

М.Д. Матвійків, М.В. Лобур, В.М. Теслюк, Т.М. Матвійків
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра систем автоматизованого проектування,
 кафедра електронних засобів інформаційно-комп’ютерних технологій

АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ПОБУДОВИ СЕНСОРІВ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ НА АКТИВНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕМЕНТАХ

© Матвійків М.Д., Лобур М.В., Теслюк В.М., Матвійків Т.М., 2006

Проаналізовано доцільність побудови сенсорів мікроелектромеханічних систем (МЕМСів) на активних напівпровідникових елементах–діодах та транзисторах.

Analyzed expediency the structure of the microelectromechanical systems (MEMS) sensors on the active semiconductors - diodes and the transistors.

Як відомо з [1], МЕМСі являють собою такі системи, в яких електричні зв’язки знаходяться у взаємодії з механічними переміщеннями і які функціонують за різних фізичних принципів. Потреба в таких системах надзвичайно велика, оскільки вони мають широкі функціональні можливості, високу надійність, малі вагогабаритні показники.

Одним з основних компонентів МЕМСів є мікроелектромеханічні сенсори, які сприймають механічні впливи і перетворюють їх в електричні сигнали. На перших порах широке розповсюдження отримали мікроелектромеханічні сенсори на пасивних елементах у вигляді напівпровідникових п’езорезисторів* [2]. З метою забезпечення високої чутливості до механічних впливів п’езорезистори часто включають у мостові схеми.

Широке розповсюдження п’езорезистивних напівпровідникових сенсорів пояснюється передусім їх простою конструкцією, яка має вигляд тонкої чотирикутної мембрани, на протилежних краях якої виготовлені методом дифузії домішок п’езорезистори.

Наш аналіз здатності таких конструкцій задовольняти різноманітні вимоги, які ставлять до них модулі обробки інформації та актюатори МЕМСів, показує, що вони не забезпечують високої чутливості до механічних впливів, високого рівня вихідних сигналів, не мають належної конструктивної та технологічної сумісності з іншими функційними вузлами, які переважно будуються на активних елементах і технологія виготовлення яких (планарно-епітаксiальна технологія) більше пристосована для виготовлення активних, ніж пасивних елементів.

Наші дослідження показують, що функціональні можливості мікроелектромеханічних сенсорів можуть бути значно розширені, а їх параметри покращані за рахунок використання в них напівпровідникових і насамперед кремнієвих діодів та транзисторів. Пояснюється це декількома обставинами.

По-перше, напівпровідникові діоди та транзистори відносяться до категорії активних елементів, здатних перетворювати енергію джерел живлення в енергію корисних сигналів, що сприяє підвищенню чутливості мікроелектромеханічних сенсорів, збільшенню рівня їх вихідних сигналів.

По-друге, напівпровідникові активні елементи в своїй роботі використовують різноманітні явища та ефекти (явища дифузії та дрейфу носіїв струму, ударної іонізації, тунельний ефект, ефекти Шоткі та Ганна тощо), що значно розширює функційні можливості побудованих на них сенсорів.

По-третє, напівпровідникові активні елементи порівняно з пасивними мають значно більший набір чутливих до механічних напружень параметрів, які можуть використовуватись для індикації

* Про напівпровідникові прилади, чутливі до тиску, іноді кажуть як про “п’езорезистори”, “п’езодіоди”, “п’езотранзистори”, хоч зміна електричних характеристик цих приладів зв’язана не з п’езоефектом, обумовленим відсутністю в кристалах центра інверсії, а з деформаційними ефектами, обумовленими зміщенням під дією механічних напружень енергетичних рівнів напівпровідників і зв’язаною з ним зміною енергетичного спектра носіїв струму – електронів і дірок.

механічних впливів. До них належать не тільки активний опір, як це зустрічається в п'єзореzis-торах, але і реактивні опори та ємності, струми та напруги прямо та зворотно зміщених р-п-переходів, коефіцієнти передавання струму α і β тощо.

Дослідження показують, що під час визначення характеру деформаційних змін параметрів активних елементів, необхідно виділяти два діапазони впливу: великий, за якого зміщення енергетичних рівнів напівпровідника значно перевищує теплову енергію, тобто

$$\Delta E_i \gg kT, \quad (1)$$

і малий, за якого

$$\Delta E_i \ll kT, \quad (2)$$

де k – стала Больцмана; T – абсолютна температура; i – енергетичний рівень.

У першому випадку основним деформаційним фактором, що відповідає за деформаційну зміну параметрів, є зміна під дією механічних напружень ширини забороненої зони, в другому – деформаційні зміни концентрації, рухливості та часу життя неосновних носіїв струму [3].

Як відомо, основним елементом напівпровідникових активних приладів є р-п-перехід. В тонких р-п-переходах завтовшки $W \leq 1$ мкм, виготовлених з сильно легованих напівпровідників, які найширше використовують для побудови напівпровідникових активних елементів, генерацією та рекомбінацією носіїв струму можна нехтувати. Густина струму через них визначається лише дифузійною складовою. Її можна визначити із виразу

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{u}{kT}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

де J_0 – густина струму насичення, обумовленого дифузією через р-п-перехід неосновних носіїв, яку можна розрахувати за формулою

$$J_0 = e \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right), \quad (4)$$

де e – заряд носіїв струму; U – напруга на р-п-переході; L_n і L_p – дифузійні довжини електронів в р-ділянці і дірок в п-ділянці відповідно; D_n і D_p – коефіцієнти дифузії електронів і дірок відповідно; n_p і p_n – рівноважні концентрації електронів в р-ділянці і дірок в п-ділянці відповідно.

Дослідження показують, що зміщення енергетичних рівнів напівпровідників і пов'язана з цим зміна ширини забороненої зони під дією механічних впливів, приводить насамперед до зміни концентрації неосновних носіїв струму p_n і n_p , а, значить, до зміни густини струму насичення J_0 і пов'язаної з ним густини струму через р-п-перехід J . Концентрація основних носіїв струму n_n і p_p при цьому змінюється слабо, оскільки вона визначається переважно числом іонізованих атомів, які від механічних напружень не залежать.

Якщо деформаційну зміну густини струму виразити відношенням густини деформаційного струму j_σ до густини струму за відсутності деформації j , то можна записати, що:

– для електронного струму

$$\frac{J_\sigma^e}{J^e} = \left(\frac{\mu_{n\sigma}}{\mu_n} \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n\sigma}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{n_{p\sigma}}{n_p}; \quad (5)$$

– для діркового струму

$$\frac{J_\sigma^p}{J^p} = \left(\frac{\mu_{p\sigma}}{\mu_p} \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{p\sigma}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{p_{n\sigma}}{p_n}, \quad (6)$$

де τ_n, τ_p – час життя електронів і дірок за відсутності механічних напружень σ ; μ_n, μ_p – рухливість електронів і дірок за відсутності механічних напружень; $\tau_{n\sigma}, \tau_{p\sigma}$ – час життя електронів і дірок за наявності механічних напружень; $\mu_{n\sigma}, \mu_{p\sigma}$ – рухливість електронів і дірок за наявності механічних напружень.

Якщо прийняти до уваги, що

$$\frac{n_{p\sigma}}{n_p} = \frac{p_{n\sigma}}{p_n} = \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right), \quad (7)$$

то вирази (5) і (6) можна записати у такому вигляді:

$$\frac{J_{\sigma}^e}{J^e} = \left(\frac{\mu_{n\sigma} \tau_n}{\mu_n \tau_{n\sigma}}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right); \quad (8)$$

$$\frac{J_{\sigma}^p}{J^p} = \left(\frac{\mu_{p\sigma} \tau_p}{\mu_p \tau_{p\sigma}}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right). \quad (9)$$

Беручи до уваги, що за значних пружних деформацій, коли $\Delta E_i \gg kT$, зміни рухливості носіїв струму та часу їх життя порівняно із зміною ширини забороненої зони є величинами другого порядку малості [3], приходимо до висновку, що деформаційна зміна густини струму визначається переважно деформаційною зміною ширини забороненої зони ΔE_g . Тому можна записати, що

$$\frac{J_{\sigma}^n}{J^n} \approx \frac{J_{\sigma}^p}{J^p} \approx \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right), \quad (10)$$

де

$$\Delta E_g = E_g - \delta_{Eg} \sigma, \quad (11)$$

δ_{Eg} – деформаційний коефіцієнт ширини забороненої зони різний для різних кристалографічних напрямів; σ – механічні напруження, створені діючою на р-п-перехід пружною силою F.

За малих пружних деформацій $\Delta E_g \approx kT$, експоненціальний множник у формулах (5) і (6) приблизно дорівнює одиниці, і на перший план виходять деформаційні зміни рухливості і часу життя носіїв. В цьому випадку

$$\frac{j_{\sigma}^n}{j^n} \approx \frac{\mu_{n\sigma} \tau_n}{\mu_n \tau_{n\sigma}}; \quad (12)$$

$$\frac{j_{\sigma}^p}{j^p} \approx \frac{\mu_{p\sigma} \tau_p}{\mu_p \tau_{p\sigma}}. \quad (13)$$

Як зазначалося вище, рухливість і час життя носіїв струму слабо залежать від механічних напружень і за наближених оцінок деформаційних змін параметрів напівпровідникових приладів залежностями $\mu(\sigma)$ і $\varepsilon(\sigma)$ можна знехтувати.

Побудовані за формулами (10) і (11) залежності густини діркового струму через пружно деформований кремнієвий р-п-перехід від величини механічних напружень показано на рис. 1. Необхідні для розрахунку деформаційні коефіцієнти брались з [3].

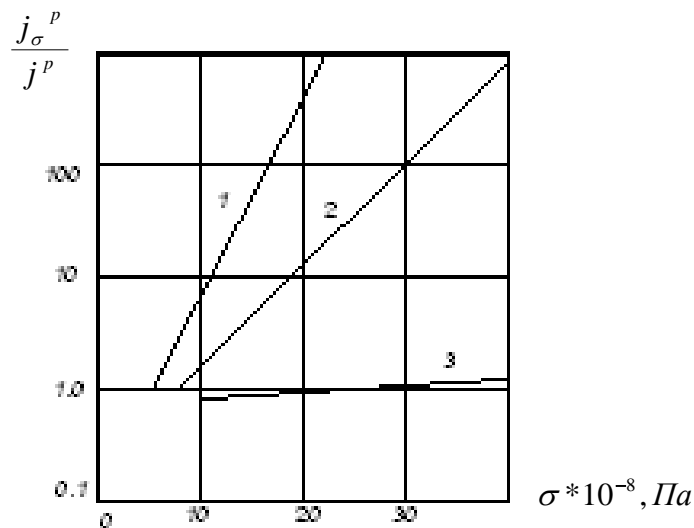


Рис. 1. Залежності відносної зміни густини діркового струму через пружно-деформований зворотно зміщений кремнієвий р-п-перехід від величини механічних напружень: 1 – [111]; 2 – [011]; 3 – [100]

Зрозуміло, що за великих механічних напружень ($\geq 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$), за яких зміщення енергетичних рівнів $\Delta E_i > kT$, зменшення ширини забороненої зони ΔE_g під дією механічних напружень σ призводить до збільшення густини струму через пружно-деформований зворотно зміщений р-п-перехід. Порівняємо величину цих деформаційних змін струму зворотно зміщеного р-п-переходу з деформаційними змінами струму через п'єзореzystор, які визначаються зміною концентрації основних носіїв (рис. 2).

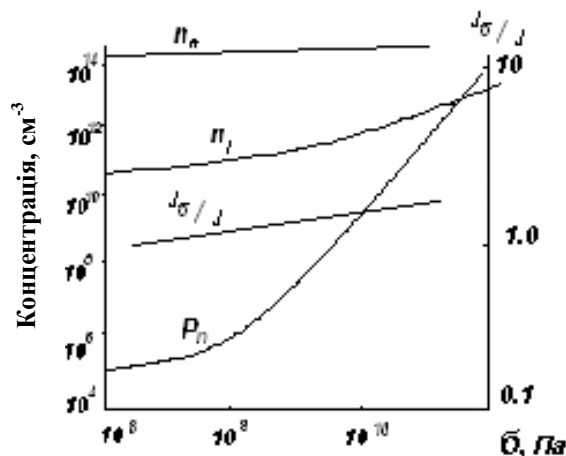


Рис. 2. Залежність концентрації носіїв струму кремнію від величини стискуючих механічних напружень

Для цього скористаємось відомим виразом залежності густини струму від їх концентрації, рухливості та заряду:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{U\gamma}{S} = \frac{U}{S} (en\mu_n + ep\mu_p), \quad (14)$$

де S – площа поперечного перерізу ділянки, якою тече струм; U – напруга; γ – питома провідність; e – заряд носіїв струму.

Зрозуміло, що деформаційні зміни струму зворотно зміщеного р-п-переходу переважають деформаційні зміни струму п'єзореzystорів. Пояснюється це тим, що деформаційні зміни струму

p-резисторів визначаються переважно деформаційними змінами концентрації основних носіїв, які є значно меншими, ніж деформаційні зміни концентрації неосновних носіїв.

Деформаційні зміщення енергетичних рівнів напівпровідників і пов'язані з цим деформаційні зміни концентрації неосновних носіїв струму призводять до деформаційних змін електричних характеристик та параметрів не тільки діодів, але і біполярних транзисторів. Адже біполярний транзистор являє собою конструкцію, яка складається з двох р-п-переходів. В активному режимі один з них зміщений в прямому напрямі, а другий – в зворотному. Прямозміщений емітерний р-п-перехід регулює кількість неосновних носіїв, які інjektуються в базу, а зворотно зміщений колекторний р-п-перехід визначає величину колекторного струму, який залежить від кількості неосновних носіїв, які екстрагувалися з бази в колектор.

При включенні біполярного транзистора за схемою із спільним емітером колекторний струм визначається із виразу

$$I_k = \beta I_\delta + (1 + \beta) I_{ks}, \quad (15)$$

де I_k , I_β , I_{ks} – струм колекторний, базовий, колекторний насичення відповідно; β – коефіцієнт підсилення транзистора в схемі із спільним емітером, який визначається із виразу

$$\beta \approx \frac{I_k}{I_\delta}. \quad (16)$$

Аналіз формули (16) показує, що в тому разі, коли деформаційні зміни колекторного і базового струму будуть однакові, коефіцієнт підсилення β від пружної деформації залежати не буде. Щоб він залежав від пружної деформації, необхідно деформаційні зміни колекторного і базового струмів зробити різними. Цього можна досягти, наприклад, таким розміщенням транзистора на мембрані, за якого на краю мембрани (місце найбільшої концентрації механічних напружень) розміщалася б база біполярного транзистора або його колекторна ділянка.

Із наведених даних зрозуміло, що основні закономірності деформаційних змін характеристик і параметрів біполярних транзисторів ті самі, що і для окремих р-п-переходів. Разом з тим в біполярному транзисторі є значно більше можливостей для перетворення механічної енергії в електричну. Пояснюється це тим, що в останньому випадку в одному приладі можуть бути об'єднані елемент, чутливий до пружної деформації, і підсилювач сигналу.

Це дає змогу зробити висновок про доцільність побудови мікроелектромеханічних сенсорів на активних елементах, які в своїй роботі використовують р-п-переходи.

1. Лобур М. Система наскрізного проектування вбудованих пристроїв // Вісник НУ "Львівська політехніка" "Радіоелектроніка та телекомунікації". – 2003. – № 477. – С. 192–200.
2. Tesluk V., Korbetsky O. Usage of Monte-Carlo Metod for Ion Implantation Simulation. Proceedings of international Conference on Modern Problems of Telecommunications Computer Science and Engineers Training. – Lviv – Slavsko, February 14–19, 2000.
3. Полякова А.Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1979.