

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНІСВИХ ЛАВИННО-ПРОЛІТНИХ ДІОДІВ

Систематизовано конструкції лавинно-пролітних діодів надвисокочастотного діапазону хвиль за типом модифікації пролітної області. Показані результати як отриманих вихідних параметрів напівпровідникових приладів на основі Si, SiC, GaAs, так і теоретично можливі, включно з діодами на основі InP. Отримані значення вказують на перевагу кремнієвої технології конструювання лавинно-пролітних діодів як такої, що станом на сьогодні є найбільш вивчена та запроваджена у виробництві. Такі результати порівнюються з іншими вихідними значеннями напівпровідникових приладів, зокрема з діодами на основі матеріалів групи A^3B^5 . Дослідження проводиться шляхом вимірювання прямої та зворотної гілок вольт-амперної характеристики (ВАХ). Визначені механізми струмопротікання через p-n-перехід кремнієвого лавинно-пролітного діоду на прямій ВАХ.

Ключові слова: лавинно-пролітний діод, вольт-амперна характеристика, Si, SiC, GaAs, InP, терагерцовий діапазон, дифузія, генерація.

Вступ. Постановка проблеми. Сучасний розвиток напівпровідникової електроніки потребує використання потужних твердотільних генераторів міліметрового діапазону довжин хвиль. Лавинно-пролітний діод (ЛПД) є одним з найпотужніших напівпровідникових приладів, який може задовільнити таку потребу. Також актуальність дослідження ЛПД діодів обумовлена можливістю переходу в область високих частот і створення генераторів на основі зворотного зміщення p-n переходів з використанням ударної іонізації, які можуть працювати в терагерцовому (ТГц) діапазоні хвиль.

Робота лавинно-пролітних діодів ґрунтується на виникненні від'ємного динамічного диференціального опору (ВДО) в надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні випромінювання хвиль під час лавиноподібного збільшення кількості носіїв та їх прольоту через напівпровідникову структуру за певних значень напруги пробою. ВДДО пов'язаний з тимчасовим запізненням вказаних процесів, які призводять до фазового зміщення між струмом і напругою. Запізнення лавиноподібного збільшення кількості носіїв проявляється за рахунок кінцевого часу наростання лавинного струму, а запізнення прольоту лавини через напівпровідникову структуру – за рахунок кінцевого часу проходження носіїв в області дрейфу. ВДДО з'являється на деякій частоті, якщо сума цих часових проміжків рівна півперіоду коливання. Лавинно-пролітні діоди можна класифікувати за модифікацією пролітної області. Класифікація надана на рисунку 1 [1–10].

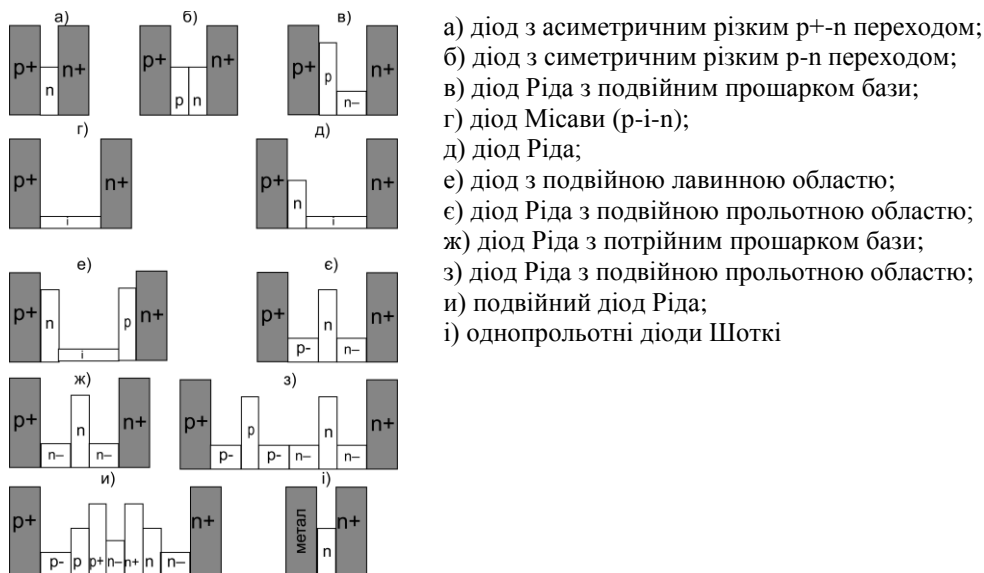


Рис. 1. Типи лавинно-пролітних діодів

Варто звернути увагу на те, що узагальнення можна провести за кількістю пролітних областей: однопролітні, в зарубіжній літературі позначаються «SDR», двопролітні – відповідно «DDR» та з напівпровідником власної провідності в пролітній області (p-i-n діоди).

На рисунку 2 наводяться зібрані літературні експериментальні дані для ЛПД, що надані в системі залежності максимальної потужності від частоти генерації [11]. Варто зазначити, що конструкції ЛПД на

основі *GaAs*, *4H-SiC* та *Si*. Із рисунка видно, що діоди на основі кремнію працюють на вищих частотах, ніж лавинно-прольотні діоди на основі галій арсеніду та карбіду кремнію. Зазначимо, що отримані результати вихідних параметрів кремнієвих ЛПД є кращим світовими зразками та надзвичайно близькі до максимально можливих розрахованих значень діодів на основі кремнію (рис. 5). Найвищі значення вихідної максимальної потужності мають лавинно-прольотні діоди на основі арсеніду галію з усіх наявних на рисунку матеріалів, які використовуються для конструювання приладів.

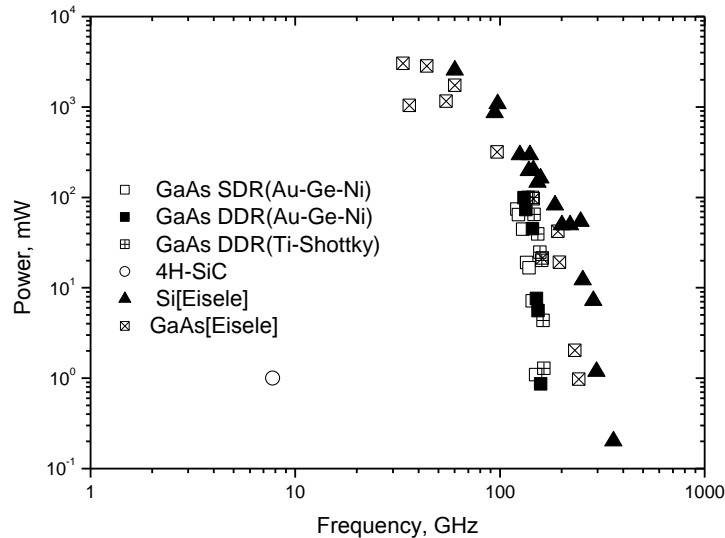


Рис. 2. Експериментальні літературні дані залежності $P_{max}(f)$ ЛПД

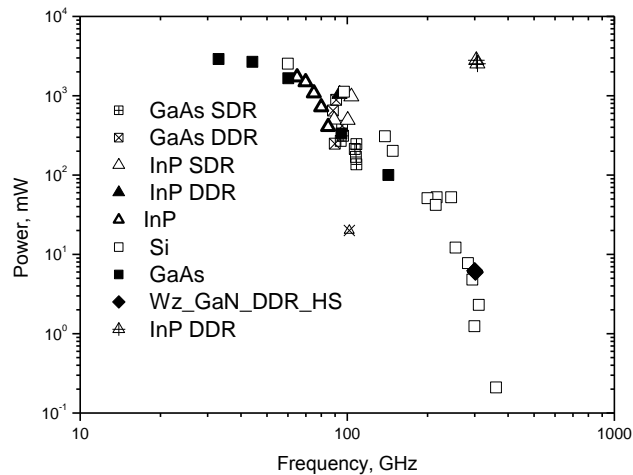
На рисунку 3 зібрані розрахункові літературні дані для ЛПД на основі наступних матеріалів: *GaAs*, *InP*, *Si*, *GaN*. Наведені розрахунки вказують на те, що лавинно-прольотні діоди на основі кремнію здатні генерувати хвилі найвищої частоти порядку 400 ГГц. Проте такі діоди програють в потужності лавинно-прольотним діодам на основі *GaAs* та *InP*, діапазон потужності яких може досягати порядку 10^3 мВ. Варто зазначити, що лавинно-прольотні діоди з подвійною прольотною областю на основі *InP* та *GaAs* можуть мати перевагу над лавинно-прольотними діодами на основі таких самих матеріалів з однією прольотною областю у вищих значеннях потужності. Також можна помітити, що можливі значення частот діодів на основі перспективних матеріалів, таких як нітриду галію з кристалічною ґраткою типу вюрциту, можуть знаходитися в діапазоні 300 ГГц.

Особливо слід приділити увагу лавинно-прольотним діодам з подвійною прольотною областю на основі *InP*, оскільки за такої технології можна отримати прилади з потужністю порядку $\sim 2,5$ Вт на частотах порядку 300 ГГц. Досліджувані ЛПД 8-міліметрового діапазону довжин хвиль виготовлені на основі епітаксціальних структур з питомим опором $n+$ -підкладки $2-3 \cdot 10^{-3}$ Ом·см. Шар $p+-Si$ напилений дифузією бора. Параметри епітаксціальних шарів вказані в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри епітаксціальних шарів *Si* ЛПД

Шар	Товщина, мкм	Концентрація домішки, см ⁻³
p+	0,3	$2 \cdot 10^{20}$
p	0,95	$3 \cdot 10^{16}$
n	1.15	

Рис. 3. Розрахункові літературні дані залежності $P_{max}(f)$ ЛПД

Омічні контакти до р+ та n+-шарам кремнію створювалися нанесенням шарів Au-Pt-Ti-Pd. Діоди виготовлялись з інтегральним тепловідводом. Структура діодного чіпа вказана в [12]. Робота ЛПД в міліметровому діапазоні великою мірою залежить від стабільності р-n переходу при різних механізмах струмопротікання через перехід та стійкого омічного контакту. Оскільки в розрахунок ідеальної ВАХ р-n переходу покладено протікання дифузійного струму ($n = 1$) як основного, реальні ВАХ відрізняються «паразитними» складовими, що роблять вагомий внесок в протікання сумарного струму через р-n перехід. Таким негативним чинником може бути генераційно-рекомбінаційний струм ($n = 2$). Отже, врахувавши сказане вище, на прямій гілці ВАХ (рис. 4) є дві ділянки з різними механізмами струмопротікання. На ділянці (I_{01}) значення фактора неідеальності знаходяться в діапазоні 1,79–2,1 (~2). На ділянці (I_{02}) значення в діапазоні 1,28–1,4 (~1). Диференціальний опір має значення 0,9 Ом.

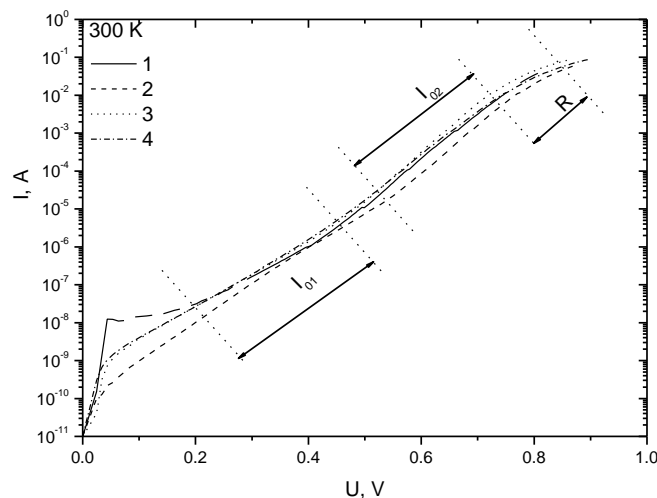


Рис. 4. Пряма гілка ВАХ

В загальному випадку залежність струму від прикладеної напруги на прямій гілці ВАХ ЛПД можна описати залежністю Шоклі:

$$I = I_0 \cdot (e^{\frac{qU}{nkT}} - 1), \quad (1)$$

де I – струм, що проходить через лавинно-пролітний діод; I_0 – струм відсічки (значення струму) при перетині ВАХ з віссю ординат (рис. 4); q – заряд електрона; U – прикладена напруга; k – стала Больцмана; T – температура навколишнього середовища; n – фактор неідеальності.

В напівлогарифмічних координатах така ВАХ приймала б вигляд прямої. Реальну ВАХ (рис. 4) неможливо описати однією експонентою. Бачимо, що ВАХ має три характерні ділянки: дві експоненційні та третю – омічну. Відповідно кожна з експоненційних ділянок (I_{01} та I_{02}) може бути описана (1). Іншими словами, для опису ми використали еквівалентну схему лавинно-пролітного діоду, що вказана на рисунку 5.

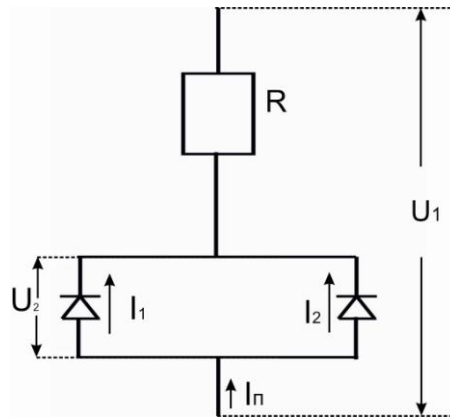


Рис. 5. Еквівалентна схема ЛПД

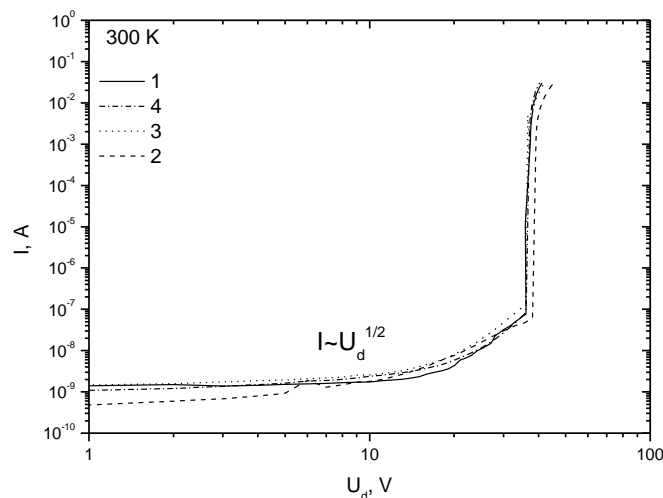


Рис. 6. Зворотня гілка ВАХ

Струм на зворотній гілці вольт-амперної характеристики (рис. 6) ЛПД описується формулою (2):

$$I = (I_{01} e^{\frac{qU_1}{n_1 kT}} + I_{02} e^{\frac{qU_1}{n_2 kT}}) \cdot M(U_1), \quad (2)$$

де M – коефіцієнт примноження носіїв.

Коефіцієнт $M(U)$ визначається співвідношенням Міллера (3) [12]:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_1}{U_{n\text{роб}}}\right)^z}. \quad (3)$$

Для зразків № 1, 3, 4, в яких значення напруги пробою знаходиться в діапазоні 37,3–37,6 В, значення z коливається від 0,51 до 0,54 [14], проте зі зразку № 2 з напругою, що дорівнює 39,4 В, відповідає $z = 0,68$. Така зміна z може свідчити про внесок польової залежності (діапазон 20–35 В на рис. 5) в струм термогенерації зворотної гілки вольт-амперної характеристики.

Висновки. На сьогодні конструювання ЛПД на основі кремнію дає можливість отримати одне з найвищих вихідних значень максимальної потужності та частоти. Перспективними в такому значенні є також діоди на основі матеріалів групи A^3B^5 , а саме на основі $GaAs$, результати якого трішки нижчими, ніж в кремнієвих діодах, але лишаються досить високими. Розрахунки показують, що в майбутньому співвідношення вихідних параметрів може покращити використання фосфіду індію з двопрольотною областю. Найближчу до ідеальної ВАХ має зразок № 3, а найбільший внесок генерацій-рекомбінаційного струму спостерігається в діоді № 1, де $n = 2,1$.

Список використаної літератури:

1. Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition / S.M. Sze, K.Ng Kwok. – A John Wiley & Sons, Inc., publication. – 2007. – 789 p.

2. *Bowers H.S.* Space-charge-induced negative resistance in avalanche diodes / *H.S. Bowers* // IEEE Trans. Electron. Dev. – 1986. – Vol. ED-15, N 6. – Pp. 343–350.
3. *Tschernitz M.* 140 GHz GaAs double-Read IMPATT diodes / *M. Tschernitz, J. Freyer* // Electronics Letters. – 1995. – Vol. 31. – No. 7. – Pp. 582–583.
4. Studies on optical modulation of III-V GaN and InP based DDR IMPATT diode at sub-millimeter wave frequency / *Soumen Banerjee et al.* // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2010. – Vol. 2(7). – Pp. 2790–2801.
5. *Eisele H.* Two-Terminal Millimeter-Wave Sources / *H.Eisele, G.Haddad* // IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 1998. – Vol. 46. – No. 6. – P. 739–745.
6. *Lutz J.* IMPATT oscillations in fast recovery diodes due to temporarily charged radiation-induced deep levels / *J.Lutz, W.Sudkamp, W.Gerlach* // Solid-State Electronics. – 1998. – Vol. 42. – No. 6. – Pp. 931–938.
7. *De P.* Epitaxial layer induced series resistance and microwave properties of N+NP+.
8. *De P.* Si X band IMPATT diodes / *P.De* // Microelectronics Journal. – 2006. – Vol. 37. – Pp. 786–791.
9. *Zemliak A.* Numerical analysis of a double avalanche region IMPATT diode on the basis of nonlinear model / *A.Zemliak, R.Cruz* // Microelectronics Reliability. – 2006. – Vol. 46. – P. 293–300.
10. Computer simulation study on the noise and millimeter wave properties of InP : GaInAs heterojunction double avalanche region IMPATT diode / *J.K. Mishra, G.N. Dash, S.R. Pattanaik et al.* // Solid-State Electronics. – 2004. – Vol. 48. – Pp. 401–408.
11. *Haddad G.I.* Microwave Solid-State Active Devices / *Haddad G.I., Trew R.J.* // IEEE MTT. – 2002. – V. 50, N 3. – Pp. 760.
12. Влияние перегрева *p-n*-перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов / *А.Е. Беляев, В.В. Басанец, Н.С. Болтовец и др.* // ФТП. – 2011. – Т. 45. – № 2. – С. 256–262.
13. *Грехов И.В.* Лавинный пробой *p-n*-перехода в полупроводниках / *И.В. Грехов, Ю.Н. Серезжин.* – Ленинград : Энергия, 1980. – 146 с.
14. Кремниевые диффузионные диоды с вольт-амперными характеристиками, близкими к идеальными / *Н.С. Болтовец, К.А. Исмайков, Р.В. Конакова и др.* // ЖТФ. – 1998. – Т. 68, № 10. – С. 131–132.

СЛІПОКУРОВ Віктор Сергійович – аспірант Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лошкарьова НАН України.

Наукові інтереси:

- фізика;
- технологія та діагностика кремнієвих напівпровідникових діодів.

Стаття надійшла до редакції 14.05.2014

Сліпокуров В.С. Дослідження електрофізичних характеристик кремнієвих лавинно-пролітних діодів

Слепокуров В.С. Исследование электрофизических характеристик кремниевых лавинно-пролетных диодов

Slipokurov V.S. Research electrophysical characteristics of silicon impatt diodes

УДК 621.328.2

Исследование электрофизических характеристик кремниевых лавинно-пролетных диодов / В.С. Слепокуров

Систематизированы конструкции лавинно-пролетных диодов СВЧ диапазона волн по типу модификации пролетной области. Показаны результаты как полученных выходных параметров полупроводниковых приборов на основе Si, SiC, GaAs, так и теоретически возможные, включая диоды на основе InP. Полученные значения указывают на преимущество кремниевой технологии конструирования лавинно-пролетных диодов как такую, которая на сегодня является наиболее изученной и внедрена в производство. Такие результаты сравниваются с другими выходными значениями полупроводниковых приборов, в частности с диодами на основе материалов группы A^3B^5 . Исследование проводится путем измерения прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики. Определены механизмы токопереноса через pn-переход кремниевого лавинно-пролетного диода на прямой ВАХ.

Ключевые слова: лавинно-пролетный диод, вольт-амперная характеристика, Si, SiC, GaAs, InP, терагерцовый диапазон, диффузия, генерация.

УДК 621.328.2

Research electrophysical characteristics of silicon impatt diodes / V.S. Slipokurov

Systematized design IMPATT diode microwave wavelength range by type modifications span region. Show results as obtained output parameters of semiconductor devices based on Si, SiC, GaAs and theoretically possible including diodes based on InP. These values indicate a preference to silicon technology design IMPATT diodes as such, which as of today is the most studied and implemented in production. These results are compared with other output value of semiconductor devices, including diodes on the basis of group A^3B^5 . Study is done by measuring the direct and reverse branches of the current-voltage characteristics. The mechanism of current through pn-junction silicon IMPATT diode for direct current-voltage characteristics.

Keywords: IMPATT diode current-voltage characteristics, Si, SiC, GaAs, InP, terahertz range, diffusion, generation.