

**А.В. Сукач, В.В. Тетьоркін, І.О. Мазарчук,
М.М. Кролевець, В.І. Лук'яненко,
І.Г. Луцишин**

ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОЇ ПРОВІДНОСТІ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕЗАСТРУКТУРНИХ InAs $p-n$ -ПЕРЕХОДІВ

Досліджено вплив поверхневої провідності на електричні властивості плавних мезаструктурних InAs $p-n$ -переходів, виготовлених дифузійним методом. З'ясовано, що внаслідок використання протравлювача 2 % $Vg_2 + HNg$ для виготовлення мезаструктур в $p-n$ -переходах виникає поверхнева шунтуюча провідність. Повторна хімічна обробка мезаструктур у протравлювачу на основі азотної кислоти суттєво зменшує темнові струми та вплив шунтуючої провідності на ВАХ переходів. Показано, що темновий струм в $p-n$ -переходах після повторної хімічної обробки мезаструктур в інтервалі температур 160—298 К зумовлений процесами генерації та рекомбінації носіїв в ОПЗ, а за температур менших ніж 160 К — тунелюванням за участю дислокацій.

Ключові слова: InAs, $p-n$ -перехід, поверхнева провідність, хімічна обробка.

ВСТУП

Відомо [1, 2], що рівень Фермі на поверхні InAs закріплюється поверхневими станами структури власний оксид—InAs у зоні провідності, і це спричиняє приповерхневий вигин енергетичних зон. У матеріалі n -типу провідності приповерхнева ділянка збагачується основними носіями заряду, а у p -типу — внаслідок вигину зон $\sim E_g$ формується інверсний n^+ -шар, крім шару збіднення основними носіями заряду. Існування інверсного n^+ -шару в діодах метал— p -InAs підтверджено експериментально [3, 4]. Наявність інверсного шару на поверхні p -області симетрично легованих InAs $p-n$ -переходів зумовлює появу шунтуючих перехід струмів, які разом з тунельними струмами формують надлишковий темновий струм $p-n$ -переходів і виготовлених на їх базі фотодіодів. Надлишковими темновими струмами $p-n$ -переходу вважаємо струми, які перевищують генераційно-рекомбінаційний струм, обумовлений процесом генерації і рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в області просторового заряду (ОПЗ). Присутність надлишкового темнового струму у фотодіодів обумовлює зменшення параметра R_0A (добуток диференційного опору при нульовій напрузі зміщення на активну площу), збільшення рівня шуму, що призводить до зменшення одного з основних параметрів фотодіодів — питомої виявлюваної здатності. У працях [5, 6] показано, що при температурах $T < 170$ К в дифузійних InAs $p-n$ -переходах надлишковий темновий струм має тунельну природу, пов'язану з дислокаціями, які перетинають їх ОПЗ. Було встановлено, що характерними ознаками тунельного струму є більш високе значення коефіцієнта неідеальності $\beta > 2$ для прямих вольт-амперних характеристик (ВАХ), у порівнянні з його значенням для термоактиваційних струмів, у яких $1 \leq \beta \leq 2$ та слабке експоненціальне зростання передекспоненціального множника ВАХ у разі збільшення температури.

Авторам невідомі праці, в яких досліджувався вплив поверхневої провідності на електричні властивості мезаструктурних InAs $p-n$ -переходів. Проте на актуальність теми вказують роботи, пов'язані з пасивацією по-

© А.В. Сукач, В.В. Тетьоркін, І.О. Мазарчук, М.М. Кролевець, В.І. Лук'яненко,
І.Г. Луцишин, 2010

верхні InAs і твердих розчинів на його основі [7, 8], а також виготовленням InAs фотодіодів $p^+—n$ -типу методом іонної імплантації на підкладках n -типу провідності [9], у яких ОПЗ локалізована в n -області, а поверхнева провідність p^+ -області не є критичною у порівнянні з фотодіодами з симетрично легованими $p—n$ -переходами.

Мета роботи — встановлення закономірностей поведінки поверхневої провідності в мезаструктурних InAs $p—n$ -переходах, з'ясування її впливу на електрофізичні властивості переходів та пошук можливості зменшення такого впливу внаслідок хімічної обробки мезаструктури.

ЗРАЗКИ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Пластини InAs n -типу провідності товщиною ~ 1 мм вирізувались абразивним способом зі зливка, вирощеного у АТ «Чисті метали» (м. Світловодськ). Після відповідних технологічних операцій: механічного шліфування і полірування, залишковий порушений шар видалявся методом хіміко-планарного полірування з використанням протравлювача 2 % розчину Br_2 в HBr . Морфологія поверхні і структурна якість підкладок контролювались вимірюванням шорсткості поверхні та напівширини кривих коливання рентгенівського дифракційного відбиття, які відповідно становили $R_z \approx 0,02—0,04$ мкм і $\Omega \approx 27—29''$ (кутових секунд). Концентрація і рухливість у підкладках при $T = 295$ К дорівнювали $n = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ та $\mu_n = 2 \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а густина дислокацій $(4—5) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. Процес дифузії акцепторної домішки кадмію у підкладки відбувався за температури $T = 550$ °С протягом 60 хв у вакуумованих кварцових ампулах. Для відтворення результатів і запобігання реєпаруванню миш'яку з поверхні підкладок процес дифузії реалізовувався з насичених парів кадмію за присутності насичених парів миш'яку. Поверхня зразків після дифузії мала дзеркальний вигляд, а півширина кривих коливання становила $31—33''$, що свідчило про відсутність структурно-порушень приповерхневих шарів, які могли утворитися внаслідок виділення кадмію у другу фазу через досягнення граничної його розчинності, що спостерігалось, наприклад у праці [10]. Глибина залягання $p—n$ -переходів знаходилась в межах $l \approx 4—5$ мкм і визначалась методом пошарового стравлювання p -області переходів на стадії виготовлення мезаструктур з вимірюванням знака термоЕРС. Зразки виготовлялись з однаковою площею мезаструктур $A \approx 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$, а товщина бази $p—n$ -переходів становила ~ 660 мкм. Для виготовлення мезаструктур використовувався полірувальний протравлювач того самого складу, що і у разі хіміко-планарної обробки підкладки. Омічні контакти до p -InAs наносились на всю активну поверхню мезаструктури методом термічного вакуумного напилювання тонких шарів цинку й індію, а також індію на поверхню підкладок n -InAs з наступною термообробкою в атмосфері очищеного водню [11]. ВАХ вимірювались методом постійного струму в інтервалі температур $77—298$ К, а високочастотні ($f = 1$ МГц) вольт-фарадні характеристики (ВФХ) за $T = 77$ К.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Типові ВАХ мезаструктурних InAs $p—n$ -переходів за $T = 77$ К наведено на рис. 1. Як бачимо, прями ВАХ, які реалізуються у разі прикладання до p -області переходів напруги зміщення позитивної полярності, незалежно від способу обробки мезаструктури, збігаються. Дифузійний потенціал $p—n$ -переходу, визначений за методикою струмової напруги

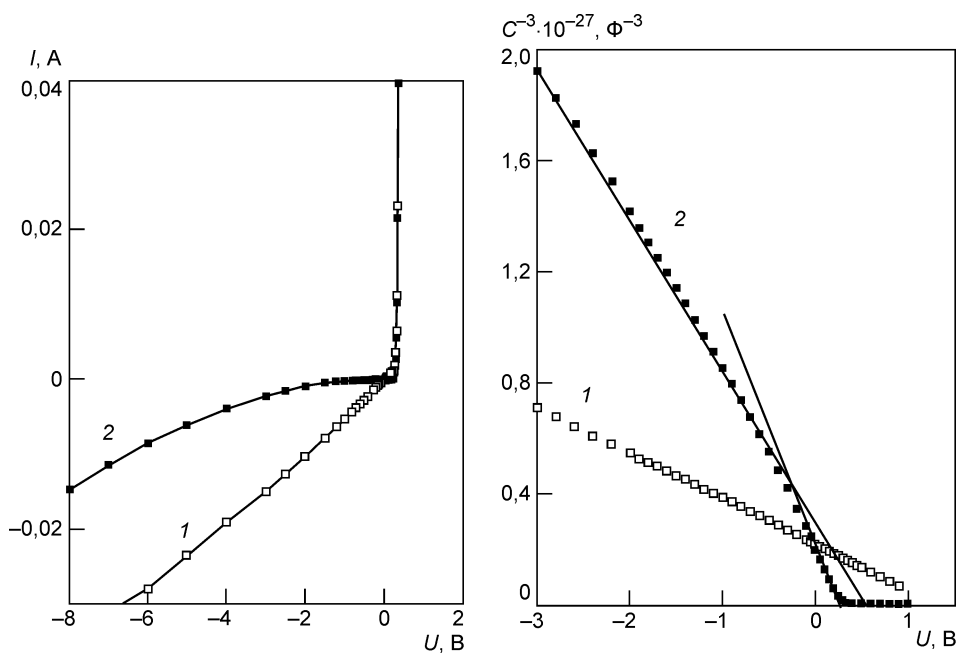


Рис. 1. ВАХ InAs p — n -переходу ($T = 77$ К) у разі різних хімічних обробок мезаструктури: 1 — вихідна обробка бромвмістним протравлювачем; 2 — після обробки протравлювачем на основі азотної кислоти

Рис. 2. ВФХ InAs p — n -переходу ($T = 77$ К) у разі різних хімічних обробок мезаструктури: 1 — вихідна обробка бромвмістним протравлювачем; 2 — після обробки травником на основі азотної кислоти

відсічки за $T = 77$ К, становив $U_D = 0,35 \pm 0,01$ В і не залежав від хімічної обробки мезаструктури. Вихідна мезаструктура оброблялася з використанням бромвмісного протравлювача. Повторна обробка тих самих зразків виконувалась за допомогою протравлювача на основі азотної кислоти. Суттєві відмінності спостерігаються у поведінці зворотних ВАХ (див. рис. 1): для мезаструктури з вихідною обробкою залежність $I(U)$ є майже лінійною (крива 1), а після повторного травлення (крива 2) значення струму суттєво зменшилися і ВАХ набула вигляду, характерного для плавного пробою p — n -переходу [12]. Коефіцієнт випрямлення γ за $U = \pm 0,4$ В для вихідної і травленої мезаструктури InAs p — n -переходу становив відповідно 26 та 860, що вказує на наявність значної поверхневої провідності у вихідній мезаструктурі, яка шунтує ОПЗ переходу. Суттєвим є вплив поверхневої провідності мезаструктури на важливий параметр R_0A , що визначає якість p — n -переходів (фотодіодів) за ознакою рівня темного струму. Для вихідної і травленої мезаструктур значення R_0A p — n -переходу за $T = 77$ К відповідно дорівнювало 14 та 790 Ом \cdot см².

Результати досліджень ВФХ за $T = 77$ К наведено на рис. 2, з якого видно, що експериментальні дані задовільно лінеаризуються в координатах $C^{-3}(U)$, що вказує на плавний характер зміни основних носіїв заряду на межі p — n -переходу. При цьому нахил залежності $C^{-3}(U)$ для вихідної мезаструктури (крива 1) суттєво менший, ніж для травленої (крива 2), а смісна напруга відсічки $U_C \approx 1,4$ В значно перевищує E_g InAs за $T = 77$ К. Експериментальні результати вимірювання ВФХ p — n -переходу з травленою мезаструктурою задовільно апроксимуються двома прямими з різним нахилом, і цей факт вказує на складний характер розподілу легуючої домішки в примежевій області p — n -переходу. Різним

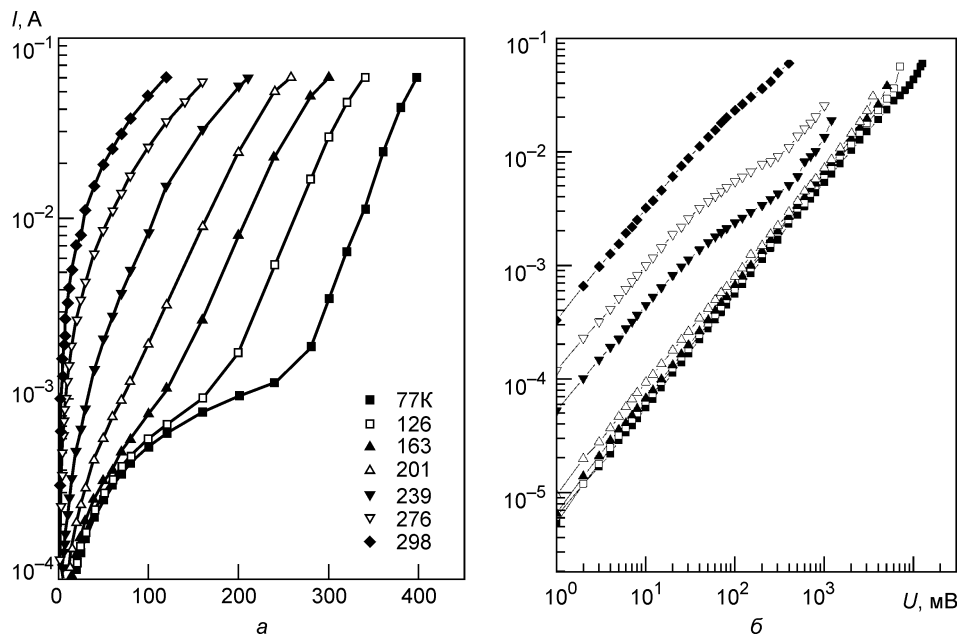


Рис. 3. Прямі (а) та зворотні (б) ВАХ за різних температур із вихідною обробкою мезаструктури бромвмістним протравлювачем

є значення U_C для цих лінійних ділянок, екстраполяція яких до перетину з віссю напруг дає значення $\sim 0,5$ та $0,35$ В (див. рис. 2, крива 2), причому $U_C = 0,35$ В добре збігається зі значенням U_D , визначеним за напругою відсічки прямих ВАХ за $T = 77$ К. За нахилом прямих було оцінено градієнт концентрації основних носіїв заряду a для травленої мезаструктури, значення якого дорівнювали $1,4 \cdot 10^{20}$ та $1,9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}$, причому менше значення a відповідає прямій із більшим нахилом. Для вихідної обробки мезаструктури $a = 6,8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}$. Як видно з рис. 2, значення C_0^{-3} за $U = 0$ збігаються, причому товщина ОПЗ $W_0 = 0,6$ мкм. Відзначимо також нетривіальний характер поведінки ВФХ із травленою мезаструктурою (крива 2) у разі прямих зміщень $U > E_g/q$. Відсутність залежності ємності від зміщення свідчить про наявність високоомної компенсованої області на межі переходу.

Наведемо характерні особливості поведінки прямих і зворотних ВАХ InAs p — n -переходу з вихідною обробкою мезаструктури, поданих на рис. 3, а, б. Прямі ВАХ в інтервалі температур 77—163 К за напруги зміщення $U \leq 80$ мВ збігаються за значенням і не залежать від температури. Перебудова експериментальних даних цих ділянок ВАХ у подвійних логарифмічних координатах засвідчила омичний характер поведінки $I(U)$ із шунтуючим опором $R_{ш} \approx 184$ Ом для $U = +50$ мВ за $T = 77$ К. Зі збільшенням напруги зміщення спостерігається перехід лінійної ділянки ВАХ в експоненціальну. У разі високих рівнів інжекції носіїв заряду виявляється вплив послідовного опору R_S на експоненціальний характер поведінки ВАХ. Значення R_S змінюється від 0,8 Ом ($T = 77$ К) до 1,5 Ом ($T = 298$ К). Оцінка вкладу базової n -області у послідовний опір не перевищує $1 \cdot 10^{-2}$ Ом за $T = 77$ К, що вказує на переважаючий вклад у R_S компенсованої та p -області переходу. Прямі ВАХ InAs p — n -переходів із вихідною обробкою мезаструктури можливо описати залежністю

$$I = G_0 U + I_0 \exp\left(\frac{eU - IR_S}{\beta kT}\right), \quad (1)$$

де G_0 — провідність шунтувального шару; I_0 — передекспоненціальний множник; β — коефіцієнт неідеальності. Зазначимо, що значення β змінюється від 4,8 ($T = 77$ К) до 2,3 ($T = 201$ К), а за $T \geq 201$ К $\beta = 2,0$. Унаслідок зменшення дифузійного по-

тенціалу зі збільшенням температури діапазон експоненціальної залежності $I(U)$ зменшується, а вплив R_S збільшується, що і обумовлює неекспоненціальний характер поведінки прямих ВАХ за $T > 239$ К (див. рис. 3, *a*). Врахування впливу R_S на ВАХ, як це показано у праці [5], дає змогу виявити експоненціальну ділянку, за якою було визначено параметри β та I_0 . На рис. 3, *б* показано зворотні ВАХ, з яких видно, що в інтервалі температур 77—201 К залежності $I(U)$ у широкому діапазоні напруг зміщення мають лінійний характер поведінки і збігаються за значеннями. За $T > 201$ К зворотні ВАХ набувають типового характеру поведінки і в діапазоні напруг $1 < U < 50$ мВ $I \sim U^m$ з $m = 1,0$, зі збільшенням U лінійна ділянка ВАХ переходить в сублінійну з $m \approx 0,5$, а за $U > 0,2$ В — у надлінійну. Диференціальний опір шунтувального ОПЗ p — n -переходу шару за $U = -50$ мВ становить ~ 180 Ом для $T = 77$ К і задовільно узгоджується за значенням цього параметра за $U = +50$ мВ, що свідчить про досить високу концентрацію носіїв заряду у шунтувальному шарі і слабку температурну залежність їх рухливості. З підвищенням температури ($T > 201$ К) диференціальний опір p — n -переходу в усьому діапазоні зворотних напруг менший за опір шунтувального шару, і тоді характер поведінки ВАХ у значній мірі визначається переходом.

Результати досліджень ВАХ для травленої мезаструктури InAs p — n -переходу наведено на рис. 4, *a*, *б*. Відзначимо особливості їх поведінки порівняно з ВАХ переходу з вихідною обробкою мезаструктури. По-перше, не виявлено впливу шунтувального шару на прямі і зворотні ВАХ, значення темнових струмів зменшилось майже на два порядки, а пряма ВАХ в інтервалі температур 77—163 К може апроксимуватись виразом

$$I = I_{01} \exp\left(\frac{eU}{E_0}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{eU - IR_S}{\beta kT}\right), \quad (2)$$

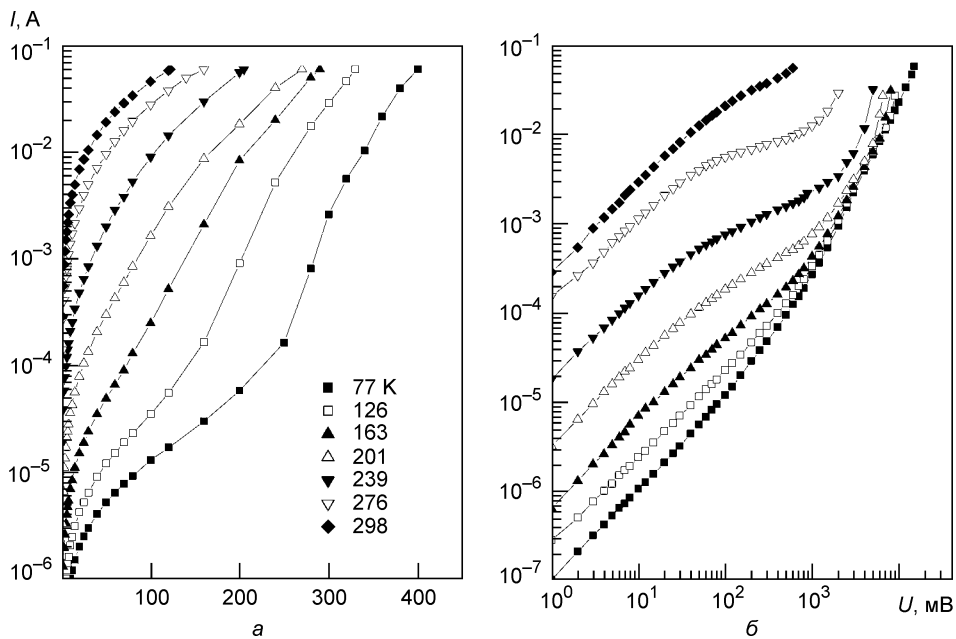


Рис. 4. Прямі (*a*) та зворотні (*б*) ВАХ за різних температур з обробкою мезаструктури у протравлювачі на основі азотної кислоти

де I_{01} , I_{02} — передекспоненційні множники, E_0 — характеристична енергія. Для прямої ВАХ ($T = 77$ К) значення I_{01} , I_{02} та E_0 такі: $2,9 \cdot 10^{-6}$, $6,0 \cdot 10^{-13}$ А та 67 меВ. Коефіцієнт неідеальності ВАХ $\beta = 1,9$ — $2,0$ для інтервалу температур 77—290 К, що вказує на генераційно-рекомбінаційний механізм перенесення заряду, а R_S змінюється від 0,8 Ом ($T = 77$ К) до 1,5 Ом (298 К), як і у p — n -переході з вихідною обробкою мезаструктури. По-друге, зворотні ВАХ задовільно апроксимуються

степенною залежністю $I \sim U^m$, і характер їх поведінки суттєво відрізняється від зворотних ВАХ із вихідною мезаструктурою. За напруг $U < 50$ мВ спостерігається лінійна ділянка, а в діапазоні напруг $0,2 \leq U \leq 1,0$ В та в інтервалі температур $T \geq 163$ К — сублінійна з $m \geq 0,3—0,4$, що характерно для генераційно-рекомбінаційного механізму перенесення заряду у плавних $p-n$ -переходах. У інтервалі температур $77—126$ К за $U > 1$ В реалізується надлінійний ($m = 19—20$) характер поведінки $I(U)$, причому експериментальні дані струму для однієї й тієї самої напруги є близькими і не залежать від температури, що вказує на тунельний механізм пробою. Зі збільшенням температури $T \geq 163$ К напруга пробою зменшується, що також характерно для тунельного механізму пробою [13].

За параметром R_0A у разі теплового характеру шуму у фотодіоді можна оцінити максимальне значення питомої виявлюваної здатності D_λ^* , використавши співвідношення [14]

$$D_\lambda^* = \frac{e}{hc} \eta \lambda \left(\frac{R_0A}{4kT} \right)^{1/2} = S_i \left(\frac{R_0A}{4kT} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

де h — стала Планка; c — швидкість світла; η — квантова ефективність фотодіода; λ — робоча довжина хвилі; S_i — монохроматична ампер-ватна чутливість. Тому важливо з'ясувати вплив хімічної обробки мезаструктури $p-n$ -переходів на значення параметра R_0A і його температурну залежність. Диференціальний опір R_0 визначався з прямих ВАХ за $U = +5$ мВ. Наявність поверхневої провідності катастрофічно обмежує значення $R_0A = 14$ Ом \cdot см² у разі вихідної обробки мезаструктури і $R_0A = 790$ Ом \cdot см² у травленій для $T = 77$ К. Суттєво розрізняються і температурні залежності $R_0A(10^3/T)$, побудовані в напівлогарифмічних координатах $\lg(R_0A) - 10^3/T$. У $p-n$ -переходах з вихідною обробкою мезаструктури в інтервалі температур $77—150$ К R_0A не залежить від температури, а у переходах із травленою мезаструктурою спостерігається плавне зменшення R_0A зі збільшенням температури, що характерно для тунельного механізму струмопроходження [5, 6]. В інтервалі температур $200—298$ К залежність $R_0A(10^3/T)$ має експоненціальний характер з енергією активації $\Delta E \approx 0,23$ еВ для обох видів обробки мезаструктури $p-n$ -переходів. Враховуючи ту обставину, що для цього самого інтервалу температур для прямих ВАХ $\beta \approx 2,0$, а енергія активації $\Delta E \approx E_g/2$, можна однозначно стверджувати про обумовленість залежності $R_0(T)$ генераційно-рекомбінаційними струмами $p-n$ -переходу.

Таким чином, мезаструктурні InAs $p-n$ -переходи, виготовлені з використанням броммістного протравлювача, можуть спричинити виникнення надлишкових темнових струмів, які катастрофічно зменшують параметр R_0A в інтервалі температур $77—160$ К. Враховуючи результати даної праці, а також [2—4], можна припустити, що надлишкові струми пов'язані з формуванням на поверхні p -області переходів шунтувального шару, обумовленого закріпленням рівня Фермі поверхневими станами межі власний оксид — p -InAs у зоні провідності. Унаслідок такого значного вигину енергетичних зон у приповерхневій p -області утворюється вроджений інверсійний шар n -типу провідності. Вимірювання параметрів InAs $p-n$ -переходів із шунтувальним інверсійним шаром за методикою височастотних ВФХ є некоректним через вплив на бар'єрну ємність переходу бар'єрної ємності структури з інверсійним шаром, локалізованої по периметру приповерхневої p -області. Обопільний вплив значного рівня шунтувального струму $p-n$ -переходу за низьких температур на вимірювання прямих ВАХ і послідовного опору може скоротити експоненціальний діапазон зміни $I(U)$ й призвести до завищеного значення $\beta > 2$ та помилкового припущення про тунельний механізм струмопроходження.

Повторна обробка мезаструктур тих самих $p-n$ -переходів протравлювачем, виготовленим на основі азотної кислоти, зменшує темнові струми майже на два порядки, і в інтервалі температур $77—160$ К спостерігається їх температурна зале-

жність, характерна для тунельних струмів. Така зміна у поведінці ВАХ може пояснюватись на підставі припущення, що повторна хімічна обробка мезаструктур змінює енергетичну структуру гетеропереходу власний оксид— p -InAs. Наприклад, це може відбутися у разі зміни складу оксиду, який виявляє пасивувальні властивості й значно зменшує густину поверхневих станів гетеромежі, що, в свою чергу, спричиняє зменшення вигину енергетичних зон на гетеромежі й унеможливує формування інверсійного шару. З'ясування механізму взаємодії такого протравлювача з p -InAs потребує додаткового детального дослідження.

Прямі ВАХ в інтервалі температур 77—160 К задовільно апроксимуються двома експоненціальними ділянками і описуються формулою (2). Перша складова формули відповідає тунельним струмам, які реалізуються у p — n -переході за участю дислокацій, що перетинають його активну область [5, 6, 15]. Друга складова формули описує генераційно-рекомбінаційні струми, які реалізуються за більших напруг зміщення крізь область переходу, вільну від дислокацій. Зі збільшенням температури $T \gg 160$ К вклад генераційно-рекомбінаційної складової струму зростає, і на прямих ВАХ спостерігається лише одна експоненціальна ділянка.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що використання протравлювача 2 % $\text{Br}_2 + \text{HBr}$ для виготовлення мезаструктур в плавних InAs p — n -переходах призводить до виникнення поверхневої шунтувальної провідності. Повторна хімічна обробка мезаструктур у протравлювачі на основі азотної кислоти суттєво зменшує темнові струми та вплив шунтувальної провідності на ВАХ переходів.

2. Показано, що темновий струм в p — n -переходах після повторної хімічної обробки мезаструктур визначається процесами генерації та рекомбінації носіїв в ОПЗ для інтервалу температур 160—298 К, а за температур менших ніж 160 К — тунелюванням за участю дислокацій.

**A.V. Sukach, V.V. Tetyorkin, I.O. Mazarchuk, M.M. Krolevets,
V.I. Lukyanenko, I.G. Lutsishyn**

EFFECT OF SURFACE CONDUCTIVITY ON ELECTRICAL PROPERTIES OF MESA-STRUCTURE InAs p — n -JUNCTIONS

The effect of surface conductivity on electrical properties of linearly-graded mesastructure InAs p — n junctions prepared by diffusion method is investigated. It is established that mesastructures prepared by chemical etching in 2 % $\text{Br}_2 + \text{HBr}$ etchant result in shunt surface conductivity. After the repeated chemical treatment in the etchant based on nitric acid the dark current is decreased substantially. It is shown, that the dark current in these mesastructures is determined by generation and recombination processes in the depletion region at temperatures of 160—298 K, while at temperatures lower than 160 K it is determined by tunneling caused by dislocations.

Keywords: InAs, p — n -junction, surface conductivity, chemical treatment.

1. Андо Т., Фаулер А., Стерн Ф. Электронные свойства двумерных систем. — М.: Мир, 1985. — 416 с.
2. Поверхностный потенциал и поверхностные состояния в монокристаллах InAs / Л.А. Балагуров, О.Ю. Борковская, Н.Л. Дмитрук и др. // ФТП. — 1976. — **10**, № 6. — С. 1108—1114.
3. Структура металл—полупроводник на основе p -InAs / Н.П. Есина, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев и др. // ФТП. — 1983. — **17**, № 6. — С. 991—995.
4. Природа отрицательного дифференциального сопротивления неидеального барьера Шоттки на основе арсенида индия / А.В. Каламейцев, Д.А. Романов, А.П. Ковчавцев и др. // Там же. — 1997. — **31**, №3. — С. 370—376.
5. Исследование механизмов переноса заряда в диффузионных InAs p — n -переходах / А.В. Сукач, Г.С. Олейник, В.В. Тетеркин и др. // ОПТ. — Киев: Наук. думка, 2005. — Вып. 40. — С. 248—257.
6. Сукач А.В., Тетеркин В.В. Трансформация электрических свойств InAs p — n -переходов в результате ультразвуковой обработки // Письма в ЖТФ. — 2009. — **35**, № 11. — С. 67—75.

7. Сульфидная пассивация поверхности арсенида индия / Ю.А. Кудрявцев, Е.Б. Новиков, Н.М. Стусь и др. // ФТП. — 1992. — **26**, № 10. — С. 1742—1749.
8. Сульфидная пассивация фотодиодных гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb / И.А. Андреев, Е.В. Куницына, В.М. Лантратов и др. // Там же. — 1997. — **31**, № 6. — С. 653—657.
9. Планарные фотодиоды на основе InAs материала / В.М. Астахов, Ю.А. Данилов, В.Ф. Дудкин и др. // Письма в ЖТФ. — 1992. — **18**, № 3. — С. 1—5.
10. Новикова Л.Н., Стафеев В.И., Русин Б.А. Исследование дефектов, возникающих в InAs при диффузии кадмия // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. — 1974. — **10**, № 12. — С. 2121—2124.
11. Влияние термообработки на электрические, шумовые характеристики структур In/Zn/p-InAs и In/n-InAs / А.В. Любченко, А.В. Сукач, С.А. Сыпко и др. // ОПТ. — Киев: Наук. думка, 2000. — Вып. 35. — С. 149—156.
12. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003. — 636 с.
13. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984. — Т. 1. — 456 с.
14. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / Под ред. Р.Дж. Кисес. — М.: Радио и связь, 1985. — 328 с.
15. Дислокационное происхождение и модель избыточно-туннельного тока в p — n -структурах на основе GaP / В.В. Евсупов, М. Джумаева, Ю.В. Жилиев и др. // ФТП. — 2000. — **34**, № 11. — С. 1357—1362.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова
НАН України
Проспект Науки, 41
03028 Київ

Отримано 12.03.2010