

**О. М. ФРОЛОВ**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри автоматизації та електрообладнання  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова  
ORCID: 0000-0003-2186-9488

**С. Р. СЕЛІВЕРСТОВА**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання  
і засобів автоматизації  
Херсонська державна морська академія  
ORCID: 0000-0003-1015-1593

## ВИКОРИСТАННЯ ТОВСТИХ ШАРІВ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКИСЛУ КРЕМНІЮ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВАРИКАПІВ

*Варикапи або діоди зі змінною ємністю є одним з важливих елементів електронної техніки. Вони використовуються в сучасній радіоелектронній апаратурі різноманітного призначення. Наприклад, в апаратурі зв'язку та апаратурі автоматичного керування для налаштування на необхідну частоту. Завдяки необхідності розробки нової апаратури, постійно підвищуються вимоги до параметрів і характеристик електронних компонентів, які використовують в цій апаратурі, у тому числі й до варикапів. Тому виготовлення варикапів з сучасними вимогами до сукупності параметрів і характеристик є актуальною задачею.*

*До параметрів та характеристик варикапів пред'являють різноманітні вимоги: напруга пробою, висока добротність, коефіцієнт перекриття по ємності, величина ємності, рівень зворотного струму, максимальний струм, стійкість до впливу статичної електрики. Отримання сукупності параметрів варикапів з сучасними вимогами до кожного параметру є досить складною задачею. Наприклад, при підвищенні напруги пробою добротність варикапа зменшується.*

*Додатковими вимогами до технології виготовлення варикапів є вимоги до повторюваності параметрів та характеристик і вимоги до собівартості виготовлення. Для зменшення собівартості виготовлення потрібно зменшувати кількість технологічних операцій, в першу чергу кількість операцій фотолітографії. Використання методів само-суміщення технологічних шарів приводить як до зменшення кількості операцій фотолітографії, так й для поліпшення повторюваності параметрів та характеристик виробу.*

*Варикапи виготовляють по різним технологіям в залежності від вимог до основних характеристик (напруга пробою або добротність, або коефіцієнт перекриття по ємності). Кожна конструкція або технологія варикапів має свої переваги та недоліки. Однак досить немає такої технології, яка б дозволяла створювати прилади з найкращою сукупністю усіх параметрів та характеристик при низькій собівартості виготовлення. Метою роботи є створення технологічного процесу виготовлення варикапів, який дозволяє отримувати всі параметри та характеристики виробів з сучасними вимогами до них при мінімальній собівартості виготовлення.*

**Ключові слова:** варикап, технологія, пористий анодний окисел кремнію.

**A. N. FROLOV**

Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,  
Assistant Professor at the Department of Automation  
and Electrical Equipment  
National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov  
ORCID: 0000-0003-2186-9488

**S. R. SELIVERSTOVA**

Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,  
Assistant Professor at the Department of Operation  
of Ship Electrical Equipment and Automation Systems  
Kherson State Maritime Academy  
ORCID: 0000-0003-1015-1593

## USE OF THICK LAYERS OF POROUS ANODIC SILICON OXIDE FOR VARICAP MANUFACTURING TECHNOLOGY

*Varicaps or diodes with variable capacitance are one of the most important elements of electronic technology. They are used in modern electronic equipment for various purposes, for example, in communication equipment and automatic control equipment for tuning to the required frequency. Due to the need to develop new equipment, the requirements for the parameters and characteristics of electronic components that are used in this equipment are constantly increasing, including and up to varicaps. Therefore, the manufacture of varicaps with modern requirements to a set of parameters and characteristics is an urgent task.*

*Various requirements are imposed on the parameters and characteristics of varicaps: breakdown voltage, quality factor, capacitance overlap coefficient, capacitance value and the level of reverse currents. Obtaining a set of varicap parameters with modern requirements for each parameter is a rather difficult task. For example, with an increase in the breakdown voltage, the quality factor varicap decreases.*

*Additional requirements for the manufacturing technology of varicaps are the requirements for the repeatability of parameters and characteristics and the requirements for the cost of production. To reduce the cost of production, it is necessary to reduce the number of technological operations, primarily the number of photolithography operations. And the use of methods of self-alignment of technological layers leads both to a decrease in the number of photolithography operations and to an improvement in the repeatability of the parameters and characteristics of the product.*

*Varicaps are manufactured using various technologies, depending on the requirements for the main characteristics (breakdown voltage or quality factor, or capacitance overlap coefficient). Each design or technology has its advantages and disadvantages. However, there is still no such technology that would allow you to create devices with the best combination of all parameters and characteristics at a low manufacturing cost. The aim of the work is to create technological process for the manufacture of varicaps, which allows you to obtain all the parameters and characteristics of devices with modern requirements for them at a minimum manufacturing cost.*

**Key words:** varicap, technology, porous anode silicon oxide.

### Постановка проблеми

Варикапи – це напівпровідникові діоди, в яких нормується величина ємності при двох або більш напругах зворотного зміщення. Тому їх використовують для заміни конденсаторів зі змінною ємністю в радіоелектронній апаратурі зв'язку, в медичній апаратурі та інших галузях [1]. Завдяки залежності ємності варикапа від напруги зворотного зміщення варикапи широко використовуються в апаратурі автоматичного регулювання та автоматичного налаштування на необхідну частоту. Область використання варикапів визначається за його основним параметрам та характеристикам, таких як напруга пробою, добротність, коефіцієнт перекриття по ємності. До додаткових показників, які також впливають на конкретне застосування варикапів, відносять: величину ємності при заданій напрузі та рівень зворотних струмів. Завдяки необхідності розробки нової апаратури, постійно підвищуються вимоги до параметрів і характеристик електронних компонентів, у тому числі й до варикапів. При цьому необхідно, щоб усі параметри і характеристики приладу, або більшість з них були близькі до теоретично можливих. Тобто, необхідно, щоб сучасний прилад мав сукупність параметрів та характеристик з сучасними вимогами до кожного з них. Для розробки та дослідження параметрів структури варикапів застосовуються мікроконтролери [2].

З точки зору економіки прилад з сукупністю параметрів та характеристик, близькими до теоретично можливих, а також при малої собівартості та високою повторюваністю параметрів і характеристик буде універсальним приладом, якій може замінити декілька типів приладів в різноманітній апаратурі.

Однак, на теперішній час немає варикапів з сукупністю параметрів, близьких до теоретично можливих, при низькій собівартості виготовлення.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для визначення оптимальної конструкції та технології виготовлення варикапів слід розглянути вплив технологій виготовлення на основні параметри та характеристики варикапів, а також вплив технологій виготовлення на їх собівартість та на повторюваність параметрів та характеристик виробів різних партій. Розглянемо переваги та недоліки цих конструкцій.

До основних параметрів та характеристик варикапів відносять наступні [3, 4]:

- $C_n$  – ємність при заданій напрузі зворотного зміщення;
- $K_c$  – коефіцієнт перекриття по ємності, яке є відношенням ємності при двох різних заданих напругах зворотного зміщення;
- $Q$  – добротність при заданій напрузі та заданій частоті;
- $I_{зв.}$  – зворотний струм при заданій напрузі зворотного зміщення;
- $U_{max}$  – максимально припустима зворотна напруга.

Крім цього для сучасних варикапів додатково слід віднести параметри:  $\Delta C_n$  – допустиме відхилення ємності від номінальної ( $C_n$  показує на повторюваність параметрів та характеристик).

1. *Напруга пробою*. Одним з основних параметрів, якій визначає область використання варикапа є напруга пробою, яка визначає величину  $U_{max}$ . З технічної літератури відомо, що напруга пробою р-п переходів визначається по формулам [4]:

– для сферичного р-п переходу:

$$U_{np.cф.} = U_{np.пл.} \cdot \frac{r}{Z_{p-n}} \cdot \left[ \sqrt[3]{3 \cdot \left( \frac{Z_{p-n}}{r} \right)^2 + 1} - 1 \right]; \quad (1)$$

– для циліндричного р-п переходу:

$$U_{np.ц} = U_{np.пл.} \cdot \frac{r}{Z_{p-n}} \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \frac{Z_{p-n}}{r} + 1} - 1 \right); \quad (2)$$

де –  $U_{np.пл.}$  – напруга пробою плоскої частини р-п переходу;

–  $r$  – радіус кривизни р-п переходу;

–  $Z_{p-n}$  – товщина області просторового заряду (ОПЗ) при напрузі  $U_{np.пл.}$ .

В загальному випадку для аналізу впливу конструктивних факторів на напругу пробою можна використати формулу:

$$U_{проб} = K \cdot \frac{r^\alpha}{N^\beta}; \quad (3)$$

де –  $K$  – коефіцієнт пропорційності;

–  $N$  – концентрація домішки на р-п переході;

–  $\alpha$  та  $\beta$  – показники ступеню.

2. *Добротність*. Другим важливим параметром варикапа є добротність ( $Q$ ), яка вказує на частотні властивості варикапа. Добротність повинна бути максимально-припустимою для даної концентрації домішки в епітаксійному шарі.

Добротність визначається по формулі:

$$Q = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot R \cdot C}; \quad (4)$$

де –  $f$  – частота сигналу, на якій вимірюють добротність;

–  $R$  – послідовний опір варикапа;

–  $C$  – ємність варикапа при напрузі, на якій вимірюють добротність.

3. *Коефіцієнт перекриття по ємності*. Ще одним з важливих параметрів та характеристик варикапа є коефіцієнт перекриття по ємності –  $K_c$ . В загальному випадку цей коефіцієнт визначають за формулою:

$$K_c = \frac{C_1}{C_2} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \sqrt{\frac{N_1 \cdot (U_2 + \phi_K)}{N_2 \cdot (U_1 + \phi_K)}}; \quad (5)$$

де –  $C_1$  – ємність варикапа при напрузі  $U_1$ ;

–  $C_2$  – ємність варикапа при напрузі  $U_2$ ;

–  $S_1$  – площа нижньої границі ОПЗ при напрузі  $U_1$ ;

–  $S_2$  – площа нижньої границі ОПЗ при напрузі  $U_2$ ;

–  $N_1$  – концентрація домішки на нижній границі ОПЗ при напрузі  $U_1$ ;

–  $N_2$  – концентрація домішки на нижній границі ОПЗ при напрузі  $U_2$ ;

–  $U_1$  – менша (нижня) напруга при вимірюванні  $K_c$ ;

–  $U_2$  – висока напруга при вимірюванні  $K_c$ ;

–  $\phi_K$  – контактна різниця потенціалів.

4. *Рівень зворотного струму*. Величина зворотного струму приладу є показником втрати енергії при роботі і також є показником якості. Тому, величина зворотного струму повинна бути як можна менше. Величина зворотного струму залежить як від якості виготовлення р-п переходу та захисних шарів на місці виходу р-п переходу на поверхню, так й від виду металу для контакту. Найліпшим захистом р-п переходу до теперішнього часу є шар окислу кремнію, сформований термічним методом, – окисленням пластин при температурах вище 900–1000°C.

5. *Повторюваність параметрів та характеристик.* Ємність ( $C_n$ ) при заданій напрузі зворотного зміщення визначається площею р-n переходу з врахуванням області об'ємного заряду (ОПЗ) та концентрацією домішки в кремнієвій пластині. В залежності від призначення у різних типів варикапів є свої номінальні значення ємності. Однак значну роль грає припустимий розкид ( $\pm \Delta C_n$ ). Розкид по ємності приводить до відхилення від номінальних значень і інших параметрів та характеристик приладу. А це підвищує витрати у споживача на додаткову наладку режимів роботи апаратури.

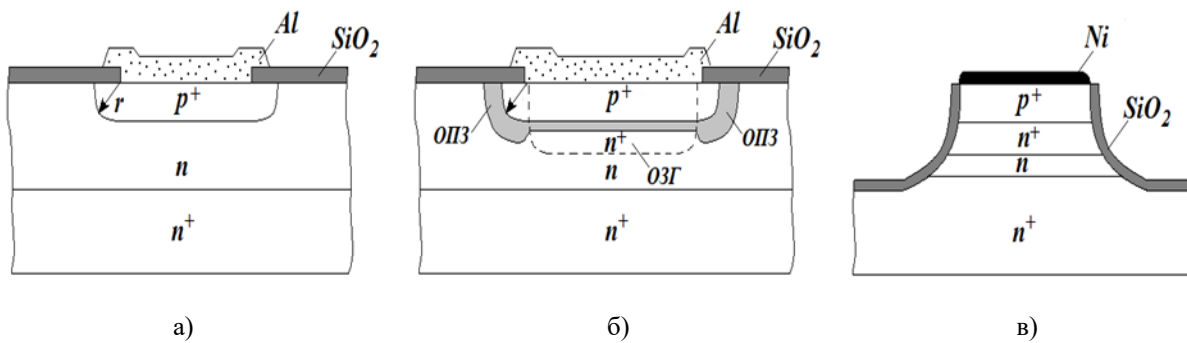
6. *Собівартість виготовлення.* Для отримання різних конструкцій використовують і різні технології. На собівартість технології в першу чергу впливає кількість процесів фотолітографії.

**Формулювання мети дослідження**

Метою роботи є аналіз чинників, що впливають на створення технологічного процесу виготовлення варикапів, який дозволяє отримувати усі параметри та характеристики приладів з сучасними вимогами до них при мінімальній собівартості виготовлення.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Технології виготовлення варикапів пов'язані з їх конструкцією, яка визначається вимогами основного призначення даного виробу. Типові конструкції варикапів наведено на рисунку 1.



**Рис. 1. Конструкції варикапів при різних технологіях виготовлення**

а) варикап, виготовлений за планарною технологією; б) варикап зі зворотним градієнтом – ОЗГ; в) варикап, виготовлений за меза-технологією

Для визначення впливу вибору структури на напругу пробою варикапу. В структурі варикапа, показаній на рисунку 1а радіус кривизни ( $r$ ) невеликий (формула (3)), що приводить до зменшення напруги пробою, а зменшення концентрації приводить до підвищення опору, що знижує добротність. В структурі варикапа рисунок 1б, в області зворотного градієнту (ОЗГ) концентрація вище, ніж в епітаксійному шарі, що знижує напругу пробою в центральній частині р-n переходів, а якщо периферійна частина р-n переходу буде також знаходитися в ОЗГ, тоді напруга пробою буде меншою за рахунок невеликого радіуса кривизни. Тому, периферійну частину р-n переходу виносять за межу ОЗГ. Найбільше значення напруги пробою при однакових концентраціях домішки в епітаксійних шарах має структура варикапа показана на рисунку 1в, яка виготовлена за меза-технологією (меза-структура), тому, що радіус кривизни р-n переходу має значну величину, в ідеальному варіанті  $r \rightarrow \infty$ .

Можна зробити висновок, що для отримання високого значення **напруги** пробою варикап повинен мати меза-структуру, або подібну.

Значення добротності визначається наступними факторами. Структура варикапа, яка показана на рисунку 1а, дозволяє отримувати максимально-можливу величину добротності. Структура варикапа, яка показана на рисунку 1б, не дозволяє отримувати максимально-можливу величину добротності, тому що при максимальній напрузі область просторового заряду (ОПЗ) на периферії р-n переходів має більшу ширину, ніж ОПЗ в області зворотного градієнту. Для отримання заданої напруги пробою за умовою змикання ОПЗ з n+ підкладкою, в периферійних областях треба більшу товщину епітаксійного шару, що дає додатковий опір, а це зменшує добротність.

Структура варикапа, яка показана на рисунку 1в, також дозволяє отримувати максимально-можливу величину добротності, тому що при правильному виготовленні, вона не має додаткового опору.

Тому можна зробити висновок, що для отримання максимально можливої величини **добротності** структура варикапа не повинна мати додаткового опору в будь-якій області. Це дозволяє типова планарна структура (рис. 1а) та меза-структура (рис. 1в).

Коефіцієнт перекриття по ємності розраховується з формули (5) та наступних умов. В структурі варикапа, приведений на рисунку 1а концентрації  $N1=N2$ , тому коефіцієнт перекриття невеликий і визначається в основному відношенням напруги  $U2$  до  $U1$ . Крім цього площа ОПЗ при  $U2$  ( $S2$ ) буде більше площі ОПЗ при  $U1$  ( $S1$ ) за рахунок розподілу ОПЗ не тільки вниз, але й в бік, як показано на рисунку 2. Це додатково зменшує  $K_c$ .

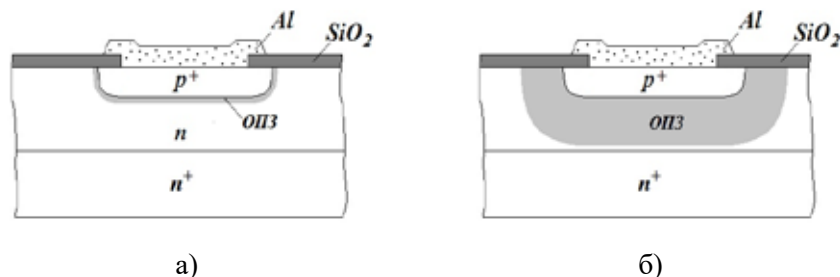


Рис. 2. Зміна ширини та площі ОПЗ при різних значеннях зворотної напруги

а – при малої (низькій) напрузі ( $U_1$ ); б – при високій напрузі ( $U_2$ )

В структурі варикапа, приведеній на рисунку 1б для підвищення коефіцієнту перекриття введена область зворотного градієнту і розподіл домішки при цьому показано на рисунку 3.

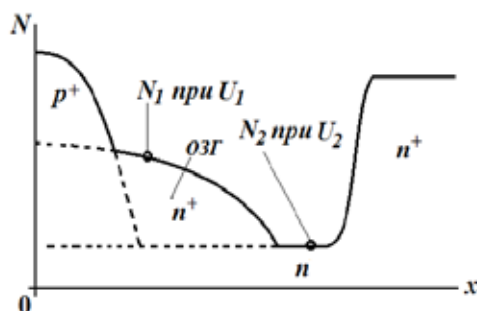


Рис. 3. Розподіл домішки в варикапі з областю зворотного градієнта (ОЗГ)

В області зворотного градієнту (ОЗГ) концентрація ( $N_1$ ) вище, ніж в епітаксійному шарі ( $N_2$ ), що підвищує величину коефіцієнту перекриття. Однак і в цій структурі площа  $S_2$  значно більше площі  $S_1$  за рахунок бічної ширини ОПЗ в області де концентрація домішки менше, ніж в плоскій частині р-п переходу. Це зменшує величину коефіцієнту перекриття по ємності.

Структуру варикапа, приведену на рисунку 1в можна виготовляти як з областю зворотного градієнту, так і без цієї області. Чим більш глибока меза-структура, тим менше різниця між площами  $S_1$  та  $S_2$ . Тому, при глибокій меза-структурі можна отримати величину коефіцієнту перекриття по ємності близьку до максимально можливої.

Таким чином, найбільшу величину *коефіцієнту перекриття по ємності* можна отримати в структурі з ОЗГ, де обмежений розподіл ОПЗ р-п переходу в бічні сторони.

Рівень зворотного струму пропонується обмежувати за рахунок використання оптимального контактного матеріалу. Найліпшим металом контакту є алюміній, якій не дає глибоких рівнів в забороненій зоні кремнію. Такий захист та такий метал використовують в структурах варикапів, приведених на рисунках 1а та 1б. В цих структурах шар алюмінію, товщиною близько 1мкм наносять в вакуумних установках на всю пластину, а потім проводять фотолітографію по алюмінію. Для захисту р-п переходу в меза-структурі (рис. 1в) також використовують термічний окисел кремнію. Металом контакту, як правило, є нікель (Ni), який наносять методом хімічного осадження. Такий метод не потребує фотолітографії, однак нікель дає глибокі рівні в забороненій зоні кремнію [5, 6], а це приводить до появи значної величини зворотних струмів. Використання алюмінію для металізації меза-структури сильно ускладнено, тому що при фотолітографії шар фоторезисту сповзає по шару алюмінію з меза-структури. Така фотолітографія потребує додаткових значних втрат матеріалів та робочого часу, як правило, на порядок вище, ніж фотолітографія по алюмінію на інших структурах.

Можемо резюмувати: для отримання малих значень *зворотних струмів*, р-п переходи на місці виходу на поверхню повинні бути захищені шаром термічного окислу кремнію, а металом контакту повинен бути алюміній.

Повторюваність характеристик при роботі забезпечується з огляду наступних міркувань. В структурі варикапа, приведеній на рисунках 1а та 1б площа р-п переходу визначається розміром вікна при фотолітографії. Площа такого вікна має велику повторюваність на різних кристалах, тому на одній пластині можна отримати усі кристали варикапів з дуже малим розкидом по ємності.

Меза-структура варикапа, яка показана на рисунку 1в виготовляється шляхом травлення кремнію в розчинах сильних кислот. На швидкість травлення впливає значне число різноманітних факторів (температура, атмосферний тиск, концентрація кислот, концентрація атомів домішки) [7, 8]. Тому на різних партіях пластин буде різна глибина травлення, що дає різну площу р-п переходу, як показано на рисунку 4.

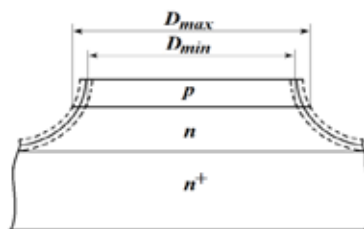


Рис. 4. Розріз меза-структури з різною площею р-п переходу

Наприклад, для приладу KB114, який виготовляється по меза-технології ємність складає величину  $68 \pm 14$  пФ, тобто відхилення від середньої величини складають більш  $\pm 20\%$ .

В результаті, для отримання *малих відхилень параметрів* та характеристик необхідно щоб площа р-п переходу визначалася тільки розміром вікна при фотолітографії.

Для структури варикапа, показаної на рисунку 1а використовують 3 фотолітографії (під р-п перехід, вікна під контакт, по алюмінію). Для структури варикапа, показаної на рисунку 1б використовують також 3 фотолітографії (під ОЗГ, під р-п перехід, по алюмінію).

Щоб не виконувати фотолітографію для вікон під контакт, після дифузії домішки в р-п перехід, інші високо-температурні технологічні операції виконують в неокислювальній атмосфері. Для структури варикапа, показаної на рисунку 1в використовують тільки 1 фотолітографію (під травлення меза-структури). Замість фотолітографії по алюмінію проводять хімічне осадження нікелю. Таким чином, ця технологія має найменші витрати на виробництво.

Тож, для отримання *малої собівартості* кількість операцій фотолітографії повинна бути не більш однієї.

#### Висновки

Аналіз основних технологічних факторів впливу на отримання варикапу з якісними характеристиками при зниженій собівартості показав, що формування технологічних підходів до процесу створення приладу повинні включати наступне:

- для отримання високого значення *напруги* пробною варикап повинен мати меза-структуру, або подібну;
- для отримання максимально можливої величини *добротності* структура варикапа не повинна мати додаткового опору в будь-якій області;
- найбільшу величину *коефіцієнта перекриття по ємності* можна отримати в структурі з ОЗГ, де обмежений розподіл ОПЗ р-п переходу в бічні сторони;
- для отримання малих значень *зворотних струмів*, р-п переходи на місці виходу на поверхню повинні бути захищені шаром термічного окислу кремнію, а металом контакту є алюміній;
- для отримання *малих відхилень параметрів* та характеристик необхідно щоб площа р-п переходу визначалася тільки розміром вікна при фотолітографії;
- для отримання малої собівартості кількість операцій фотолітографії повинна бути не більш однієї.

Перелічені вимоги може забезпечити застосування технології виготовлення варикапів з використанням технологічних шарів пористого анодного окислу кремнію, яку ми розглянемо у подальших роботах.

#### Список використаної літератури

1. Inki Jung, Keekeun Lee. Wireless neural probes based on one-port SAW delay line and neural firing-dependent varicap dsode/ Sensors and Actuators B: Chemical, February, 2015.
2. Ibrahim Turkoglu. Hardware implementation of varicap diode's ANN model using PIC microcontrollers / Sensors and Actuators A:Physical, 26 August 2007.
3. Kasap S., Principles of electronic materials and devices, Third Edition, McGraw-Hill, 2006.
4. Keith Brindley. Varicap diodes (varactor diode). – Newness Electronics engineers. Pocket Book, 1993.
5. S.M. Sze Physics of Semiconductor Devices: 2nd Ed Published by John Wiley and Sons Ltd, 1981. ISBN 10: 047109837X.
6. D. F. Stout and M. Kaufman, McGraw Hill. Handbook of Microcircuit Design and Application, 499 pp.
7. Фролов О.М., Філіпшук О.М., Шевченко В.В., Самойлов М.О., та ін. Спосіб виготовлення діодів зі змінною ємністю. Патент на корисну модель № 120347. МПК (2017.01): НОІЛ 21/100, НОІЛ 21/761. Публ.25.10.2017, бюл. № 20.
8. Фролов А.Н., Самойлов Н.А., Марончук А.И. Виготовлення напівпровідникових діодів з використанням шарів пористого анодного окислу кремнію. // Матеріали та програма науково-технічної конференції. Фізика, електроніка, електротехніка. ФЕЕ::2017. Суми, Сумський державний університет, 2017. С. 201.

**References**

1. Inki Jung, Keekeun Lee. Wireless neural probes based on one-port SAW delay line and neural firing-dependent varicap dsode/ Sensors and Actuators B: Chemical, February, 2015.
2. Ibrahim Turkoglu. Hardware implementation of varicap diode's ANN model using PIC microcontrollers / Sensors and Actuators A:Physical, 26 August 2007.
3. Kasap S., Principles of electronic materials and devices, Third Edition, McGraw-Hill, 2006.
4. Keith Brindley. Varicap diodes (varactor diode). – Newness Electronics engineers. Pocket Book, 1993.
5. S.M. Sze Physics of Semiconductor Devices: 2nd Ed Published by John Wiley and Sons Ltd, 1981, ISBN 10: 047109837X.
6. D. F. Stout and M. Kaufman, McGraw Hill. Handbook of Microcircuit Design and Application, 499 pp.
7. Frolov O.M., Filipchuk O.M., Schevchenko V.V. i dr. Patent na korisnu model № 120347. Sposib вигotovlennya diodiv zi zminnoyu emnistyu. МПК (2017.01) HOIL 21/00, HOIL 21/761(2006.01), Publ.26.10.2017. Bull. № 20.
8. Frolov A.N., Samoiylov N.A., Maronchuk A.I. Izgotovlenie poluprovodnikovih diodov s primeneniem sloev poristogo anodnogo okisla kremnia.// Materiali ta programa nauko-technichnoi konferencii. Phisica, electronica, electrotechnica. FEE::2017. Sumi, *Sumskiy derzhavnyy universitet*, 2017. P. 201.