуванню вістрь мікрокатодів. При моделюванні електростатичних полів і траєкторій електронів та іонів використовуються електрофізичні моделі [2] і різні програмні засоби. Так в програмах комп'ютерної математики Matlab [3], мультифізичного моделювання Femlab [4] реалізовані розв'язувачі рівнянь Лапласа/Пуассона, що дозволяє моделювати електростатичні поля. Спеціалізовані програми Simion [5], Trak [6] дозволяють моделювати електростатичні і магнітостатичні поля, а також інтегрувати рівняння руху заряджених частинок. Об'єднання таких математичних моделей і програм з моделями автоемісії напівпровідників може дати якісно нові результати. Тому розробка комплексного підходу до електронно-оптичного моделювання автоемісійних кремнієвих мікрокатодів є актуальною задачею.

1. Автоемісія напівпровідників

Основи теорії автоемісії металів були розроблені Фаулером і Нордгеймом [7]. На даний час для розрахунків густини автоемісійного струму

металевих мікрокатодів (в А/см²) використовується уточнене рівняння Фаулера-Нордгейма в наступному вигляді:

$$J(F) = \frac{A \cdot F^2}{\phi \cdot t^2(y)} \exp\left(-B \cdot \frac{\phi^{3/2}}{F} \cdot v(y)\right), \quad (1)$$

де $A=1,54 \times 10^{-6}$; $B=6,87 \times 10^7$; ϕ — робота виходу електрону з металу, еВ; F — електричне поле біля поверхні катоду, В/см; $t^2(y)$ і $v(y)$ — математичні функції, які записуються через еліптичні інтеграли. Відомі різні апроксимації цих функцій, а найпростішою серед них є $t^2(y) \cong 1,1$; $v(y) = 0,95 - y^2$; $y = 3,79 \times 10^{-4} \cdot \sqrt{F} / \phi$.

Рівняння (1) отримано при наступних припущеннях, які визначають його область застосування: заповненість енергетичних рівнів вільними електронами описується статистикою Фермі-Дірака, автоемісія електронів відбувається з рівня Фермі, поза металом на електрони діють тільки сили дзеркального відображення і зовнішнє електричне поле.

Теорія автоелектронної емісії металів застосовується і до напівпровідників [8, 9, 10], але при цьому враховується зонна структура, діелектричні властивості та проникнення електричного поля у напівпровідник, утворення поверхневого акумуляційного шару електронів. Особливості автоемісії напівпровідникових мікрокатодів розглянуті в [11]. Форма потенціального бар'єру та емісія з обох зон напівпровідника показана на рис. 1.

Для розрахунку густини автоемісійного струму напівпровідника використано рівняння (1) в якому враховано зміни роботи виходу і форми потенціального бар'єру в параметрі у для зони провідності

$$y = \left(\frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + 1} \right)^{1/2} \frac{\sqrt{e^3 F}}{\chi - v F^{4/5}}, \quad v = 4,5 \times 10^{-7} \epsilon_s^{-2/5},$$

та валентної зони:

$$y = \left(\frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + 1} \right)^{1/2} \frac{\sqrt{e^3 F}}{\chi + \Phi_{E_g}}.$$

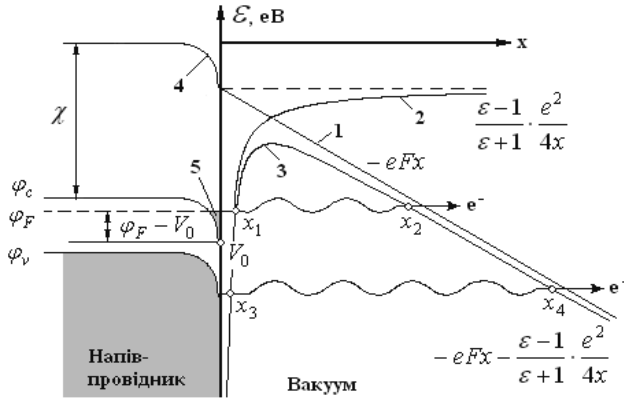


Рис. 1. Потенціальний бар'єр і автоемісія напівпровідника *n*-типу провідності: 1 — бар'єр від зовнішнього електричного поля; 2 — бар'єр від сил електростатичного відображення зарядів; 3 — бар'єр з врахуванням факторів 1 і 2; 4 — згин зон; 5 — поверхневий акумуляційний шар електронів

Густину автоемісійного струму напівпровідника розраховано наступною MatLab програмою:

```
% Густина струму Фаулера-Нордгейма для напів-
% провідників
fi=4.05; % Si
Eg=1.12; % ширина забороненої зони
eps=11.7; % діелектрична стала
A=1.54e-6; B=6.87e7;
% Напруженість електричного поля
F=5.0e7; % V/sm
r=5e-9; % m
% трикутний бар'єр, густина струму, A/m2
J1=1e4*A*(F^2)/fi*exp(-B*(fi^1.5)/F);
% трикутний бар'єр із ефектом Шоткі
y=3.79e-4*sqrt(F)/fi;
vy=0.95-y^2;
t2=1.1;
% густина струму, A/m2
J2=1e4*A*(F^2)/(fi*t2)*exp(-B*(fi^1.5)*vy/F);
% зона провідності: v(y), t(y), прозорість бар'єру D
fi_zp=fi-4.5e-7.*(eps.^(-2.0/5.0)).*(F.^(4.0/5.0));
y=((eps-1)/(eps+1)).^0.5.*3.79e-4.*(F.^0.5)/fi_zp;
if y>1.0
y=1.0;
fprintf('Область насичення зони провідності!\n')
end
vy = -0.7555*y.^2 - 0.2676*y + 1.0138;
```

```
ty = 0.0443*y.^2 + 0.0716*y + 0.9967;
Dp=exp(-B.*(fi_zp.^1.5)*vy/F);
% густина струму зони провідності, A/m2
J_zp=1e4*A*(F^2)/(fi_zp*(ty^2.0))*Dp;
fprintf('Зона провідності y=%e, D=%e, F=%e В/м,
J=%e А/м2, I=%e А\n',y,Dp,F*1e2,J_zp,J_zp*pi*r^2)
% валентна зона: v(y), t(y), прозорість бар'єру D
fi_vz=fi+Eg;
y=((eps-1)/(eps+1)).^0.5.*3.79e-4.*(F.^0.5)/fi_vz;
if y>1.0
y=1.0;
fprintf('Область насичення валентної зони!\n')
end
vy = -0.7555*y.^2 - 0.2676*y + 1.0138;
ty = 0.0443*y.^2 + 0.0716*y + 0.9967;
Dv=exp(-B.*(fi_vz.^1.5)*vy/F);
% густина струму валентної зони, A/m2
J_vz=1e4*A*(F^2)/(fi_vz*(ty^2.0))*Dv;
fprintf('Валентна зона y=%e, D=%e, F=%e В/м,
J=%e А/м2,
I=%e А, Iall=%e А\n',
y,Dv,F*1e2,J_vz,J_vz*pi*(r^2),J_zp*pi*(r^2)+J_vz*pi*(r^2))
```

Напруженість електричного поля неоднорівномірна по поверхні мікрокатоду, тому для визначення загального струму необхідно інтегрувати рівняння (1) по всій емісійній поверхні. У [12] запропоновано спрощену формулу для розрахунку емісійного струму:

$$I = \alpha' \pi R_{\text{верх}}^2 J(E_{\text{верх}}),$$

де $R_{\text{верх}}$, $E_{\text{верх}}$ — радіус заокруглення та напруженість електричного поля на верхівці мікрокатоду; α' — коефіцієнт пропорційності, який слабо залежить від $R_{\text{верх}}$, $E_{\text{верх}}$.

Величина $\alpha = \alpha' \pi R_{\text{верх}}^2$ визначає ефективну емісійну площу і є коефіцієнтом пропорційності між струмом мікрокатоду I і його густиною J . Подібний коефіцієнт β зв'язує потенціал U і величину напруженості електричного поля E на вістрі мікрокатоду. Це дозволяє отримати прості залежності між розрахунковими J , E і вимірюваними I , U значеннями: $J = I / \alpha$, $E = \beta \cdot U$. Для мікрокатодів складних геометричних форм коефіцієнти α , β визначаються на основі експериментальних даних або комп'ютерного моделювання. Так значення β отримані за результатами комп'ютерного моделювання для мікрокатоду з радіусом верхівки в інтервалі 0,2÷80 нм, діаметром екстракційного електроду 600 нм, при віддалі 40 нм між катодом і електродом та різницею потенціалів 100 В показані в табл. 1.

Таблиця 1
Коефіцієнт локального підсилення поля

$r, \text{ нм}$	0,2	1	2	5	10	20	30	40	80
$\beta \times 10^7$	15,1	7,1	5,2	3,3	1,4	1,1	0,9	0,78	0,57

2. Розрахунок напруженості електричного поля

В рівняння (1) входить напруженість електричного поля на верхівці мікрокатоду. Напруженість електричного поля F зв'язана з градієнтом потенціалу U векторним рівнянням $\vec{F} = -grad U$, а розподіл потенціалу у вакуумі з просторовим зарядом для декартових координат описується рівнянням Пуассона [13]:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (2)$$

Для області, яка не містить заряду $\rho_c = 0$ і (2) перетворюється в рівняння Лапласа.

В методі скінчених різниць отримано апроксимацію рівняння (2), для прямокутної комірки із змінним кроком і 5-ти точковою розрахунковою схемою (рис. 2), яка на ітерації n має вигляд

$$U_{i,j}^n = \frac{1}{h_1 h_3 + h_2 h_4} \cdot \left(\frac{h_2 h_3 h_4}{h_1 + h_3} U_{i,j+1}^{n-1} + \frac{h_1 h_3 h_4}{h_2 + h_4} U_{i+1,j}^{n-1} + \frac{h_1 h_2 h_4}{h_1 + h_3} U_{i,j-1}^n + \frac{h_1 h_2 h_3}{h_2 + h_4} U_{i-1,j}^n \right) \quad (3)$$

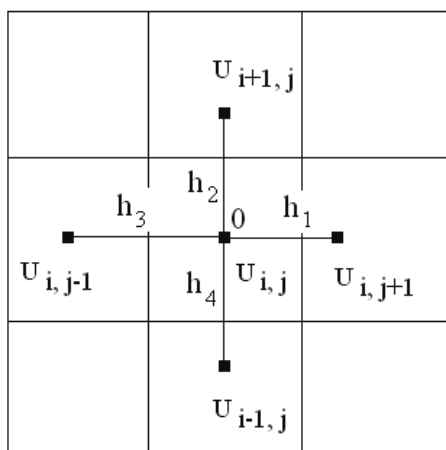


Рис. 2. Розрахункова прямокутна комірка із змінним кроком: ($h_1 \neq h_2 \neq h_3 \neq h_4$)

Для вакуумного проміжку із скінченого числа комірок значення потенціалів поля у

всіх точках сітки розраховується за рівняння (3) релаксаційним методом. За відомими значеннями потенціалів визначаються їх проекції градієнтів на координатні осі і напруженості електричного поля. Результат розрахунку потенціалів і напруженості електричного поля для мікрокатоду з екстракційним електродом показано на рис. 3.

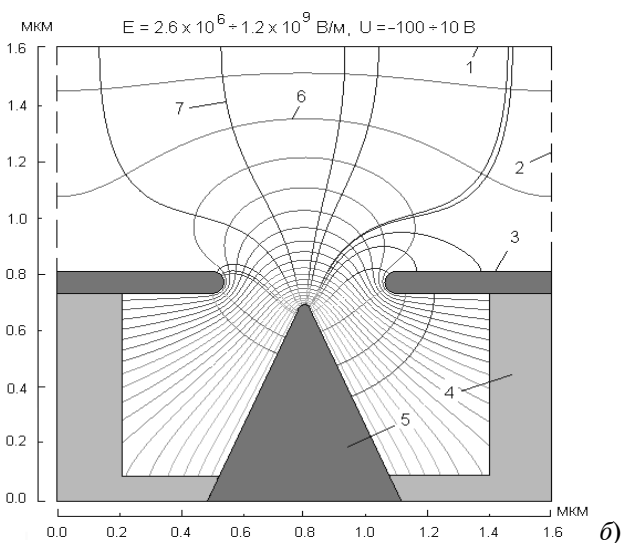
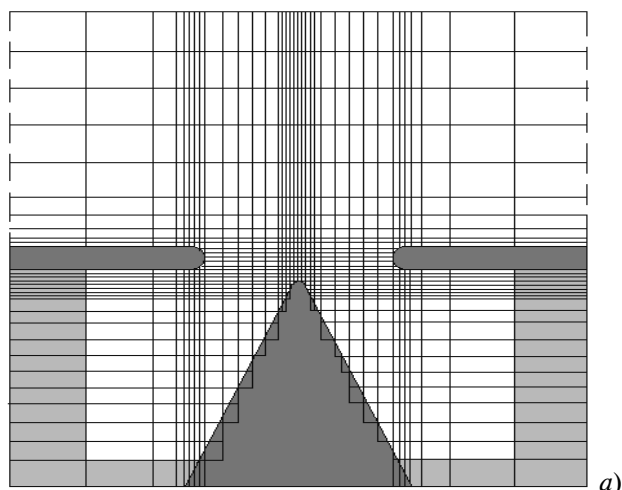


Рис. 3. Потенціали і напруженість електричного поля одноелектродного кремнієвого автоемісійного мікрокатоду: а) прямокутна сітка із змінним кроком; б) 1 — анод; 2 — вісь симетрії; 3 — екстракційний електрод; 4 — ізолятор; 5 — кремнієвий катод; 6 — екіпотенціальні поверхні; 7 — лінії напруженості електричного поля

При великому числі комірок і складній геометричній формі мікрокатодів та електродів більш ефективним є метод скінчених елементів [15], який реалізований в програмі мультифізичного моделювання FemLab. При-

клад тривимірного розрахунку напруженості електростатичного поля автоемісійних мікрокатодів з використанням FemLab показано на рис. 4.

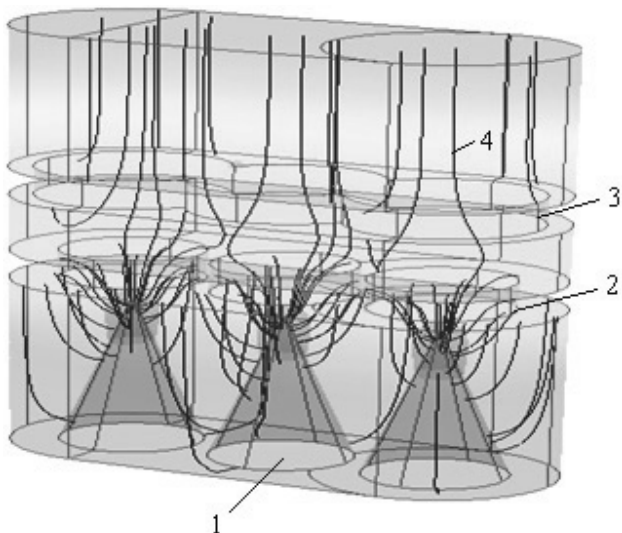


Рис. 4. Автоемісійні мікрокатоди: 1 — мікрокатод, 2 — екстракційний електрод, 3 — фокусуєчий електрод, 4 — лінії напруженості електричного поля

На основі отриманого розподілу напруженості електричного поля у вакуумному проміжку можна розрахувати траєкторії електронів.

3. Розрахунок траєкторій електронів

Рух електронів в електростатичному полі описується рівнянням Лоренца

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E}. \quad (3)$$

Звичайно рівняння (3) використовується у формі проєкцій на координатні осі

$$m\ddot{x} = eE_x, \quad m\ddot{y} = eE_y, \quad m\ddot{z} = eE_z. \quad (4)$$

Рівняння (4) можна записати у вигляді задач Коші 2-го порядку. Так для проєкції на координатну вісь X отримаємо

$$\ddot{x}(t) = f(t, x(t), \dot{x}(t)), \quad x(t_0) = x_0, \quad \dot{x}(t_0) = V_0. \quad (5)$$

Тоді $\ddot{x} = \dot{V}(t)$ і (5) перетворюються в систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= V, \\ \frac{dV}{dt} &= f(t, c, V) \end{aligned} \right\} \begin{cases} x(t_0) = x_0 \\ V(t_0) = V_0 \end{cases}. \quad (6)$$

Система (6) розв'язується стандартним методом Рунге-Кутта порядку $N=4$, при цьому вона буде генеруватися дві послідовності $\{x_k\}$ і $\{V_k\}$ [16]:

$$V_{k+1} = V_k + \frac{h(f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4)}{6}, \quad (14)$$

$$f_1 = f(t_k, V_k), \quad f_2 = f\left(t_k + \frac{h}{2}, V_k + \frac{h}{2}f_1\right),$$

$$f_3 = f\left(t_k + \frac{h}{2}, V_k + \frac{h}{2}f_2\right), \quad f_4 = f\left(t_k + h, V_k + hf_3\right).$$

Перша послідовність буде числовим розв'язком задачі (5). В результаті автоемісії електрони попадають у вакуумний проміжок, прискорюються електростатичним полем і при русі створюють просторовий заряд. Послідовність розрахунку траєкторій електронів з врахуванням просторового заряду у системі послідовних електростатичних електродів, призначених для вимірювання надвисокого вакууму, описано в [17]. З незначними змінами її можна застосувати для розрахунків траєкторій руху електронів у вакуумному проміжку мікрокатода. Результати розрахунку траєкторій електронів для 30 точок емісії на поверхні одноелектродного мікрокатода без і з врахуванням просторового заряду показано на рис. 5.

Як видно з рис. 5, б, просторовий заряд спричиняє взаємне відштовхування електронних променів, що суттєво викривляє їх траєкторії. Так як мікрокатод з одним екстракційним електродом при автоемісії утворює розбіжний пучок електронів, то для експозиції областей заданої форми і розмірів на фоторезисті, який розміщений в площині аноду, потрібний додатковий фокусуєчий електрод. Результати розрахунку траєкторій електронів для 30 точок емісії на поверхні мікрокатода з додатковим фокусуєчим електродом і з врахування просторового заряду показано на рис. 6.

Як видно з рис. 6, додатковий електрод дозволяє сфокусувати електронні промені і забезпечити практично однорідну експозицію області діаметром 0,8 мкм. Для автоемісії електронів потрібний високий вакуум з тиском залишкових газів $10^{-5} \div 10^{-7}$ Па. Енергія електронів, прискорених потенціалами на електродах мікрокатода, є достатньою для іонізації молекул залишкових газів. Аналогічно до розрахунку траєкторій електронів,

розраховано траєкторії позитивно заряджених іонів двоелектродного мікрокатоду, які показано на рис. 7.

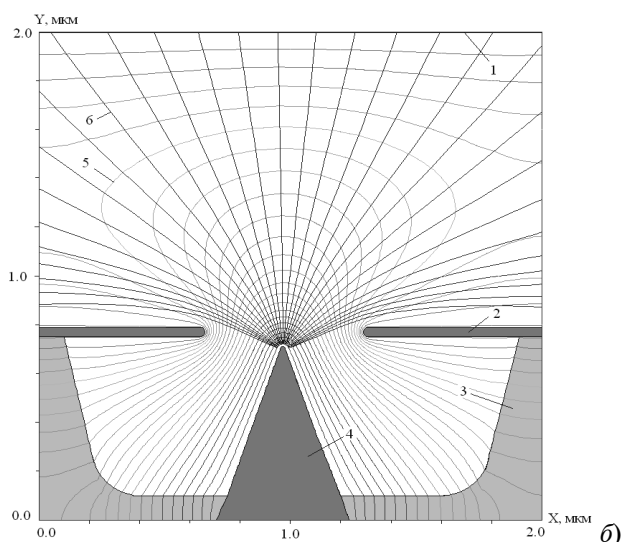
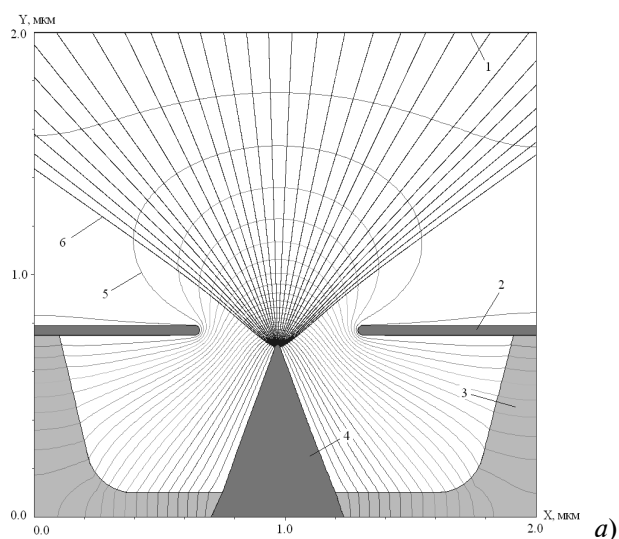


Рис. 5. Траєкторії електронів одноелектродного автоемісійного мікрокатоду: а) без врахування просторового заряду; б) з врахуванням просторового заряду; 1- анод $U=10$ В; 2 — екстракційний електрод $U=0$ В; 3 — оксид кремнію; 4 — кремнієвий катод $U=-80$ В; 5 — еквіпотенціальні поверхні; 6 — траєкторії руху електронів

Як видно з рис. 7, найбільшому бомбардуванню іонами піддається вістря мікрокатоду, що спричиняє його розпилення, нестабільний автоемісійний струм і невелику тривалість роботи. Значно більший струм, стабільнішу автоемісію і більшу на порядок тривалість роботи мають конструкції мікрокатодів з планарно-торцевими емісійними поверхнями [1, 18].

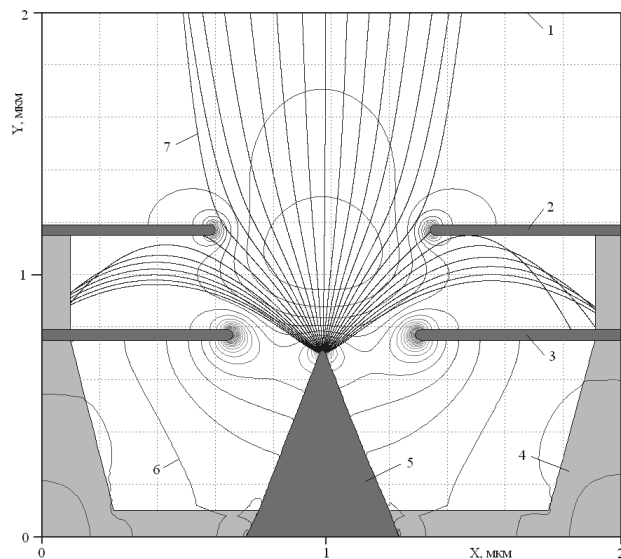


Рис. 6. Траєкторії електронів двоелектродного мікрокатоду: 1- анод; 2 — фокусуєчий електрод; 3 — екстракційний електрод; 4 — оксид кремнію; 5 — кремнієвий мікрокатод; 6 — лінії напруженості електричного поля; 7 — траєкторії руху електронів

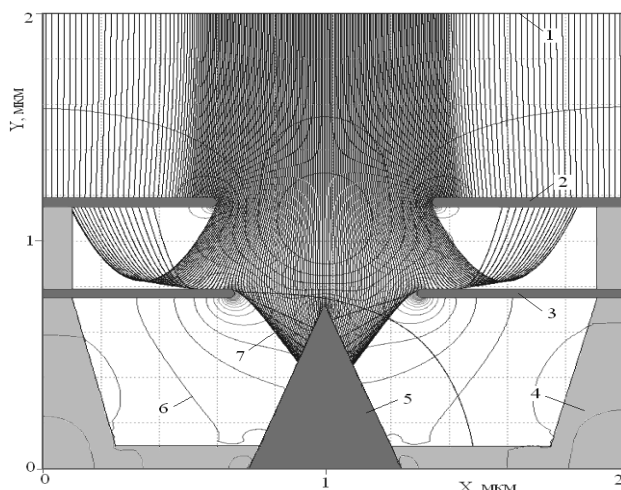


Рис. 7. Траєкторії позитивно заряджених іонів двоелектродного мікрокатоду: 1 — анод; 2 — фокусуєчий електрод; 3 — екстракційний електрод; 4 — оксид кремнію; 5 — кремнієвий катод; 6 — лінії напруженості електричного поля; 7 — траєкторії руху іонів

4. Оцінку чутливості фоторезисту

Для прискорюючих потенціалів до 0,5 КВ, при яких працюють кремнієві мікрокатоди в цифровій літографії, електрони проникають на невелику глибину фоторезисту, тому його товщина не повинна перевищувати 100 нм. На даний час недостатньо даних про чутливість фоторезистів такої товщини до електронів з не-

великими енергіями. Тому для оцінки дози, необхідної для експозиції областей фоторезисту мікрокатодами в цифровій літографії, прийнято величину заряду експозиції лінії мінімальної товщини гаусівським електронним пучком в електронно-променевої літографії. Так в [19] розрахований експозиційний заряд $2 \cdot 10^{-16}$ Кл для експозиції області діаметром 50 нм при прискорюючому потенціалі 2 КВ. Для такої величини експозиційного заряду оціночна чутливість фоторезисту і час експозиції ліній мінімальної товщини при емісійному струмі 1 нА для цифрової літографії показана в табл. 2.

Таблиця 2
Оціночна чутливість фоторезисту і час експозиції

Потенціал прискорення, В	Розмір області експозиції, нм	Чутливість, мкКл/см ²	Час експозиції, с
100	25	40,1	1e-7
	50	10,2	
	100	2,6	
	200	0,6	

Як видно з табл. 2, при використанні в цифровій літографії областей експозиції різних розмірів чутливість фоторезисту може бути меншою від 1 мкКл/см², що потребує спеціальних фоторезистів із хімічними підсилювачами чутливості. Час експозиції набагато більший від часу прольоту електронів від мікрокатода до поверхні фоторезисту і тому він буде визначальним у тривалості літографічного процесу.

Висновки

Розглянуто рівняння Фаулера-Нордгейма в якому враховано зміни роботи виходу і форми потенціального бар'єру для зони провідності і валентної зони. Наведено MatLab програму для розрахунку густини автоемісійного струму напівпровідників. Розраховано коефіцієнт локального підсилення поля для мікрокатода з різним радіусом вістря.

Для розрахунку напруженості електричного поля вакуумного проміжку отримано в методі скінчених різниць апроксимацію рівняння Лапласа для 5-ти точкової розрахункової схеми із змінним кроком. Показано результат дво- і тривимірною розрахунку потенціалу і напруженості електричного поля.

Розглянуто розрахунок траєкторій руху електронів у вакуумному проміжку мікрока-

тода. Встановлено, що просторовий заряд змінює траєкторії електронів. Показано траєкторії електронів і іонів двоелектродного мікрокатода. Отримано оцінку чутливості фоторезисту для цифрової літографії.

Результати роботи можуть бути використані при розробці і проектуванні напівпровідникових автоемісійних мікрокатодів для цифрової електронної літографії.

Список літератури

1. *Абаньшин Н.П.* Исследование механизма ионного нагружения острийных эмиттеров автоэмиссионных структур / Н.П. Абаньшин, Б.И. Горфинкель, А.Н. Якунин // "Письма в ЖТФ". — Том 32, № 20, 2006. — С. 52-59.
2. *Молоковский С.И.* Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. — [2-е изд.], — М.: Энергтоиздат, 1991. — 302 с.
3. *Семенов Н.Г.* Введение в математическое моделирование. Maple, Mathematica, MATLAB / Н.Г. Семенов. — М.: Солон, 2002. — 112 с.
4. *Femlab Multiphysics:* www.comsol.com
5. *Simion, Lorentz.* Advanced electrostatic/magnetic fields and trajectories particles simulation: www.siom.com.
6. Software products for simulating charged-particle beam: www.field.com.
7. *Fowler R.H.* Electron emission in intense electric fields / R.H. Fowler, L.W. Nordheim // Proc. R. Soc. Ser. A. — 1928. — Vol. 119, No. 781. — P. 173.
8. *Stratton R.* Field emission from semiconductor / R. Stratton // Proc. Phys. Soc. London. — 1955. — V. B68. — P. 746-757.
9. *Stratton R.* Theory of field emission from semiconductors / R. Stratton // Phys. Rev. — 1962. — V. 125. — P. 67-82.
10. *Фишер Р.* Автоэлектронная эмиссия полупроводников / Р. Фишер, Х. Норман; пер. с нем. — М. — 1971.
11. *Голота В.І.* Особливості автоелектронної емісії напівпровідникових мікрокатодів / В.І. Голота // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2008. — № 5/4 (35). — С.4-7.
12. *Dvorson L.* Analytical Electrostatic Model of Silicon Conical Field Emitters-Part I / L. Dvorson, M. Ding and A.I. Akinwande // IEEE Transaction on Electron Devices. — Jan. 2001. — Vol. 48. — P. 134.
13. *Бинск К.* Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинск, П. Лауренсон; пер. с англ. — 1970. — 376 с.
14. *Голота В.І.* Розрахунок напруженості електричного поля і автоемісійного струму кремнієвого мікрокатода / В.І. Голота // Вос-

- точно-Европейский журнал передовых технологий. — 2008. — № 5/4 (35). — С.8-16.
15. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич; пер. с англ. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
16. *Метьюз Д.* Численные методы. Использование MATLAB / Джон Г. Метьюз, Куртин Финк; 3-е изд.; пер. с англ. — М.: Изд. дом “Вильямс”. — 2001. — 720 с.
17. *Mitsui T.* Computer simulation of electron trajectories with the space charge in cascade static lens gauge / T. Mitsui, T. Urano, M. Tanaka, T. Kanaji. // Applied Surface Science. — 2001. — Vol. 169-170. — P. 747-751.
18. Пат. № 32528 України, МКІ H05K 21/00. Спосіб виготовлення мікروвакуумного автоемісійного випромінювача з планарно-торцевим катодом / Голота В.І.; Прикарпатський НУ ім. В. Стефаника; заявл. 04.02.08; опубл. 11.08.08, Бюл. № 15. — 14с.
19. *Yoshizawa Masaki.* A Feasibility Study of 50 nm Resolution with Low Energy Electron Beam Proximity Projection Lithography / Masaki Yoshizawa and T. A. Savas // Jpn. J. Appl. Phys. — 2002. — Vol. 41. — P. L87-L88.