

**Л.В. Шеховцов, С.І. Кирилова**

## **ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕНЬ ПЕРЕХІДНИХ ШАРІВ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ГЕТЕРОСИСТЕМАХ**

Дослідження спектральних характеристик в зразках контактів Шотткі показали, що фотоерс, що генерується монохроматичним світлом, за механізмом формування має переважно латеральну природу, тобто в гетеросистемі існують як мінімум дві області, які розділені потенційним бар'єром вздовж межі поділу, з різним рівнем провідності.

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

Знакозмінний характер і невелика амплітуда характеристики вказує на формування перехідного шару, відносно однорідного і з незначною, у порівнянні з об'ємом GaAs, концентрацією легування.

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.

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.

Розподіл латеральної фотоерс вздовж зразка також має знакозмінний характер. Для того, щоб отримати коректні результати відносно перехідного шару гетеросистеми, необхідно проводити вимірювання спектральної характеристики на відстані від точки зміни знаку ерс, що в декілька разів перевищує довжину дифузії нерівноважних носіїв заряду в GaAs.

Проблемі формування контакту метал-напівпровідник і інших гетеросистем, що супроводжується виникненням неоднорідних перехідних шарів, завжди приділялась увага.

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

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

### **ВСТУП**

Формування контакту метал-напівпровідник і інших гетеросистем супроводжується виникненням неоднорідних перехідних шарів, а також флуктуаціями товщини шарів збіднення і модуляції енергетичної висоти бар'єрів [1-3]. Цій проблемі завжди приділялась увага. Зокрема, в статті Ж.І.Алфьорова [4] детально проаналізовані технологічні умови, яких треба було дотримуватись, щоб мінімізувати товщину перехідного шару в лазерних структурах до розмірів постійної кристалічної ґратки. В роботі [5] викладено феноменологічний підхід до оцінювання товщини шару в залежності від ступеня його легування. При концентрації легування  $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup> товщина такого перехідного шару повинна бути меншою за постійної ґратки, що фізично некоректно.

В такому випадку шар перетворюється в окремі кластери, тобто він не є суцільним вздовж межі поділу складових гетеросистеми.

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.

Це погіршує електрофізичні властивості мікроелектронного приладу внаслідок можливого перерозподілу густини струму, що протікає через гетеросистему і відповідно через перехідний шар. Такі процеси характерні, зокрема, для діодів, що працюють в діапазоні надвисоких частот струму.

Формування фізичного контакту метал-напівпровідник (або напівпровідник-напівпровідник) вивчаються із застосуванням різних методів [6-8]. Отримані таким чином результати дають в основному дані про структурні перетворення в контактуючих матеріалах

і на межі їхнього поділу [9-11], а проблеми, пов'язані з перехідними шарами в напівпровідниковій частині гетеросистеми, залишались осторонь.

Фотоелектричний метод має такі переваги, як експресний 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.

### МЕТОДИКА ВИМІРЮВАНЬ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗРАЗКІВ

Суть методу полягає в наступному: вимірюється спектральна характеристика латеральної фотоерс, що генерується в структурі при її освітленні світлом з довжиною хвилі поблизу краю фундаментального поглинання базового напівпровідникового шару. Така методика використовувалась при дослідженні структур ZnSe-GaAs [12] і контактів Шоттки (КШ) TiB<sub>2</sub>-GaAs [13].

Найбільш яскраво фотоелектричний метод показав себе на модельних зразках КШ NbN-GaAs. Методичні аспекти технології виготовлення зразків КШ представлені в роботі [14]. Товщина плівки 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 – 10–12 мм.

Вимірювання проводились на частоті модуляції монохроматичного світла 540 Гц при кімнатній температурі. Інтенсивність модульованого випромінювання могла варіюватися від  $1 \cdot 10^{14}$  до  $8 \cdot 10^{14}$  квант/см<sup>2</sup>с.

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

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

При фотоелектричних дослідженнях гетеросистем можна очікувати генерацію ерс, що обумовлена різними механізмами взаємодії світла і напівпровідника. Можлива генерація фотоерс як в області неоднорідного бар'єра просторового заряду біля вільної поверхні зразка, так і біля межі поділу метал-напівпровідник внаслідок формування потенційного бар'єра в області виснаження. Наслідком існування зазначених бар'єрів, що розділяють між собою частини зразка з різним ступенем провідності, буде генерація латеральної ерс. Також є вплив на вимірюваний сигнал неоднорідного легування як об'єму зразка, так і перехідного шару між GaAs і плівкою NbN.

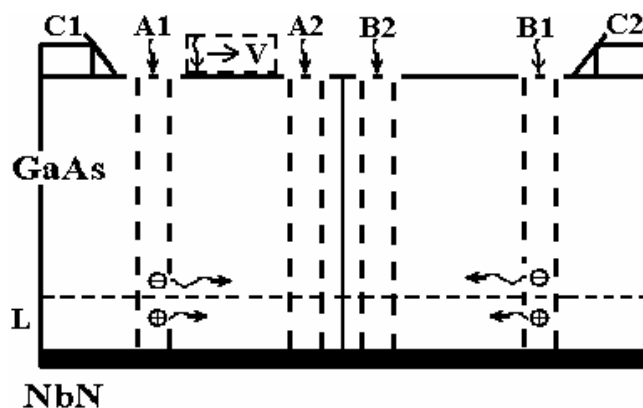


Рис. 1а. Геометрія досліджень:

– розподілу латеральної фотоерс: V-рух зонда світла;

– спектральної характеристики: A1, A2, B1, B2 – точки освітлення зразка модульованим монохроматичним світлом;

L – область виснаження контакту NbN-GaAs; C1, C2 – вимірювальні контакти.

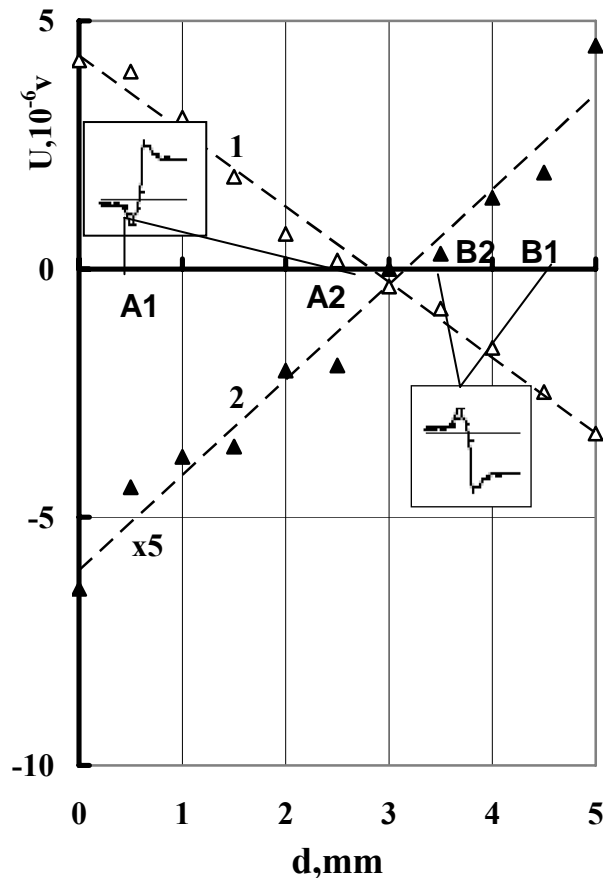


Рис.1в. Розподіл латеральної ерс та інверсія спектральної характеристики:  
 – зонд збуджуючого світла знаходиться в протилежних кінцях освітлюваної частини зразка (A1, B1),  
 – біля центру зразка (A2, B2); довжина хвилі 1-0,6 мкм (1,86eV), 2-1,0 мкм (1,24eV)  
 d – довжина освітлюваної частини зразка; U – амплітуда фотоерс.

Рис.1в (залежність 1,2) ілюструє розподіл фотоерс вздовж освітлюваної частини зразка при інтенсивності світла  $2 \cdot 10^{14}$  квант/см<sup>2</sup>с. Ця залежність отримана при русі світлового зонда шириною 0,3мм із швидкістю 0,025 мм/сек. в напрямку від одного контакту до іншого. Крива розподілу має близький до лінійного характер зі зміною знаку в центрі зразка. Такий характер залежності є ознакою переважної генерації саме латеральної ерс, механізм виникнення якої докладно висвітлений в роботі [15]. Деякі флуктуації амплітуди фотоерс навколо лінії апроксимації пов'язані з неоднорідністю висоти потенціального бар'єра між областю виснаження контакту Шоттки та квазінейтральною частиною GaAs.

Розподіл фотоерс вздовж зразка може бути далеким від лінійного, отже, в такому випадку переважає генерація ерс на неоднорідності як легування напівпровідника, так і висоти бар'єра біля межі поділу метал-напівпровідник. Такий вигляд розподілу ерс вказує на те, що в цьому випадку технологія формування контакту Шоттки потребує корекції.

Цей висновок характеризує одну із позитивних сторін пропонованого фотоелектричного методу дослідження гетеросистем.

На рис.2 представлені спектральні характеристики фотоерс, що вимірювались у випадку її лінійного розподілу. Ширина світлового зонда складала 1 мм, інтенсивність монохроматичного світла –  $2 \cdot 10^{14}$  квант/см<sup>2</sup>с. Видно, що типові характеристики мають вигляд як знакозмінної, так і однополярної кривої. Такі залежності можна отримати в випадку освітлення зразка біля області вимірювальних контактів або поблизу середини зразка (точки A1, A2, рис.2). Амплітуда ерс буде відрізнятись, але знаки і форма кривих залишаються сталими.

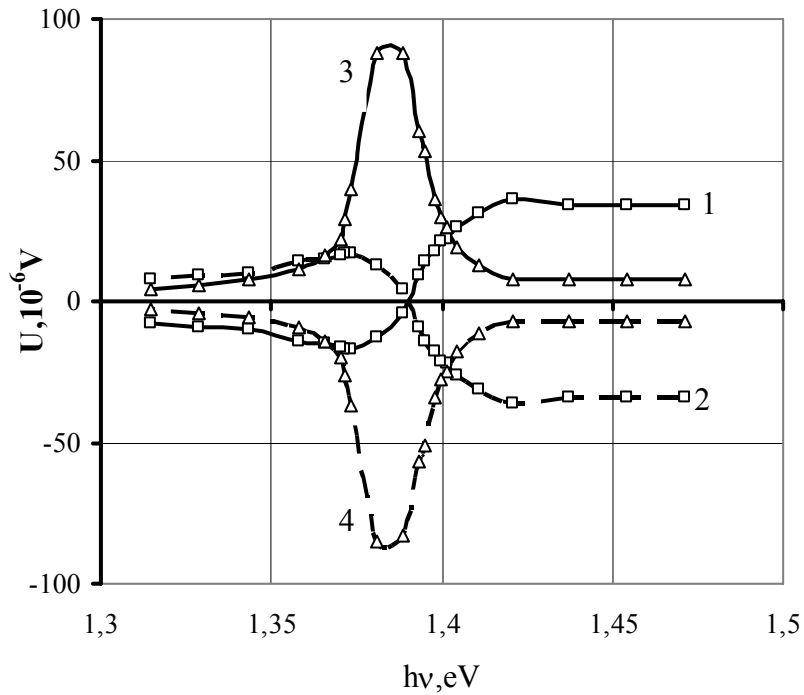


Рис.2. Інверсія знака спектральних характеристик латеральної ерс:  
 1,4 – вимірювання в точках A1,B1;  
 2,3 – в точках A2,B2.

Вимірювання ерс в точках B1,B2 (рис.2) призводить до інверсії знака характеристик без зміни їхньої форми, що, власне, можна було очікувати. Отже, якщо світловий зонд буде розташований симетрично відносно точки зміни знака розподілу ерс, сигнал буде дорівнювати нулю внаслідок компенсації дифузійних струмів нерівноважних носіїв заряду, які розтікаються в протилежні сторони в напрямку вимірювальних контактів.

Вище вже зазначалось, що латеральна ерс генерується внаслідок існування потенційного бар'єра, що поділяє між собою частини зразка з різним ступенем провідності. В даному випадку це квазінейтральна область GaAs та перехідний шар біля межі поділу КШ.

Треба відзначити методичні аспекти вимірювання розподілу ерс, а саме: лінійність і флуктуації сигналу залежать від ширини світлового зонда. Очевидно, що чим більша ця ширина, тим більше усереднення як розподілу ерс, так і амплітуди флуктуацій. Зменшення ширини означає зменшення освітлюваної площі зразка, це деталізує картину, але при цьому зменшується амплітуда сигналу при однаковій інтенсивності світла в обох випадках.

Тобто отримання достовірної інформації про фотоелектричні властивості гетеросистеми залежить від коректно підбраного співвідношення між освітлюваною площею зразка і інтенсивністю зондуєчого світла.

Існують розподіли фотоерс, що відрізняються від лінійного. Це є наслідком значного впливу неоднорідно легованого перехідного шару на межі поділу метал-напівпровідник, що означає істотно менший внесок латеральної ерс в сумарний вимірюваний сигнал.

Спектральна характеристика досліджувалась 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'єра. У другому випадку з'являлася можливість порівнювати форму спектральної характеристики фотоерс і її можливі зміни, яка генерувалась модульованим світлом в різних точках зразка.

Характерною особливістю спектральної характеристики фотоерс є зміна її вигляду при зміні концентрації азоту в плівці NbN і температури термічного відпалення досліджуваної гетеросистеми. На рис.1в представлені, як приклад, спектральні характеристики, що виміряні на зразках контактів Шотткі NbN- GaAs з концентрацією азоту в плівці NbN - 5% і температурою відпалення 900°C і 950° С та інтенсивності модульованого світла  $2 \cdot 10^{14}$  квант/см<sup>2</sup>с.

Пояснити зміни форми характеристик можна наступним чином. При формуванні контакту відбувається легування перехідної області між NbN і GaAs як за рахунок гетерування домішок з об'єму GaAs [16], так і внаслідок перехресного легування між напівпровідниковою частиною гетеросистеми і металопоподібною плівкою NbN [6].

Знакозмінний характер і невелика амплітуда характеристики вказує на якісний за однорідністю і незначну, у порівнянні з об'ємом GaAs, концентрацію легування перехідного шару, сформованого при виготовленні напівпровідникової структури при температурі відпалення 900°C (рис.1в, крива 1). Збільшення температури до 950°C (рис.1в, крива 4) призводить до зміни виду спектральних характеристик фотоерс, а саме: характеристика тепер має один максимум і амплітуду, яка може в декілька разів перевищувати амплітуду знакозмінної залежності.

Це вказує на сформований перехідний шар між складовими гетеросистеми з високою, у порівнянні з квазінейтральною областю напівпровідника, провідністю. Подібна різка зміна рівня легування перехідного шару гетеросистеми буде призводити до аналогічної зміни щільності струму, що протікає вздовж нормального напрямку щодо шарів напівпровідників. Це, в свою чергу, збільшує ймовірність виходу з ладу мікроелектронного приладу під час його функціонування.

Важливим моментом в дослідженні модельних зразків контактів Шотткі є розташування світлового зонда на відкритій частині зразка.

На рис.1а вказані випадки, коли світловий зонд розташований біля одного з двох кінців освітлюваної частини зразка поблизу вимірювальних контактів. Ширина прямокутного світлового зонда модульованого випромінювання в цьому випадку становила 1мм. Інтенсивність модульованого випромінювання становила  $2 \cdot 10^{14}$ квант/см<sup>2</sup>с.

З рисунку 2 видно, що відбувається інверсія знака знакозмінної спектральної характеристики. З одного боку, така зміна пов'язана з виникненням перехідного шару на межі розділу між металом і напівпровідником і залежить від довжини хвилі збуджуючого світла, а отже, його глибини поглинання в об'ємі зразка (рис.2, крива 1).

З іншого боку, інверсія знака ерс може бути отримана при зміщенні світлового зонда щодо точки зміни знака ерс характерної знакозмінної залежності розподілу латеральної ерс уздовж освітлюваної частини зразка (рис.2, крива 2). Аналогічна інверсія відбувається і в разі однополярної спектральної характеристики (рис.2, криві 3,4).

Для отримання коректних результатів вимірювання спектральних характеристик необхідно розташовувати світловий зонд на відстані, що набагато перевищує довжину дифузії нерівноважних носіїв заряду, яка в GaAs становить ~1-3 мкм [17].

Ясно, що ці зміни мають різні механізми генерації ерс, при цьому інформативно доповнюють один одного щодо існування поблизу контакту метал-напівпровідник потенційного бар'єра і легованого перехідного шару.

## ВИСНОВКИ

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

Співвідношення між неоднорідністю і невисоким ступенем легування є критичними для надійності реальної структури. Ця неоднорідність буде відображатись на залежності

розподілу ерс вздовж межі поділу. З іншого боку, однорідно легований шар, але з високим, в порівнянні з квазінейтральним об'ємом напівпровідника, теж є технологічним недоліком, зокрема, це вплине на величину падіння напруги на області виснаження.

Досліджуючи розподіл ерс та її спектральну характеристику, можна отримати повну картину (з точки зору фотоелектричної методики) процесів, що відбулись при формуванні гетеросистеми.

Слід зазначити, що в зразку гетеросистеми можна виділити шар області просторового заряду на вільній поверхні GaAs, власне обсяг напівпровідника (квазірівноважну область), область виснаження 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'єра області виснаження 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.

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.

Ясно, що в разі складних багат шарових структур для коригування технології їхнього виготовлення необхідно проводити вимірювання фотоерс в зразку гетеросистеми 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 керуваності вирощування напівпровідникових гетеросистем різного призначення на стадії відпрацювання та оптимізації технологічних процесів.

**L.V. Shekhovtsov, S.I. Kirilova**

## **FEATURES STUDIES OF TRANSITION LAYERS IN SEMICONDUCTOR HETEROSYSTEMS**

Studies of spectral characteristics in Schottky's contact specimens showed that photoemf generated by monochromatic light, according to the formation mechanism, has a predominantly lateral nature, that is, in a heterosystem there are at least two areas separated by a potential barrier along the interface, with different conductivity levels.

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

A significant characteristic and a small amplitude of the characteristic indicates the formation of a transition layer, relatively homogeneous and with insignificant, compared with the volume of GaAs, the doping concentration.

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.

The distribution of lateral photoemf along the sample also has a significant character. In order to obtain the correct results relative to the heterosystem transition layer, it is necessary to measure spectral acute characteristics at a distance from the point change sign of the emf that several times the diffusion length of non-equilibrium charge carriers in GaAs.

The problem of the formation of a metal-semiconductor contact and other heterosystems accompanied by the occurrence of heterogeneous transition layers, always paid attention.

The use of the proposed photovoltaic method allows to establish the degree of homogeneity of semiconductor layers, components of the structure and predict the redistribution of current density flowing through the physical scope of the device.

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

1. Бондаренко В.Б., Кузмин М.В., Кораблев В.В. Анализ естественных неоднородностей потенциала у поверхности примесного полупроводника. *ФТП*. 2001. **35**, №8. С.964-968.
2. 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.
3. Palm H., Arhes M., Schulz M. Fluctuations of the Au-Si (100) Schottky Barrier Height. *Phys.Rev.Lett*. 1993. **71**, №14. P.2224-2227.
4. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. *ФТП*. 1998. **32**, №1. С.3-18.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
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. E.F. Venger, Yu.G. Sadof'ev, G.N. Semenova, N.E. Korsunskaya, V.P. Klad'ko, M.P. Semtsiv, L.V. Borkovskaya, S.Yu. Sapko, L.V. Shekhovtsov. Lateral and depth inhomogeneity in Zn-based heterostructures grown on GaAs by MBE technology. *Thin Solid Films*. 2000. **367**. P.184 – 188.
13. Венгер Е.Ф., Конакова Р.В., Охрименко О.Б., Сапко С.Ю., Иванов В.Н., Шеховцов Л.В. Переходной слой в контактах Шоттки TiB<sub>2</sub>-GaAs и Au-TiB<sub>2</sub>-GaAs. *ФТП*. 2001. **35**, N4. С.439–444.
14. Hotovy I., Brcka J., Huran J. Investigation of reactively sputtered NbN films. *Fizika A*. 1995. **4** (2). P.337-342().
15. Wallmark J.T. A New Semiconductor Photocell Using Lateral Photoeffect. *Procc. IRE*. 1957. **45**, №4. P.474-483.
16. Власенко Л.С., Горелёнок А.Т., Емцев В.В., Каманин А.В., Полоскин Д.С., Шмидт Н.М. Поверхностное геттерирование фоновых примесей и дефектов в пластинах GaAs. *ФТП*. 2001. **35**, №2. С.184-187.
17. Карпович И.А., Степихова М.В. Влияние гетероэпитаксиальной пассивации поверхности на спектры фоточувствительности и рекомбинационные параметры слоев GaAs. *ФТП*. 1998. **32**, №2. С.182–186.

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

Отримано 01.09.2021