

7-8, 1999. Pp. 233-236. 2. Slosarčík S.-Živčák, J.-Bauer, R.-Molcányi, T.-Gmiterko, A.- M. Mrázik; T. Podprocký: *Pressure Sensor in LTCC Multilayer Technology for Medical Application SEE '99 Dresden, 1999. Pp. 111-115.* 3. Bauer, R.- Rebenklau, L.-K.-J. Wolter; W.- Schiller; A.: *New Applications for Low Temperature Cofiring Ceramic Multilayers in 3D-Shaped Devices, International Conference and Exhibition Micro Materials, Micro Mat '97; Berlin, 1997. Pp. 127-129.* 4. Bauer, R.-Rebenklau, L.- K.-J. Wolter –Sauer, W.: *Aspects of LTCC Utilization for Microtechnical Application, 3rd IEMT/IMC Symposium April 21-23, 1999, Omiya-Tokyo, Japan. Pp. 162-167.* 5. Živčák, J.-Slosarčík, S.-Molcányi, T.-Knežo, D.: *Snímací systém pre neinvazívne meranie prejavov kompartment syndrómu, Acta Mechanica Slovaca, 2/99, ročník 3. Pp.71-75.* 6. Gmiterko, A.-Dovica, M.- Slosarčík, S.: *Mikromechatronika, AT P Journal, 9/1998. Pp. 46-48.* 7. Gmiterko, A.-Dovica, M. Slosarčík, S.: *Mechatronický konceptný návrh, AT P Journal, 7/198. Pp. 62-64.*

УДК 539.219.3

В.М. Матюшин, Р.В. Мартинюк

Запорізький державний технічний університет,
кафедра мікроелектроніки

ВПЛИВ АТОМІВ ВОДНЮ НА СИСТЕМУ Ni-Ge

© Матюшин В.М., Мартинюк Р.В., 2001

Досліджується процес гетеродифузії в германії під впливом атомарного водню на основі модельної системи Ni-Ge. Розглянуто вплив процесу дефектоутворення на протікання дифузії атомів нікелю в приповерхніх прошарках германію. Розраховано розподіл концентрації нікелю в германії. Запропоновано фізичну модель процесу стимулювання гетеродифузії атомарним воднем з урахуванням впливу дефектів.

Based upon a model system Ni-Ge, research of diffusion stimulated by hydrogen atoms is held. It is shown that defect creation processes caused by hydrogen-atom-recombination have a great effect on nickel diffusion in germanium subsurface layers. The nickel-in-germanium concentration distribution is calculated. The physical model of chemistimulated diffusion is suggested.

Вступ

Однією з найважливіших задач електронної технології є зниження температури процесу дифузійного легування. Проведено дослідження із стимулювання дифузії атомів домішки в напівпровідниках за допомогою енергії жмту високоенергетичних часток [1-3] (радіаційно стимульована дифузія – РСД) або електромагнітного випромінювання [4-8] (фотостимульована дифузія – ФСД).

Метод РСД дозволяє знизити температуру дифузії до 573 – 773 К [2-3], проте через необхідність відпалу радіаційних дефектів при 1173 К він не має перспективи як самостійний метод легування, але може бути використаний для розгонки домішки після її загонки методом термічної дифузії або іонної імплантації. Серед методів ФСД великі перспективи має лазерне твердофазне легування, що призводить до зниження температури дифузії до 673 – 773 К і дозволяє створювати напівпровідникові структури за дуже малий час (1 с).

Але найбільше зниження температури (до 300 – 330 К) досягається при стимулюванні дифузії за допомогою енергії екзотермічної хімічної реакції, що проходить на поверхні структури дифузанти-напівпровідник, тобто коли відбувається хемостимульована дифузія [9,10]. Проте при її дослідженні не враховувалися процеси дефектоутворення, що можуть інтенсивно проходити при стимулюванні дифузії [11].

В роботі досліджується вплив процесів дефектоутворення, що проходять при рекомбінації атомарного водню, на дифузію атомів домішки в напівпровідниковому кристалі.

Методика дослідження

Для дослідження були узяті пластини n-германію з питомим опором $0,15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ і щільністю дислокацій 10^6 м^{-2} , орієнтовані в напрямку /111/. Після травлення й ультразвукового очищення пластин на їхню поверхню методом термічного випару у вакуумі наносилися плівки нікелю. Товщина плівок контролювалася на рентгенівському мікроаналізаторі MAP-2 і становила $(1 - 5)\cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Атомарний водень одержували дисоціацією молекул водню у ВЧ-разряді. Молекулярний водень одержувався електролізом 20 %-го розчину КОН. Атоми водню вільно дифундували з області розряду до зразків на відстань 0,25 м. Концентрація атомарного водню в робочій камері вимірювалася калориметричним методом і методом ЕПР і досягала 10^{21} м^3 . Під час обробки в атомарному водні температура зразків становила 300 – 330 К, причому вони нагрівалися тільки за рахунок енергії, що виділяється під час реакції.

Розподіл повної концентрації нікелю за глибиною в кристалах германію, оброблених в атомарному водні протягом різних інтервалів часу, досліджувався методом вторинної іонної мас-спектрометрії (ВІМС). Зразки бомбардувалися з іонної пушки типу «Дуоплазатрон» іонами кисню O^{+2} з енергією 4 кеВ і щільністю струму 1 А/м^2 . Для реєстрації вторинних іонів використовувався твердотільний мас-спектрометр на базі МІ-1305.

Дослідження структури кристалічної ґратки германія проводилося методом рентгеноструктурного аналізу на установці "Дрон" із використанням мідного монохроматичного випромінювання.

Результати дослідження

За допомогою методу ВІМС було визначено профілі повної концентрації нікелю в германії у різні проміжки часу обробки в атомарному водні (рис. 1).

Внаслідок сканування на установці "Дрон" прошарків германія, легованих нікелем, отримали рентгенограми, на яких зареєстровано порушення кристалічної ґратки вакансійного типу. Це дає підстави припускати інтенсивне дефектоутворення при протіканні хемостимульованої дифузії під впливом атомарного водню.

Отримані експериментальні дані дозволили виявити деякі особливості хемостимульованої дифузії: концентрація домішки в приповерхневих прошарках значно перевищує межу розчинності нікелю в германії для даних температур; максимальна концентрація домішки в легованому прошарку виникає не на поверхні, а на деякій глибині $1,2\cdot 10^{-8} \text{ м}$, що пояснюється протіканням обернено спрямованого процесу випару домішки; із збільшенням часу обробки концентрація домішки в приповерхневому прошарку зменшується, тому що відбувається розпилення легованих прошарків у результаті впливу атомів водню; отримані концентраційні профілі міді в германії не вдається точно описати стандартними рішеннями другого рівняння Фіка для джерел постійної і перемінної потужності.

Аналітичний вираз для розрахунку розподілу концентрації домішки при хемостимульованій дифузії одержимо так.

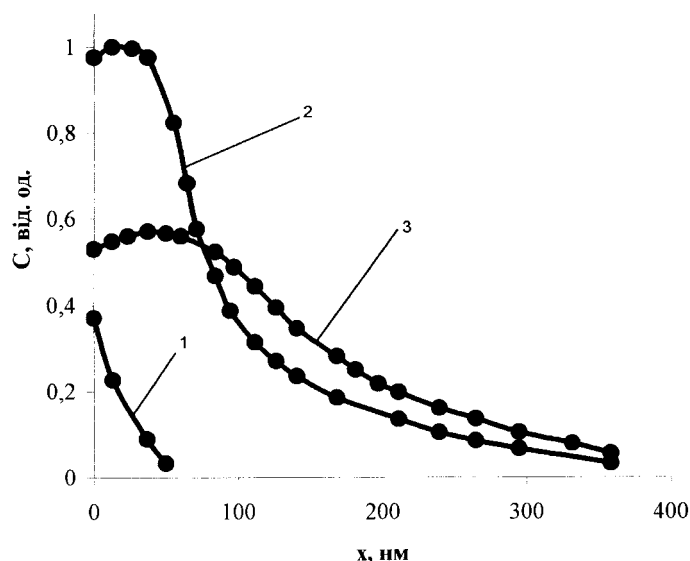


Рис. 1. Експериментальні профілі концентрації нікелю в германії (ВІМС після обробки зразків в атомарному водні:

1 – після напильовання; 2 – час обробки 30 хв; 3 – час обробки 60 хв

Час виділення енергії хімічної взаємодії атомів водню $\sim 10^{-10}$ с (час обмінної взаємодії), тому процес виділення і розсіювання енергії, що виділяється відповідає, уявленню про θ -спалах [12]. Оскільки температура в області θ -спалаху достатньо велика (близька за значенням до температури плавлення), то зростає роль дефектоутворення та багатофононних механізмів розсіювання. Утворення дефектів, зокрема вакансій, та фононні процеси сприяють введенню поверхневих атомів домішки в приповерхневі прошарки кристала. Розрахунок довжини вільного пробігу повздовжніх L_{\parallel} і поперечних L_{\perp} фононів [13] показує, що $L_{\parallel} \gg L_{\perp}$, $L_{\parallel} \sim 10^{-8}$ м.

Дефекти, що утворилися, знижують потенційний бар'єр для введення атомів дифузанта в приповерхневі прошарки кристала і самі дифундують усередину напівпровідникового кристала, отже у кристалі утворюється деякий профіль концентрації хімоактивованих дефектів. Як відомо, коефіцієнти дифузії для міжвузлового і вакансійного механізмів залежать від концентрації відповідних дефектів [14]. Тому варто очікувати залежності коефіцієнта дифузії D від глибини x [11]

$$D(x) = D_0 \exp\left(\frac{-x}{L}\right) + D_T, \quad (1)$$

де D_0 – значення коефіцієнта дифузії за хімоактивованими дефектами, екстрапольоване до $x = 0$; L – дифузійна довжина хімоактивованих дефектів; D_T – термічний коефіцієнт дифузії.

Зневажати термічною дифузією припустимо не в усіх випадках, тому що на великих глибинах значення коефіцієнта дифузії за хімоактивованими дефектами має однаковий порядок з термічним коефіцієнтом дифузії. Тому варто очікувати вплив термічної дифузії на форму концентраційного профілю.

Розподіл концентрації атомів домішки з урахуванням (1) описується рівнянням

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[D_0 \exp\left(\frac{-x}{L}\right) + D_T \right] \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (2)$$

з початковими і граничними умовами, що відповідають випадку дифузії з необмеженого джерела

$$\begin{aligned} C(x, t = 0) &= 0, \quad x > 0, \\ C(x = 0, t) &= C_0, \quad t > 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Вирішуючи (2,3) за допомогою методів математичної фізики, одержимо вираз, що описує розподіл концентрації атомів домішки при ХСД

$$C(x, t) = \frac{C_0 L}{\sqrt{\pi D_T t}} \int_0^1 \exp \left[-\frac{L^2}{4 D_T t} \ln^2 \left(\frac{z(m+1-\lambda)}{\lambda(1-\lambda)} \right) \right] \frac{\partial \lambda}{\lambda}, \quad (4)$$

де $z = e^{x/L}$; $m = D_0 / D_T$; λ – параметр інтегрування.

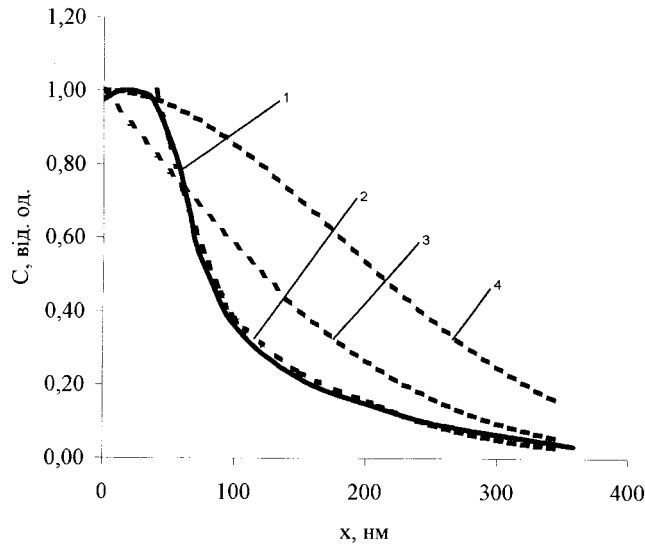


Рис. 2. Експериментальний і розрахункові профілі концентрації нікелю в германії:
1 – експериментальний розподіл; 2 – розрахунок (4); 3 – *erfc*-розподіл; 4 – *exp*-розподіл

На рис. 2 наведено експериментальний і розрахунковий профілі розподілу атомів нікелю в германії для таких значень параметрів, що входять у рівняння (4): $D_T = 9 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с}$, $D_0 = 1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$, $L = 9,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, $t = 1800 \text{ с}$.

Висновки

Добре узгодження результатів моделювання з експериментальними даними дозволяє зробити такі висновки: у профілі концентрації домішки можна виділити три області: область загонки домішки під впливом енергії рекомбінації атомарного водню (активна зона); область розгонки домішки за хімоствимюльованими дефектами; область розгонки домішки за термічними рівноважними дефектами; в активній зоні атоми домішки проникають у приповерхневі прошарки кристала під впливом енергії екзотермічної реакції на поверхні структури; дефекти, що утворюються в результаті взаємодії структури з атомарним воднем, значно впливають на процес дифузії домішки в приповерхневих прошарках підкладки; в об'ємі напівпровідника проходить термічна дифузія домішки; виявлено залежність коефіцієнта дифузії домішки від координати.

Отримані результати дозволяють уточнити фізичні процеси, що відбуваються під час взаємодії атомарного водню з напівпровідниковим структурами. Це відкриває нові можливості для ефективного використання хемостимульованої гетеродифузії в електронній і напівпровідниковій технології.

1. Болтакс Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Л., 1972. 2. Диффузия серебра в кремний под действием электронного облучения / В.В. Козловский,

- В.Н. Ломасов, Я.Я. Пилькевич, М.В. Путкевич // *Физика и техника полупроводников*. 1980. Т. 14. Вып. 10. С. 2043. 3. Влияние электронного облучения на диффузию примесей в монокристаллических полупроводниках / Ю.Н. Казаринов, В.В. Козловский, В.Н. Ломасов, М.В. Путкевич // *Физика и техника полупроводников*. 1986. Т. 20. Вып. 9. С. 1577. 4. Diffusion of phosphorus and boron into silicon at low temperature by heating with light irradiation / Ishakawa Yutaka, Maruyama Mitsuharu // *Jap. J. Appl. Phys. Pt 1*. 1997. 36, № 12a. С. 7433. 5. Капустин А.Ю., Колокольчиков Б.М., Свешиников А.А. Фотостимулированная диффузия золота в кремнии при импульсной фотонной обработке // *Физика и техника полупроводников*. 1990. Т. 24. Вып. 2. С. 318. 6. Антонова И.В., Шаймеев С.С. Лазерно-стимулированная диффузия золота в кремнии // *Физика и техника полупроводников*. 1992. Т. 26. Вып. 7. С. 1282. 7. Твердофазное легирование кремния под действием непрерывного излучения СО₂-лазера / С.Г. Кияк., В. Крэчун., А.А. Маненков и др. // *Физика и техника полупроводников*. 1989. Т. 23. Вып. 5. С. 421. 8. Лазерное твердофазное легирование фосфида индия / А.Ю. Бончик., С.Г. Кияк, О.В. Огнева и др. // *Физика и техника полупроводников*. 1989. Т. 23. Вып. 10. С. 1893. 9. Матюшин В.М. Низкотемпературная диффузия золота в германии под воздействием атомарного водорода // *Журнал технической физики*. 1999. Т. 69. Вып. 7. С. 73. 10. Матюшин В.М. Ускорение диффузионных процессов в твердых телах-катализаторах при протекании на их поверхности экзотермической реакции // *Укр. хим. журнал*. 1999. Т. 65. Вып. 4. С. 100. 11. Блинов Ю.Ф., Серба П.В. Расчет распределения атомов примеси при радиационно-стимулированной диффузии // *Физика и техника полупроводников*. 1983. Т. 17. Вып. 9. С. 1706. 12. Могилевский Б.И., Чудновский А.Ф. Теплопроводность полупроводников. М.: Наука, 1972. 320 с. 13. Glassbrenner C.T., Slack G.A. *Phys. Rev.* 1964. V. 134. № 4. P. 1058. 14. Атомная диффузия в полупроводниках / Под ред. Д. Шоу. М., 1975. 684 с.

УДК 537.33

А.О. Дружинін, Ю.М. Панков, С.М. Матвієнко
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра напівпровідникової електроніки

МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРА ТИСКУ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ П'ЄЗО-ТЕРМО-ЕРС

© Дружинін А.О., Панков Ю.М., Матвієнко С.М., 2001

Наведено комп'ютерну модель процесів, які відбуваються у сенсорі гідростатичного тиску на основі ефекту п'єзо-термо-ЕРС у мікрокристалах кремнію р-типу провідності при нестационарних температурах та тисках. Результати можна використати для проектування напівпровідникових сенсорів механічних величин з оптимальними параметрами при роботі в нестационарних режимах.

The computer model of processes which occur in hydrostatic pressure sensor on the base intermittent of the piezo-seebeck effect in p-type silicon whiskers is presented. The results may be used for designing the semiconductor sensors of mechanical values with optimum parameters under nonsteady-state conditions.

Вступ

Для розробки мікроелектронних сенсорів механічних або теплових величин використовується обмежена кількість кінетичних ефектів у напівпровідниках, таких як п'єзо-