

С. М. Кісельов, канд. техн. наук

Запорізька державна інженерна академія

м. Запоріжжя, Україна

e-mail: enmv@rambler.ru

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНОГО ДІОДА ШОТТКИ

Ключові слова: діод Шоттки, струм, керування, напруга, затвор, концентрація електронів.

Анотація. Засобами системи TCAD Studio розглянуто статичні і динамічні характеристики двовимірної скінченноелементної моделі комбінованого діода Шоттки. Показано, що ефективність керування діодом залежить від величини напруги на додатковому електроді — затворі. Встановлено, що ступінь регулювання додаткової ємності, згідно з моделлю, має значення близько 22 %.

Вступ

Діоди Шоттки (ДШ) є загально розповсюдженими приладовими структурами на основі контакту «метал – напівпровідник». У сучасній перетворюваній техніці ДШ використовуються у якості випрямляючі прилади. Вони мають менше падіння прямої напруги і підвищену швидкодію порівняно з діодами на основі $p-n$ переходу. З метою поліпшення параметрів ДШ були розроблені більш досконалі структури [1 – 6], до яких належить комбінований ДШ (КДШ) [7], що поєднує контакт «метал – напівпровідник» і «метал – діелектрик – напівпровідник» компонента (рис. 1). Ці КДШ, як показано у [8], потенційно мають розширені функціональні можливості і можуть бути основою для створення адаптивних сенсорів.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У [1 – 6] були запропоновані ДШ з вертикальною конструкцією, поліпшення характеристик яких досягалося за рахунок використання канавкових МОН-структур (Trench MOS). Таким чином, електричне поєднання затворів МОН-структур з анодами інтегрованих ДШ призводило до підвищення зворотної пробійної напруги і швидкості перемикавання. Разом з тим, у [1 – 6] основна увага приділялась дослідженням впливу додаткового затвора на випрямляючі властивості ДШ у припущенні однакових значень електричного потенціалу на затворі і аноді.

Також було розроблено структуру КДШ [7] з електрично розділеними електродами, де за рахунок незалежної зміни потенціалу затвора здійснювалося керування властивостями контакту «метал – напівпровідник». Попередній аналіз КДШ [7] показав, що за допомогою зміни потенціалу на затворі можливо змінювати умови переносу носіїв заряду через бар'єр Шоттки і виконувати регулювання ємності, опору і часу перемикавання діода.

Подальші пов'язані з цим дослідження вимагають виготовлення і діагностики КДШ, що можливі тільки з використанням найбільш досконалих сучасних технологічних і аналітичних методів, а також інформаційних технологій [9]. Тому експериментальні дослідження КДШ є складним, трудомістким і витратним завданням. Альтернативою цьому може бути використання методів математичного моделювання, які базуються на

двовимірних чисельних методах розрахунку транспорту носіїв і динамічних характеристик приладів [10]. Таким чином, для уявлення, як впливає додатковий затвор на процеси переносу заряду, необхідно провести дослідження розподілу потенціалу, носіїв заряду і динамічних параметрів КДШ.

Синтез сіткової моделі комбінованого діоду Шоттки

У разі відсутності моделей складних об'єктів для опису поведінки цих об'єктів широко використовується метод аналізу скінченних елементів. Існує декілька фірм, які займаються розробкою програм і моделей окремих фізичних властивостей, що дозволяють проводити моделювання поведінки об'єктів методом кінцевих елементів. З існуючих систем програмного забезпечення до проведення фізико-топологічних моделювання КДШ було обрано систему TCAD Studio [11].

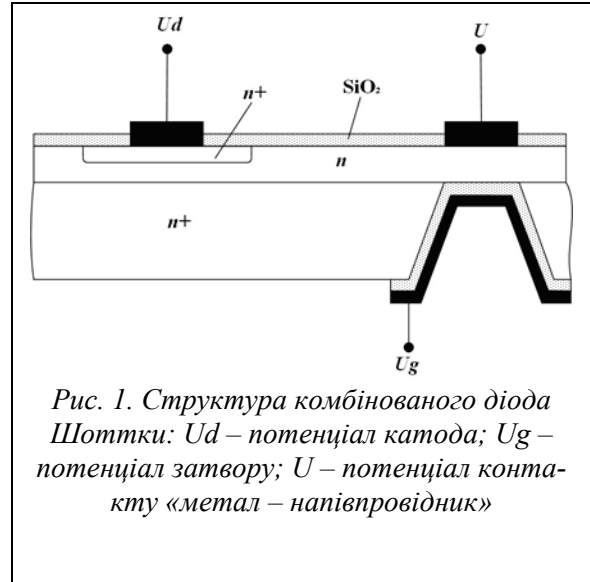


Рис. 1. Структура комбінованого діода Шоттки: U_d – потенціал катода; U_g – потенціал затвору; U – потенціал контакту «метал – напівпровідник»

Двовимірний модель КДШ у TCAD Studio, згідно з рис. 1, містить контакт з бар'єром Шоттки і омичний контакт, сформований до напівпровідника n – типу, на якому також виконано затвор, ізольований від діода шаром діелектрика. Розміри КДШ становлять $10 \times 15 \text{ мкм}$ із довжинами областей n^+ і n – 10 мкм і 5 мкм відповідно. Для контакту Шоттки робота виходу з металу – $5,2 \text{ eV}$. Товщина слою оксиду, що ізолює затвор від активної області встановлена $0,1 \text{ мкм}$.

На рис.2. представлено двовимірну модель комбінованого діода Шоттки, зокрема на рис. 2, а наведено область розв'язання рівняння Пуассона і пов'язаних з ним рівнянь, що мають еліптичний вигляд з експоненціальною нелінійністю та розв'язуються в прямокутній області напівпровідника. У оксиді затвора необхідно розв'язати тільки рівняння Лапласа, оскільки там немає просторового заряду. Відповідна розроблена модель характеризується розмірністю 572 вузли і 1054 елементи. Концентрації легуючих домішок встановлювались на рівнях 10^{19} см^{-3} для n^+ - області та 10^{15} см^{-3} для n області (рис. 2, б).

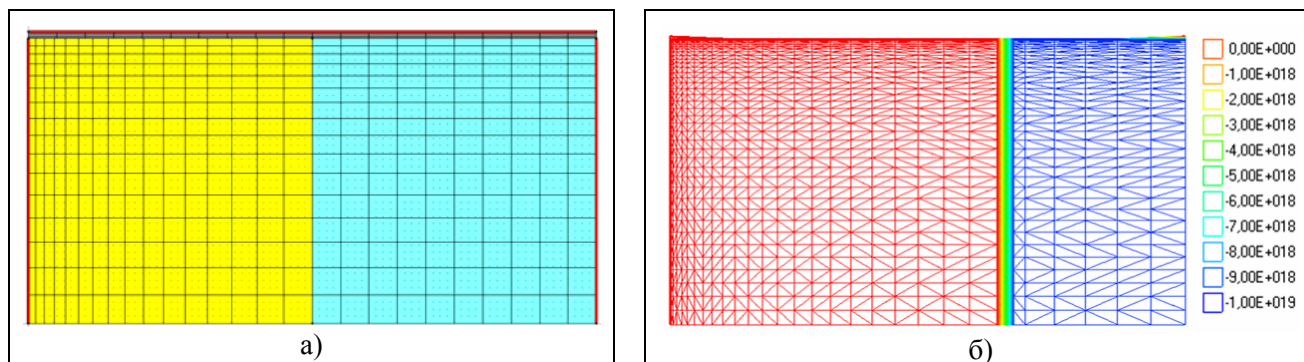


Рис. 2. Двовимірний модель комбінованого діода Шоттки: а) – досліджувана область і прямокутна сітка в моделі діода Шоттки; б) – розподіл концентрації легуючих домішок

У критичних областях з великими помилками дискретизації крок сітки завдано низьким, тоді як в областях з невеликими помилками його було збільшено.

Результати фізико-топологічного моделювання діода Шоттки

Результати фізико-топологічного моделювання КДШ наведені на рис. 3 у вигляді розподілу електростатичного потенціалу. Аналіз рис. 3 показує, що при прямому зміщенні діода і напрузі на

затворі 2В потенціал різко змінюється на границі областей просторового заряду контакту Шоттки і границі $n - n^+$ областей у об'ємі.

Разом з тим у приповерхневій області стрибки потенціалу мають значно більше значення. Але градієнт змін зменшується при збільшенні величини прямого зміщення і при напрузі на аноді понад 2В відбувається зміна типу провідності приповерхневого шару у області контакту Шоттки, а діод перестає мати випрямляючу властивість. Це обмежує робочі режими структури. При цьому розподіл струму і концентрації електронів відповідає даним, наведеним на рис. 4.

Аналіз рис. 4 показує, що при зміні величини затворної напруги у робочому діапазоні змінюються струм і послідовний опір діода. Керування струмом при цьому відбувається за рахунок розширення збідненого шару затвора аж до границі бар'єра Шоттки, що призводить до проколу n – шару, збільшенню товщини шару об'ємного заряду бар'єра Шоттки, зменшенню напруги поля у бар'єрі і підвищенню послідовного опору. У результаті зростає висота бар'єра за рахунок зниження сил дзеркального відображення [7].

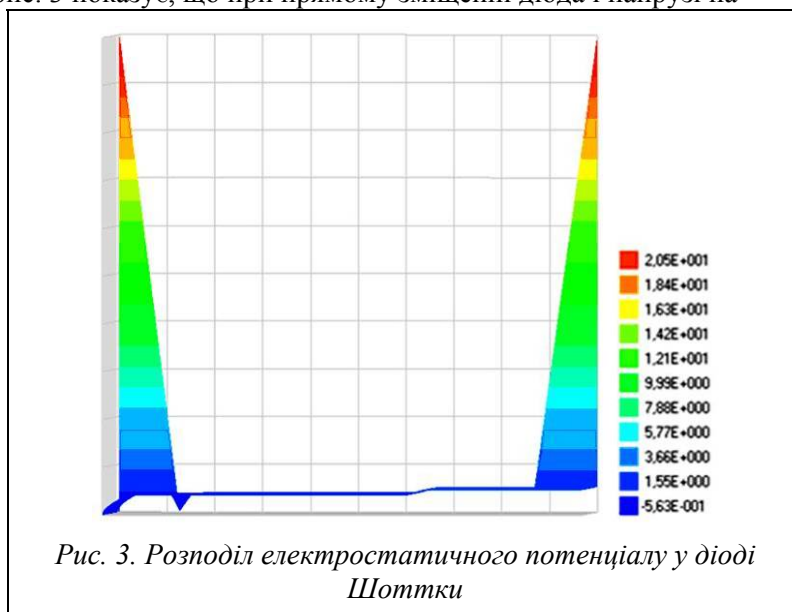


Рис. 3. Розподіл електростатичного потенціалу у діоді Шоттки

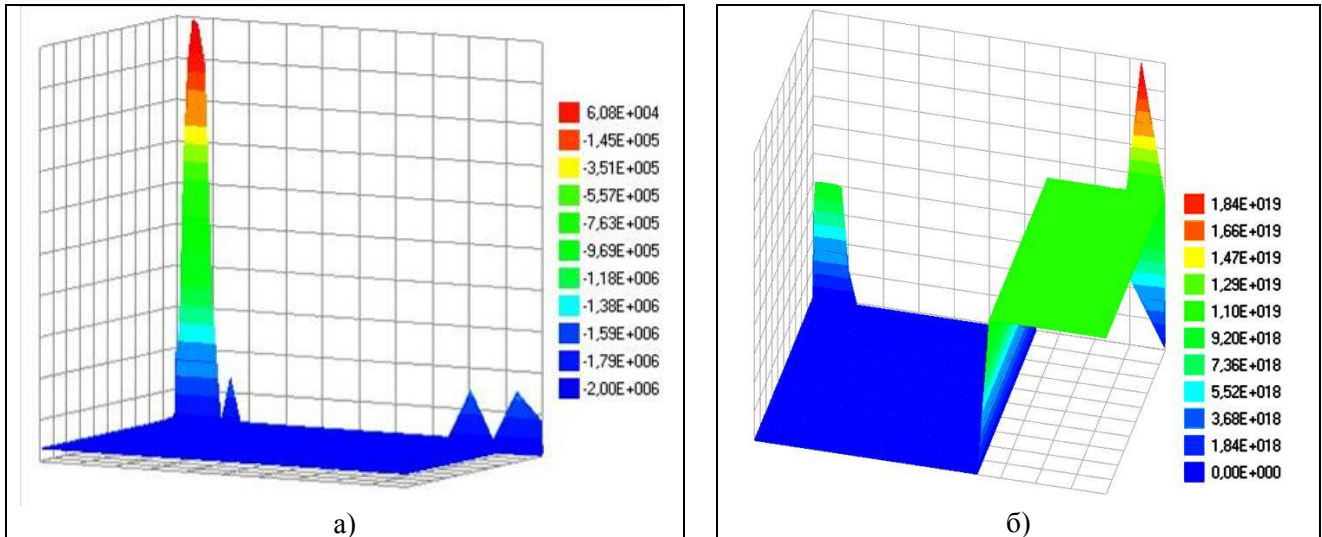


Рис. 4. Структура діода шоттки: а) – розподіл струму; б) – концентрація електронів

Таким чином, при зміні напруги на затворі від нуля до 2В потенціал змінюється від 0,54В до 1,5В і ефективність керування залежить від величини напруги на польовому електроді.

З результатів моделювання зворотних гілок ВАХ КДШ при напрузі на затворі від -14 до 4В впливає, що при зростанні негативної напруги на затворі зворотній струм зменшується при зростанні величини зсуву на одиниці A^{-14} . Протилежним чином відбувається зміна струму при позитивних затворних напругах – він зростає, але не настільки стрімко, як при негативних напругах. Разом з тим, можливо відмітити, що збільшення позитивної напруги на затворі призводить до зменшення напруги пробією діода. Так, при напрузі на затворі 4В пробій відбувається при напрузі на аноді 5,9В.

Дослідження впливу напруги на затворі виконувалося при фіксованій напрузі на аноді, що дорівнювала -2В. При цьому встановлено, що на пряму гілку ВАХ діода напруга на затворі практично не впливає при зміні у діапазоні 0 – 20В.

При прямих зміщеннях діода незначний вплив напруги на затворі відбувається тільки на лінійних ділянках ВАХ. За умов, що наближуються до проколу бази, може відбуватися аномальна зміна провідності нейтральної бази та послідовного опору. Це викликано інжекцією дірок, що призводить до утворення додаткового заряду електронів, які повинні увійти до нейтральної бази для компенсації заряду дірок.

Результати досліджень динамічних характеристик КДШ наведено на рис. 5, 6.

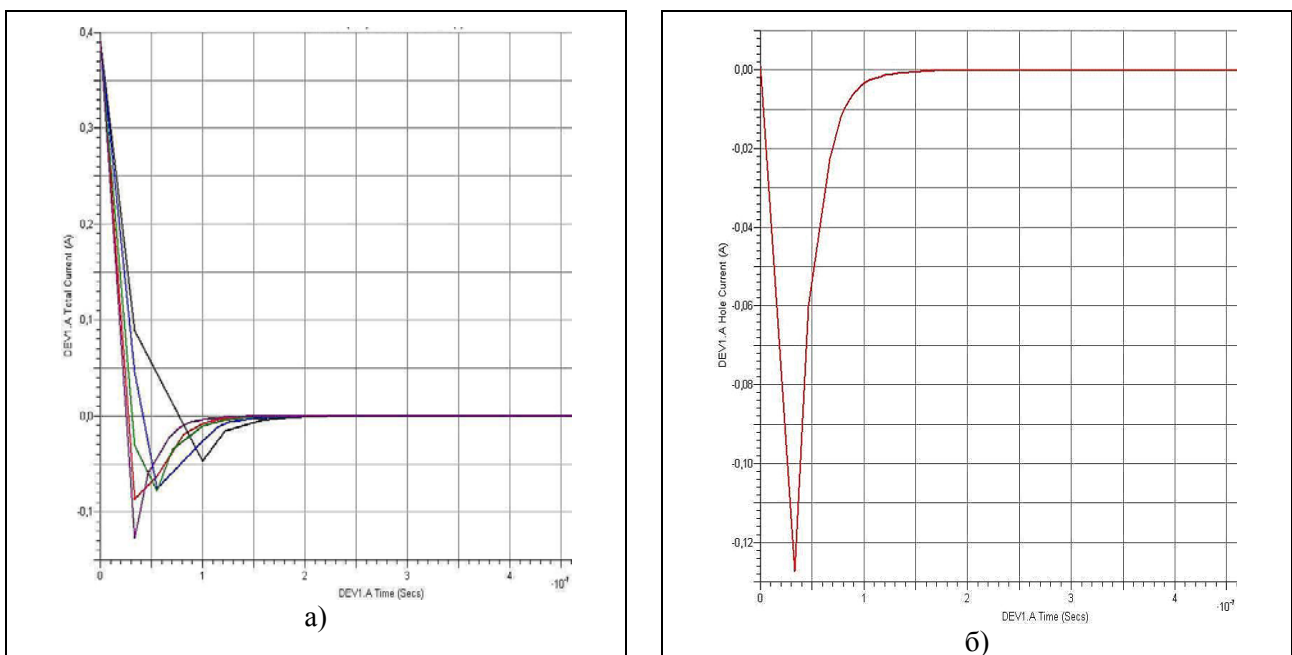


Рис. 5. Часові залежності: а) – повного; б) – дірочного струмів, що протікають через діод: DEVI A Total Current – повний струм; DEVI A Hole Current – дірочний струм; DEVI A Time – час

З рис. 5 випливає, що викид зворотного струму у КДШ обумовлюється надлишком дірок. При підвищенні напруги на затворі збільшується концентрація надлишкових носіїв у базі діода за рахунок розширення збідненого шару, який поєднується з шаром бар'єра Шоттки.

Разом з тим збільшення часу відновлення КДШ (рис. 6) може бути пояснено появою додаткових ємностей. Ємність затвору у цьому випадку дорівнює ємності послідовно ввімкнених областей оксиду і ємності області збіднення. Ємність бар'єру Шоттки замкнена зовнішнім з'єднанням $n+$ - області і контакту бар'єра Шоттки, що дозволяє оцінити зміну сумарної ємності КДШ. Але результати, показані на рис. 6,

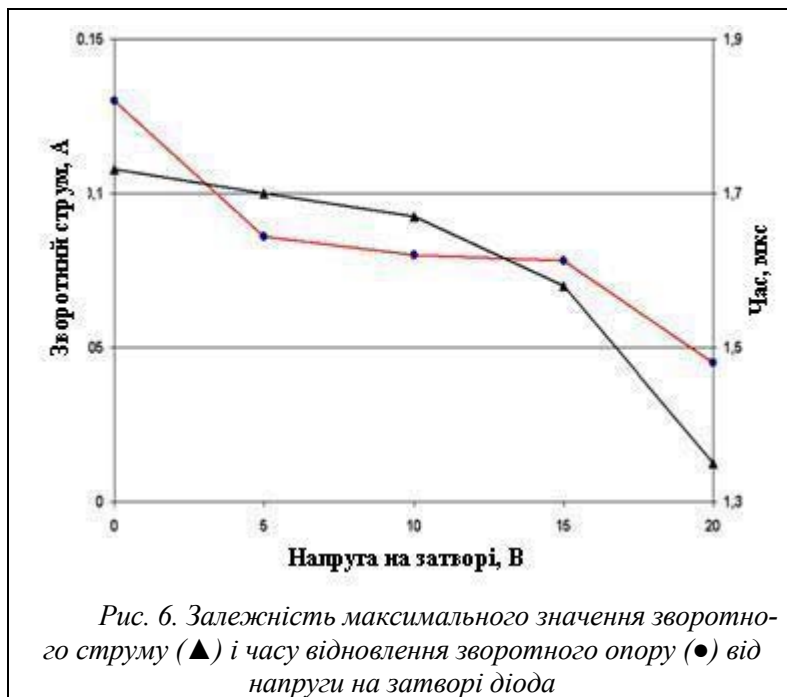


Рис. 6. Залежність максимального значення зворотного струму (▲) і часу відновлення зворотного опору (●) від напруги на затворі діода

дозволяють встановити, що межі зміни додаткової ємності становлять близько 22 % на відміну від очікуваних 50 % [7].

Таким чином подальші дослідження можуть бути пов'язані з дослідженням конструкцій КДШ з додатковим затвором, що дозволять збільшити ступінь регулювання статичних і динамічних характеристик. Для цього можливо виконати дослідження конструкції, що показана на рис. 1, додатково враховуючи явища пробую і польової залежності рухливості носіїв заряду і їх тунелювання скрізь потенційні бар'єри [12].

Висновки

Встановлено, що КДШ характеризується зміною густини об'ємного заряду у підзатворних областях при зміні напруги на затворі. Це призводить до змін ємності і опору між катодом та анодом таких структур.

Показано, що при зміні напруги на затворі КДШ від нуля до 2В бар'єрний потенціал змінюється від 0,54 до 1,5В і ефективність керування залежить від величини напруги на польовому електроді. При зростанні негативної напруги на затворі зворотний струм зменшується при зростанні величини зсуву на одиниці A^{-14} . Разом з тим збільшення позитивної напруги на затворі призводить до зменшення напруги пробую діода. Так, при напрузі на затворі 4В, пробій відбувається при напрузі на аноді 5,9В. Встановлено, що ступінь регулювання додаткової ємності КДШ становить близько 22 % у робочих режимах.

Література

1. Mahalingam, S. The graded doped trench MOS barrier Schottky rectifier: A low forward drop high voltage rectifier [Text] / S. Mahalingam, B. J. Baliga // Solid-State Electronics. – 1999. – Vol. 43. – P. 1 – 9.
2. Hsu, W.C.W. A Novel Trench Termination Design for 100-V TMBS Diode Application [Text] / W.C.W. Hsu, C.M. Liu, M.G. Kao et al. // IEEE Electron Device Letters. – 2001. – Vol. 22. – № 11. – P. 551 – 552.
3. Kumar, M.J. Silicon-on-Insulator Lateral Dual Sidewall Schottky (SOI-LDSS) Concept for Improved Rectifier Performance: A Two-Dimensional Simulation Study [Text] / M.J. Kumar, C.L. Reddy // Microelectronics International. – 2006. – Vol. 23. – № 1. – P. 16 – 18.
4. Rusu, A. Gate controlled diode – a new way for electronic circuits [Text] / A. Rusu, C. Bulucea // Proc. Romanian Academy. Series A. – 2009. – Vol. 10. – № 3. – P. 1 – 6.
5. Trench MOS диоды Шоттки [Электронный ресурс] Режим доступа: www.platan.ru/library/Trench_MOS.pdf (accessed 5 December 2013).
6. Kumar, M.J. New Schottky-gate Bipolar Mode Field Effect Transistor (SBMFET): Design and Analysis using Two-dimensional Simulation [Text] / M.J. Kumar, H. Bahl // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2006. – Vol. 53. – P. 2364 – 2369.
7. Костенко, В.Л. Комбинированные твердотельные структуры и микроэлектронные сенсоры [Текст] / В.Л. Костенко. – Запорожье: Издательство Зап. гос. инж. ак., 1997. – 109 с.

8. Костенко, В. Л. Измерительные преобразователи на основе комбинированных твердотельных структур [Текст] / В. Л. Костенко, Е. Я. Швец, Е. Н. Киселев, Н. А. Омельчук. – Запорожье: Издательство Зап. гос. инж. ак., 2001. – 175 с.
9. Міхалевський, Д. Дослідження шумових характеристик біполярного транзистора в області середніх частот [Текст] / Д. Міхалевський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – Т. 6, № 11(60). – С. 33-36. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/6001>
10. Еременко, А. Двухмерное приборно-технологическое моделирование. Оптимизация конструкции высоковольтного биполярного pnp транзистора [Текст] / А. Еременко, Н. Зайцев, А. Новоселов, И. Романов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2002. – №4. – С. 58 – 60.
11. Device & Process Simulation: Part №: MPEM – CAD – Simulator – TCAD, Available at: <http://www.microport.com.tw/english/SingleP.asp?Category=175&PNo=262&Url=Product&page=1> (accessed 5 December 2013).
12. Mudanai, S. Modeling of direct tunneling current through gate dielectric stacks [Text] / S. Mudanai, Y. Y. Fan, Q. Ouyang et al. // Transaction on Electron Devices. – 2000. – Vol. 47. – № 10. – P. 1851 – 1857.

Надійшла до редакції 11.11.13