

УДК 621.315.592

М.М. Ваків, Р.С. Круковський
Науково-виробниче підприємство «Карат»

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ МАГНІЮ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ШАРІВ АРСЕНІДУ ІНДІЮ, ОТРИМУВАНИХ МЕТОДОМ РФЕ

© Ваків М.М., Круковський Р.С., 2013

M.M. Vakiv, S.I. Krukovsky

PECULIARITIES OF MAGNESIUM INFLUENCE ON ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF INDIUM ARSENIDE LAYERS OBTAINED BY LPE METHOD.

© Vakiv M.M., Krukovsky S.I., 2013

Досліджено залежність концентрації та рухливості носіїв заряду в епітаксійних шарах InAs, отриманих із індієвих та вісмуткових розплавів, легованих магнієм, в інтервалі температур 670–550 °С. Встановлено, що при концентраціях Mg 0,07–0,12 ат % в розплавах вісмуту кристалізуються шари InAs n-типу провідності, а їх рухливість зростає від 70000 до 92000 см²/В·с. При концентраціях Mg ≈ 1,1 ат % в індієвих та при 0,56 ат % у вісмуткових розплавах кристалізуються шари p-InAs.

Ключові слова: арсенід індію, вісмут, структурні дефекти, легуюча домішка.

Concentration and mobility dependence of charge carriers in InAs epitaxial layers obtained from indium and bismuth melts doped by magnesium at 670-550 ° C temperature range has been studied. It was found that in bismuth melts at Mg concentrations 0,07-0,12 at% InAs layers with n-type conductivity are crystallized and their mobility increases from 70000 to 92000 cm²/V·s. Layers p -InAs are crystallized at Mg concentrations ≈ 1,1 at% in indium melts and at 0.56 at% in bismuth melts.

Key words: indium arsenide, bismuth, structural defects, dopant.

Вступ

Нелегований арсенід індію, отриманий різними методами, завжди має n-тип провідності [1]. Співвідношення As і In, а отже, кількість структурних дефектів і концентрація електронів у кристалі залежить від температури вирощування [2]. Для отримання матеріалу р-типу, в якості акцепторної домішки найчастіше використовують цинк, який добре розчиняється в InAs і дозволяє отримати матеріал з концентрацією дірок $p > 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [3]. Цинк, однак, – це швидко дифундує домішка. З епітаксійних шарів р-типу він може проникати в шари n-типу, розмиваючи границю розділу між ними, що ускладнює його використання в епітаксійних структурах з різкими р-n переходами. Щоб позбутись цього недоліку, деколи в якості акцептора в InAs використовують Mn [3]. У цьому випадку максимальна концентрація дірок може досягати значення $p \approx (5-8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Однак марганець створює глибокі рівні в InAs, тому його застосування в якості акцепторної домішки погіршує електрофізичні параметри [4] та люмінесцентні властивості таких шарів [5]. Альтернативною цинку домішкою, близькою до нього за властивостями, є

магній. Відомо, що коефіцієнт дифузії магнію в арсеніді індію на три порядки менший, ніж у цинку ($D_{Mg} = 1,98 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$, $D_{Zn} = 3,11 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$) [6]. У всіх з'єднаннях $A_{III}B_V$, вирощених різними методами, Mg виявляв себе як акцептор, заміщаючи атоми In [7]. Проте його вплив на електрофізичні властивості епітаксійних шарів, отримуваних із вісмуткових розплавів, не вивчали.

Метою роботи є дослідження впливу магнію на електрофізичні параметри та морфологію поверхні шарів InAs, отримуваних методом рідиннофазної епітаксії з індієвих та вісмуткових розплавів.

Методика експерименту

Шари InAs були вирощені методом рідиннофазної епітаксії із індієвих та вісмуткових розплавів, легованих магнієм в графітовій касеті поршневого типу в температурному інтервалі 670–550 °С. Використовували підкладки InAs (100), $n \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Концентрація магнію в індієвих та вісмуткових розплавах змінювалась від 0 до 1,1 ат %. Для визначення електрофізичних параметрів використовували методики ефекту Холла та електрохімічне вольт-фарадне профілювання (CV-профілювання) на установці Assent. Для встановлення профілю розподілу основних носіїв заряду по товщині шару, серію зразків готували таким способом. Епітаксійні шари розколювали на кілька частин, кожна з яких травили у травнику $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 = 1 : 1 : 1$ впродовж різного часу (5–30 хв). Швидкість травлення становила 15 – 20 мкм/хв за температури $T_{\text{тр}} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$. У результаті були отримані зразки з різною товщиною нарощеного шару. На поверхні отриманих таким способом зразків концентрацію носіїв заряду визначали з вольт-фарадних характеристик, виміряних на границі розділу електроліт–напівпровідник.

Експериментальні дані та обговорення результатів

На рис. 1 наведені залежності концентрації носіїв заряду в епітаксійних шарах InAs від концентрації Mg в індієвому (крива 1) та вісмутковому (крива 2) розплавах. Як видно із рисунку при концентраціях Mg приблизно 0,1 ат %, концентрація електронів зменшується до $\sim 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для індієвих та до $\sim 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для вісмуткових розплавів. При концентраціях Mg приблизно 1,1 ат % для індієвих та 0,56 ат % для вісмуткових розплавів настає інверсія типу провідності. При подальшому збільшенні концентрації Mg в індієвих розплавах до 1,3 ат % концентрація основних носіїв (дірок) досягає рівня $(8-9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. При збільшенні концентрації Mg у вісмуткових розплавах до 1,2 ат %, концентрація дірок в епітаксійних шарах становить $\sim 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 2 наведені залежності рухливості носіїв заряду в епітаксійних шарах InAs від концентрації Mg в індієвому (крива 1) та вісмуткових (крива 2) розплавах. Як видно із рисунку при концентраціях Mg приблизно 0,1 ат %, рухливість електронів зростає до $\sim 7,2 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для індієвих та до $\sim 9 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для вісмуткових розплавів. При концентраціях Mg приблизно 1,1 ат % для індієвих та 0,56 ат % для вісмуткових розплавів настає інверсія типу провідності. У разі подальшого збільшення концентрації Mg в

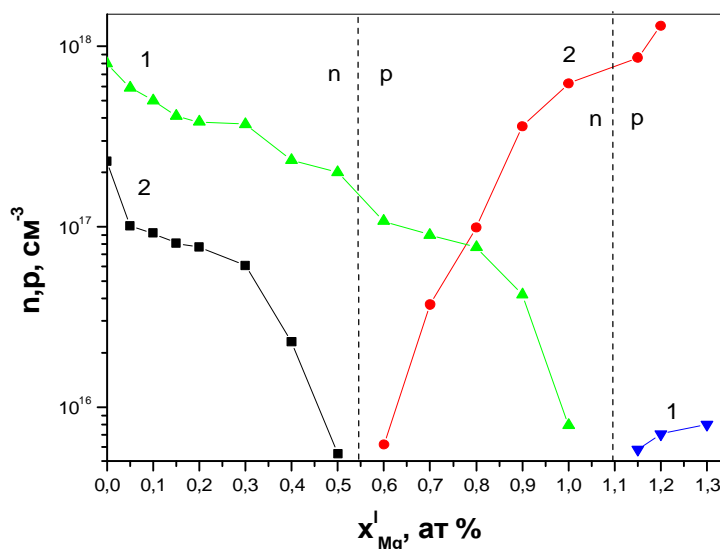


Рис. 1. Залежності концентрації носіїв заряду в епітаксійних шарах InAs від концентрації Mg в індієвому (крива 1) та вісмуткових (крива 2) розплавах

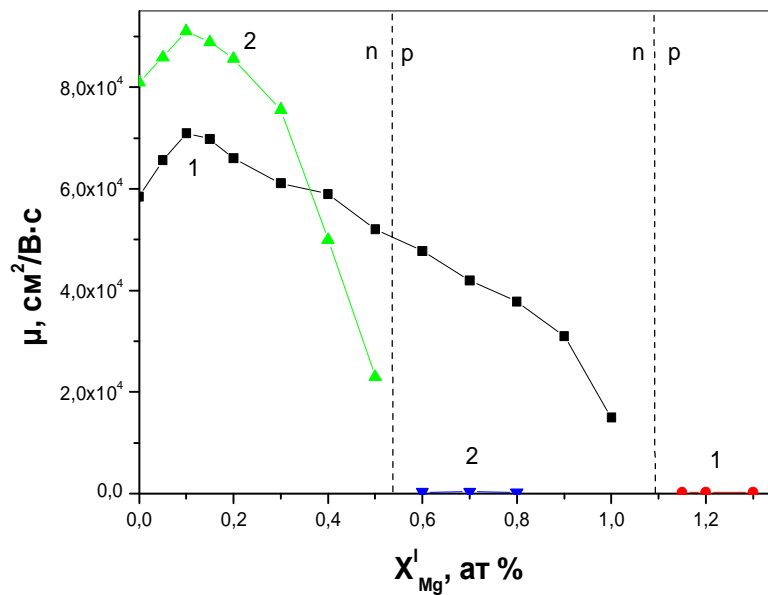


Рис. 2. Залежності рухливості носіїв заряду в епітаксійних шарах InAs від концентрації Mg в індієвому (крива 1) та вісмутових (крива 2) розплавах

но зростає від низьких до високих значень. Таку аномальну концентраційну залежність можна пояснити високою хімічною активністю магнію щодо деяких фонових домішок (сірка, селен, телур тощо) в розчині-розплаві вісмуту чи індію. При низьких концентраціях магнію у розплаві (рис. 1) значна частина його атомів взаємодіє із фоновими домішками, а решта входить в підгратку елемента третьої групи як акцепторна домішка. Саме такий механізм впливу магнію на електрофізичні властивості шарів є наймовірніший, оскільки при цьому істотно зростає рухливість носіїв заряду в епітаксійних шарах InAs, отриманих як з індієвих, так і з вісмутових розплавів (рис. 2). За подальшого збільшення концентрації магнію в розплавах рухливість електронів зменшується одночасно із їх концентрацією у шарах, і при концентраціях, більших від $\approx 0,56$ ат % для вісмутових розплавів та $\approx 1,1$ ат % для індієвих, утворюються епітаксійні шари р-типу провідності. Спостерігаємо типовий компенсаційний механізм легування.

Зміну типу провідності в епітаксійних шарах, кристалізованих із індієвих та вісмутових розплавів, що спостерігаємо при різних концентраціях магнію у розплаві, можна пояснити такими міркуваннями. При нарощуванні епітаксійних шарів InAs із індієвих розплавів переважаючим за концентрацією елементів є індій. Тому епітаксійні шари кристалізуються із низькою концентрацією вакансій індію. На відміну від цього, під час кристалізації епітаксійних шарів арсеніду індію із вісмутових розплавів забезпечуються стехіометричні умови. У таких шарах концентрації вакансій арсену та вакансій індію приблизно рівні. Магній є акцепторною домішкою, яка вбудовується в підгратку індію. Оскільки концентрація вакансій індію в шарах InAs, кристалізованих із вісмуту, є значно вищою, ніж в шарах, отримуваних із індієвих розплавів, то концентрація магнію, що входить в індієву підгратку, буде більшою. Тому шарам InAs, кристалізованим із вісмутових розплавів за однакових технологічних умов, властива вища концентрація дірок.

Встановлено, що епітаксійні шари арсеніду індію р-типу провідності, кристалізовані із розплавів індію та вісмуту, характеризуються різною морфологією поверхні (рис. 3). Фотографії поверхні цих шарів отримані з використанням оптичної фазово-контрастної мікроскопії. Епітаксійні шари, отримані із вісмутових розплавів, характеризуються дзеркальною поверхнею із незначною концентрацією випадкових дефектів (рис. 3, а). Тоді як в шарах арсеніду індію, кристалізованих із індієвих розплавів легованих приблизно такою ж кількістю магнію (1,3 ат% Mg),

індієвих розплавах до 1,3 ат % рухливість дірок досягає значень ≈ 300 см²/В·с. При збільшенні концентрації Mg у вісмутових розплавах до 0,8 ат %, концентрація дірок в епітаксійних шарах становить 380 см²/В·с.

Спостережуваний ефект незначного зменшення концентрації електронів з одночасним зростанням їх рухливості в шарах арсеніду індію n-типу провідності, отриманих із індієвих та вісмутових розплавів, легованих низькими концентраціями магнію 0,07–0,12 ат %, не є типовий для акцепторних домішок, таких як цинк, марганець чи амфотерний кремній. Концентраційна залежність дірок в шарах InAs, отриманих РФЕ, монотонно

морфологія поверхні істотно відрізняється. Для неї характерним є наявність «мікроструктури» у вигляді «апельсинової шкірки» та значної концентрації пірамідальних дефектів. Такий характер морфології яскраво виявляється за концентрацій магнію, більших від 1,0 ат% в індієвих розплавах. Отже, аналізуючи отримані дані з впливу магнію на електрофізичні параметри та морфологію поверхні, можемо стверджувати, що епітаксійні шари InAs р-типу провідності з дзеркальною морфологією та концентрацією дірок $\sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ можна вирощувати із вісмутових розчинів-розплавів.

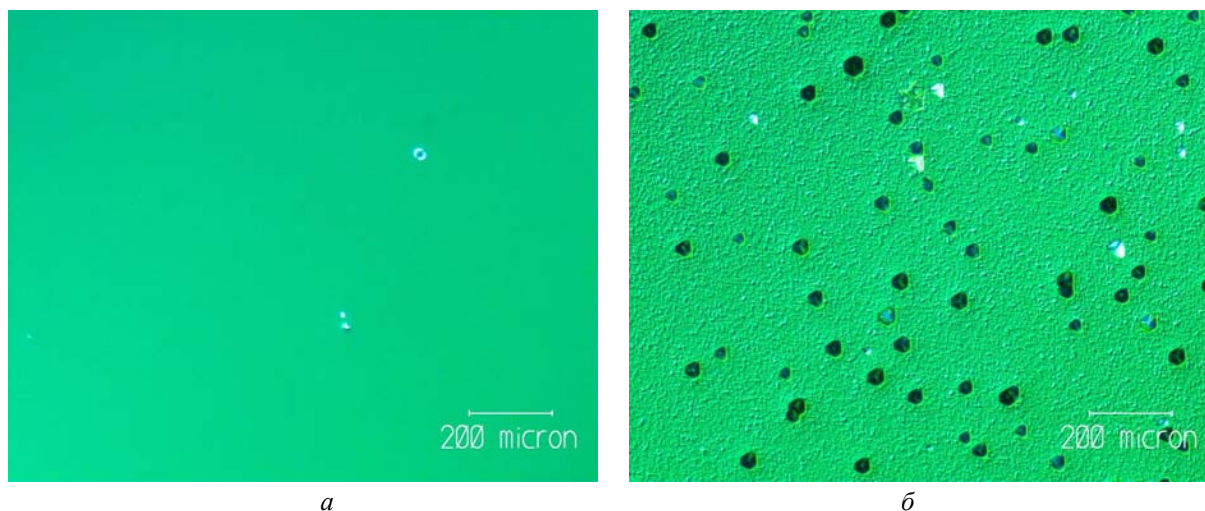


Рис. 3. Фотографія поверхні епітаксійних шарів InAs легованих Mg отриманих із вісмутових (1,2 ат% Mg) (а) та індієвих (б) розчинів-розплавів (1,3 ат% Mg)

Висновки

Встановлено, що при концентраціях 0,07–0,12 ат % в розплавах індію та вісмуту, магній спричиняє ефект «очистки» від фонових домішок. Епітаксійні шари InAs р-типу провідності з якісною морфологією поверхні та рівнем легування $\sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ можна отримувати із вісмутових розчинів-розплавів з концентрацією магнію, не меншою від 1,2 ат%. Епітаксійні шари InAs кристалізовані із індієвих розплавів, в ідентичних технологічних умовах, характеризуються дефектною поверхнею та концентрацією дірок, що не перевищує $\sim 1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

1. Воронина Т.И., Луганова Т.С., Моисеев К.Д., Розов А.Е. Электрофизические свойства эпитаксиального арсенида индия и узкозонных твердых растворов на его основе // ФТП. – 1999 – Т.33, В.7. – С.781–787.
2. Баранов А.Н., Воронина Т.И., Луганова Т.С. Свойства эпитаксиального арсенида индия, легированного редкоземельными элементами // ФТП. – 1993. – Т.27, В.– С.421–429.
3. Ashen D.J., Dean P.J., Hurle D.T.J. The incorporation and characterization of acceptors in epitaxial InAs // JPCS. – 1975. – V.36, N.10-B. – P.1041–1053.
4. Воронина Т.И., Луганова Т.С., Моисеев К.Д., Розов А.Е. Электрофизические свойства эпитаксиального арсенида индия и узкозонных твердых растворов на его основе // ФТП. – 1999 – Т.33, В.7. – С.781–787.
5. Гореленок А.Т., Каманин А.В., Шмидт Н.М. Редкоземельные элементы в технологии соединений АЗВ5 и приборов на их основе // ФТП. – 2003. – Т.37, В.8. – С.922–940.
6. Емцев В.В., Машовец Т.В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. – М.: Радио и связь, 1981. – 248 с.
7. Рытова Н.С., Фистуль В.И. Термодинамический анализ поведения амфотерных примесей в полупроводниках АЗВ5 // ФТП. – 1970. – Т.4, В.6. – С.1109–1117.