

В. М. ЛИТВИНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гідротехнічного будівництва,
водної та електричної інженерії
Херсонський державний аграрно-економічний університет
ORCID: 0000-0002-9425-5551

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАРИКАПА

Варикап – це напівпровідниковий діод, дія якого заснована на використанні залежності ємності від зворотної напруги і який призначений для застосування як елемент із електрично керованою ємністю. Як керована ємність використовується бар'єрна (зарядова) ємність p - n переходу. Дифузійна ємність не підходить для цієї цілі, так як вона проявляється при прямому зміщенні p - n переходу, коли рівень прямого струму через діод великий, отже для керування величиною дифузійної ємності необхідно витратити значну потужність джерела живлення. В той же час на зміну величини бар'єрної ємності при зворотному включенні варикапу витрачається зовсім незначна потужність джерела живлення.

У виробництві варикапів кожен тип приладу має кілька груп, що відрізняються за добротністю – низько-добротні і високодобротні. Потреби варикапів в тій чи іншій групі залежить від замовлень споживачів, які можуть змінюватися непередбачено. Добротність варикапа, як і любого конденсатора, визначається відношенням реактивного опору варикапа на заданій частоті змінного сигналу до повного активного опору варикапа (опору втрат). Показано, що опір структури варикапа залежить від великої кількості чинників, багато з яких не пов'язані з вимірюванням питомого опору та товщини вихідної епітаксильної плівки. Тому некоректно було б при прогнозуванні величини добротності варикапа орієнтуватися тільки на значення цих двох параметрів. Виходячи з цього, виникає необхідність проведення досліджень, спрямованих на знаходження залежності величини добротності варикапа від значень деяких його електричних параметрів, а саме, від величини пробивної напруги та коефіцієнта перекриття за ємністю. Це дозволяє проводити прогнозування величини добротності варикапів на ранніх стадіях їх виготовлення.

У статті наведені результати дослідження взаємозалежності електричних параметрів варикапа. Досліджено залежність величини добротності варикапа від його напруги пробою та коефіцієнта перекриття за ємністю. Наведено експериментальні графіки отриманих залежностей. Розроблено методіку прогнозування величини добротності варикапу за значеннями його електричних параметрів.

Ключові слова: варикап, добротність, напруга пробою, коефіцієнт перекриття за ємністю, питомий опір, епітаксильна плівка.

V. M. LYTVYENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Hydraulic Construction,
Water and Electrical Engineering
Kherson State Agrarian and Economic University
ORCID: 0000-0002-9425-5551

STUDY OF INTERDEPENDENCE OF ELECTRICAL PARAMETERS OF VARICAP

A varicap is a semiconductor diode whose operation is based on the use of the dependence of the capacitance on the reverse voltage and which is intended for use as an element with an electrically controlled capacitance. The barrier (charge) capacity of the p – n junction is used as the controlled capacity. Diffusion capacitance is not suitable for this purpose, as it manifests itself in the direct bias of the p - n junction, when the level of direct current through the diode is large, therefore, to control the value of diffusion capacitance, it is necessary to spend significant power of the power source. At the same time, changing the value of the barrier capacity when the varicap is turned on in reverse consumes very little power from the power source.

In the production of varicaps, each type of device has several groups that differ in quality – low-quality and high-quality. The needs of varicaps in one or another group depends on the orders of consumers, which can change unpredictably. The quality of the varicap, like any capacitor, is determined by the ratio of the reactive resistance of the varicap at a given frequency of the alternating signal to the total active resistance of the varicap (loss resistance). It is shown that the resistance of the varicap structure depends on a large number of factors, many of which are not related to the measurement of the resistivity and thickness of the original epitaxial film. Therefore, it would be incorrect to focus only on the value of these two parameters when predicting the Q factor of the varicap. Based on this, there is a need to conduct

research aimed at finding the dependence of the Q factor of the varicap on the values of some of its electrical parameters, namely, on the breakdown voltage and the capacitance overlap coefficient. This makes it possible to predict the Q factor of varicaps in the early stages of their production.

The article presents the results of the study of the interdependence of the electrical parameters of the varicap. The dependence of the Q factor of the varicap on its breakdown voltage and the coefficient of overlap by capacity was investigated. Experimental graphs of the obtained dependencies are given. A methodology for predicting the Q factor of the varicap based on the values of its electrical parameters has been developed.

Key words: varicap, Q factor, breakdown voltage, capacitance overlap factor, resistivity, epitaxial film.

Постановка проблеми

Варикапи широко використовують у радіоелектроніці як змінну ємність, величина якої керується напругою [1–3]. Залежність добротності варикапа від його фізичних властивостей виражається формулою [3]:

$$Q = \frac{1}{2\pi f C_{\text{ном}} R_{\text{носл}}}, \quad (1)$$

де $C_{\text{ном}}$ – номінальна ємність варикапу; $f = 50$ МГц – частота змінної напруги, яка прикладається до варикапу при вимірі добротності одночасно зі зворотним постійним зміщенням; $R_{\text{носл}}$ – опір структури варикапа, який приблизно дорівнює опору бази варикапа (опором контактів робочої та зворотної сторін кристала нехтуємо, так як вони малі);

$$R_{\text{носл}} \approx R_{\sigma} = \frac{\rho_{\text{еп}} W_{\sigma}}{S_{p-n}}, \quad (2)$$

де S_{p-n} – площа р-п переходу варикапа; $\rho_{\text{еп}}$ – питомий опір епітаксимальної плівки; W_{σ} – товщина бази варикапа:

$$W_{\sigma} = d_{\text{еп}} - X_j - d_1 - W_1, \quad (3)$$

де $d_{\text{еп}}$ – товщина епітаксимальної плівки; X_j – глибина залягання р-п переходу; d_1 – розширення ОПЗ р-п переходу при постійній зворотній напрузі, яка прикладається до варикапу при вимірі добротності; W_1 – зсув підкладки в епітаксимальну плівку в процесі всіх високотемпературних операцій (ступінь «розмиття» межі розділу підкладка – епітаксимальна плівка).

На рис. 1 приведена структура досліджуваного варикапа.

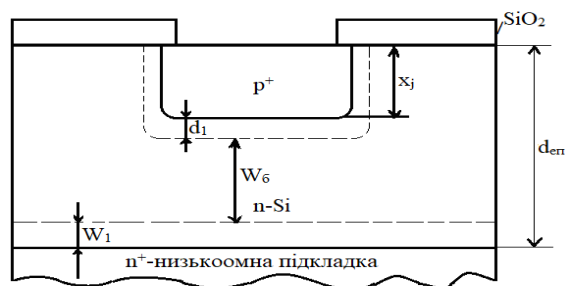


Рис. 1. Структура варикапа

Традиційно прогнозування добротності варикапів проводять за величиною питомого опору та товщиною шару епітаксимальної плівки. Але як показує практика виробництва варикапів, вихідні параметри епітаксимальної плівки (товщина та питомий опір) можуть неконтрольовано змінюватися від однієї партії пластин до іншої, тобто не мають фіксованих значень. Це призводить до значного розкиду величини добротності варикапів та зменшення виходу придатних приладів.

З формул (1–3) видно, що опір структури варикапа залежить від великої кількості чинників. Багато з цих факторів не пов'язані з вимірюванням питомого опору та товщини вихідної епітаксимальної плівки, тому орієнтуватися при прогнозуванні величини добротності варикапа тільки на значення цих двох параметрів було б некоректно. До того ж при вимірюванні величин товщини та питомого опору епітаксимальної плівки завжди має місце похибка виміру. Виходячи з цього, виникає необхідність проведення досліджень, спрямованих на знаходження залежності величини добротності варикапа від значень деяких його електричних параметрів, а саме від величини пробивної напруги та коефіцієнта перекриття за ємністю. Це дозволить проводити прогнозування величини добротності варикапів на ранніх стадіях їх виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Інтенсивний розвиток мікроелектроніки, чітка тенденція до мініатюризації робочих елементів, створення новітніх перспективних, конструктивно складних приладів, а також необхідність наявності високоефективного промислового виробництва сучасних напівпровідникових приладів і інтегральних схем продовжують залишати актуальними питання підвищення якості вихідних напівпровідникових матеріалів, а також проблеми в забезпеченні високої точності та єдності вимірювань параметрів вихідних напівпровідникових кристалів та мікроструктур [4]. У виробництві кремнієвих варикапів такими параметрами являються товщина та питомий опір вихідних епітаксіальних структур. Похибки вимірювань параметрів вихідних структур приводять до погіршення параметрів варикапів і зниження процента виходу придатних приладів.

В роботі [5] запропоновано використовувати метод власного випромінювання для аналізу якості складних напівпровідникових структур (мікропроцесорів, мікроконтролерів, програмовано-логічних інтегральних схемах та ін.). Метод власного випромінювання пов'язаний з реєстрацією параметрів електромагнітного поля в інфрачервоному діапазоні хвиль. Параметри цього випромінювання безпосередньо залежать від температури об'єкту контролю – температури напівпровідникової структури. Використання температури в якості діагностичного параметру вимагає аналітичного опису процесів в напівпровідникових структурах, а саме фізико-хімічних процесів пов'язаних з термодинамічними властивостями кристалічної структури та поверхні, яка ізолює кристал від зовнішнього середовища. В роботі визначено час реєстрації (довжину активуючого впливу) діагностичного параметру окремих функціональних вузлів. Проаналізовано умови розповсюдження тепла в ізолюючому шарі напівпровідникової структури, яка містить в собі декілька окремих функціональних вузлів з відомим геометричним місцем розташування на підкладці.

Виготовлено кремнієві p-i-n фотодіоди з різною концентрацією фосфору в n⁺-шарі [6]. Отримано експериментальну криву розподілу домішки фосфору по глибині дифузійного шару. Досліджено вплив концентрації носіїв заряду в цьому шарі на темнові струми чутливих елементів і захисного кільця. З цією метою проведено вимірювання вольт-амперних характеристик фотодіодів. Показано, що при зменшенні поверхневого опору n⁺-шару темнові струми зменшуються, але зразки з поверхневим опором 1,9–2,4 Ом/□ мають приблизно однаковий рівень темнових струмів чутливих ділянок, тобто при подальшому збільшенні концентрації носіїв заряду темнові струми, практично, не змінюються. Що стосується темнових струмів захисних кілець фотодіодів, то виявилось, що вони здебільшого залежать від стану периферії кристала, а не від рівня легування. Також не виявлено впливу поверхневого опору n⁺-шару на опір з'єднання між відповідними ділянками та захисним кільцем і на ємність фотодіодів.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є дослідження взаємозалежності електричних параметрів варикапа та знаходження зв'язку між окремими електричними параметрами варикапа та його добротністю з метою встановлення раннього прогнозу величини добротності.

Виклад основного матеріалу дослідження

Експериментальні зразки. В якості вихідного матеріалу для виготовлення варикапу використовувалися кремнієві епітаксіальні плівки з питомим опором 1,5 Ом·см і товщиною 10 мкм. Структури варикапів були виготовлені за планарно – епітаксіальною технологією [3]. Технологічний процес їх виготовлення включав три високотемпературні операції: окислення при температурі 1050°C в середовищі водяної пари протягом 90 хв, першу стадію дифузії бору (загонку) з джерела В₂О₃ при температурі 1100°C тривалістю 25 хв, другу стадію дифузії бору (розгонку) при температурі 1150°C на протязі 80 хв по циклу: сухий О₂ (10 хв) – вологий О₂ (60 хв) – сухий О₂ (10 хв).

Дослідження залежності добротності варикапа від величини його напруги пробою. Вважатимемо, що p-n перехід у нас плоский. Пробивна напруга плоского різкого p⁺-n переходу визначається за формулою [7]:

$$U_{np} = 96(\rho_{en})^{0,78} \quad (4)$$

Як видно з формули (4), пробивна напруга варикапа залежить від величини питомого опору епітаксіального шару. При збільшенні зворотної напруги, що прикладається до варикапу, розширення області просторового заряду (ОПЗ) p⁺-n переходу d₁ зміщуватиметься у бік підкладки, зменшуючи товщину бази варикапа W_б (рис. 1).

При відповідній величині зворотної напруги варикапа область просторового заряду d₁, розширюючись, з'єднається з областю «розмиття» межі розділу підкладка – епітаксіальна плівка, яка утворюється в результаті дифузії легуючої домішки з низькоомної підкладки в епітаксіальну плівку в процесі всіх високотемпературних операцій. Тому чим менша товщина епітаксіальної плівки, тим при меншій зворотній напрузі область просторового заряду d₁ з'єднається з областю «розмиття», де питомий опір плівки менше питомого опору бази варикапа. При цьому відповідно до формули (4) напруга пробою варикапу зменшиться. Оскільки добротність варикапа обернено пропорційно залежить від величини питомого опору і товщини епітаксіальної плівки, то очевидно, що зі збільшенням «розмиття» межі розділу підкладка – епітаксіальна плівка і зменшенням товщини бази величина добротності варикапа буде збільшуватися.

Дослідження залежності добротності варикапа від величини його напруги пробою, проведене на 205 пластинах, показало очевидну залежність значень добротності варикапа від напруги пробою ($U_{пр}$). При цьому низькі значення добротності відповідали високим значенням $U_{пр}$ і навпаки. На рис. 2 наведена експериментальна залежність Q від $U_{пр}$.

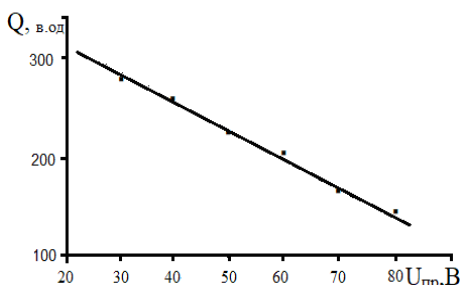


Рис. 2. Залежність добротності варикапа від його напруги пробою

З рис. 2 видно, що зі зменшенням величини напруги пробою добротність варикапа зростає і навпаки – добротність варикапа зменшується зі збільшенням напруги пробою.

Дослідження залежності величини добротності варикапа від коефіцієнта перекриття за ємністю. Величина добротності варикапа визначається переважно опором бази варикапа, яка в свою чергу, залежить від товщини епітаксильної плівки та її питомого опору (див. формули (1–3)). Як зазначалося вище, при вимірі товщини та питомого опору епітаксильної плівки має місце похибка вимірювання, тому було поставлено завдання встановити залежність добротності варикапа від інших електричних параметрів.

Зручним параметром реалізації цієї мети, як показала практика, є коефіцієнт перекриття за ємністю. Коефіцієнт перекриття за ємністю K_c можна розрахувати за формулою [3]:

$$K_c = C_{max}/C_{min} , \tag{5}$$

де C_{min} – ємність варикапа при максимальному значенні зворотної напруги, що прикладається до приладу; C_{max} – ємність варикапа при мінімальному значенні зворотної напруги, що прикладається до приладу.

Ємність варикапу розраховується за формулою [3]:

$$C_{ном} = S_{p-n} \sqrt{\frac{e\epsilon\epsilon_0 N_{en}}{2(\phi_k + U_{зв})}} , \tag{6}$$

де ϕ_k – контактна різниця потенціалів між p – і n – областями;

$U_{зв}$ – напруга зворотного зміщення; N_{en} – концентрація легуючої домішки в базі варикапу; ϵ_0, ϵ – діелектрична проникність, відповідно вакууму і кремнію.

Проаналізувавши формули (1–3), можна зробити висновок, що на розкид величини добротності варикапа можуть впливати флюктуації товщини епітаксильного шару і ступінь «розмиття» межі розділу підкладки – епітаксильна плівка за рахунок дифузії легуючої домішки з низькоомної підкладки в епітаксильну плівку. «Розмиття» межі розділу підкладки – епітаксильна плівка в процесі проведення високотемпературних технологічних операцій може реально змінити значення величини питомого опору епітаксильної плівки порівняно зі значенням питомого опору, отриманого при вимірюванні фізичних параметрів вихідних епітаксильних плівок. Отже, прогноз величини добротності варикапа з урахуванням вимірюваних значень ρ_{en} і d_{en} може бути помилковим.

Дослідження залежності добротності варикапа від величини коефіцієнта перекриття за ємністю було проведено на 230 пластинах.

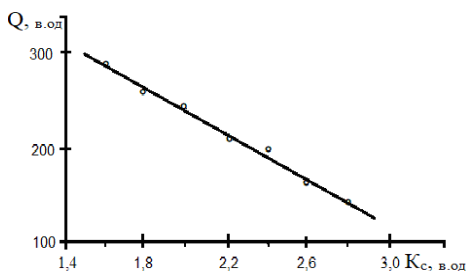


Рис. 3. Залежність добротності варикапа від величини коефіцієнта перекриття за ємністю

Проведені дослідження підтвердили припущення щодо залежності значень добротності варикапа від значень коефіцієнта перекриття за ємністю. Причому C_{\min} , яка визначає величину K_c відповідно до формули (6), залежить від концентрації домішки в базі варикапа як і добротність варикапа (див. формули (1, 2, 6)).

На рис. 3 наведена експериментальна залежність добротності варикапа від величини коефіцієнта перекриття за ємністю. Як видно із рис. 3, із зменшенням величини K_c добротність варикапу зростає, а при збільшенні – навпаки зменшується.

Висновки

Розроблено методику прогнозування величини добротності варикапу за значеннями його електричних параметрів. Розроблені графіки залежності величини добротності варикапа від величини його напруги пробою та коефіцієнта перекриття за ємністю можуть бути використані у виробництві варикапів для діагностики величини його добротності на ранніх стадіях виготовлення приладу. Це дозволить оптимальніше виконувати замовлення споживачів продукції.

Список використаної літератури

1. Литвиненко В.М., Шутов С.В. Поліпшення зворотних характеристик кремнієвого варикапа за допомогою низькотемпературного гетерування // Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 2023. № 1–2. С. 43–49. <https://doi.org/10.15222/ tkea 2023.1-2.43>.
2. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка. Підручник. – Мелітополь: Видавничо– поліграфічний центр «Люкс», 2019. 223 с.
3. Литвиненко В.М. Фізика та технологія напівпровідникових діодів. Монографія. Херсон : ФОП Вишемирський В.С, 2018. 184 с.
4. Ігнаткін В. У., Томашевський О. В., Матюшин В. М. Основи метрології. Навчальний посібник. Запоріжжя : Запорізький національний технічний університет, 2017. 119 с.
5. Кузавков В.В., Романенко М.М. Аналіз фізичних можливостей теплового моніторингу як методу оцінки фактичного стану цифрових радіоелектронних об'єктів. Науково-практичний журнал ДНДІ МВС України: Сучасна спеціальна техніка. Київ, 2020. № 2 (61). С. 34–46.
6. Kukurudziak M.S. Influence of Surface Resistance of Silicon p-i-n Photodiodes n⁺-Layer on their Electrical Parameters // Phys. Chem. Solid State, 2022. V. 23. № 4. P. 756–763.
7. Радевич Я. І., Андрушак Г. О. Твердотільна електроніка. Навчальний посібник. Чернівці : Чернівецький національний університет, 2013. 323 с.

References

1. Lytvynenko V.M., Shutov S.V. (2023) Improvement of the reverse characteristics of a silicon varicap using low-temperature heterization // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature, no. 1–2, pp. 43 – 49. <https://doi.org/10.15222/ tkea 2023.1-2.43> [in Ukrainian].
2. Kvitka S.O. (2019) Elektronika ta mikroskhemotekhnika [Electronics and microcircuit engineering]. Textbook. – Melitopol: Publishing and printing center "Lux", 223 p. [in Ukrainian].
3. Lytvynenko V.M. (2018) Fyzyka ta tekhnolohiya napivprovodnykovykh diodiv [Physics and Technology of Semiconductor Diodes]. Monograph. Kherson: V.S. Vyshemyrskyi Publishing House. 184 p. [in Ukrainian].
4. Ignatkin V. U., Tomashevsky O. V., Matyushin V. M. (2017) Osnovy metrolohii [Fundamentals of metrology]. Tutorial. Zaporozhye: Zaporizhzhya National Technical University, 119 p. [in Ukrainian].
5. Kuzavkov V.V., Romanenko M.M. (2020) Analysis of the physical capabilities of thermal monitoring as a method of assessing the actual state of digital electronic objects. Scientific and practical journal of the Research Institute of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine: Modern special equipment. Kyiv, no 2 (61), pp. 34–46 [in Ukrainian].
6. Kukurudziak M.S. (2022) Influence of Surface Resistance of Silicon p-i-n Photodiodes n⁺-Layer on their Electrical Parameters // Phys. Chem. Solid State, V. 23, no 4, pp. 756–763.
7. Radevich Ya. I., Andrushchak G. O. (2013) Tverdotilna elektronika [Solid-state electronics]. Tutorial. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 323 p. [in Ukrainian].