

**ВИСОТА БАР'ЄРУ ТА ВОЛЬТ-АМПЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ДІОДІВ ШОТТКІ НА ОСНОВІ $Mn_xHg_{1-x}Te$ І $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$**

Проведено порівняння з експериментом діодної та флуктуаційної теорій проходження струму через бар'єр Шотткі для твердих розчинів на основі $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$, а також перевірена методика розрахунку висоти бар'єру Шотткі, яка враховує вплив поверхневих електричних станів контакту метал-напівпровідник та проміжного діелектричного шару.

The given paper deals with comparison of the diode and fluctuation theories of Schottky barrier photocurrent for $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ solid solutions. The methodic of calculation of Schottky barrier height was examined. This methodic take into accounts the influence of surface states and intermediate dielectric layer.

Фізичні й електрооптичні властивості твердих розчинів $Mn_xHg_{1-x}Te$ і $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ подібні за властивостями такому відомому матеріалу, як $Cd_xHg_{1-x}Te$. Це надає можливість вважати, що фотодіоди на основі $Mn_xHg_{1-x}Te$ матимуть характеристики, подібні фотодіодам на $Cd_xHg_{1-x}Te$. Однак розчини з вмістом марганцю мають бути більш стабільними, завдяки меншій різниці атомних радіусів Mn і Hg, в порівнянні з Cd і Hg. Це визначає перспективність використання розчинів $Mn_xHg_{1-x}Te$ і $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ для створення на їх основі фотодетекторів ближнього і середнього ІК-діапазонів.

Незважаючи на перспективність фотодетекторів на основі $Mn_xHg_{1-x}Te$ та $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$, їх основні параметри, внаслідок складності отримання якісних діодів, досліджені слабо. В першу чергу це стосується параметрів фотодетекторів на основі діодів Шотткі – висота бар'єру і залежність струму від різних факторів.

Висота бар'єру – одна з основних величин, що визначає роботу фотодетекторів на основі діоду Шотткі. У даній роботі при розрахунках висоти бар'єру Шотткі врахований вплив поверхневих електричних станів контакту, які відіграють істотну роль у формуванні бар'єру. Крім цього враховувався діелектричний проміжний шар, впливом якого, не можна нехтувати.

Враховуючи всі означені фактори, величину бар'єру Шотткі можливо виразити наступним співвідношенням [1]:

$$\varphi_b = \gamma(\varphi_m - \chi_s) + (1 - \gamma)(E_g - \varphi_0) - \alpha \left(\frac{2qN_d}{\varepsilon_s} \right)^{1/2} \left(V_d - \frac{kT}{q} \right)^{1/2} - \Delta\varphi, \quad (1)$$

де $\alpha = \frac{\delta\varepsilon_s}{\varepsilon_i + q\delta D_s}$, ε_i – діелектрична проникливість

проміжного шару, δ – товщина проміжного шару, D_s – густина поверхневих станів на границі розділу метал-напівпровідник, ε_s – діелектрична проникливість напівпровідника, χ_s – спорідненість напівпровідника, φ_0 – рівень нейтральності для поверхневих станів, V_d – дифузійний потенціал, $V_d = \varphi_0 - V - \xi$, $\xi = E_c - E_f$ в глибині напівпровідника,

$\Delta\varphi = \left(\frac{q^4 N_d}{8\pi^2 (\varepsilon'_s)^2 \varepsilon_s} (\varphi_b - V - \xi - kT/q) \right)^{1/4}$ – пониження бар'єру Шотткі за рахунок впливу сил зображення, ε'_s – високочастотна діелектрична провідність напівпровідника.

Розв'язок рівняння (1) відносно φ_0 :

$$\varphi_b = \varphi_b^0 + \varphi_1 / 2 - \left[\varphi_1 (\varphi_b^0 + \varphi_1 / 4 - V - \xi - kT/q) \right]^{1/2},$$

$$\varphi_b^0 = \gamma(\varphi_m - \chi_s) + (1 - \gamma)(E_g - \varphi_0), \quad (2)$$

$$\varphi_1 = 2\alpha^2 q N_d / \varepsilon_i.$$

Якщо розрахувати висоту бар'єру, то E_g для $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ виражена формулою [2]:

$$E_g = -0,302 + 5,125 \cdot 10^{-4} \cdot T - (x + 2,287y) \times 10^{-3} \cdot T + 1,93 \cdot (x + 2,197y) - 1,62 \times (x^2 + 2,728y^2) + 0,272 \cdot (1,235x^3 - y^3). \quad (3)$$

Рівень нейтральності на поверхні приймався не $\phi_0 = E_g/3$ від стелі валентної зони, як рекомендується для широкозонних напівпровідників [3], а $\phi_0 = 2E_g/3$, що більш придатне для вузькозонних напівпровідників типу $Cd_xHg_{1-x}Te$ і $Mn_xHg_{1-x}Te$ [4].

Залежність висоти бар'єру від ширини проміжного шару для різних температур, розрахована за формулою (2) і приведена на рис.1. Як випливає з рис.1, висота бар'єру Шотткі повинна достатньо сильно залежати від товщини проміжного шару, а крім цього, залежність посилюється з ростом температури. Все це узгоджується з припущенням про вплив проміжного шару на висоту бар'єру.

В якості перевірки точності формула (2) була використана нами при розрахунках висоти бар'єру Шотткі і вольт-фарадних характеристик фотодіодів Шотткі на основі $Cd_xHg_{1-x}Te$. При цьому в розрахунках були використані параметри діоду з статті [5]. Результати наведені на рис.2, і як видно, методика розрахунку, основана на формулі (2), дає результати, які досить добре узгоджуються з даними [6], що дає нам право використовувати формулу (2) для розрахунків висоти бар'єру Шотткі $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$.

На основі величини висоти бар'єру, отриманої згідно формули (2), робився розрахунок вольт-амперних характеристик діоду Шотткі. При цьому нами були використані такі дві теорії.

Оскільки для $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ рухливість носіїв заряду велика і складає для електронів $\mu_n \approx 10^4 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, то для розрахунків використана стандартна діодна теорія. Згідно з даною теорією густина струму через бар'єр визначається так:

$$J_d = A^* T^2 \exp(-q\phi_b/kT) \cdot (\exp(qV/kT) - 1), \quad (4)$$

де $A^* = 4\pi m^* q k^2 / \hbar^3$ - постійна Річардсона для термопольової емісії (маса електрона замінена ефективною масою m^*), V - напруга зміщення.

Так як у досліді нами використано сильно компенсований напівпровідник, то для розрахунків ВАХ використовувалась теорія флуктуаційних надлишкових струмів. Згідно цієї теорії струм через бар'єр Шотткі визначається тунелюванням по мікроканалам - флуктуаційним угрупованням

іонізованих донорів та акцепторів, які призводять до локального зниження бар'єру. У відповідності з даною теорією, показник експоненти тунельного струму:

$$\begin{cases} Q^- = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -A_0 + B_0 \sqrt{V^- + \phi_b}, & T < T_0, V < 0, \\ Q^+ = -A_0 \left(1 - \frac{V}{\phi_b}\right)^{5/4}, & T < T_0, V > 0, \\ Q^- = -A_T + B_T \sqrt{V^- + \phi_b}, & T > T_0, V < 0, \\ Q^+ = -A_T + \frac{V}{T}, & T > T_0, V > 0, \end{cases} \quad (5)$$

де $A_0 = 4\phi_b T_0 / 5$, $B_0 = E_{00} \sqrt{\phi_b} / (2T_0^2)$, $E_{00} = 2E_b \sqrt{\pi(N_d - N_a)a_b^3}$, a_b і E_b - борівські енергія і радіус електрона.

Результати розрахунків ВАХ згідно з теоріями (4) і (5), в яких висота бар'єру Шотткі була отримана за формулою (2), в порівнянні з даними вимірювання ВАХ зображені на рис.3. При певних значеннях коефіцієнту неідеальності n та густини поверхневих станів D_s обидві теорії добре узгоджуються з експериментом (рис.3). Однак при зростанні густини поверхневих станів розбіжності в значеннях зворотного струму між теоріями (4) і (5) зростають.

Відсутність розбіжності при прямих зміщеннях пов'язано з тим, що в умовах експерименту прямий струм визначається, в основному, термопольовою емісією, відносно якої обидві теорії дають приблизно однакові результати. Однак при зворотніх зміщеннях теорія проколів дає завищені значення. Можливо це пояснюється тим, що в експериментальному зразку товщина діелектрика відносно велика, що заважає процесу тунелювання.

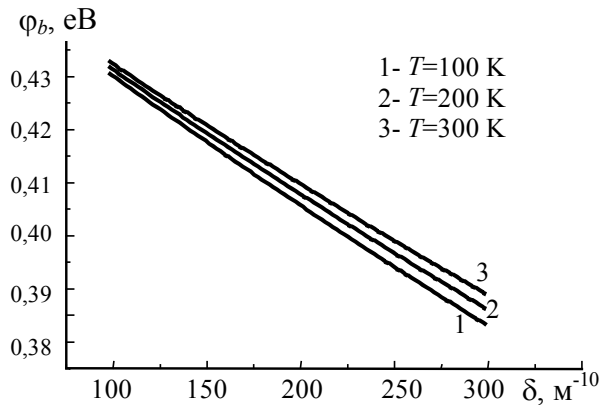


Рис.1. Залежність висоти бар'єру Шотткі від товщини проміжного шару для різних температур.

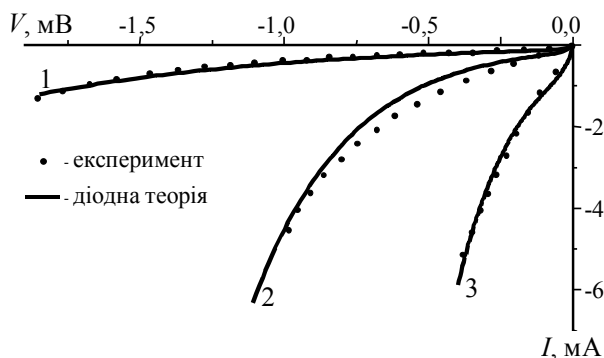


Рис.2. Вольт-амперна характеристика діоду Шотткі для $Cd_xHg_{1-x}Te$.

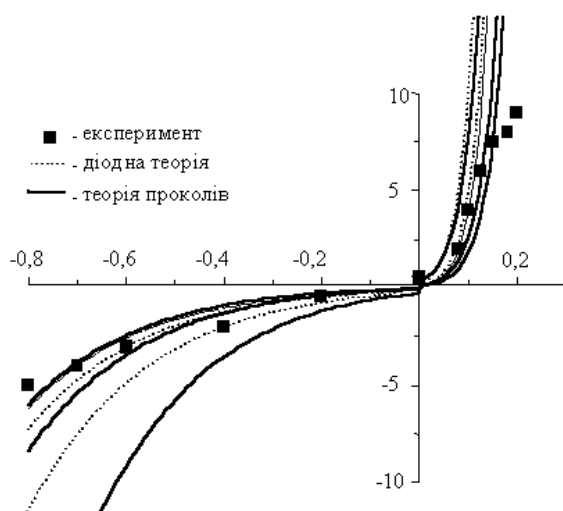


Рис.3. Вольт-амперна характеристика діоду Шотткі для $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$.

Висновки

1. Для діодів Шотткі на основі $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ була розрахована висота бар'єру Шотткі. Точність запропонованого методу розрахунку перевірялась за допомогою застосування даної методики до відомих даних для $Cd_xHg_{1-x}Te$.
2. Показано, що висота бар'єру Шотткі сильно залежить від ширини проміжного шару.
3. Для діодів Шотткі на основі $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ побудовані ВАХ, розрахунок яких здійснювався за двома різними методиками.
4. На основі порівняння розрахованих ВАХ з експериментальними результатами обраний найбільш придатний метод розрахунку струму через бар'єр для $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$.
5. Показано, що за електричними параметрами діоди Шотткі на основі $Cd_xMn_yHg_{1-x-y}Te$ подібні до таких на основі $Cd_xHg_{1-x}Te$ і можуть використовуватись при виготовленні фотодетекторів ІЧ-випромінювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Родерик Э.Х. Контакты металл-полупроводник. - М.: Радио и связь, 1982.
2. Боднарук О.О., Остапов С.Е., Раренко І.М. Ширина забороненої зони та концентрація власних носіїв заряду у $HgCdMnTe$ // УФЖ. - 1998. - **43**, №4. - С.463-466.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Мир, 1984.
4. Завьялов В.В., Раданцев В.Ф., Дерябина Т.И. Особенности тунелирования в барьерах шоттки на основе узкощелевого полупроводника $p-Hg_{1-x}Cd_xTe$ // ФТП. - 1992. - **26**, №4. - С.691-700.
5. Курбанова Э.И., Гусейнов Э.К., Исмаилов Н.Д., Джалилова Х.Д. Электрофизические свойства контактов металл - $Cd_xHg_{1-x}Te$ // ФТП. - 1986. - **20**, №12. - С.2150-2152.
6. Райх М.М., Рузин И.М. Температурная зависимость флуктуационных избыточных токов через контакт металл-полупроводник // ФТП. - 1987. - **21**, №3. - С.456-460.