

Л.В. Шеховцов

ПЕРЕХІДНИЙ ШАР І ЛАТЕРАЛЬНА ФОТОЕРС В НАПІВПРОВІДНИКОВІЙ ГЕТЕРОСИСТЕМІ

В зразках контакту Шотткі NbN-GaAs досліджена фотоерс, що генерується вздовж межі поділу метал-напівпровідник.

Показано, що суттєвий вплив на вигляд спектральних залежностей створює перехідний напівпровідниковий шар, який формується біля межі поділу контакту Шотткі.

Особливістю спектральної характеристики фотоерс є зміна її вигляду при зміні температури термічного відпалу досліджуваної гетеросистеми.

Якщо спектральна характеристика має один максимум і амплітуду, яка в декілька разів перевищує амплітуду знакозмінної характеристики, це означає сформування перехідного шару в області виснаження контакту Шотткі з високою, у порівнянні з квазінейтральною областю напівпровідника, провідністю.

Складна знакозмінна форма спектральних характеристик пов'язана з внеском у вимірюваний сигнал декількох складових ерс, які генеруються на потенційних бар'єрах гетеросистеми метал-напівпровідник.

Спостерігається зміна форми спектральних характеристик і знака фотоерс при освітленні зразка зі сторони металу. Це зумовлено зміною співвідношення між складовими ерс, які формуються в шарах гетеросистеми з різним рівнем провідності.

Для зразків, що відпалені при $T = 900^\circ\text{C}$, характерна зміна знака фотоерс в області краю поглинання GaAs.

Визначено, що відпалення при $T = 950^\circ\text{C}$ призводить до збільшення відносної неоднорідності товщини області виснаження і відсутності зміни знака спектральної характеристики фотоерс.

При цьому зберігається значний вплив неоднорідності згину зон в області виснаження гетеросистеми на характер розподілу латеральної ерс.

Ключові слова: перехідний шар, спектральна характеристика, латеральна фотоерс.

ВСТУП

Технологічною проблемою в процесі виробництва напівпровідникових приладів, які часто являють собою багат шарові структури з латеральними потенційними бар'єрами, є виникнення неоднорідних перехідних шарів, а також флуктуації товщини шарів збідніння і модуляції енергетичної висоти бар'єрів [1-3]. Це призводить до суттєвого зменшення пробивних напруг і термостабільності приладів. Аналогічні проблеми виникають також при формуванні лазерних напівпровідникових гетероструктур, в яких з'являються перехідні області з товщиною, порівняною з постійною кристалічної решітки [4].

При цьому будь-які флуктуації неоднорідності розподілу легуючих домішок, дефекти на поверхні і в об'ємі структури будуть слугувати областями зі змінною щільністю струму, що може призвести до локального термічного перегріву приладу. Такі процеси характерні, зокрема, для діодів, що працюють в діапазоні надвисоких частот струму. В результаті термічного перегріву, і як наслідок, переходу вентильного контакту в омичний і "розчинення" межі розділу метал-напівпровідник, мікроелектронна структура може вийти з ладу [5].

Формування контакту метал-напівпровідник це перш за все підбір бар'єростворюючих металів або їхніх сполук з високою термостійкістю, що викликано необхідністю отримання стабільної межі поділу гетеросистеми, яка в реальних напівпровідникових приладах (наприклад, діодах Шотткі), в процесі експлуатації піддається багаторазовим термічним розігрівам. З цієї точки зору бориди і нітриди перехідних металів (Nb, Ti, Ta) є перспективними матеріалами. Для нітридів перехідних металів характерне утворення ними фаз впровадження (interstitial alloys), тобто фаз з простими структурами, побудованими за типом впровадження атомів неметалу в кристалічну структуру металу. Вони за своїми

властивостями є металопоподібними, мають низький питомий опір (~ 150-400 Ом см для NbN) [6,7].

Формування фізичного контакту метал-напівпровідник (або напівпровідник-напівпровідник) вивчаються із застосуванням таких методів, як емісія балістичних електронів, температурна залежність вольт-амперної характеристики, фотоемісійна спектроскопія, растрова оптична мікроскопія та інші [8-10]. Отримані цими методами результати стимулюють пошуки оптимальних технологічних умов і матеріалів, однак вони дають в основному дані про структурні перетворення в контактуючих матеріалах і на межі їхнього поділу [11-13]. При цьому досить важко встановити кореляцію між такими перетвореннями і електрофізичними властивостями отриманих структур.

З цієї точки зору фотоелектричний метод має такі переваги, як експресність і неруйнівний характер вимірювань. Він заснований на вимірюванні амплітуди і спектра латеральної фотоерс в напівпровідникових гетеросистемах або приладах, що складаються з декількох шарів різних матеріалів (метал-напівпровідник, напівпровідник-напівпровідник, метал-діелектрик-напівпровідник). Звичайно, цей метод може застосовуватися до тих структур в яких можливий фотоелектричний ефект.

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАНЬ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗРАЗКІВ

Суть методу полягає в наступному: вимірюється спектральна характеристика фотоерс, що генерується в структурі (або приладі) світлом з довжиною хвилі поблизу краю фундаментального поглинання базового напівпровідникового шару. Така методика використовувалася при дослідженні структур Ge-GaAs [1], ZnSe-GaAs [14,15] і контактів Шоттки (КШ) TiB₂-GaAs [16]. Зразки представляли собою інформативні моделі для дослідження процесів і результатів формування гетеросистем і, що важливіше, перехідних шарів в них.

Найбільш яскраво фотоелектричний метод показав себе на модельних зразках КШ NbN-GaAs. Методичні аспекти технології виготовлення зразків представлені в роботі [17]. Товщина півки NbN становить 100-150 нм із концентрацією домішок в підкладці n-GaAs $n_0=5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, товщина підкладки - 200 мкм. Довжина зразків - 10-12мм.

Вимірювання проводились на частоті модуляції світла 540Гц при кімнатній температурі. Інтенсивність модульованого випромінювання могла варіюватися від $1 \cdot 10^{14}$ до $8 \cdot 10^{14}$ квант/см²с.

Геометрія проведення досліджень була загальноприйнятою для фотоелектричних вимірювань (рис.1). Сформовані на зразку з боку GaAs контакти і прилеглі до них частини зразків були прикриті для запобігання генерації паразитної вентильної фотоерс, площа освітлюваної частини поверхні зразків становила $5 \times 2 \text{ мм}^2$.

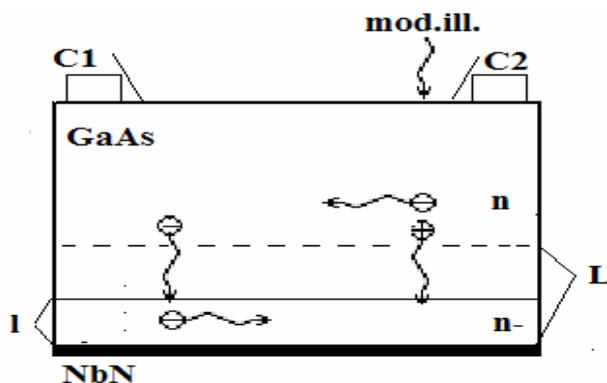


Рис.1. Геометрія дослідів. L - область виснаження гетеросистеми; l - перехідний шар біля межі поділу; C1,C2 – вимірювальні контакти; mod.ill. - збуджуюче монохроматичне світло.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Розподіл ерс уздовж межі поділу контакту вимірювався за допомогою світлового зонда шириною 0,3мм, при його русі вздовж зразка зі швидкістю 0,025мм/с. Інтенсивність модульованого випромінювання становила $8 \cdot 10^{14}$ квант/см²с.

Дослідження показали, що фотоерс, що генерується монохроматичним світлом, за механізмом формування має переважно латеральну природу, тобто в гетеросистемі існують як мінімум дві області, розділені потенційним бар'єром, з різним рівнем (або типом) провідності (рис.1) [18]. На рисунку відображений випадок, коли рівень легування перехідного шару, а отже, і його провідність менші за рівень легування і провідності квазінейтрального об'єму GaAs.

Специфічна, близька до лінійної залежності зі зміною знака ерс в центрі зразка представлена на рисунку, є характерною ознакою латеральної ерс (рис.2, залежність 1). На бар'єрну природу ерс вказує також її сублінійна залежність амплітуди від інтенсивності збуджуючого світла, яка добре помітна в області максимуму спектральної характеристики ерс (рис.3).

Флуктуації амплітуди на тлі такого розподілу пов'язані з наявністю неоднорідності потенціального бар'єру в області виснаження контакту.

Однак існують розподіли фотоерс, які відрізняються від лінійного (рис.2, крива 2). Це є наслідком значного впливу неоднорідного легованого перехідного шару на межі поділу метал-напівпровідник, що означає істотно менший внесок латеральної ерс в сумарний вимірюваний сигнал.

Спектральна характеристика досліджувалася як при повному освітленні відкритої частини структури, так і при її локальному освітленні вузьким світловим зондом. У першому випадку вимірювалася інтегральна фотоерс, амплітуда якої визначається декількома механізмами, зокрема, характеризує усереднену величину потенційного бар'єру. У другому випадку з'являлася можливість порівнювати форму спектральної характеристики фотоерс і її можливі зміни, яка генерувалася модульованим світлом в різних точках досліджуваного зразка.

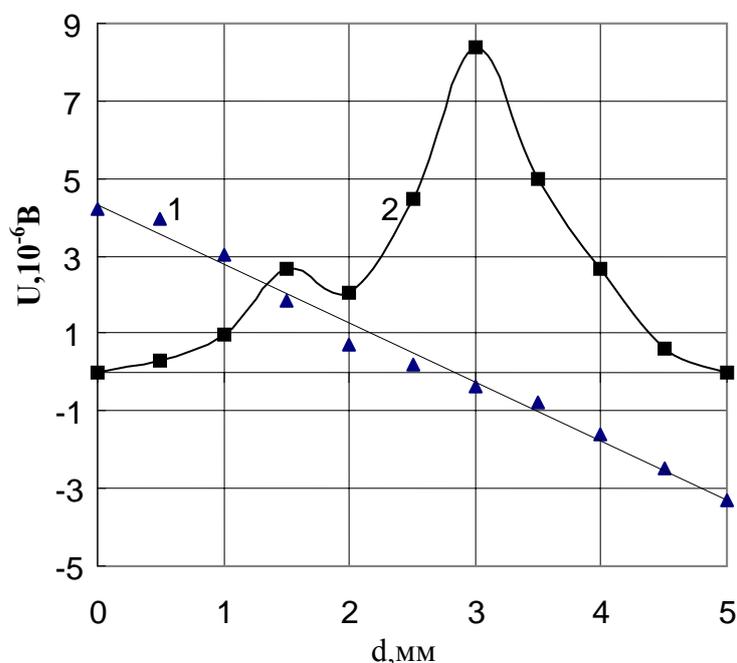


Рис.2. Розподіл латеральної фотоерс вздовж зразка гетеросистеми: 1 – однорідний; 2 – неоднорідний перехідний шар.

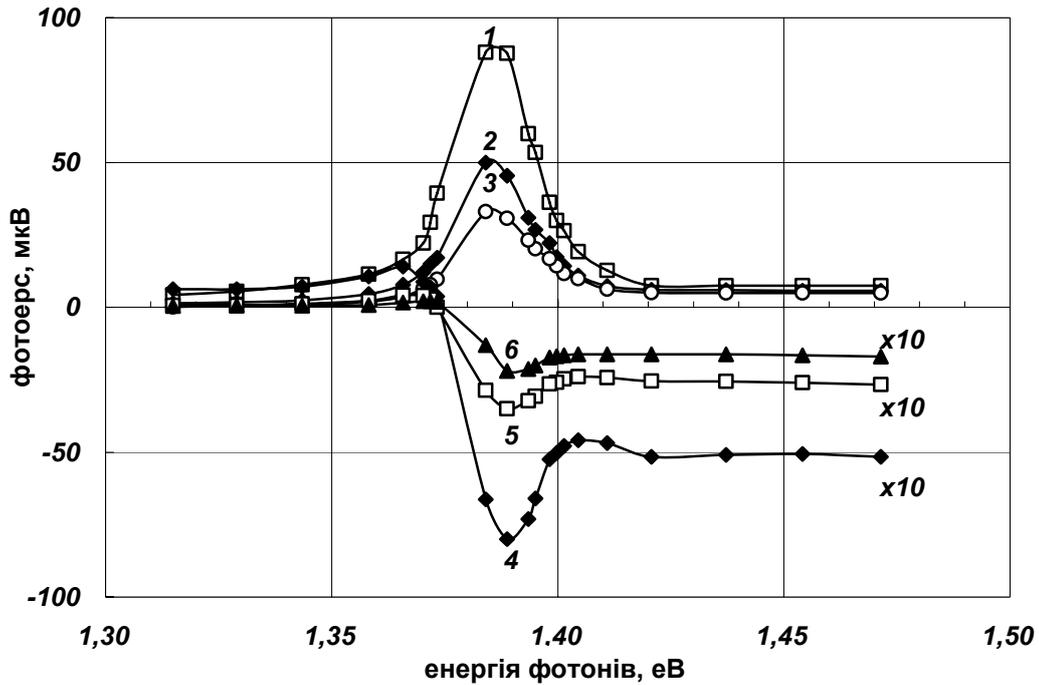


Рис. 3. Нелінійна залежність амплітуди фотоерс від інтенсивності збуджуючого модульованого світла:
 - освітлення зі сторони GaAs: 1- $8 \cdot 10^{14}$ квант/см²с 2- $2 \cdot 10^{14}$ квант/см²с 3- $1 \cdot 10^{14}$ квант/см²с;
 - освітлення зі сторони NbN: 4- $8 \cdot 10^{14}$ квант/см²с 5- $2 \cdot 10^{14}$ квант/см²с 6- $1 \cdot 10^{14}$ квант/см²с.

Характерною особливістю спектральної характеристики фотоерс є зміна її виду при зміні концентрації азоту в плівці NbN і температури термічного відпалення досліджуваної гетеросистеми (рис.4).

При формуванні контакту відбувається легування перехідної області між NbN і GaAs частково за рахунок гетерування домішок з об'єму GaAs і частково внаслідок перехресного легування між напівпровідниковою частиною гетеросистеми і металоподібною плівкою NbN. Знакозмінний характер і невелика амплітуда такої характеристики вказує на однорідний, з незначною, у порівнянні з об'ємом, концентрацією легування перехідного шару, сформованого при виготовленні напівпровідникової структури. На рис.4 представлені спектральні характеристики, які виміряні на зразках контактів Шоттки NbN- GaAs з концентрацією азоту в плівці NbN - 5% і різною температурою відпалу. Видно, що збільшення температури від 900°C (рис.4, крива 1) до 950°C (рис.4, крива 2) призводить до зміни виду спектральних характеристик фотоерс.

Якщо спектральна характеристика має один максимум і амплітуду, яка в декілька разів перевищує амплітуду знакозмінної характеристики, то це вказує на сформований перехідний шар між складовими гетеросистеми з високою, у порівнянні з квазінейтральною областю напівпровідника, провідністю (рис.4, крива 2). Наявність такого шару збільшує ймовірність виходу з ладу мікроелектронного приладу під час його функціонування.

Феноменологічні розрахунки показують, що товщина перехідних шарів залежить від концентрації перехресного легування: з ростом вона зменшується до межі формування не суцільного шару, а окремих кластерів, в разі, наприклад, концентрації легування $\sim 10^{16}$ см⁻³ [19].

Тут необхідно зазначити важливі властивості плівки NbN. При формуванні змінюються хімічні зв'язки між атомами ніобію, тобто проникнення атомів неметалу (N) в решітку металу (Nb) супроводжується не простим утворенням сполук типу кластерів, а формуванням сильних хімічних зв'язків між атомами металу і неметалу, що призводить до зміни таких фізичних властивостей, як їхня тугоплавкість і твердість [6,7,20].

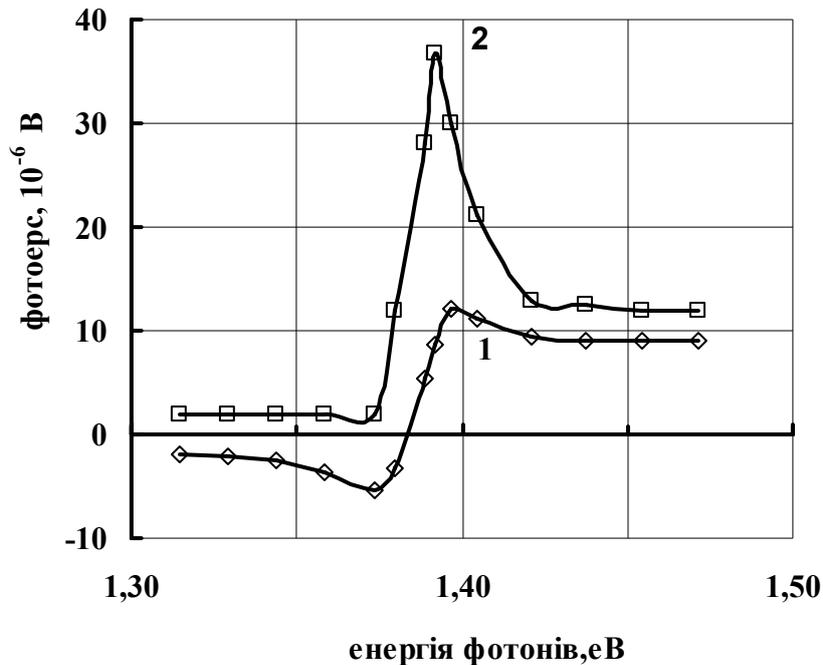


Рис.4. Характерний вигляд спектральних характеристик.
Відпалення зразків NbN-GaAs: -при T=900°C –1; -при T=950°C –2.

Крім того, термічний відпал структур NbN-GaAs оптимізує електрофізичні параметри контактів [21].

Зміна характеру спектральної залежності ерс пов'язана з модифікацією контакту в залежності від вищевказаних технологічних умов. Подібна різка зміна рівня легування перехідного шару гетеросистеми призводить до аналогічної зміни щільності струму, що протікає вздовж нормального напрямку щодо шарів напівпровідників. Очевидно, що це знижує робочий ресурс багат шарового пристрою.

ВИСНОВКИ

Вимірювання спектра латеральної фотоерс дозволяє давати рекомендації, зокрема, щодо хімічного складу матеріалу контакту, температури відпалення, які сприяють керованості технології вирощування гетеросистем для сенсорної техніки.

Застосування запропонованого фотоелектричного методу дозволяє також встановити ступінь однорідності напівпровідникових шарів, складових структури і прогнозувати перерозподіл щільності струму, що протікає через фізичний об'єм приладу.

Слід зазначити, що в зразку гетеросистеми можна виділити шар області просторового заряду біля поверхні GaAs, власне обсяг напівпровідника (квазірівноважну область), область виснаження (ОВ) на межі поділу метал-напівпровідник, перехідний напівпровідниковий шар, перехідний шар з металевими властивостями.

Тому при інтерпретації форми спектральних характеристик необхідно враховувати можливий внесок в сумарний сигнал фотоерс різної природи, а саме: об'ємно-градієнтної, латеральної ерс, пов'язаної з неоднорідністю потенційного бар'єру ОВ гетеросистеми.

Взагалі, генерація латеральної фотоерс вказує на те, що в напівпровідниковій структурі існують потенційні бар'єри (або бар'єр) між частинами або шарами гетеросистеми з різним рівнем або типом провідності [18], а це вже є її частковою діагностикою.

Методика вимірювання спектральних характеристик латеральної фотоерс дозволяє проводити неруйнівну візуалізацію процесів формування функціональних потенційних

бар'єрів в об'ємі приладів різного призначення, таких як сенсори температури, фотоперетворювачі, лазери, діодні структури, інтегральні схеми.

Ці можливості важливі ще й тому, що дозволяють отримати як характеристику окремого контакту в напівпровідниковому приладі, так і диференціювати вплив на властивості функціональних потенційних бар'єрів, які сформувалися в різних шарах гетеросистеми, складових діагностованих напівпровідникових гетеросистем. В разі складних багатошарових структур для коригування технології необхідно проводити вимірювання фотоерс після формування кожного наступного шару.

Таким чином, чутливість характерного вигляду спектра фотоерс по відношенню до технологічних умов виробництва вихідних структур дозволяє давати рекомендації, які сприяють керованості вирощування напівпровідникових гетеросистем різного призначення на стадії відпрацювання та оптимізації технології їх виготовлення.

L.V. Shekhovtsov

TRANSITION LAYER AND LATERAL PHOTO-EMF IN SEMICONDUCTOR HETEROSYSTEMS

A photo-emf in the NbN–GaAs Schottky contact samples studied. This photo-emf is generated along the metal–semiconductor interface.

It is shown that a semiconductor transition layer formed near the Schottky contact interface has a pronounced effect on the form of spectral characteristics.

The feature of the photoemf spectral characteristics is a variations its appearance when changing the thermal annealing temperature of the studied heterosystems.

If the spectral characteristic has one maximum and amplitude, which several times exceeds the amplitude of a significant characteristic, which means the formation of a transition layer in the Schottky contact depletion area with high conductivity, compared with a quasineutral region of a semiconductor.

A complicated alternating form of spectral characteristics of the photo-emf is related to contributions to the measured signal from several components that are generated at potential barriers of the metal–semiconductor heterosystem.

Illumination of samples on the metal side results in change of the form of spectral characteristics and reversal of sign of photo-emf. This is caused by variation of interrelation between the photo-emf components that are generated in the heterosystem layers with different conductivities.

For the samples annealed at $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, the photo-emf changes its sign near the GaAs absorption edge.

It was found that thermal annealing at $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ results in increase of relative nonuniformity of the depletion region thickness, while the sign of the photo-emf spectral curve does not change.

In this case, considerable effect of band bending nonuniformity in the depletion region of the heterosystem under investigation on the character of lateral photo-emf distribution is retained.

Keywords: transition layer, lateral photo-emf, spectral characteristic.

1. Шеховцов Л.В., Саченко А.В., Шварц Ю.М. Поперечная фотоэдс в гетероэпитаксиальной структуре. *ФТП*. 1995. **29**, №3. С.566-573.
2. Palm H., Arhes M., Schulz M. Fluctuations of the Au-Si (100) Schottky Barrier Height. *Phys.Rev.Lett.* 1993. **71**, №14. P.2224-2227.
3. Бондаренко В.Б., Кузмин М.В., Кораблев В.В. Анализ естественных неоднородностей потенциала у поверхности примесного пролупроводника. *ФТП*. 2001. **35**, №8. С.964-968.
4. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. *ФТП*. 1998. **32**, №1. С.3-18.
5. Гольдберг Ю.А., Поссе Е.А. Образование омического контакта в процессе непрерывного нагревания диодов Шоттки на основе GaAs и GaP. *ФТП*. 1998. **32**, № 2. С.200-202.
6. Гольдшмидт Х.Дж. Сплавы внедрения.1. М.: Мир. 1970. 424 с. Goldschmidt H.J. Interstitial Alloys (Butterworths. London. 1967).
7. Самсонов В.Г. Нитриды. Киев: Наукова думка. 1969. 380 с.
8. Konevecki M.W., Westra K.L., Sullivan B.T., Korlenson K.E., M.J. Brett. Optical constants of reactively-sputtered NbN films. *Thin Solid Films*. 1993. **232**, №2. P.228-231.

9. Liliental-Weber Z., Gronsky R., Washburn J., Newman N., Spicer W.E., Weber E.R. Schottky and Ohmic Au contacts on GaAs: Microscopic and electrical investigation. *J.Vac.Sci.Technol. B*. 1986. **4**, №4. P.912-918.
10. Волкова Е.В., Логинов А.Б., Логинов Б.А., Тарасова Е.А., Пузанов А.С., Королев С.А., Семёновых Е.С., Хазанова С.В., Оболенский С.В. Экспериментальные исследования модификации характеристик GaAs-структур с контактами Шоттки после воздействия быстрых нейтронов. *ФТП*. 2021. **55**, №10. С.846-849.
11. Kim C., King P.L., Pianetta P. Fermi-level inhomogeneities on the GaAs(110) surface imaged with a photoelectron microscope. *J.Vac.Technol.B*. 1992. **10**, №4. P.1944-1948.
12. Максимова Н.К., Калигин В.М., Воронков В.П., Вяткин А.П. Структура и свойства межфазных границ арсенид галлия–металл (диэлектрик). *Изв.вузов. Физика*. 1993. 10. С.52-62.
13. Инкин В.Н., Кирпиленко Г.Г., Портнов С.М. Особенности структуры межфазной границы NbN-GaAs. *Электрон. техника. Сер.3 (Микроэлектроника)*. 1991. **4**, №143. С.32-35.
14. Венгер Е.Ф., Семенова Г.Н., Садофьев Ю.Г., Корсунская Н.Е., Семцов М.П., Сапко С.Ю., Шеховцов Л.В. Особенности долговременной релаксации фотоэдс в гетероэпитаксиальной структуре ZnSe-GaAs. *Письма ЖТФ*. 2000. **26**, №5. С.23-30.
15. Venger E.F., Sadofev Yu.G., Semenova G.N., Korsunskaya N.E., Klad'ko V.P., Semtsiv M.P., Borkovskaya L.V., Sapko S.Yu., Shekhovtsov L.V. Lateral and depth inhomogeneity in Zn-based heterostructures grown on GaAs by MBE technology. *Thin Solid Films*. 2000. 367. P.184 – 188.
16. Венгер Е.Ф., Конакова Р.В., Охрименко О.Б., Сапко С.Ю., Иванов В.Н., Шеховцов Л.В. Переходной слой в контактах Шоттки TiB₂-GaAs Au-TiB₂-GaAs. *ФТП*. 2001. **35**, №4. С.439-444.
17. Hotovy I., Brcka J., Huran J. Investigation of reactively sputtered NbN films. *Fizika A*. 1995. **4**, №2. P.337-342.
18. Wallmark J.T. A New Semiconductor Photocell Using Lateral Photoeffect. *Procc. IRE*. 1957. **45**, №4. P.474-483.
19. Shekhovtsov L.V. On a doped transition layer in the space charge region of Schottky contact. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2002. **5**, №4. С.403-405.
20. Ахинько И.А., Гольдберг Е.Я., Григорьев А.Т., Ильичов Е.А., Инкин В.Н., Липшиц Т.Л. Свойства барьеров Шоттки Nb/n-GaAs и NbN/n-GaAs. *Электрон. техника. Сер.3 (Микроэлектроника)*. 1990. **1**, №135. С.35-37.
21. Ахинько И.А., Инкин В.Н., Карамышев Е.П., Кирпиленко Г.Г., Лоцман П.Л., Орлова И.Г. Контакт Шоттки NbN/GaAs и глубокие уровни в приграничном слое GaAs. *Электрон. техника. Микроэлектроника*. 1990. Вып. 5(139). С.42-45.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
41, проспект Науки,
03680 Київ, Україна
E-mail: lvsh@ua.fm

Отримано 30.09.2022