

- 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.

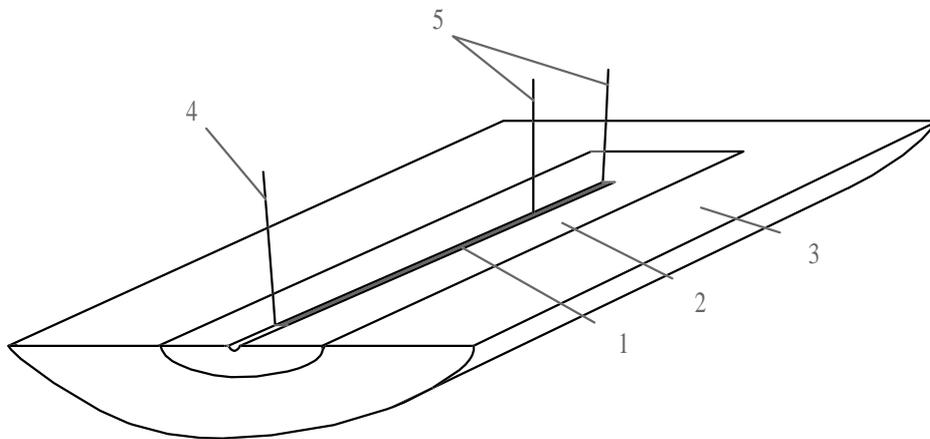
Вступ

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

опір, терморезистивний ефект і ефект Зеебека. В той же час деформація викликає появу інших п'єзокінетичних ефектів, зокрема, п'єзотермоелектричних, таких як п'єзотермопровідність, п'єзо-термо-ЕРС та п'єзо-Пельт'є, які придатні для створення сенсорів [1-3].

Математична модель сенсора

При розробці багатофункціональних сенсорів теплових і механічних величин на основі ниткоподібних мікрокристалів (НК) важливо знати розподіл температури вздовж зразка. В даній роботі досліджуються НК при всебічному тиску одночасно з його нагріванням електричним струмом на певній ділянці. На рис. 1 показана спрощена модель установки для її розрахунку. Тиск на зразок передається від зовнішнього задавача гідростатичного тиску до сенсора через рідину (масло) і термоізолюючий шар. Для створення градієнта температури вздовж зразка його інший кінець охолоджують, відводячи тепло за допомогою мідної пластинки, яка має кімнатну температуру.



*Рис. 1. Спрощена модель для дослідження ефекту п'єзо-термо-ЕРС:
1 – зразок ниткоподібного кристала (НК); 2 – термоізолюючий матеріал;
3 – рідина; 4 – контакт до охолоджуваного кінця НК;
5 – контакти, якими протікає струм для нагрівання даної ділянки НК*

Розрахунок моделі в нашому випадку проводився числовим розв'язанням рівняння теплопровідності методом скінченних елементів (Finite Element Method) [4]. Такий підхід дозволяє детально дослідити роботу сенсора в нестационарних умовах. Комп'ютерну модель було побудовано в програмному середовищі Matlab із використанням пакету PDE (Partial differential equations) Toolbox [5]

За допомогою PDE Toolbox можна проводити розрахунки як для стаціонарного випадку, так і для динамічного режиму. Для останнього можна візуалізувати зміну температури в реальному часі.

Розв'язання рівняння методом скінченних елементів йшло такими етапами:

1. Визначення геометрії.
2. Задання граничних умов.
3. Визначення коефіцієнтів, які визначають задачу.
4. Дискретизація скінченних елементів.
5. Задання початкових умов та розв'язання PDE.
6. Обробка отриманого розв'язку та його графічне відображення.

Розподіл температури в зразку можна знайти, розв'язуючи рівняння теплопровідності

$$\rho \cdot C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) = f, \quad (1)$$

де ρ – густина, C – теплоємність, k – коефіцієнт теплопровідності, f – джерело тепла.

Рівняння (1) є рівнянням параболічного типу. Коли маємо стаціонарний випадок, то рівняння (1) спрощується до еліптичного типу

$$-\nabla(k \nabla T) = f. \quad (2)$$

Граничні умови є комбінацією функції T та її похідної на границях моделі:

$$\text{Діріхле: } hT = r \text{ на границі } \partial\Omega. \quad (3.1)$$

$$\text{Неймана: } \vec{n} \cdot (k \nabla u) + qT = g \text{ на } \partial\Omega, \quad (3.2)$$

де \vec{n} – зовнішня нормаль, g, h, q, r є функції, визначені на $\partial\Omega$.

Розв'язок еліптичного диференціального рівняння в частинних похідних за допомогою PDE Toolbox знаходять так.

1. Описується геометрія моделі і граничні умови за допомогою Graphical User Interface (GUI) або безпосередньо в М-файлі.

2. Проводиться автоматична розбивка моделі на ділянки за допомогою трикутної сітки.

3. Проводиться дискретизація диференціального рівняння і граничних умов для отримання лінійної системи $KT = F$. Невідомий вектор T містить значення наближеного розв'язку в точках сітки, матриця K складена з коефіцієнтів k, q і h .

Помножимо рівняння (2) на довільну функцію v і проінтегруємо на $\partial\Omega$:

$$-\int_{\Omega} (\nabla(k \nabla T)) v dx = \int_{\Omega} f v dx. \quad (4)$$

Інтегруючи (4) частинами і взявши до уваги (3), отримаємо:

$$\int_{\Omega} (k \nabla u) \nabla v dx - \int_{\partial\Omega} \vec{n} \cdot (k \nabla u) v ds = \int_{\Omega} f v dx,$$

$$\int_{\Omega} (k \nabla T) \nabla v - f v dx - \int_{\partial\Omega} (-qT + g) v ds = 0. \quad (5)$$

Розв'язок T шукатимемо з умови (5), який разом з функцією v належить до функціонального простору V . Далі виберемо N_p -розмірний підпростір $V_{N_p} \subset V$. При $N_p \rightarrow \infty$ V_{N_p} буде прямувати до V . Рівняння (5) буде задовольняти N_p тестові функції $\phi_i \in V_{N_p}$:

$$\int_{\Omega} (k \nabla T) \nabla \phi_i - f \phi_i dx - \int_{\partial\Omega} (-qT + g) \phi_i ds = 0, \quad i = 1, \dots, N_p. \quad (6)$$

Коли ми функцію $T(x)$ подамо у вигляді

$$T(x) = \sum_{j=1}^{N_p} T_j \phi_j(x), \quad (7)$$

то отримаємо систему рівнянь

$$\sum_{j=1}^{N_p} \left(\int_{\Omega} (k \nabla \phi_{ji}) \nabla \phi_i + \int_{\partial\Omega} q \phi_j \phi_i ds \right) \cdot T_j = \int_{\Omega} f \phi_i dx + \int_{\partial\Omega} g \phi_i ds, \quad i = 1, \dots, N_p. \quad (8)$$

Позначимо у (8) через

$$K_{i,j} = \int_{\Omega} (k \nabla \phi_j) \nabla \phi_i dx, \quad Q_{i,j} = \int_{\partial\Omega} q \phi_j \phi_i ds,$$

$$F_i = \int_{\Omega} f \phi_i dx, \quad G_i = \int_{\partial\Omega} g \phi_i ds,$$

і перепишемо систему (8) у вигляді $(K + Q)T = F + G$, де K, Q – $N_p \times N_p$ матриці, а F і G – N_p -вектори. Розв'язок системи – вектор T складається з коефіцієнтів T_i , значення яких відповідають координатам x_i вершин трикутників сітки, коли $T_h(x_i) = T_i$.

PDE Toolbox має функції, які створюють K і F . Це робиться автоматично за допомогою Graphical User Interface (GUI).

Точність розв'язку T_h рівняння (2) буде залежати від того, як густо ми розіб'ємо трикутною сіткою нашу область Ω .

Нашу задачу можна вважати циліндрично симетричною, тому граничні умови задавалися для дворовірної області, і розрахунок проводився із використанням циліндричних координат. Початковою умовою було прийнято $T(t = 0) = 20^\circ C$.

Детальніше про метод кінцевих елементів, який реалізується в PDE Toolbox, наведено в [5].

Результати та обговорення

На рис. 2-5 показані результати розрахунку для стаціонарного й динамічного випадків, а для різного коефіцієнта теплопровідності ізолюючого матеріалу. З цих розрахункових даних можна зробити висновок, що розподіл температури і градієнт температури сильно залежить від типу ізолюючого матеріалу, а також від рідини, що знаходиться навколо цього матеріалу (рис. 1). Від товщини ізолюючого матеріалу розподіл температури залежить слабо.

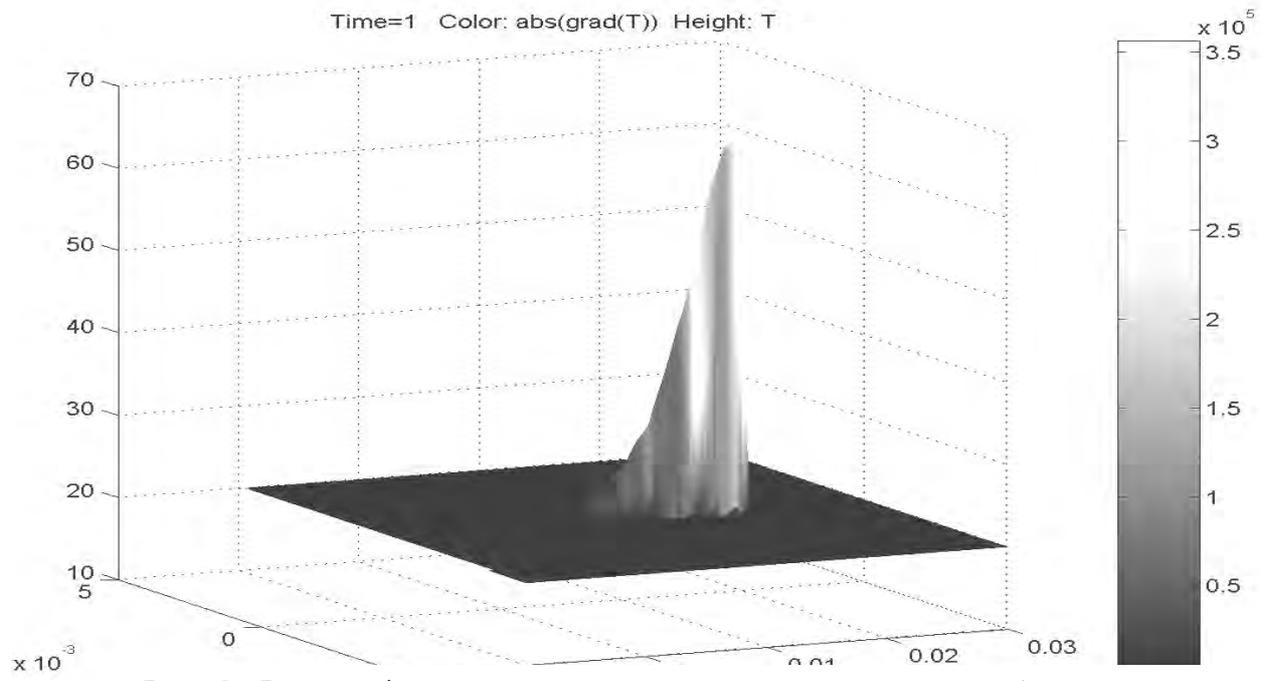


Рис. 2. Розподіл температури для моменту часу $t = 1$ с, коли теплоізолюючий матеріал має $k = 0,004$ Вт/(м град)

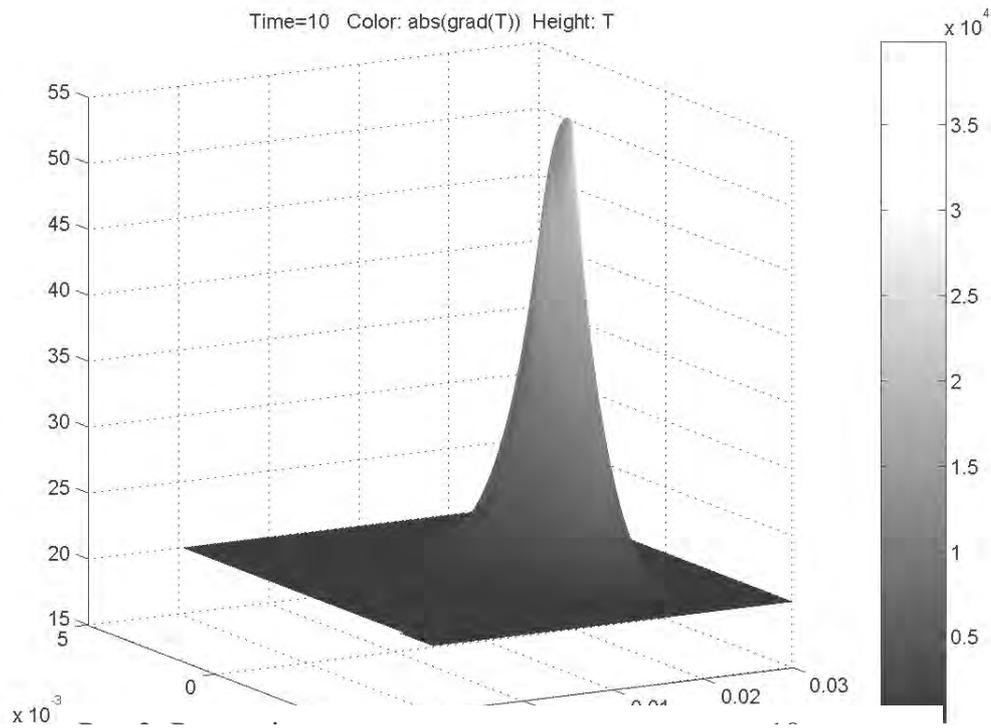


Рис. 3. Розподіл температури для моменту часу $t = 10$ с, коли теплоізолюючий матеріал має $k = 0,2$ Вт/(м град)

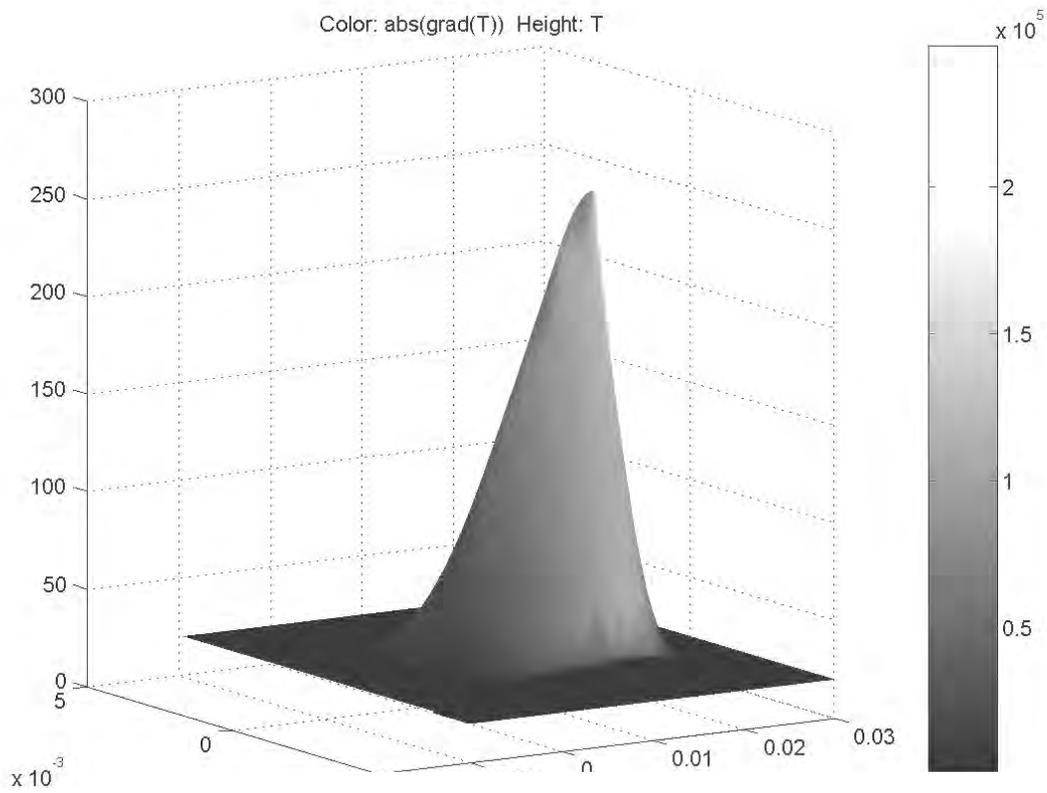


Рис. 4. Розподіл температури для стаціонарного випадку, коли теплоізолюючий матеріал має $k = 0,004$ Вт/(м град)

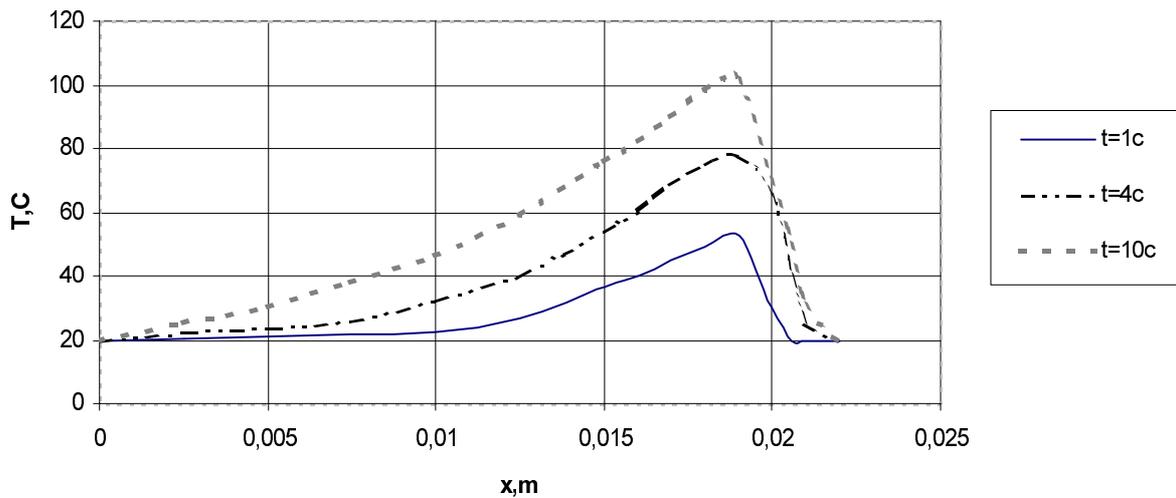


Рис.5. Одномірний розподіл температури вздовж зразка при різних t

Висновки

Комп'ютерна модель роботи напівпровідникового сенсора тиску дає змогу отримати повний тримірний розподіл температури та його зміни з часом при реальному нестационарному тиску. Результати можна використати при проектуванні напівпровідникових сенсорів механічних величин з оптимальними параметрами при роботі в нестационарних режимах.

1. A. Druzhinin, I. Maryamova, E. Lavitska, Y. Pankov. *Physical aspects of multifunctional sensors based on piezothermomagnetic effects in semiconductors* // *Sensors and Actuators*, 1998. Vol. A68. P. 229-233.
2. Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Панков Ю.М., Ховерко Ю.М. Ефект п'єзо-Зеебека в кремнії з-типу // *Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. 2000. № 397. С. 117-121.
3. A.G. Samoilovich, M.V. Nitsovich, V.M. Nitsovich. *On the theory of anisotropic thermoelectric power in semiconductors* // *Phys. status solidi*. 1966, Vol. 16 No.2. P. 459-465.
4. Галлагер Р. *Метод конечных элементов*. М., 1984.
5. <http://www.mathworks.com>.