

УДК 539.21:537.1

Дослідження впливу матеріалу електродів на перенесення носіїв заряду в структурах Si – Ge₃₃As₁₂Se₅₅

М.І.Довгошей, О.Б.Кондрат, М.Д.Савченко, Ю.Й.Сідор
Ужгородський державний університет, 294000, м.Ужгород, вул.Підгірна, 46

Досліджені вольт-амперні характеристики p-Si, плівок Ge₃₃As₁₂Se₅₅ і гетероструктур p-Si – Ge₃₃As₁₂Se₅₅ з блокуючими (In) та інжектуючими (Sb) контактами. Встановлено, що на межі поділу p-Si – In і Ge₃₃As₁₂Se₅₅ – In утворюються бар'єри Шотткі. При використанні контактів із Sb перенесення носіїв заряду через плівки Ge₃₃As₁₂Se₅₅ і гетероструктуру p-Si – Ge₃₃As₁₂Se₅₅ при прямому зміщенні визначається струмами, обмеженими просторовим зарядом, а при зворотньому зміщенні – висотою бар'єра на гетеропереході.

Ключові слова: контактні явища, перехідний шар, гетероструктура, електрофізичні параметри, поверхневі стани.

Стаття постуила до редакції 6.12.1999; прийнята до друку 13.12.1999

I. Вступ

Дослідження явища переносу носіїв заряду в гетероструктурах дає одну з основних інформацій про їх енергетичну структуру. При цьому необхідно враховувати процеси, які відбуваються як на межі поділу двох напівпровідників, так і на межі поділу метал-напівпровідник. Це зумовлено тим, що реальна поверхня напівпровідників після хімічної, електрохімічної або механічної обробки покрита окисним шаром. Товщина окисного шару для такого напівпровідника, як кремній, лежить в межах від 1 до 6 нм [1].

Відомо [2], що вплив сильного поля на вольт-амперні характеристики (ВАХ) зумовлений головним чином зміною функції розподілу і рухливості носіїв заряду, або зміною їх швидкості генерації, рекомбінації, інжекції, або одночасно зміною всіх цих параметрів. Дослідження ВАХ дозволяє встановити механізм переносу носіїв заряду і визначити деякі параметри напівпровідників [1-6]. Матеріал

контактів також відіграє важливу роль в проходженні струму через плівкові структури [7]. Так, наприклад, в роботі [8] досліджені особливості проходження струму в аморфній трьохселенистій сурьмі при наявності інжектуючих (Sb) і блокуючих (In) контактів. Раніше в роботах [9–16] вже вивчалися фізичні аспекти формування перехідного шару плівка Ge₃₃As₁₂Se₅₅ – p-Si і досліджувалися основні їх фізичні властивості. Для з'ясування впливу типу контактів на вольт-амперні характеристики гетероструктур Ge₃₃As₁₂Se₅₅ – p-Si в даній роботі вимірювання проведені на зразках з електродами із Sb і In, які мають роботу виходу відповідно рівну 4,08 eВ і 3,8 eВ [17].

II. Методика експеримента

При одержанні гетероструктур використовувалися халькогенідні стекла Ge₃₃As₁₂Se₅₅ і монокристалічний епітаксціальний p-Si, легований бором,

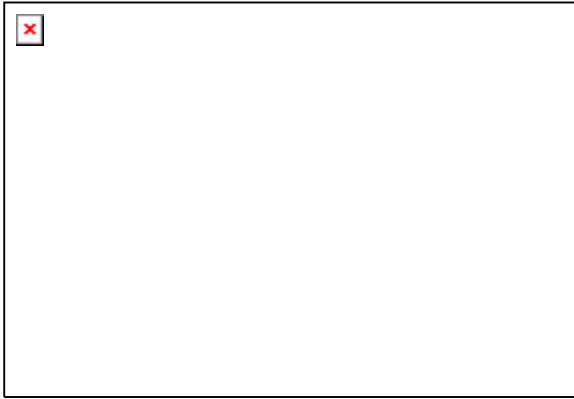


Рис.1 Вольтамперні характеристики "сендвіч"-структур М – $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ – М, де М - Sb (крива 1) і In (крива 2) при температурі 300 К. Товщина плівки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ рівна 0,5 мкм.



Рис.2 Вольт-амперна характеристика планарної структури Sb – $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ – Sb ($L=10^{-3}$ см). На вставці показана залежність інжекційного струму від напруги.

марки ЭКДБ з орієнтацією (111). Стекла $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ одержані з використанням Ge марки ОСЧ "В-6", As металічного марки ОСЧ-19-5 і Se марки ОСЧ-17-4, який очищався методом вакуумної дистиляції. Напилення плівок $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ на підкладки із Si проводилося термічним методом із ефузійних комірок на установці ВУП-5 у вакуумі $\sim 10^{-4}$ Па. Перед напиленням плівок підкладки із Si, після їх кінцевої очистки, прогрівалися у вакуумній камері напилювальної установки при температурі 450 К на протязі однієї години, а потім охолоджувалися до необхідної температури.

Середня швидкість напилення плівок складала 8,0 нм/с. Після охолодження підкладок і розгерметизації вакуумної системи на одержаний зразок з боку плівки кріпилася маска з круглими отворами діаметром $1,0 \pm 0,1$ мм. Потім після повторної відкачки вакуумної системи проводилась іонна очистка підкладки і термічне напилення контактів із Sb. Контакти із In на Si наносилися безпосередньо перед проведенням експеримента. Методика дослідження ВАХ аналогічна приведеній у роботі [18].

III. Експериментальні результати та їх обговорення

На рис.1 приведені ВАХ, виміряні при $T = 300$ К і побудовані в логарифмічному і напівлогарифмічному масштабі для "сендвіч"-структур М - $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ - М, де М - Sb (крива 1) і In (крива 2). Їх аналіз показує, що при використанні контактів із Sb ВАХ описується степеневим законом $j \sim V^n$, де j – густина струму, V - напруга, $n=2,7$ (n - показник степеневі залежності $j = f(V^n)$). В даному випадку це може свідчити про наявність струмів, обмежених просторовим зарядом. При використанні контактів із In ВАХ цих структур описується експоненціальним законом $J \sim \exp(\text{const } V)$, що може свідчити про утворення на контакті бар'єра Шоткі [20].

На рис.2 приведена ВАХ планарної структури $\text{Sb}-\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}-\text{Sb}$ з міжелектродною відстанню $L=10^{-3}$ см, побудована в координатах $\lg j = f(\lg V)$. Аналіз одержаних залежностей показує, що при електричних полях $E = 2 \cdot 10^4$ В/см має місце різке збільшення густини струму з $n \sim 10$. За ним іде ділянка ВАХ з $n=2,7$, яка переходить в квадратичну залежність.

Досліджувані зразки необхідно розглядати як довгу інжекційну структуру, оскільки міжелектродна відстань $L > l_k$, де l_k - приконтактна диференціальна довжина спаду концентрації, яка складає для напівпровідника $l_k = 10^{-3} \div 10^{-5}$ см [7]. З

іншого боку, радіус екранування Дебая-Гюккеля l_e складає приблизно 10^{-2} см, тому у випадку для $L=10^{-3}$ см можна використати наближення низькоінжекційного бездифузійного режиму ВАХ. Для такого випадку, побудуємо залежність $\lg j_i = f(V)$, де j_i - інжекційна густина струму, яка визначається по формулі [7]:

$$j_i = \frac{j^2(V)}{j(V) - \sigma(V/L)}, \quad (1)$$

де $\sigma = (dj/dV)_{V \rightarrow 0}$. (2)

Як показали розрахунки інжекційної сили струму j_i від напруги V (рис.2, вставка), струм j_i зростає з ростом V , що свідчить про наявність інжектуючих контактів. Тому різке збільшення густини струму при $V_{ГЗВ} = 20$ В може бути обумовлено граничним заповненням вловлювачів (ГЗВ), так як ділянка ВАХ з $n \sim 10$ переходить в квадратичну залежність. Відомо [2,20], що в такому режимі концентрація рівноважно захоплених дірок вловлювачами з однорідним розподілом рівнів може бути підрахована в практичних одиницях по формулі:

$$N_t = 1,1 \cdot 10^6 \varepsilon \frac{V_{d,e}}{\Delta E \cdot L^2} (-^{--3} \cdot H e^{-1}), \quad (3)$$

де $\varepsilon=7,8$ - діелектрична проникливість досліджуваного матеріалу [8]. Це відповідає $N_t = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ при ширині зони розподілу центрів захвату $\Delta E=0,025$ eV [19].

На рис.3 зображена вольт-амперна характеристика переходу In - Si р-типу, побудована в координатах $\lg I = f(V)$.

Видно, що ВАХ добре описується рівнянням Шоттки для струму, що протікає через бар'єр, яке має вигляд [19]:

$$I = I_0 [\exp(qV/\eta kT) - 1], \quad (4)$$

де $I_0 = A T^2 \exp(-q\Phi_B/kT)$, (5)

де A - квазіконстанта Річардсона, T - температура, Φ_B - висота бар'єра, k - стала Больцмана, q - заряд електрона, η - емпіричний множник. Отже проходження струму на переході In-p-Si визначається бар'єром на контакті метал-напівпровідник.

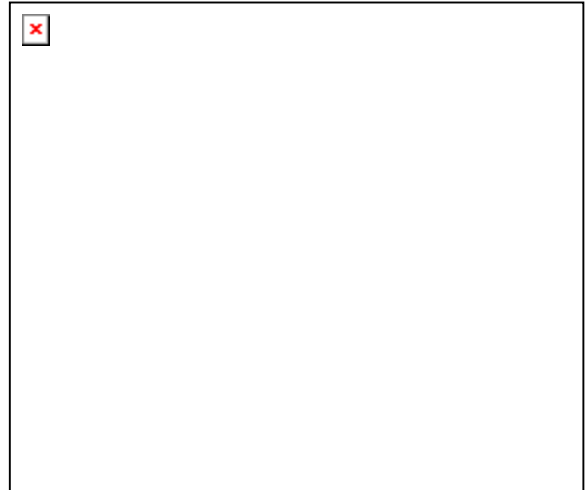


Рис.3 Вольт-амперна характеристика структури In - p-Si - In, побудована в координатах $\lg I = f(V)$ при різній полярності на електродів. Пунктиром показаний кут нахилу характеристики, що відповідає $\eta=1$.

Товщина p-Si рівна 0,5 мм.

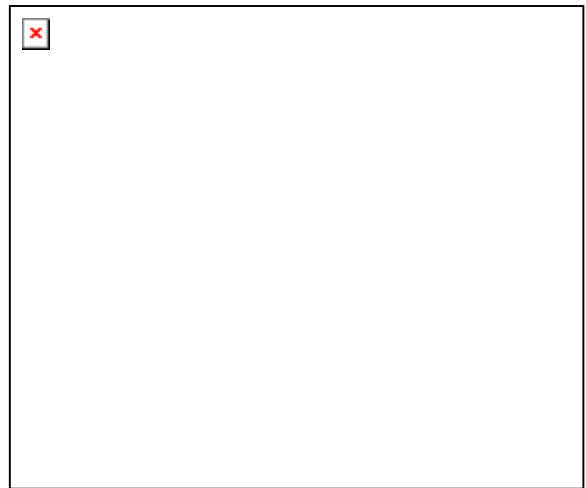


Рис.4 Вольт-амперна характеристика гетероструктури M-Ge₃₃As₁₂Se₅₅-Si-M, де M-In (криві 1-4) і Sb (криві 5, 6) при прямому (1, 3, 5, 5') і зворотньому (2, 4, 6) зміщенні для різної товщини плівки Ge₃₃As₁₂Se₅₅ h (мкм): 1, 2 - 0,1; 3-6 - 0,5. Пунктиром (крива 5') показана крива 5, побудована в логарифмічному масштабі.

При використанні контактів із Sb ВАХ переходу Sb-p-Si були лінійними.

На рис.4 приведена ВАХ для гетероструктури Ge₃₃As₁₂Se₅₅ - Si при прямому і зворотньому зміщенні, що прикладається до електродів із In (криві 1-4), і Sb (криві 5, 6).

При використанні блокуючих контактів (In) ВАХ при прямому зміщенні (плюс

прикладений до $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$) може бути описана рівнянням, подібним до (4), але з коефіцієнтом ідеальності η для плівок $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ товщиною 0,1 і 0,5 мкм рівним відповідно 2,6 і 3,3 (рис. 4, прямі 1, 3). При зворотньому зміщенні при $V > 2$ В має місце перехід до насичення струму. Проходження струму через гетероструктуру при використанні інжектуючих контактів при прямому зміщенні визначається механізмом перенесення заряду в аморфній плівці, а при зворотньому зміщенні – висотою бар'єра на гетеропереході. Подібна ВАХ характерна для ізотипних гетеропереходів із врахуванням станів на межі поділу [21]. При використанні інжектуючих контактів (Sb) ВАХ у прямому напрямку описується степеневим законом $j \sim V^n$, де $n=2$ (рис.4, крива 5').

Обмеження струму через гетероструктуру при прямому зміщенні визначається провідністю аморфної плівки, яке можна пояснити на основі моделі про D^+ центри [22]. Вважається, що D^+ центри в аморфних напівпровідниках утворюють донорні стани у верхній половині квазізабороненої зони, аналогічно до дрібних рівнів, а центри D^- - акцепторні стани, розташовані в нижній половині забороненої зони. З обох сторін від рівня Фермі розташовані два глибокі рівні, зв'язані з D^0 центрами. Як і для ряду релаксаційних напівпровідників [2], можна припустити, що при інжекції неосновних носіїв заряду в аморфній плівці існує область збіднення основними носіями

заряду, яка розташована поблизу контактів, тобто існує область низької провідності, питомий опір якої перевищує об'ємний питомий опір плівки.

При низьких напругах більша частина спаду напруги припадає на об'єм плівки. Із збільшенням рівня інжекції нерівноважні носії заряду починають захоплюватися D^- центрами, в результаті чого збільшується концентрація D^0 центрів, що приводить до обмеження струму просторовим зарядом. Це також приводить до різкого росту струму через планарну структуру (рис.2), який пов'язаний із граничним заповненням вловлювачів. Із збільшенням напруги збіднені шари розповсюджуються в об'єм плівки, що приводить до наближення ВАХ до квадратичного закону Мотта-Генрі [20].

IV. Висновки

Перенесення носіїв заряду через гетероструктуру аморфна плівка $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ – епітаксiальний p-Si при використанні контактів із In визначається бар'єром на межі поділу метал–аморфна плівка. При використанні контактів із Sb перенесення носіїв заряду через плівки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ і гетероструктуру p-Si – $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ при прямому зміщенні визначається струмами, обмеженими просторовим зарядом, а при зворотньому зміщенні – висотою бар'єра на гетеропереході.

- [1] В.И.Стриха, *Теоретические основы работы контакта металл-полупроводник*, Наукова думка, Київ (1974).
- [2] К.Као, В.Хуанг, *Перенос электронов в твёрдых телах*. Часть 2, Мир, Москва (1973).
- [3] W.van Roosbroeck, Current-carrier transport with space charge in semiconductors // *Phys. Rev.* 123, pp. 474-490 (1961).
- [4] W.van Roosbroeck, Electronic basis of switching in amorphous semiconductor alloys // *Phys. Rev. Lett.* 28. pp. 1120-1123 (1972).
- [5] W.van Roosbroeck, Principles of electrical behaviour of amorphous semiconductor alloys // *J. Non-Cryst. Solids*. 12. pp. 232-262 (1973).
- [6] А.М.Ефимов, В.А.Харьюзов, *Диэлектрические свойства и строение халькогенидных стёкол*. В сб. Структура и свойства некристаллических полупроводников, сс. 113-117, Наука, Ленинград (1976).
- [7] А.Н.Зюганов, С.В.Свечников, *Инжекционно-контактные явления в полупроводниках*, Наукова думка, Київ (1981).

- [8] В.М. Любин, В.С. Майдзинский, Особенности прохождения тока и фотоэлектронных процессов в аморфной трёхселенистой сурьме при наличии инжектирующих и блокирующих контактов // *ФТП.3(4)*, сс.1675-1679 (1969).
- [9] N.I.Dovgoshey, V.P.Svitlinets, I.E.Kacher, E.Yu.Remeta, V.V.Onopko, A.B.Kondrat, The formation of a transition layer in the Si - amorphous film heterostructures of Ge-As-Se system // *Proc. Inter. workshop on advanced technologies of multicomponent solid films and structures.*, pp. 76-78, Uzhgorod (1994).
- [10] Н.И.Довгошей, И.Э.Качер, А.Б.Кондрат и др., Формирование переходного слоя плёнки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ с подложкой Si // *Труды Украинского Вакуумного общества*, сс. 262-265, Харьков (1995).
- [11] Н.И.Довгошей, В.В.Онопко, И.Э.Качер, А.Б.Кондрат, Переходные слои и адгезионные свойства в структурах плёнка $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ - монокристалл кремния. // *Вакуумная техника и технология*. 6(2), сс.39-43 (1996).
- [12] N.D.Savchenko, A.B.Kondrat, T.N.Shchurova, N.I.Dovgoshey, Band splitting in heterojunctions chalcogenide film - crystalline semiconductor // *Труды Украинского Вакуумного общества*, сс. 262-265, Харьков (1997).
- [13] N.Savchenko, T.Shchurova, A.Kondrat, M.Trunov, V.Onopko, Deposition technique and external factors effect on $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ - Si heterostructure mechanical properties // *Proc. of SPIE*. 3182, pp. 308-313 (1997).
- [14] Н.И.Довгошей, В.Н.Жихарев, И.Э.Качер, А.Б.Кондрат. Формирование псевдоморфного слоя в гетероструктурах Si-аморфная плёнка Ge-As-Se(S) // *Вакуумная техника и технология*, 8(2), с.29-33 (1998).
- [15] О.Б.Кондрат, М.Д.Савченко, М.І.Довгошей. Технологія одержання та дослідження межі поділу ізотипних гетеропереходів $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ – p-Si // *ВАНТ. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*, 6(7), сс. 248-250, Харьков (1998).
- [16] Н.И.Довгошей, И.Э.Качер, А.Б.Кондрат, Физические аспекты формирования переходного слоя плёнки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ с подложкой Si // *Тонкие плёнки в электронике: Матер. VI Междун. симпозиума*, сс. 103-104, Москва-Киев-Херсон (1995).
- [17] *Таблица физических величин*, Справочник под ред. акад. И.К.Кикоин, Атомиздат, Москва (1976).
- [18] *Свойства структур металл-диэлектрик-полупроводник*, Под ред. А.В.Ржанова, Наука, Москва (1976).
- [19] А.Милнс, Д.Фойхт, *Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник*. Мир, Москва (1975).
- [20] М.Ламберт, П.Марк, *Инжекционные токи в твёрдых телах*, Мир, Москва (1973).
- [21] N.D. Savchenko, Energy band diagram for the $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ - Si heteroboundary // *Inst. Phys. Conf. Ser.* IOP Publishing Ltd. 152, p.723 (1998).
- [22] Н.Мотт, Э.Дэвис, *Электронные процессы в некристаллических веществах*, Т. 1,2, Мир, Москва (1982).

The influence electrode material on charge transition in structures Si – $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ investigation

N.I.Dovgoshey, O.B.Kondrat, N.D.Savchenko, Yu.J.Sidor

The current-voltage characteristics of epitaxial p-Si, amorphous $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ films and $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ – p-Si heterostructures with injection (Sb) and blocking (In) contacts are investigated. It is established, that current-voltage characteristics of In-p-Si and In- $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ junction may be described in the framework of simple Shottky model. By the use of injection contacts the current through the amorphous film and heterostructure at direct bias is restricted by spatial charge, which appears in the film; the current through the heterostructure at reverse bias is determined by the barrier height on the amorphous film – p-Si interphase.