

УДК 537.312.9

AN EMPIRICAL MODEL OF THE DEPENDENCE OF THE BAND GAP OF SILICON ON THE EXTERNAL PRESSURE

ЕМПІРИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛЕЖНОСТІ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ КРЕМНІЮ ВІД ЗОВНІШНЬОГО ТИСКУ

Zylevich M.O. / Зилевич М.О.

PhD.student. / аспірант

ORCID: 0000-0003-1646-0557

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 37, Prosp. Peremohy, 03056

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, проспект

Перемоги, 37, 03056

Kucherniuk P.V. / Кучернюк П.В.

PhD, Assoc.Prof.. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-6381-0156

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 37, Prosp. Peremohy, 03056

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, проспект

Перемоги, 37, 03056

Анотація. У роботі розглядається експериментальне дослідження впливу зовнішнього тиску на електричні параметри інтегрального резистору та діоду. Визначено вирази для обчислення значення ширини забороненої зони через експериментальні значення опору резистора та струму через діод при нульовому тиску та певній величині тиску, що дозволило побудувати залежність ширини забороненої зони кремнію від тиску. Визначено, що класична лінійна модель не відображає реальний нелінійний характер такої залежності. Запропоновано уточнюючий нелінійний коефіцієнт та проведено цикл обчислювальних експериментів для вибору найбільш оптимального методу апроксимації експериментальних даних. З використанням гіперболічної апроксимації побудовано емпіричну модель залежності ширини забороненої зони кремнію від зовнішнього тиску, похибка якої не перевищує 2 % у діапазоні значень тиску від 0 до 25 ГПа.

Ключові слова: деформація; тиск; заборонена зона ;деламінація; модель; апроксимація; провідність; густина струму; напівпровідник.

Abstract. The paper considers an experimental study of the influence of external pressure on the electrical parameters of the integrated resistor and diode. Expressions for calculating the value of the band gap through the experimental values of the resistance of the resistor and the current through the diode at zero pressure and a certain value of pressure, which allowed to construct the dependence of the band gap of silicon on pressure. It is determined that the classical linear model does not reflect the real nonlinear nature of such dependence. A refining nonlinear coefficient is proposed and a cycle of computational experiments is performed to select the most optimal method of approximation of experimental data. Using a hyperbolic approximation, an empirical model of the dependence of the width of the silicon band gap on the external pressure, the error of which does not exceed 2% in the range of pressure values from 0 to 25 GPa.

Key words: *deformation; pressure; band gap; delamination; model; approximation; conductance; current density; semiconductor.*

Вступ. Однією з актуальних задач проектування інтегральних мікросхем є дослідження впливу зовнішніх факторів на вихідні характеристики та параметри з метою забезпечення їх стабільності у певних умовах експлуатації. Одним з таких факторів є зовнішній тиск, який, найчастіше, виникає в результаті делямінаційних процесів в товщі корпусу мікросхеми [1]. Існує лише теоретичне описання фізики процесу впливу тиску на характеристики напівпровідникових компонентів [2 –7]. Основним фактором, який призводить до змін електричних параметрів напівпровідникових компонентів є зміна ширина забороненої зони під впливом тиску. Існуючі моделі такої залежності [5, 8, 9] є дуже спрощеними, не забезпечують точність моделювання у широкому діапазоні значень тиску, що не дозволяє розробити адекватні математичні моделі напівпровідникових компонентів для схемотехнічного аналізу та оптимізації.

Метою статті є збільшення точності моделювання залежності ширини забороненої зони кремнію від зовнішнього тиску шляхом проведення експериментальних досліджень та побудови емпіричної моделі такої залежності.

Основний текст. Фізику процесу впливу деформації на характеристики такого напівпровідникового матеріалу, як кремній, досліджено у роботах [3, 5, 7, 10, 11]. Аналіз цих робіт дозволяє зробити висновок, що причиною зміни електричних характеристик під впливом тиску є зміна ширини забороненої зони. Така зміна описується у праці [12]. Для врахування нелінійного характеру залежності ширини забороненої зони від тиску, пропонується використовувати наступне рівняння:

$$E_g(X) = E_{g0} - \alpha \times \gamma(X) \times X,$$

де E_{g0} – ширина забороненої зони за нормальних умов, яка дорівнює 1,12 еВ, $E_g(X)$ – ширина забороненої зони під впливом тиску, α – баричний коефіцієнт [4], X – тиск, що діє на кремній, $\gamma(X)$ – уточнюючий коефіцієнт, який буде

представлено у вигляді нелінійної функції за допомогою математичного апарату апроксимації.

Для побудови більш точної математичної моделі залежності ширини забороненої зони кремнію від зовнішнього тиску експериментально досліджено вплив тиску на електричні параметри напівпровідникового резистора та діода у складі інтегральної мікросхеми.

Використовуючи дані з праці [12] зміну ширини забороненої зони під впливом тиску можна визначити через відношення значень опору резистора при нульовому тиску R_0 та певній величині тиску X – R_x :

$$E_g(X) = E_{g0} - 2rT \ln \frac{R_0}{R_x}.$$

Аналогічно, зміну ширини забороненої зони під впливом тиску можна визначити через відношення значень струму діода при нульовому тиску та певній величині тиску X :

$$E_g(X) = E_{g0} + rT \ln \frac{I_0}{I_x}.$$

Для побудови емпіричної моделі залежності ширини забороненої зони від тиску скористуємось математичним апаратом апроксимації. Розрахунки проводились з використанням математичного пакету MATLAB R2016a. Обчислювальні результати дозволяють зробити висновок, що для даної задачі найточнішою виявились гіперболічна апроксимація, яку і використаємо для побудови емпіричної моделі.

В результаті отримаємо наступну емпіричну модель залежності ширини забороненої зони кремнію від зовнішнього тиску:

$$E_g(X) = E_{g0} - \alpha \times \gamma(X) \times X,$$

$$\gamma(X) = 0.4116 + \frac{5.57 \times 10^8}{X}.$$

Відносна похибка запропонованої моделі в діапазоні значень тиску від 0 до 25 ГПа не перевищує 2 %, що дозволяє використовувати її для модернізації

моделей активних та пасивних компонентів в програмах схемотехнічного аналізу і оптимізації для вирішення задач проектування ІМС зі стабільними вихідними характеристиками та параметрами в умовах експлуатації, пов'язаними зі значними змінними тисками на кристал ІМС.

Висновки. Експериментально досліджено що: характер залежності електропровідності легованого кремнію при кімнатних температурах від ширини забороненої зони відповідає власній електропровідності; існуюча лінійна модель залежності ширини забороненої зони кремнію від тиску є досить спрощеною і неточно відображає реальний характер цієї залежності. Для підвищення точності моделі при високих значеннях тиску запропоновано введення нелінійного коефіцієнту, залежність якого від тиску отримано шляхом апроксимації експериментальних даних. Визначено, що для даної задачі найменшу похибку апроксимації забезпечує гіперболічна апроксимація. Відносна похибка моделі не перевищує 2 % у діапазоні зміни тиску від 0 до 25 ГПа. Отримана точність моделі дозволяє використовувати її для подальших досліджень впливу тиску на електричні характеристики інтегральних мікросхем засобами схемотехнічного аналізу та оптимізації. Результати роботи можуть бути використані для побудови аналогічних моделей і інших напівпровідникових матеріалів.

Література:

1. M. R. Begley, J. W. Hutchinson, The Mechanics and Reliability of Films, Multilayers and Coatings. England: Cambridge University Press, 2017, 288 p.
2. Блейкмор Дж. Физика твердого тела Пер. с англ. под ред. д.ф.-м.н., проф. Д.Г. Андрианова и д.ф.-м.н., проф. В.И. Фистуля. — М.: Мир, 1988. — 608 с.: ил. — ISBN 5-03-001256-7.
3. Маделунг О. Теория твердого тела Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980
4. Полякова А.Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1979. — 168.с

5. Багдасарян А.В., Шермергор Г.Д., Захаров Н.П., Сергеев В.С. Оценка влияния напряжено деформированного состояния кремниевых пластин на смещение экстремумов энергетических зон //Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1986. –№5. – С. 21-30..

6. A. Barlian, W-T. Park, J. Mallon, A. Rastegar, B. Pruitt. "Review: Semiconductor Piezoresistance for Microsystems," Proceedings of the IEEE, vol 97, pp 513-552, 2009. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2013612

7. G. L. Bir, G. E. Pikus, P. Shelnitz, D. Louvish, Symmetry and strain-induced effects in semiconductors. New Yourk, USA: Wiley, 1974. 484 p.

8. J. F. Creemer, "The effect of mechanical stress on bipolar transistor characteristics," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Delft Univ., Delft, Netherlands, 2002.

9. J.F.Creemer P.J.French. "A new model of the effect of mechanical stress on the saturation current of bipolar transistors," Sensors and Actuators A Physical, vol, 97-98, pp 289-295, 2002. DOI: 10.1016/S0924-4247(01)00854-8

10. Кочемировский В. А. Дефекты кристаллической структуры полупроводниковых материалов / А. В. Кочемировский, И. А. Соколов. – С-П.: Издательский дом СПбГУ, 2013. – 94 с. Полякова А. Л. Физические принципы работы полупроводниковых датчиков механических величин / А. Л. Полякова // Акустический журнал – 1972. – № 1. С. 1-22.

11. W. Rindner, I. Braun. "Resistance of Elastically Deformed Shallow p-n Junctions," Journal of Applied Physics, vol 34, 1963. DOI: 10.1063/1.1729719

12. K.V. Shalimova, Fizila poluprovodnikov. Sankt-Peterburh, Russia: Lan Publ., 2010, 400 p.

Стаття відправлена: 23.08.2020 г.

© Зилевич М.О.