

С. В. Бандуш,
В.В. Мартинюк

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК КРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЕТАПІВ ФОРМУВАННЯ НАНОЧИПІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто послідовність фізико-хімічних процесів, що застосовуються при створенні сучасних напівпровідникових наночипів. Детально описано етапи вирощування монокристалічного кремнію, термічного окислення, фотолітографії, плазмового травлення та іонної імплантації. Наведено фізичні принципи, які забезпечують формування наноструктур на кожному технологічному етапі.

Ключові слова: метод Чохральського, модель Діла-Гроува, EUV-літографія, іонна імплантація, еквівалентна товщина оксиду (ЕОТ), квантове тунелювання.

Abstract

The physical model of the sequence of technological processes for the creation of semiconductor nanochips has been expanded. Mathematical models and analytical calculations are presented for key stages: the rate of crystal growth by the Czochralski method, oxidation kinetics using the Deal-Grove model, optical limitations of EUV lithography, impurity distribution profile during ion implantation, and calculation of the Equivalent Oxide Thickness (EOT) for High-k dielectrics.

Keywords: Fermi paradox, metallicity, exoplanets, nucleosynthesis, equation of state, accretion.

Вступ

Перехід до технологічних норм 5 нм, 3 нм і нижче вимагає не лише розуміння якісних фізичних процесів, але й точного математичного апарату для їх контролю. Кожен етап створення інтегральної мікросхеми жорстко обмежений фундаментальними константами. Метою даної роботи є розширений аналіз фізико-технологічних етапів формування наночипів із застосуванням математичного моделювання та розрахунком критичних параметрів, що визначають межі мініатюризації.

Результати дослідження

Виробництво розпочинається з отримання бездислокаційного монокристала кремнію методом Чохральського.(1) Для забезпечення стабільного фронту кристалізації максимальна швидкість витягування злитка V_{max} визначається балансом теплопередачі на межі фаз і описується рівнянням:

$$V_{max} = \frac{k_s \nabla T_s}{\rho_s L}$$

де k_s — теплопровідність твердого кремнію, ∇T_s — градієнт температури вздовж кристала, ρ_s — густина твердої фази, L — прихована теплота кристалізації.

Наступним кроком є термічне окислення для створення ізоляційного шару SiO_2 . Кінетика росту оксиду описується математичною моделлю Діла-Гроува(4):

$$x_o^2 + Ax_o = B(t + \tau)$$

де x_0 — товщина шару оксиду, t — час окислення, B — параболічна константа швидкості (визначає дифузію крізь оксид), B/A — лінійна константа швидкості (реакція на поверхні), τ — зсув часу, що враховує початкову товщину оксиду.

Етап **EUV-фотолітографії** використовує екстремальний ультрафіолет із довжиною хвилі $\lambda = 13.5$ нм(2). Крім роздільної здатності, критичним параметром є **глибина різкості (Depth of Focus, DOF)**, яка визначає допустиму похибку неплоскостності пластини. Вона розраховується за формулою:

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{NA^2}$$

Розрахунок: При типових значеннях коефіцієнта процесу $k_2 = 0.5$ та числової апертури сучасних EUV-сканерів $NA = 0.33$, глибина різкості становить:

$$DOF = 0.5 \cdot \frac{13.5}{0.33^2} \approx 61.98 \text{ нм}$$

Це означає, що фокусна площина має підтримуватися з точністю до 62 нм, що вимагає надскладних оптико-механічних систем стабілізації.

Формування активних областей транзистора відбувається шляхом **іонної імплантації**. Розподіл концентрації імплантованих іонів (наприклад, бору або фосфору) по глибині підкладки апроксимується розподілом Гауса:

$$N(x) = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left(-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right)$$

де $N(x)$ — концентрація іонів на глибині x , Φ — доза імплантації (кількість іонів на одиницю площі), R_p — середній проєктований пробіг іона, ΔR_p — середньоквадратичне відхилення пробігу (страглінг). Ці параметри безпосередньо залежать від енергії прискорювача.

Головним бар'єром для наночипів є **квантове тунелювання** електронів крізь надтонкий шар підзатворного діелектрика. При використанні SiO_2 завтовшки менше 1.2 нм струми витоку стають критичними. Для розв'язання цієї проблеми впроваджено High-k діелектрики(3) (наприклад, оксид гафнію HfO_2). Ефективність заміни оцінюється через **еквівалентну товщину оксиду (Equivalent Oxide Thickness, EOT)**:

$$EOT = t_{high-k} \frac{\epsilon_{SiO_2}}{\epsilon_{high-k}}$$

Розрахунок: Діелектрична проникність кремнію $\text{SiO}_2 \approx 3.9$, а оксиду гафнію $\text{HfO}_2 \approx 25$. Якщо ми створюємо фізично товстий шар HfO_2 товщиною 5 нм (який повністю блокує квантове тунелювання), його еквівалентна електрична товщина складе:

$$EOT = 5 \cdot \frac{3.9}{25} = 0.78 \text{ нм}$$

Таким чином, фізика дозволяє отримати електричні характеристики шару товщиною 0.78 нм, зберігаючи фізичну товщину в 5 нм для уникнення тунельних ефектів.

Висновки

Процес створення сучасного наночипа неможливий без точного фізико-математичного моделювання на кожному з етапів. Наведені розрахунки демонструють, що фундаментальні хвильові (EUV-оптика) та квантові (тунелювання) ефекти накладають жорсткі рамки на виробництво. Впровадження нових матеріалів, таких як High-k діелектрики, та використання математичних моделей розподілу домішок дозволяють інженерам обходити фізичні обмеження класичної електродинаміки та продовжувати масштабування за законом Мура.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices. – Wiley, 2006. – <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0470068329>
2. Bhosale P. P. Advanced Photolithography: Techniques and Applications. – Springer, 2023. – <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-25014-9>
3. Kuo P. S. The Future of Nanoelectronics: Beyond CMOS. – Nature, 2021. – <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03352-x>
4. Deal B. E., Grove A. S. General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon. – Journal of Applied Physics. – <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1713945>

Бандуш Софія Володимирівна — студентка групи 3кн-25Б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: sofiabandus955@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Sofia V. Bandush — Student of group 3KN-25B, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sofiabandus955@gmail.com

Scientific Supervisor: Volodymyr V. Martynyuk — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua