

УДК 623.574

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛЕГУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ДОМІШКАМИ МЕТОДОМ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ

Д. І. Левінзон, С. Е. Притчин

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: pritchinse@ukr.net

А. Ю. Ніконов

Запорізька державна інженерна академія
просп. Леніна, 226, м. Запоріжжя, 69006, Україна.

Постійний розвиток і ускладнення засобів електронної техніки, особливо в області НВЧ і оптоелектроніки, призводять до необхідності розвитку нових і вдосконалення існуючих технологій процесів легування, пошуку і розробки нових методів, які поліпшують параметри електронних приладів. Одним із таких методів є метод високоенергетичної імплантації. Будучи складним технологічним процесом, даний метод не надає можливості прямих вимірювань параметрів процесу. Розв'язання даної задачі може бути виконано за допомогою методів математичного моделювання. У роботі вдосконалено математичну модель легування напівпровідникових структур домішками методом високоенергетичної імплантації. Визначено початкові умови й обмеження моделі. За допомогою моделі розрахований профіль розподілу такої легуючої домішки, як фосфор, і розраховано значення залежності зміни концентрації домішки від відстані шар–підкладка за різних швидкостей травлення. Встановлено, що розподіл легуючої домішки здійснюється в приповерхневому шарі товщиною від 0 до 80 мкм.

Ключові слова: математичне моделювання, легування, іонна імплантація.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВИДНИКОВЫХ СТРУКТУР ПРИМЕСЯМИ МЕТОДОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Д. И. Левинзон, С. Э. Притчин

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: pritchinse@ukr.net

А. Ю. Никонов

Запорожская государственная инженерная академия
просп. Ленина 226, г. Запорожье, 69006, Украина.

Постоянное развитие и усложнение средств электронной техники, особенно в области СВЧ и оптоэлектроники, приводят к необходимости развития новых и усовершенствования существующих технологий процессов легирования, поиску и разработке новых методов улучшающих параметры электронных приборов. Одним из таких методов является метод высокоэнергетической имплантации. Являясь сложным технологическим процессом, данный метод не предоставляет возможность прямых измерений параметров процесса. Решение данной задачи может быть выполнено при помощи методов математического моделирования. В работе усовершенствована математическая модель легирования полупроводниковых структур примесями методом высокоэнергетической имплантации. Определены начальные условия и ограничения модели. При помощи модели рассчитан профиль распределения такой легирующей примеси, как фосфор, и рассчитано значение зависимости изменения концентрации примеси от расстояния слой–подложка при различных скоростях травления. Установлено, что распределение легирующей примеси осуществляется в приповерхностном слое толщиной от 0 до 80 мкм.

Ключевые слова: математическое моделирование, легирование, ионная имплантация.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. На даний час в основу більшості електронних приладів покладена планарна технологія [1]. Одним із технологічних етапів останньої є методика легування (впровадження електрично активних домішок) методом високоенергетичної імплантації [2]. Даний метод має як досить великі позитивні властивості, що сприяє його широкому впровадженню до промисловості, так і свої обмеження.

Основною перевагою методу іонної імплантації є те, що він дозволяє досить легко керувати формуванням електричних властивостей одержуваних напівпровідникових структур, не призводить до суттєвих змін механічних властивостей підкладки і має хорошу повторюваність.

До недоліків можна віднести те, що в процесі іонної імплантації легуючих домішок у структурі формуються точкові дефекти кристалічної решітки, які в процесі відпалу перетворюються на дефекти упаковки. Це призводить до погіршення параметрів електронних виробів [3].

Одним з основних параметрів кременевих структур, які виготовляється методом іонної імплантації, є профіль розподілу легуючої домішки. Не дивлячись на те, що даній проблемі приділяється досить велика увага [4, 5], частина питань до цих пір є невирішеними. Особливий інтерес становить визначення зв'язку характеристик процесу росту і структури перехідної області легованого шару і підкладки. Вирішення цього завдання можливе при використанні методів математичного моделювання.

Метою роботи є розробка математичної моделі легування напівпровідникових структур домішками методом високоенергетичної імплантації, за допомогою якої дослідити профіль розподілу домішок і залежність добутку концентрацій від функції швидкості випарювання домішки з поверхні кристала.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Дифузійний перерозподіл домішки у твердому тілі з фазовою межею, що переміщується, можна визначити наступними виразами [6]:

$$D \frac{d^2 C}{dx^2} = V \frac{dC}{dx} + \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

$$D \frac{dC}{dx} \Big|_{x=0} = (h_T + V) C \Big|_{x=0} \quad (2)$$

$$C(x, 0) = C_0, x \geq 0 \quad (3)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} C(x, t) = C_0 \quad (4)$$

де C – концентрація домішки у системі «високолегований шар–підкладка», m^3 ; C_0 – початкова концентрація домішки у підкладці, m^3 ; x – відстань, що відлічують від межі розділу «кристал–газова фаза», m ; V – швидкість осадження високолегованого шару, m/s ; h_T – швидкість випарювання домішки з поверхні кристалу, m/s ; t – тривалість осадження високолегованого шару, s .

На практиці перед осадженням проводиться високотемпературна обробка, під час якої відбувається випарювання домішки з поверхні підкладки та її перерозподіл. За таким способом високолегований шар осаджується вже не на однорідну леговану підкладку. Для обліку випарювання та перерозподілу домішки під час обробки підкладки необхідно замінити початкові умови у виразах (1)–(4). Як початкову умову варто використовувати розподіл домішки, що сформувався після попередньої високотемпературної обробки.

Розв’язання зазначеної задачі можна одержати у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{C(x, t)}{C_0} = & \frac{1}{2} \left\{ 2 - a - b + \left(1 - \frac{v_T}{h_T}\right) \times c \right\} + \\ & + \frac{v_T \cdot x}{D_T} + \frac{V \cdot x}{D} \times \operatorname{erfc} \left(\frac{v_T \times \sqrt{Dt}}{D_T} + \right. \\ & + \left. \frac{(x + Vt)}{2 \cdot \sqrt{Dt}} \right) - \left(1 - \frac{v_T}{h_T}\right) \times \exp \left(\frac{v_{T^2} \times D \times t}{D_T^2} + \right. \\ & + \left. \frac{v_T \times V \times t}{D_T} - \frac{v_T \times x}{D_T} \right) \times \\ & \times \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{v_T \times \sqrt{Dt}}{D_T} - \frac{(x - Vt)}{2 \times \sqrt{Dt}} \right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

при $a = \operatorname{erfc} \left(\frac{x - Vt}{2 \times \sqrt{Dt}} \right)$; $b = \exp \left(\frac{V \cdot x}{D} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x + Vt}{2 \cdot \sqrt{Dt}} \right)$;

$$c = \exp \left(\frac{v_{T^2} \times D \times t}{D_T^2} + \frac{v_T \times V \times t}{D_T} \right).$$

де v_T – швидкість травлення підкладки, m/s ; t_T – тривалість травлення підкладки, s ; h_T – швидкість випарювання домішки з поверхні кристалу, m/s ; D_T – коефіцієнт дифузії легуючої домішки за температури травлення, cm^2/s ; D – коефіцієнт дифузії кремнію, cm^2/s .

Розв’язання рівняння (5) зручно виконати у пакеті MATLAB, після аналізу літературних джерел. Початкові дані для моделювання на основі літературних джерел [7,8] були прийняті наступні:

- швидкість травлення підкладки $v_T = 0,0001$ – $0,0100$ m/s із кроком $0,001$;
- тривалість травлення підкладки $t_T = 60$ – 1800 s із кроком 60 ;
- швидкість випарювання легуючої домішки з поверхні кристала $h_T = 0,0001$ – $0,0100$ m/s із кроком $0,001$;
- швидкість осадження високолегованого шару $V = 0,005$ – $0,020$ m/s із кроком $0,002$;
- відстань, що відлічують від межі розділу «кристал–газова фаза» $x = 0$ – 300 m із кроком 20 ;
- коефіцієнт дифузії домішки за температури травлення $D_T = 8$ – 1010 m^2/s ;
- коефіцієнт дифузії кремнію $D = 13$ – 1010 m^2/s ;
- початкова концентрація домішок у підкладці $C_0 = 5$ – 1015 m^2 .

Враховуючи що запропонована модель є багато параметричною (x, t, V, v_T, h_T), які можуть змінюватися у широкому діапазоні значень, тому виникла необхідність ретельного дослідження впливу змінювання концентрації домішок у системі «високолегований шар–підкладка» $C(x, t)$. Для цього було зроблено вибірку для кожного з параметрів t (постійні параметри $V = 0,005$ m/s , $v_T = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s , $h_T = 10^{-10}$ m/s , V (постійні параметри $v_T = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s , $h_T = 10^{-10}$ m/s , $t = 1500$ s), v_T (постійні параметри $V = 0,005$ m/s , $t = 1500$ s , $h_T = 10^{-10}$ m/s), h_T (постійні параметри $V = 0,005$ m/s , $v_T = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s , $t = 1500$ s), відповідно 30, 7, 11 і 10 незалежних виборок даних. Як фактор було обрано змінювання концентрації домішок у системі «високолегований шар–підкладка» $C(x, t)$, як показник – відстань, що відлічують від межі розділу «кристал–газова фаза» (x).

У результаті моделювання отримано профілі розподілу домішки фосфору та залежність добутку концентрацій від функції швидкості випарювання домішки з поверхні кристала, які наведено на рис. 1, 2.

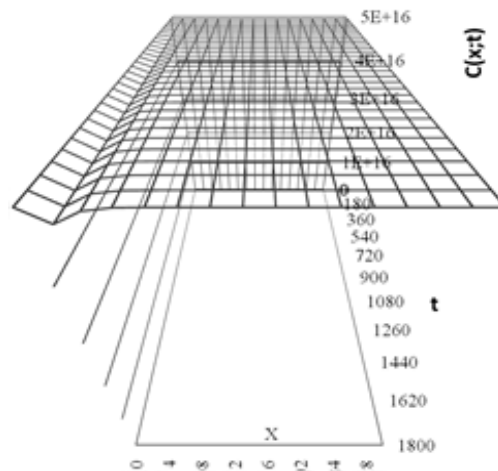


Рисунок 1 – Розрахований профіль розподілу домішки фосфору при наступних значеннях технологічних параметрів імплантації: $v_T = 1 \cdot E^{-10}$, $V = 0,005$, $h_T = 1 \cdot E^{-09}$

Аналіз профілів розподілу домішки (рис. 1) показує, що розподіл легуючої домішки здійснюється у поверхневому шарі товщиною від 0 до 80 мкм. При збільшенні тривалості осадження та травлення плівки процес легування відбувається більш інтенсивніше. Відстань, що відлічують від межі розділу «кристал–газова фаза» та яка дорівнює 20 мкм, характеризується більшою недостатністю легуючої домішки і подана на рис. 1 і 2 як найбільша регресія серед інших відстаней.

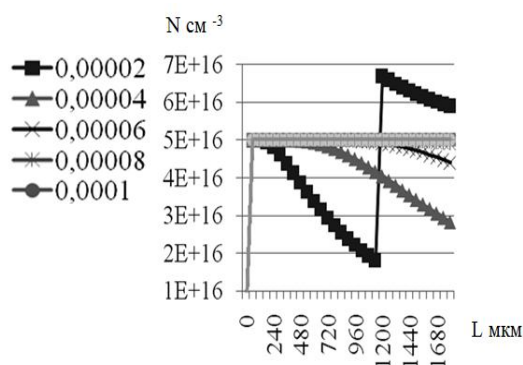


Рисунок 2 – Розраховане значення залежності зміни концентрації домішки фосфору у системі «високолегований шар–підкладка» на варіацію відстані, що відлічується від межі розділу «кристал–газова фаза» за різної швидкості травлення підкладки й утворення високолегованого шару при наступних значеннях технологічних параметрів імплантації: $v_T = 1 \cdot E^{-10}$, $V = 0,017$, $h_T = 1 \cdot E^{-09}$

Для оцінки профілів розподілу домішки необхідно провести статистичну обробку одержаних результатів, що можуть пояснити деякі моменти під час моделювання процесів захоплення легуючої домішки в процесі легування кремнію межею розділу.

Результати статичної обробки результатів моделювання процесу легування напівпровідникових структур домішками методом високоенергетичної імплантації наведені відповідно у табл. 1–3.

Під час порівняння табл. 1–3 можна зробити висновки, що коефіцієнт варіації більше 40 % для усіх випадків, тому коливання відстані в сукупності є невеликим, що свідчить про однорідність сукупності.

Таблиця 1 – Визначення впливу змінювання концентрації домішки у системі «високолегований шар–підкладка» на варіацію відстані, що відлічується від межі розділу «кристал–газова фаза» під час змінювання V

Найменування показника	Швидкість утворення високолегованого шару, V, мкм/с						
	0,005	0,007	0,009	0,011	0,013	0,015	0,017
Розмах варіації, м	0,00012			0,00036			

Дисперсія	9,83 E-09	9,83 E-09	1,086 E-08	9,83 E-09	9,83 E-09	5,3 E-09	3,49 E-08
Середньоквадратичне відхилення, м	9,91 E-05	9,91 E-05	10,42 E-05	9,91 E-05	9,91 E-05	7,27 E-05	18,69 E-05
Коефіцієнт осциляції, %	200	200	200	200	200	323	221
Коефіцієнт варіації, %	165,23	165,23	173,66	165,23	165,23	65,27	114,73
Коефіцієнти динаміки для коефіцієнта осциляції	1,0		1,0		1,61538		
Коефіцієнти динаміки для коефіцієнта варіації	1,0		0,95145		0,39503		

Таблиця 2 – Визначення впливу зміни концентрації домішки у системі «високолегований шар–підкладка» на варіацію відстані, що відлічується від межі розділу «кристал–газова фаза» при зміні v_T

Найменування показника	Швидкість травлення підкладки, v_T , мкм/с										
	1 E-10	1,1 E-09	2,1 E-09	3,1 E-09	4,1 E-09	5,1 E-09	6,1 E-09	7,1 E-09	8,1 E-09	9,1 E-09	1,01 E-08
Розмах варіації, м	0,00012										
Найменування показника	Швидкість травлення підкладки, v_T , мкм/с										
	1 E-10	1,1 E-09	2,1 E-09	3,1 E-09	4,1 E-09	5,1 E-09	6,1 E-09	7,1 E-09	8,1 E-09	9,1 E-09	1,01 E-08
Дисперсія	1,6E-09	1,6E-09	1,6E-09	1,6E-09	1,6E-09	9,83E-09	1,6E-09	1,6E-09	1,6E-09	1,6E-09	1,6E-09
Середньоквадратичне відхилення, м	4E-05	4E-05	4E-05	4E-05	4E-05	9,9 E-05	4E-05	4E-05	4E-05	4E-05	4E-05
Коефіцієнт осциляції, %	200,00										
Коефіцієнт варіації, %	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	165,23	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7
Коефіцієнти динаміки коефіцієнта варіації	1,0		1,0		2,47848		1,0		1,0		

Таблиця 3– Визначення впливу змінювання концентрації домішки у системі «високолегований шар-підкладка» на варіацію відстані, що відлічується від межі розділу «кристал-газова фаза» при зміні h_T

Найменування показника	Швидкість випарювання домішки з поверхні кристала, h_T								
	0	2E-10	3E-10	4E-10	5E-10	6E-10	7E-10	8E-10	9E-10
Розмах варіації, м	0,00012								
Дисперсія	1,6 E-09								
Середньоквадратичне відхилення, м	4E-05								
Коефіцієнт осциляції, %	200,0								
Коефіцієнт варіації, %	66,7								

До абсолютних статистичних показників належать розмах варіації, дисперсія і середньоквадратичне відхилення.

З табл. 1–3 можна зробити висновок, що дисперсія відстані характеризує її варіацію під впливом усіх факторів, але найбільш характерними є швидкість утворення високолегованого шару ($9,82 \cdot 10^{-09}$ – $1,086 \cdot 10^{-08}$) та швидкість травлення підкладки ($9,82 \cdot 10^{-09}$ – $1,086 \cdot 10^{-09}$), менш характерними - утворення високолегованого шару ($9,08 \cdot 10^{-09}$ – $7,83 \cdot 10^{-09}$) і швидкість випарювання домішки з поверхні кристалу ($1,6 \cdot 10^{-09} = \text{const}$).

Для з'ясування ступеня близькості між x і показником $S(x,t)$ використовувався коефіцієнт кореляції. Встановлено, що його значення перебуває у межах $0,36$ – $0,44 > 0$ і має позитивну величину, тобто існує прямий зв'язок між даними параметрами. Для якісної оцінки використовували шкалу Чедока, за якою визначено, що між x і $S(x,t)$ є помірний зв'язок.

Оцінка значущості коефіцієнта кореляції здійснювалася за допомогою t -критерію Ст'юдента. Виявлено, що $t_{\text{розр}} = (1,46$ – $1,83) \geq t_{p,k} = (1,35)$ при $p = 0,2$; $k = 14tr$; k , тобто коефіцієнт кореляції є значимим.

Розроблена модель перевірялася на адекватність за допомогою критерію Фішера методом найменших квадратів: $F_{\text{розр}} = (2,14$ – $3,34) \geq F_{p;k_1;k_2} (1,81)$ при $p = 0,2$; $k_1 = 1$; $k_2 = 14$.

Враховуючи вище сказане, можна зробити висновок, що модель є адекватною та може бути застосованою для проведення математичного аналізу

процесів захвату домішки під час високо енергетичного легування кремнію.

ВИСНОВКИ.

1. Удосконалена математична модель процесів захоплення домішки фосфору в процесі високоенергетичної імплантації кремнію на межі розділу, яка на відміну від існуючих характеризує появу концентраційного градієнта в твердій фазі на межі розділу фаз кристал-газова фаза.

2. Математичне моделювання процесу легування напівпровідникових структур домішками методом високоенергетичної імплантації дозволило встановити, що розподіл легуючої домішки здійснюється у поверхневому шарі товщиною від 0 до 80 мкм.

При збільшенні тривалості осадження та травлення півки процес легування відбувається більш інтенсивніше. Відстань, що відлічують від межі розділу «кристал-газова фаза» та яка дорівнює 20 мкм, характеризується більшою недостатністю легуючої домішки.

ЛІТЕРАТУРА

1. A novel planar-type body-connected FinFET device fabricated by self-align isolation-last process / Jyi-Tsong Lin, Yu-Che Chang, Yi-Chuen Eng, Hsuan-Hsu Chen // Solid-State and Integrated Circuit Technol. – 2010. – PP. 1235–1237.

2. New processing equipment for innovative technologies micro, nano- and radio electronics / V.V. Odynokov, G.Ya. Pavlov // Technology and designing in the electronic equipment. – 2011. – Vol. 3. – PP. 41–43.

3. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии / А.Р. Челябинский, Ф.Ф. Комаров // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173. – № 8. – С. 813–825.

4. Surface modification of SKD-61 steel by ion implantation technique / F.L. Wena, Y.-L. Lo, Y.-C. Yu // J. Vac. Sci. Technol. – 2007. – Vol. 161. – PP. 222–228.

5. Pre-amorphization damage in ion-implanted silicon / R.J. Schrentelkamp // Mater. Sci. Rep. – 1991. – Vol. 3. – PP. 275–280.

6. Технология материалов электронной техники. Теория процессов полупроводниковой технологии / Крапухин В.В., Соколов И.А., Кузнецов Г.Д. – М.: МИСИС, 1995. – 493 с.

7. Modeling of epitaxial silicon growth from the SiH_2Cl_2 - H_2 - HCl system in an rf-heated pancake reactor / Oh. In-Hwan, Takoudis. Christos G. // J. Appl. Phys. – 1991. – Vol. 69. – PP. 8336–8345.

8. Modeling silicon epitaxial growth with SiH_2Cl_2 / P.A. Coon1, M.L. Wise, S.M. George // Journal of Crystal Growth. – 1993. – Vol. 130. – PP. 162–172.

MATHEMATICAL MODELING OF DOPING SEMICONDUCTOR STRUCTURES BY HIGH-ENERGY IMPLANTATION

D. Levinson, S. Pritchinn

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: pritchinse@ukr.net

A. Nikonov

Zaporizhzhia State Engineering Academy
prosp. Lenina, 226, Zaporizhzhia, 69006, Ukraine.

Continuous development and sophistication of electronic equipment, especially in the microwave and

optoelectronics, lead to the need to develop new doping technologies and improve the existing ones, and to search for new methods of improving the parameters of electronic devices. One of these methods is a high-energy implantation. Being a complex technological process, this method does not provide a direct measurement of the process parameters. The solution of this problem can be accomplished using methods of mathematical modeling. In this paper, the mathematical model of doping impurities of semiconductor structures by high-energy implantation is improved. The initial conditions and limitations of the model are defined. Using the model the distribution profile was calculated for such a dopant as phosphorus and it was calculated the changes in the impurity concentration depending on the layer-substrate distance for various etching rate. It was found that the distribution of the dopant occurs in a surface layer of 0 to 80 microns in thickness.

Key words: mathematical modeling, doping, ion implantation.

REFERENCES

1. Lin, J.T., Chang Yu-Che, Eng, Y.C., Chen, H.H. (2010), "A novel planar-type body-connected FinFET device fabricated by self-align isolation-last process", *Solid-State and Integrated Circuit Technology*, pp. 1235–1237.
2. Odinokov, V.V., Pavlov, G.Y. (2011), "New processing equipment for innovative technologies micro, nano- and radio electronics", *Technology and designing in the electronic equipment*, vol. 3, pp. 41–43.
3. Cheljadinskij, A.R., Komarov, F.F. (2003), "Defect-impurity engineering in implanted silicon", *Uspehi fizicheskikh nauk*, vol. 173, no. 8, pp. 813–825.
4. Wena, F. L., Lo, Y.-L., Yu, Y.-C. (2007), "Surface modification of SKD-61 steel by ion implantation technique", *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 161, pp. 222–228.
5. Schrentelkamp, R.J. (1991), "Pre-amorphization damage in ion-implanted silicon", *Mater. Sci. Rept*, vol. 3, pp. 275–280.
6. Krapuhin, V.V., Sokolov, I.A., Kuznecov, G.D. (1995), *Tekhnologiya materialov elektronnoi tekhniki. Teoriya protsessov poluprovodnikovoi tekhnologii* [Technology electronic materials. Theory of semiconductor technology processes], MISIS, Moscow, Russia.
7. In-Hwan, Oh., Takoudis, C.G. (1991), "Modeling of epitaxial silicon growth from the $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{-H}_2\text{-HCl}$ system in an rf-heated pancake reactor", *J. Appl. Phys.*, vol. 69, pp. 8336–8345.
8. Coon1, P.A., Wise, M.L., George S.M. (1993), "Modeling silicon epitaxial growth with SiH_2Cl_2 ", *Journal of Crystal Growth*, vol. 130, pp. 162–172.

Стаття надійшла 05.06.2014.