

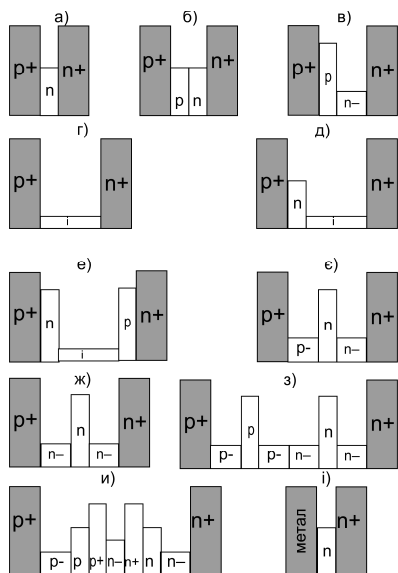
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
КРЕМНІСВИХ ЛАВИННО-ПРОЛІТНИХ ДІОДІВ

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].



- а) діод з асиметричним різким p+-n переходом;  
 б) діод з симетричним різким p-n переходом;  
 в) діод Ріда з подвійним прошарком бази;  
 г) діод Місави (p-i-n);  
 д) діод Ріда;  
 е) діод з подвійною лавинною областю;  
 є) діод Ріда з подвійною прольотною областю;  
 ж) діод Ріда з потрійним прошарком бази;  
 з) діод Ріда з подвійною прольотною областю;  
 и) подвійний діод Ріда;  
 і) однопрольотні діоди Шоткі

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.

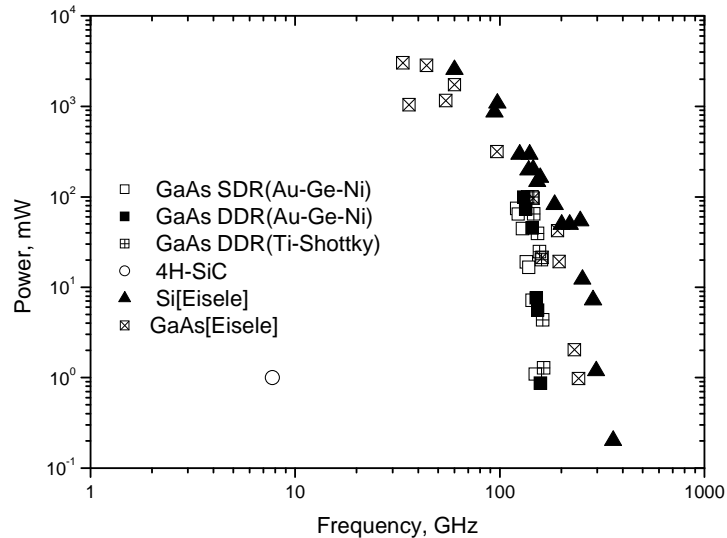


Рис. 2. Експериментальні літературні дані залежності  $P_{max}(f)$  ЛПД

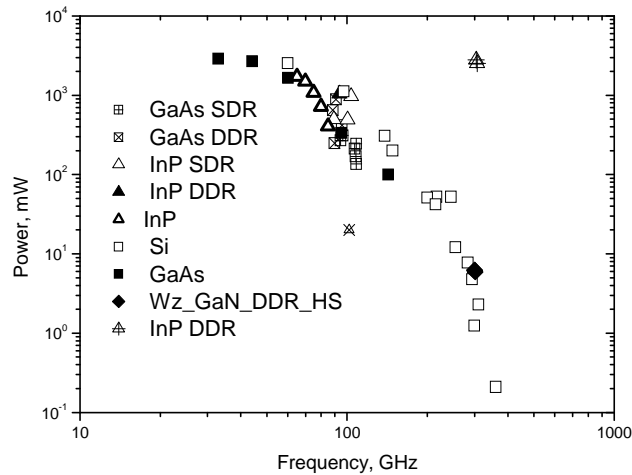
На рисунку 3 зібрані розрахункові літературні дані для ЛПД на основі наступних матеріалів: *GaAs*, *InP*, *Si*, *GaN*. Наведені розрахунки вказують на те, що лавинно-прольотні діоди на основі кремнію здатні генерувати хвилі найвищої частоти порядку 400 ГГц. Проте такі діоди програють в потужності лавинно-прольотним 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, $\text{см}^{-3}$
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.

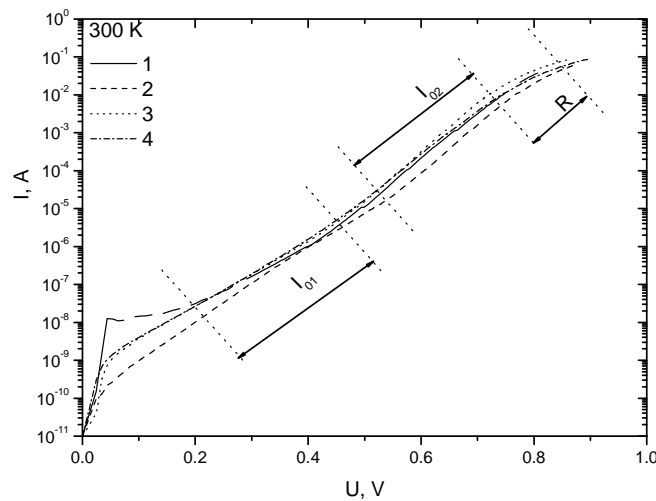


Рис. 4. Пряма гілка ВАХ

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.

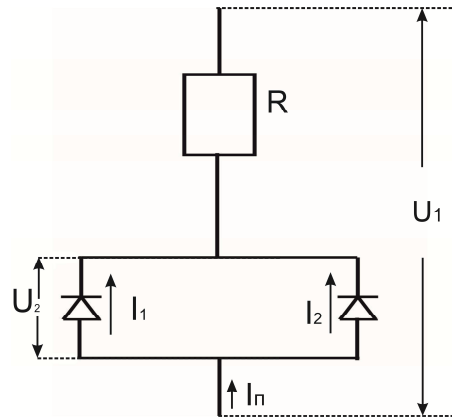


Рис. 5. Еквівалентна схема ЛПД

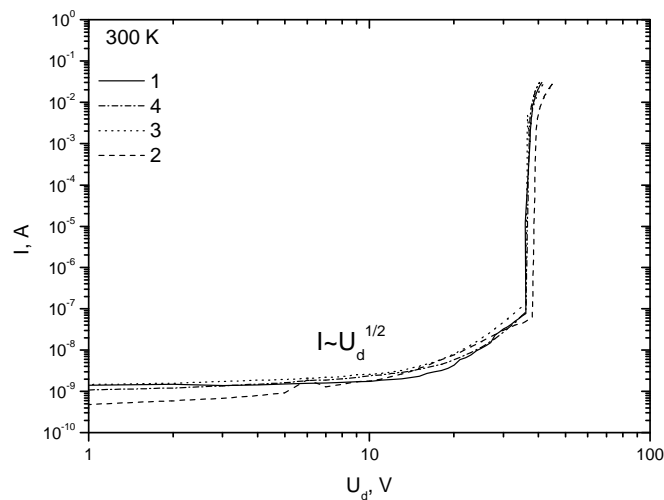


Рис. 6. Зворотня гілка ВАХ

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 двопробольною 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