

УДК 669.776:621.315.592

С.С. Варшава, Н.С. Лях, Н.М. Стасюк

Нелінійні ефекти в точкових контактах метал-кремній, метал-кремній-германій

Національний університет "Львівська політехніка"
кафедра напівпровідникової електроніки.
79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12. Тел. 721632

Приведений огляд методів створення точкових приварних контактів до мікрокристалів Si, Ge, Si-Ge, досліджені нелінійні ВАХ Pt-контактів на ниткоподібних кристалах Si-Ge, Si ("С"-характеристики). Показано, що форма ВАХ визначається як параметрами, так і геометрією структур, зокрема діаметром кристала.

Ключові слова: мікрокристали, ниткоподібні кристали, контакти.

Стаття поступила до редакції 3.07.2001; прийнята до друку 31.10.2001

I. Особливості приварних контактів до ниткоподібних напівпровідникових кристалів

У зв'язку з практичним використанням напівпровідникових ниткоподібних кристалів (НК) в сенсорній техніці (датчики деформації, температури, газового потоку, електромагнітних полів і т.п.) [1] були розроблені різноманітні методи створення неविप्रямляючих контактів до НК. Провідне місце серед них займав і займає метод імпульсного приварювання металевої мікродротини до НК. При цьому джерелом нагріву може бути імпульс змінного струму, що проходить між додатковим електродом та кінцем мікродротини, яка знаходиться на поверхні НК [2], електрична дуга [3], електрична іскра [4], розряд конденсатора [5]. При створенні контактів до НК кремнію використовували спеціальний генератор-формуваць пилкоподібних імпульсів та підігрів НК [6]. В якості захисних середовищ в процесі створення контактів до НК A_3B_5 використовували спирт [7], каніфоль [8].

Надалі для покращення параметрів контактів, а в першу чергу зменшення контактного опору R_k (ρ_k), застосовували термовідпал [23], підлеговування мікродротини [7,9], лазерне опромінення області контакту [13], додаткове закріплення контакту пастами [4] і т.п.

Для визначення контактних опорів та дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) контактів застосовували мостовий метод [14], потенціометричний в декількох варіантах [15,16], а на прикладі контактів Au-GaAs з порівняння методів визначення R_k по вимірюванню розподілу потенціалу вздовж НК і по його спаду в одній довільній точці зразка, впливало, що між ними немає великої різниці [17], тому останній метод і використовували переважно для дослідження контактів на НК.

Про омичність контактів судили не тільки за лінійністю ВАХ контактів, але й також за величиною таких параметрів як коефіцієнт

нелінійності $\left(\frac{U_+}{U_-} \times 100\% \right)$, коефіцієнт нелінійних спотворень k , параметр

Параметри контактів

НК	Тип провідн.	Матеріал мікродрогу	Ø, мм	Параметри НК		Опір контактів		Метод створення	Літ.
				ρ (Ом·см)	n (см ⁻³)	R _к (Ом)	ρ _к (Ом·см ²)		
Si	p	Pt Au		0,001-1,0		0,5-3,2		формувавч ел.імпульсів	13
Si	n	Al Au	0,03 0,03-0,05		10 ¹⁸ -8·10 ¹⁸	випрямн 50		ел.-імпульс. зварювання	9
Si Si	n p	Au Pt	0,015-0,05		5·10 ¹⁷ -4·10 ¹⁹	≈ 0,7		формувавч ел.імпульсів	10
Si	p	Au Pt Au Pt		0,01-0,1 0,01-0,3 0,5 0,5		0,06-0,3(випр) 0,06-2 0,16 випрямн		формувавч ел.імпульсів	11
Si	p	Au		<1,0			3·10 ⁻⁷ - 5·10 ⁻⁵	розряд конденсатора	4
Si Si	p n	Ag Pt Al Au<Sb> Ag Pt Al Au<Sb>	0,035-0,05 0,035-0,05			k=1,19 0,19 0,96 24,3(випр) 22,8(випр) 0,49 38(випр) 0,40		формувавч ел.імпульсів	5
Si	n	Pt Pt<Sb> Al	0,03	0,01-0,1 0,01-0,1		1-100(випр)		точк.-дугов. зварювання	22
Si	p	Pt Al		0,01-0,1		1,0 1,0-3,0(відпал)		УЗ-зварювання	23
Ge Ge	n p	Ag, Au	0,03-0,04	0,02-1,0		52,7-100		ел.-імпульс. зварювання	18
Ge-Si Ge-Si	n p	Au, Pt Au<Sb>	0,03	0,8-1,3			2·10 ⁻⁴ - 6·10 ⁻⁴	ел.-іскрове зварювання	19

нелінійності $\left(\frac{\Delta R}{R_{сер}} \times 100\% \right)$, де ΔR – різниця

опорів зразка для двох полярностей.
Узагальнені результати по створенню

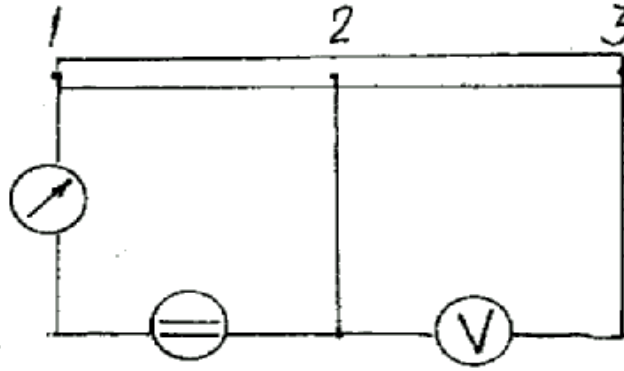


Рис. 1,а. Схема для вимірювання ВАХ контактів.

приварних контактів до НК Si, а також Ge і Si-Ge, наведені в табл. 1. Контакти до НК провідників A_3B_5 , серед яких найбільше вивчений GaAs, досліджували в роботах [4,7,8,9,17,18], до яких і відправимо читача.

II. Методика експерименту

НК Si, а також твердого розчину Si-Ge складу $X=5-10\%$ Ge, були отримані метобом хімічно-транспортних реакцій із вихідних Si і Ge, легованих В [24,21]. Питомий опір знаходився поблизу $0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, довжина НК 3-6мм, ефективний діаметр 10 - 80 мкм. Контакти спотворювали електроімпульсним приварюванням Pt або Au мікродротом

діаметром 30мкм.

Створювали як мінімум три контакти – два крайні і середній – досліджуваний. Для вимірювання ВАХ струм пропускали від джерела постійної напруги через контакти 1-2, вимірюючи цифровим вольтметром спад напруги між контактами 2-3; ”-” клемма вольтметра під’єднувалась до контакту 2 (рис. 1,а). В цьому випадку міліамперметр і вольтметр показували додатні значення (пряма гілка ВАХ). Зворотню гілку ВАХ отримували, змінюючи напрям струму між контактами 1-2, не змінюючи підключення приладів. Зауважимо, що пропускаючи струм між контактами 2-3 і вимірюючи спад напруги між 1-2, отримували другу пару ВАХ.

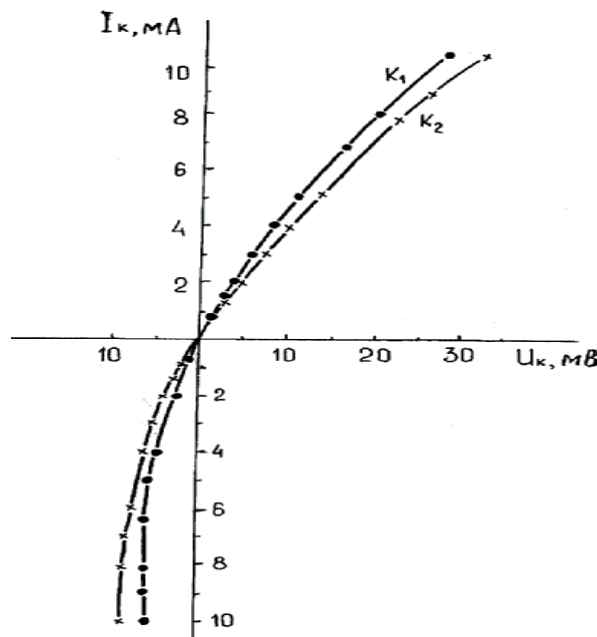


Рис. 1,б. Залежність опору контакту Pt-Si-Ge від струму через контакт ($X=0,08$, $\rho \sim 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

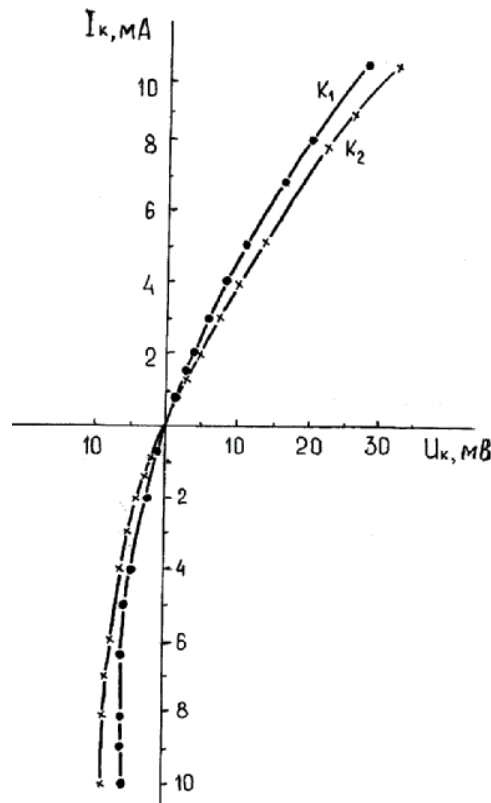


Рис. 2. Вольтамперні характеристики контактів Pt-Si-Ge ($a=4,0\text{мкм}$, $X=0,05$, $\rho\sim 0,03\text{ Ом см}$).

III. Результати вимірювань і їх обговорення

Отримано, що як і для p-Si [11], залежності R_k від струму I_k мають, загалом нелінійний характер. Особливо це проявляється при малих струмах, і якщо визначити R_k у диференціальній формі як $\left(\frac{\Delta U}{\Delta I}\right)$ (рис. 1,б). Як і у випадку Si, значення

R_k для контактів Si-Ge-Au є меншим, ніж для Si-Ge-Pt. Відхилення ВАХ від лінійності при малих струмах спостерігали також в [20], однак на НК Si-Ge з більшим питомим опором ρ .

Далі досліджували контакти, створені приварюванням Au (Pt) – мікродроту до НК Si-Ge різного складу і геометрії (рис. 2).

Спостерігали відмінність прямих та зворотніх гілок ВАХ як для Au, так і для Pt-контактів. У зворотніх гілках проявляється насичення по U . 1-а і 2-а пари ВАХ дещо відрізняються. Однак, якщо контакт

знаходиться посередині, і нема конусності в НК, ця відмінність несуттєва і більше проявляється у зворотній гілці ВАХ. Відмінність характеристик двох контактів, створених на 1 зразку (рис. 2, 4), визначається як матеріалом контакту, так і геометрією, тобто його розташуванням на НК. Звичайно, спостерігається кореляція між величиною R_k та загальним опором зразка R_0 (як правило, $R_k < 1\% R_0$).

Створюючи Pt-контакти до тонких зразків ($a=30\text{ мкм}$), при цьому діаметр мікродротини вже можна порівняти з шириною грані (a) НК, отримали загин зворотньої гілки ВАХ в бік додатних напруг і зміну полярності U_k ("С"-характеристики), (рис. 3,4). Цікаво відзначити, що ці ВАХ залишалися незмінними протягом декількох років.

На рис. 3 зображені характеристики контактів на зразку 3 при різних температурах. Більші температурні зміни властиві зворотній гілці ВАХ.

Досліджуючи ще тонші зразки ($a=$

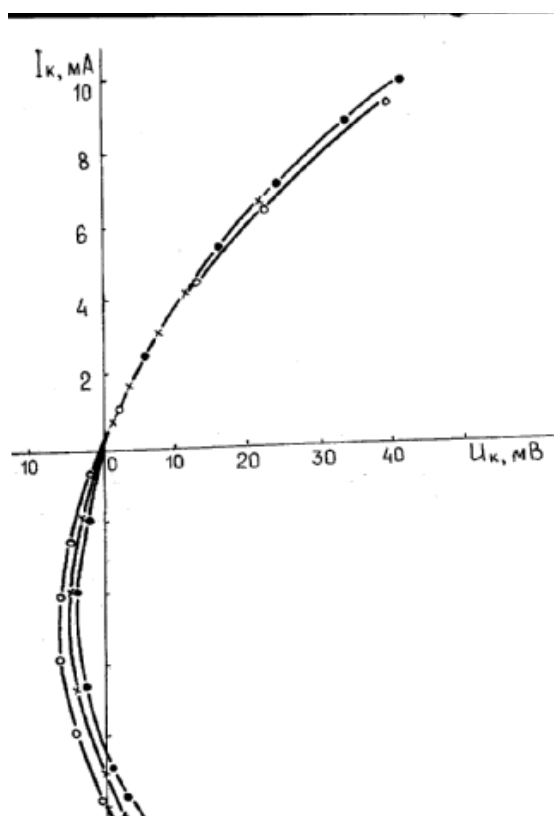


Рис. 3. Вольтамперні характеристики контактів Pt-Si-Ge при різних температурах ($a=30$ мкм), (\bullet – $25,5^\circ\text{C}$; \circ – 58°C ; \times – 100°C).

20 мкм), отримали ще більший загин характеристик в бік додатних напруг та їх проходження через $U = 0$ при менших струмах $I=-(2\div 4$ мА), в залежності від розташування контактів рис. 4. Така зміна знаку U_k є цікавим ефектом і може знайти технічну реалізацію.

На рис. 5 наведено ВАХ контакту Pt-Si. На відміну від контактів до твердого розчину Si-Ge, тут пряму гілку ВАХ можна апроксимувати прямими лініями, навіть до великих струмів ($I>50$ мА), проте перехід зворотної гілки ВАХ до додатних значень U_k має місце при більших зворотніх струмах ($I>20$ мА).

Цей ефект спостерігали також і на контактах Au-p-GaSb з $\rho=0,01-0,04$ Ом·см після термовідпалу (ТВ). Тут на вихідних зразках ВАХ були достатньо лінійними. Після ТВ, дещо зростало ρ , ТКО, однак, більш чутливим параметром виявилась ВАХ контактів (і ρ_k). Був підібраний режим ТВ, що створював неоднорідність за товщиною НК і призвів до появи “С”-характеристик [25]. Механізм утворення “С”-характеристик не з’ясовано

до кінця.

Як вже говорилося, зауважено про існування неоднорідностей в НК, впливу геометрії структур. Можливо, що перехідна область контакту містить високоомні перекомпенсовані шари, що мають складну структуру, що проявляється в виникненні областей просторового заряду.

Можливий такий підхід для пояснення розмірних ефектів. Якщо опір контакту подати у вигляді $R_c = k R_s$, де R_s – опір розтікання. (Для кругового контакту радіусом a , на напівнескінченному зразку з питомим опором ρ $R_s = \frac{\rho}{4a}$), k – коефіцієнт поправки, що враховує потенціальний бар’єр між металом та напівпровідником, опір якого обумовлений двома механізмами протікання струму – термоемісією і тунельним ефектом. У цьому випадку розмірний ефект пов’язаний з перерозподілом величин k і R_s . Однак, на нашу думку механізм утворення “С”-характеристик пов’язаний з ефектами сильного електричного поля в області контакту і виникнення термо-е.р.с. гарячих

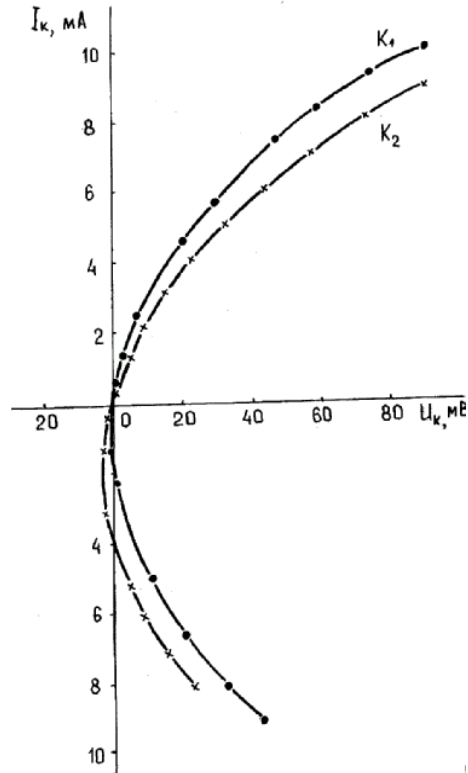


Рис. 4. Вольтамперні характеристики контактів Pt-Si-Ge на тонких НК ($a=20$ мкм).

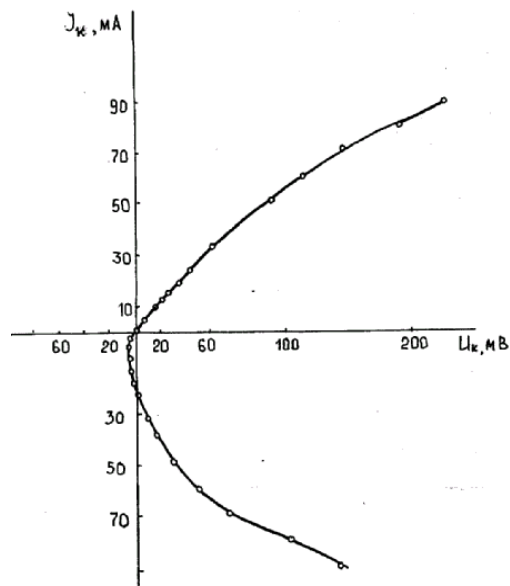


Рис. 5. Вольтамперна характеристика контакту Pt-Si ($\rho=0,02$ Ом·см).

носіїв [27]. Ці ефекти мають розмірні прояви. Підтверджується це аналогічними характеристиками, одержаними нами на зростках НК.

- [1] Р.И. Байцар, С.С. Варшава, Е.П. Красноженов, А.С. Островская. Электромеханические, терморезистивные и фотоэлектрические преобразователи на основе монокристаллов системы Si-Ge // *Неорган. материалы*, **32**(7), сс. 789-793 (1996).
- [2] А.В. Сандулова, С.С. Варшава, К.С. Щербай. О методе создания контактов к нитевидным полупроводниковым кристаллам // *Нитевидные кристаллы и неферромагнитные пленки. Тр. I научной конференции*, Воронеж, **1**, сс. 269-272 (1970).
- [3] В.Я. Александренко, В.О. Альохін. Застосування методу дугового зварювання для виготовлення контактів до напівпровідникових ниткоподібних кристалів та плівок // *Вісник Львів. політехн. ін-ту. Електронна техніка та прилади*, **132**, сс. 62-67 (1979).
- [4] А.В. Сандулова, Н.С. Буркой, С.С. Варшава, и др. Методика создания омических контактов к нитевидным кристаллам тугоплавких полупроводников // *Электронная промышленность*, **7**, сс. 94-97 (1972).
- [5] Г.А. Абрамчук, В.А. Алёхин, В.Я. Александренко, И.М. Кравчук. Омические контакты к частично-компенсированному Si p-типа // *ПТЭ*, **1**, сс. 254-256 (1979).
- [6] А.В. Сандулова, В.П. Гончаров. Создание омических выпрямляющих контактов на нитевидных кристаллах кремния, выращенных методом газотранспортных реакций // *Нитевидные кристаллы и неферромагнитные пленки. Тр. I научной конференции*, **1**, Воронеж, сс. 256-263 (1970).
- [7] В.П. Гончаров, В.М. Рыбак, Ю.А. Охрименко. Омические контакты к НК антимонида галлия и некоторые их свойства // *Нитевидные кристаллы и тонкие пленки. Мат. II Всес. научной конф.*, **1**, Воронеж, сс. 323-326 (1975).
- [8] А.В. Сандулова, С.С. Варшава, К.С. Щербай. Омические контакты к монокристаллам арсенида галлия // *ПТЭ*, **1**, сс. 224-225 (1970).
- [9] С.С. Варшава, В.В. Вайнберг. Низкотемпературные контакты к арсениду галлия // *ПТЭ*, **1**, сс. 268-269 (1980).
- [10] В.Г. Сандулова, Р.М. Векслер. Можливість створення випрямляючих та омичних контактів до легованих ниткоподібних монокристалів кремнію методом імпульсного зварювання // *Вісник Львів. політехн. ін-ту. № 94. Електронна техніка та прилади*, сс. 82-85 (1975).
- [11] І.П. Богоявленська, Д.В. Витрикуш. Термометри опору на ниткоподібних кристалах кремнію // *Вісник Львів. політехн. ін-т. Електронна техніка та прилади*, **94**, сс. 112-117 (1975).
- [12] А.В. Сандулова, И.И. Марьямова, Ю.И. Заганяч, Р.А. Пеленский. Технология создания и исследования свойств контактов на полупроводниковых тензодатчиках типа «Кремнистор» // *Полупроводниковая тензометрия*, **1**, сс. 15-27 (1969).
- [13] С.С. Варшава, А.А. Димидова, Л.Н. Пелех. Влияние лазерного облучения на свойства контактов Pt-Si // *Вестник Львов. политехн. ин-т. Теория проектирование n/n и радиоэлектронных устройств*, **186**, сс.18-21 (1984).
- [14] Ю.И. Заганяч, И.И. Марьямова, Р.А. Пеленский. Новый метод исследования контактов полупроводниковых тензодатчиков // *Полупроводниковые тензодатчики*, **1**, сс. 16 (1967).
- [15] И.Б. Гуляев, А.Г. Ждан, Н.М. Рассуканый. К методике контроля омических контактов металл-полупроводник // *ПТЭ*, **2**, сс. 197-199 (1983).
- [16] M. McKinnon, R.F. Hoachelman. Measurement of metal-semiconductor contact resistance // *IEEE Internat. Conf. Rec.*, **11** (6), pp. 93 (1963).
- [17] А.В. Сандулова, С.С. Варшава, К.С. Щербай, Т.П. Рудич. Исследование свойств контактов GaAs-Au // *Физ. Электроника*, **8**, сс. 117-119 (1974).
- [18] І. Большакова, С. Гумен, Т. Гур'єва, І. Московець. Технологічні аспекти виготовлення мікросенсорів магнітного поля з напівпровідникових кристалів // *Вісник ДУ "Львівська політехніка". Теорія і проект. напівпров. та радіоел. пристроїв*, **326**, сс. 107-109 (1997).
- [19] Г.П. Богоявленская, С.А. Аммер. Создание и исследование омических контактов на НК Ge // *Вопросы физики тв. теле. Тр. аспирантов ФТ Воронеж. Политехн. ин-та*, **11**, Воронеж, сс. 225-232 (1971).
- [20] Л.Ю. Христосенко, Т.О. Бабіна. Властивості контактів напівпровідникових термометрів опору на основі ниткоподібних кристалів твердого розчину Ge-Si // *Вісник Львівського політехнічного інституту "Електронна техніка та прилади"*, **132**, сс. 69-73 (1979).
- [21] Р.І. Байцар, С.С. Варшава. *Напівпровідникові мікросенсори*. Льв. ЦНТЕІ, Львів, 288 с. (2001).

- [22] Е.П. Новокрещенова, А.И. Дрожжин, Р.Н. Кройчик, А.А. Щетинин. Создание и исследование свойств токовых контактов к нитевидным кристаллам кремния п-типа. // Воронеж. *Деп. в ВИНИТИ*. № 7468, **86**, 21 с. (1986).
- [23] Е.П. Новокрещенова, А.И. Дрожжин. Создание контактов Pt-НК р-Si методом дуговой микросварки и исследование их свойств // Воронеж. *Деп. в ВИНИТИ*. № 4665, 83, 29 с. (1983).
- [24] С.С. Варшава, А.С. Островська, Р.І. Байцар. Морфологія, структура і деякі властивості голчастих кристалів твердого розчину кремній-германій // *УФЖ*, **39**(2), сс. 230-233 (1994).
- [25] Г.М. Бортнік, С.С. Варшава, І.С. Вірт. Електрофізичні властивості і розмірні ефекти в ниткоподібних кристалах GaSb // *УФЖ*, **45**(11), сс. 1348-1351 (2000).
- [26] В.Я. Ницков, А.Н. Ухина. К методике определения переходного сопротивления омических контактов // *Эл. техника. Полупр. приборы*, **6**(56), сс. 83-88 (1970).
- [27] С. Ашмонтас. *Електроградиентные явления в полупроводниках*. Моклас, Вильнюс, сс. 96-112 (1984).

S.S. Varshava, N.S. Lyakh, N.M. Stasyuk

Nonlinear Effects on Dot Contacts Metal-Silicon, and Metal-Silicon-Germanium

*National University "Lvivska polytechnika", Electrophysical Department,
12, Bandery St., 79013, Lviv, Ukraine*

It is shown the review of methods formation of dot united contacts to microcrystallines Si, Ge, Si-Ge; and research nonlinear UI-characteristics Pt-contacts on whiskers crystals Si-Ge, Si ("C"-characteristics). The form UI-characteristics get employment as parameters, and geometry of structure also, namely, of crystal diameter.