

*Отримано світловипромінюючі гетероструктури n-TiN/n-GaP шляхом нанесення тонкоплівкового TiN методом реактивного магнетронного розпилення на монокристалічні підкладки фосфіду галію.*

*Досліджено температурні залежності висоти потенціального бар'єру і послідовного опору ізотипного гетеропереходу n-TiN/n-GaP та вольт фарадні характеристики при різних частотах збуджуючого сигналу.*

*Встановлено, що домінуючі механізми струмопереносу через гетероструктуру при прямому зміщенні добре описуються в рамках тунельно-рекомбінаційної і генераційно - рекомбінаційної моделей за участю поверхневих станів.*

УДК 621.315.592

**М. М. Солован**, магістр,  
**В. В. Брус**, канд. тех. наук,  
**П. Д. Мар'янчук**,  
 докт. фіз-мат наук,  
**Е. В. Майструк**,  
 канд. фіз-мат наук,  
**І. Г. Орлецький**,  
 канд. фіз-мат наук  
 Чернівецький національний  
 університет  
 імені Ю. Федьковича  
 вул. Коцюбинського 2,  
 Чернівці, Україна, 58012  
 Контактний тел.:  
 (03722) 4-68-77  
 E-mail:  
[p.maryanchuk@chnu.edu.ua](mailto:p.maryanchuk@chnu.edu.ua)

## ***ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧОЇ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ n-TiN/n-GaP***

### **Вступ**

Нітрид титану (TiN) - це перспективний широкозонний матеріал, який володіє вдалою сукупністю фізико-хімічних параметрів: низький питомий опір, досить високий коефіцієнт пропускання у видимій частині спектру, високий коефіцієнт відбивання в інфрачервоній частині спектру, висока твердість, висока зносостійкість, хороша хімічна інертність і стійкість до корозії [1-3].

Тонкі плівки TiN знайшли практичне застосування в мікроелектронних пристроях, сонячних батареях та в якості захисних і декоративних покриттів. Крім того, завдяки біосумісності, TiN успішно використовується в якості поверхневого шару та електричного контакту в ортопедичних протезах, кардіологічних клапанах та інших біомедичних приладах. Використовують різні методи для наплення плівок TiN. Найбільш придатними методами вважають реактивне магнетронне розпилення. Перевага методу реактивного розпилення полягає в тому, що він дозволяє контролювати ряд параметрів, такі як тиск азоту, базовий тиск, тиск розпилення, потужність магнетрона, зміщення підкладки і температуру підкладки, тому таку кількість комбінацій параметрів можна використовувати для отримання високої якості плівок з необхідними властивостями.

Завдяки фізичним властивостям тонкі плівки TiN отримані методом реактивного магнетронного розпилення є перспективним матеріалом для застосування в різних електронних приладах.

В цій роботі досліджуються електричні та оптичні властивості світловипромінюючої ізотипної гетероструктури n-TiN /n-GaP.

### **Експериментальна частина**

Світловипромінююча гетероструктура виготовлена методами епітаксійного вирощування з рідкої фази та реактивного магнетронного розпилення. На монокристалічну підкладку фосфіду галію n – типу провідності методом епітаксії з

рідкої фази наноситься епітаксійний шар GaP n – типу провідності товщиною 20 мкм легований азотом.

Напилення тонкої плівки n-TiN проводилося в універсальній вакуумній установці Laybold – Heraeus L560 за допомогою реактивного магнетронного розпилення мішені чистого титану в суміші газів аргону та азоту при постійній напрузі. Парціальні тиски аргону та азоту складають 0,35 Па та 0,7 Па, відповідно, при постійній потужності магнетрона - 120 Вт. Протягом процесу напилення температура підкладки підтримується на рівні  $\sim 470$  К. Отримані плівки TiN володіли n-типом провідності. Товщина плівок нітриду титану ( $\sim 100$  нм) визначалася за допомогою інтерферометра МІІ-4 за стандартною методикою.

Фронтальний електричний контакт до тонкої плівки нітриду титану формується методом термічного осадження індію при температурі підкладки  $150^\circ\text{C}$ . Тиловий омичний контакт до n- GaP отримували шляхом вплавлення індію.

Структурна схема отриманого ізотипного гетеропереходу n-TiN/n-GaP приведена на рис. 1.

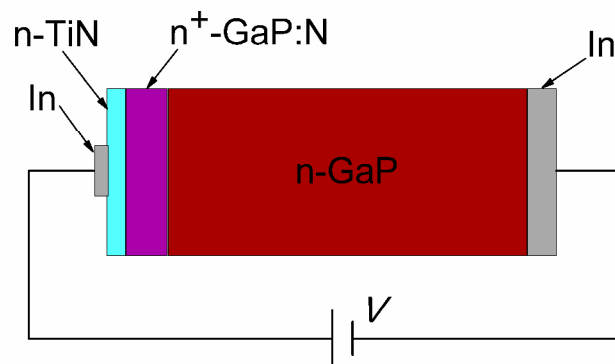


Рис. 1 - Структурна схема гетеропереходу n-TiN/n-GaP

Температурні залежності вольт – амперних характеристик та частотні залежності вольт – фарадних характеристик гетероструктури n-TiN/n-GaP вимірювалися за допомогою вимірювального комплексу SOLARTRON SI 1286, SI 1255.

### Результати та їх обговорення

Досліджувані гетеропереходи володіли яскраво вираженими діодними характеристиками з коефіцієнтом випрямлення  $k = 2 \cdot 10^5$  при 295 К.

Прямі гілки ВАХ досліджуваної структури, виміряні при різних температурах, приведено на рис. 2. Для них характерно зменшення напруги, при якій спостерігається швидке зростання струму з підвищенням температури внаслідок зниження потенціального бар'єру, зумовленого контактною різницею потенціалів.

Шляхом екстраполяції лінійних ділянок ВАХ до перетину з віссю напруг визначені значення висоти потенціального бар'єру  $\varphi_0$  гетеропереходу при різних температурах ( $\varphi_0 = eV_{bi}$ , де  $V_{bi}$  - контактна різниця потенціалів) (вставка рис. 2). Встановлено, що температурна залежність висоти потенціального бар'єру гетероструктури n-TiN/n-GaP добре описується рівнянням:

$$\varphi_0(T) = \varphi_0(0) - \beta_\varphi \cdot T, \quad (1)$$

де  $\beta_\varphi = 2.48 \cdot 10^{-3}$  eV  $\cdot$  K $^{-1}$  - температурний коефіцієнт висоти потенціального бар'єру, а  $\varphi_0(0) = 2.43$  eV - значення висоти потенціального бар'єру досліджуваної гетероструктури при абсолютному нулі температури.

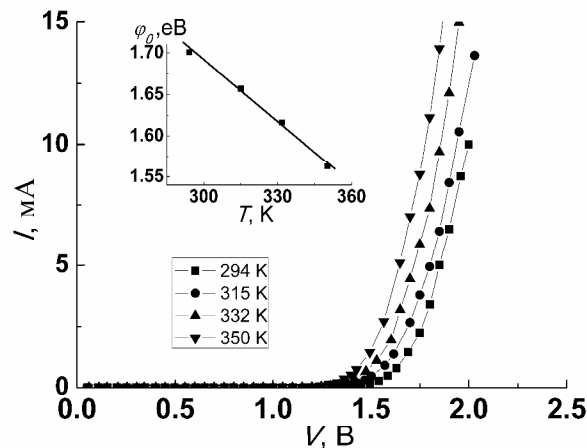


Рис. 2 - Вольт-амперні характеристики гетеропереходу n-TiN/n-GaP:  
На вставці - температурна залежність висоти потенціального бар'єру

Варто зауважити, що великі значення  $\beta_\phi$  і  $\phi_0(0)$ , обумовлені високою концентрацією поверхневих станів (дислокації невідповідності)  $N_{ss}$  на межі розділу гетеропереходу. У першому наближенні  $N_{ss} \sim x^{-2}$ , де  $x$  - відстань між дислокаціями невідповідності, визначається з наступного виразу:

$$x = a_{GaP} a_{TiN} / (a_{GaP} - a_{TiN}), \quad (2)$$

Значення постійної ґратки ( $a_{TiN} = 4.24 \text{ \AA}$ ) [4] і  $a_{GaP} = 5.45 \text{ \AA}$  [5], для  $x$  і  $N_{ss}$  отримане  $19.09 \text{ \AA}$  і  $2.7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , відповідно. При такій густині поверхневі стани, можуть грати роль центрів захоплення, або рекомбінації і суттєво впливати на електричні властивості гетероструктур [6].

Величину послідовного опору гетероструктури  $R_s$  можна визначити з нахилу прямої гілки вольтамперної характеристики. Видно, що в області напруг більше висоти потенціального бар'єру криві  $I = f(V)$  переходять з експоненційної залежності в лінійну. Це свідчить про те, що напруга на бар'єрних областях гетероперехода перестає змінюватися, тобто бар'єр практично відкритий, а струм через гетероперехід обмежується його послідовним опором  $R_s$ . Відомо, що з нахилу температурної залежності  $\ln(R_s) = f(10^3/T)$  можна визначити глибину залягання робочого донорного рівня, який визначає властивості базового матеріалу [7]. Отримане значення глибини залягання донорного рівня складає  $0.1 \text{ eV}$  (рис. 3), і може бути пов'язане з глибиною залягання донорних рівнів утворених домішками азоту  $E_N$ .

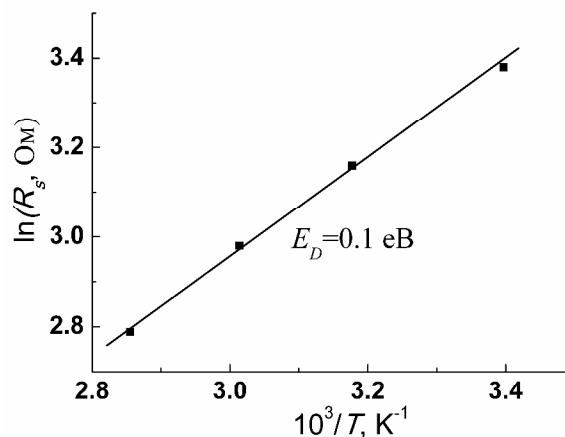


Рис. 3 - Залежність  $R_s(10^3/T)$  в напівлогарифмічному масштабі.

Аналіз прямих гілок ВАХ структур n-TiN/n-GaP, побудованих в напівлогарифмічному масштабі (рис. 4), показав, що залежності  $\ln I = f(V-IR_s)$  можна інтерпретувати двома прямолінійними ділянками, що свідчить про експоненційну залежність струму від напруги і наявність двох домінуючих механізмів переносу заряду в досліджуваному інтервалі напруг. Визначені значення коефіцієнта неідеальності  $n$  ( $\Delta \ln(I)/\Delta V = e/nkT$ , де  $n$  - коефіцієнт неідеальності) для обох ділянок напруг, які становлять  $n \approx 4,5$  ( $0,15 < V < 1$  В) та  $n$  змінюється від 2,8 до 2,5 ( $1 < V < 1,7$  В) з підвищенням температури від 294-350 К.

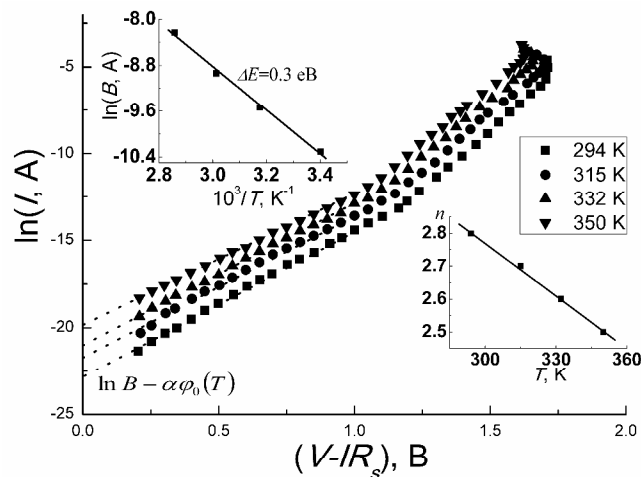


Рис. 4 - Прямі гілки ВАХ гетеропереходу n-TiN/n-GaP в напівлогарифмічному масштабі з урахуванням впливу послідовного опору. На вставках зображено температурну залежність коефіцієнта  $B$  та показника неідеальності  $n$

Слабка температурна залежність нахилу прямолінійних ділянок ВАХ експериментальних залежностей  $\lg I = f(V-IR_s)$  в області напруг  $0.15 < V < 1$  В і значення показника неідеальності  $n \approx 4,5$  дають можливість припустити, що єдиним фізично обґрунтованим механізмом струмопереносу, враховуючи вище оцінену високу концентрацію дислокацій невідповідності  $N_s$ , можна вважати багатоступінчаті тунельно-рекомбінаційні процеси за участю поверхневих станів на межі поділу TiN/GaP. В цьому випадку струм при прямому зміщенні визначається наступним виразом [8]:

$$I = B \exp(-\alpha(\phi_0(T) - eV)) \quad (3)$$

$$\alpha \approx \frac{4}{3\hbar} \left( \frac{m_n^* \varepsilon_0 \varepsilon_n}{N_D} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

де  $B$  - величина, яка слабо залежить від температури і напруги,  $\phi_0$  - висота потенціального бар'єру,  $m_n^*$ ,  $N_D$ ,  $\varepsilon_n$  - ефективна маса електрона, концентрація донорів і відносна діелектрична проникність TiN, відповідно.

Перепишемо вираз (3) в іншій формі:

$$I = B \exp(-\alpha\phi_0(T)) \exp(\alpha eV) = I_0 \exp(\alpha eV), \quad (4)$$

де,  $I_0 = B \exp(-\alpha\phi_0(T))$  - струм відсічки, який не залежить від прикладеної напруги. З виразу (6) видно, що нахил  $\Delta \ln(I)/\Delta V$  початкових ділянок прямих гілок вольт-амперних характеристик зображених на рис. 3 визначає коефіцієнт  $\alpha$ , який приймає значення  $\sim 7.4 \text{ eV}^{-1}$ .

Взявши логарифм виразу для струму відсічки, отримуємо рівняння (5):

$$\ln I_0 = \ln B - \alpha \varphi_0(T), \quad (5)$$

Якщо значення висоти потенціального бар'єру і коефіцієнта  $\alpha$  відомі, тоді величину коефіцієнта  $B$  можна легко обчислити з рівняння (5):  $\ln B = \alpha \varphi_0(T) + \ln I_0$  (вставка на рис. 4.). З нахилу якого можна визначити енергію активації поверхневих станів за участю яких відбуваються тунельно рекомбінаційні процеси при прямому зміщенні  $\Delta E = 0.3$  еВ.

Оскільки значення показника неідеальності в області напруг  $1 < V < 1,7$  В змінюються від 2.8-2.5 з підвищенням температури від 294-355 К (вставка рис. 4), то це свідчить про те, що домінуючий механізм струмопереносу обумовлений генераційно-рекомбінаційними процесами в області просторового заряду через глибокий енергетичний рівень розміщений посередині забороненої зони за участю енергетично активних поверхневих пасток розміщених на металургійній межі розділу досліджуваного гетеропереходу [9]. ВАХ при прямих зсувах  $1 < V < 1,7$  В рис. 4 в нашому випадку добре описується рівнянням (5):

$$I_{gr} = \frac{qn_i S}{2\tau} W \left( \exp \left[ \frac{qV}{nkT} \right] - 1 \right), \quad (5)$$

де  $n_i$  - концентрація власних носіїв заряду;  $S$  - площа гетероперехода;  $W$  - ширина ОПЗ, а  $\tau$  - ефективний час життя нерівноважних носіїв в ній.

На рис. 5 зображено вольт - фарадні характеристики (ВФХ) гетеропереходу n-TiN/n-GaP при кімнатній температурі і різних частотах збуджуючого сигналу. Прямолінійність ВФХ в координатах  $C^{-2} = f(V)$  свідчить про однорідний розподіл концентрації незкомпенсованої домішки в межах області просторового заряду [10]. Таким чином, досліджуваний гетероперехід можна віднести до різних поверхнево-бар'єрних напівпровідникових структур. Спостережувана залежність ємності досліджуваного гетеропереходу від частоти збуджуючого сигналу обумовлена впливом його послідовного опору.

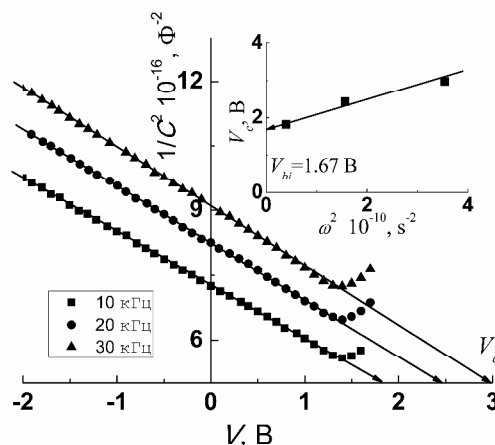


Рис. 5 - ВФХ досліджуваного гетеропереходу при різних частотах змінного сигналу: 1 – 10 кГц, 2 – 20 кГц, 3 – 30 кГц

На вставці рис. 5 зображена залежність напруги відсічки  $V_c$  від квадрата циклічної частоти  $\omega^2$ , на основі якої можна визначити величину вбудованого потенціалу  $V_{bi} = 1.67$  В досліджуваного гетеропереходу з урахуванням впливу його послідовного опору, який добре корелює з висотою потенціального бар'єру визначеного з вольт-амперної характеристики рис. 2. Добре співпадання висоти

потенціального бар'єру отриманого з різних залежностей підтверджує достовірність експериментальних результатів.

На рис. 6 приведено спектральний розподіл свічення досліджуваних гетеропереходів n-TiN/n-GaP з боку плівки TiN виміряний при різних прямих зміщеннях. Максимум спектрального розподілу свічення гетеропереходів n-TiN/n-GaP спостерігається в області довжин хвиль  $\sim 568$  нм. Положення максимуму спектрального розподілу слабо зміщується у довгохвильову область спектру при збільшенні прямого зміщення. Така поведінка може бути пов'язана з нагріванням гетеропереходу внаслідок протікання відносно великого струму.

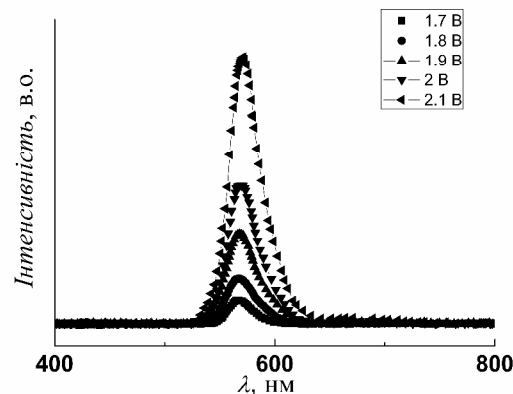


Рис. 6 - Спектральний розподіл свічення гетеропереходу n-TiN/n-GaP

### Висновки

Виготовлені світловипромінюючі гетероструктури n-TiN/n-GaP методом реактивного магнетронного розпилення.

Досліджено температурні залежності висоти потенціального бар'єру і послідовного опору ізотипного гетеропереходу n-TiN/n-GaP.

Встановлено, що механізми струмопереносу через гетероструктуру при прямому зміщенні добре описуються в рамках тунельно-рекомбінаційної і генераційно-рекомбінаційної моделей за участю поверхневих станів.

Прямолінійність ВФХ, виміряних при різних частотах збуджуючого сигналу в координатах  $C^2 = f(V)$  свідчить про рівномірний розподіл концентрації некомпенсованої домішки в межах області просторового заряду. Таким чином, гетероперехід n-TiN/n-GaP можна віднести до різких асиметричних поверхнево-бар'єрних структур.

Виміряно спектральний розподіл свічення досліджуваних гетеропереходів n-TiN/n-GaP з боку плівки при різних прямих зміщеннях, на якому спостерігається максимум в області довжин хвиль  $\sim 568$  нм.

### Список використаної літератури

1. Gagnon, G. Characterization of reactively evaporated TiN layers for diffusion barrier applications [Text] / G. Gagnon, J.F. Currie, C. Beique, J.L. Brebner, S.G. Gujrathi, L. Onllet // J. Appl. Phys., 1994, Vol. 75(3), pp. 1565-1570
2. Solovan, M.N., Kinetic properties of the TiN thin films obtained by reactive magnetron sputtering [Text] / M.N. Solovan, V.V. Brus, P.D. Maryanchuk, T.T. Kovalyuk, J. Rappich, M. Gluba // Physics of the Solid State, 2013, Vol. 55(11), pp. 2234-2238
3. Solovan, M.N. Electrical and Optical Properties of TiN Thin Films [Text] / M.N. Solovan, V.V. Brus, P.D. Maryanchuk // Inorganic Materials, 2014, Vol. 50(1), pp. 40-45
4. Г. В. Самсонов. *Нитриды* [Текст] (М.Наукова думка, 1969) с. 133-158.

5. Шуберт Ф. *Светодиоды* [Текст] [Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича]/Ф.Шуберт.-2-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496с.
6. А. Фаренбрух, Р. Бьюб. Солнечные элементы: Теория и эксперимент [Текст] (М., Энергоатомиздат, 1987) [Пер. с англ.: A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube. Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion (New York, 1983).
7. S. Sze, *Physics of semiconductor devices* [Text], 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, New York, 1981.
8. Brus, V. V. Electrical and photoelectrical properties of photosensitive heterojunctions n-TiO<sub>2</sub>/p-CdTe [Text] / V. V. Brus, M. I. Ilashchuk, Z. D. Kovalyuk, P. D. Maryanchuk, K. S. Ulyanytskiy // Semiconductor Science and Technology. – 2011. – Vol. 26. – 125006.
9. Solovan, M. M. Fabrication and characterization of anisotype heterojunctions n-TiN/p-CdTe [Text] / V. V. Brus, P. D. Maryanchuk, M. I. Ilashchuk, J. Rappich, N. Nickel, S. L. Abashin // Semicond. Sci. Technol. – 2014. – Vol. 29. – 015007.
10. Брус, В. В. Электрические свойства анизотипных гетеропереходов n-CdZnO/p-CdTe [Текст] / В. В. Брус, М. И. Илащук, В. В. Хомяк, З. Д. Ковалюк, П. Д. Марьянчук, К. С. Ульяницкий // ФТП. – 2012. – Том. 46, Вып. 9. – С. 1175-1180

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ n-TiN/n-GaP

М. Н. Солован, В. В. Брус, П. Д. Марьянчук, Э. В. Майструк, И. Г. Орлецкий

*Получены светоизлучающие гетероструктуры n-TiN/n-GaP путем нанесения тонкопленочного TiN методом реактивного магнетронного распыления на монокристаллические подложки фосфида галлия.*

*Исследованы температурные зависимости высоты потенциального барьера и последовательного сопротивления изотипных гетеропереходов n-TiN/n-GaP и вольт-фарадные характеристики при различных частотах возбуждающего сигнала.*

*Установлено, что доминирующие механизмы токопереноса через гетероструктуру при прямом смещении хорошо описываются в рамках туннельно-рекомбинационной и генерационно-рекомбинационной моделей с участием поверхностных состояний.*

### ELECTRICAL PROPERTIES OF LIGHT EMITTING HETEROSTRUCTURES n-TiN/n-GaP

M. N. Solovan, V. V. Brus, P. D. Maryanchuk, E. V. Mastruk, I. G. Orletskii

*Light emitting heterojunction n-TiN/n-GaP were fabricated by the deposition of the TiN thin film onto the GaP single crystal substrate by means of the reactive magnetron sputtering.*

*The temperature dependences of the height of the potential barrier and series resistance as well as the capacitance-voltage characteristics at different frequencies of the ac signal were investigated.*

*We have established that the dominating current transport mechanisms through the heterojunctions under investigated are well described in the scope of the tunnel-recombination and generation-recombination models.*