

ФІЗИКА І ТЕХНІКА НАПІВПРОВІДНИКІВ, МЕТАЛІВ, ДИЕЛЕКТРИКІВ ТА РІДКИХ КРИСТАЛІВ

УДК 621.315.592

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

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ІНВЕРСІЇ ТИПУ ПРОВІДНОСТІ В ЕПІТАКСІЙНИХ ШАРАХ InAs, ОТРИМАНИХ РФЕ З ІНДІЄВИХ РОЗПЛАВІВ, ЛЕГОВАНИХ КРЕМНІЄМ

© Ваків М.М., Круковський Р.С., 2012

M.M. Vakiv, R.S. Krukovsky

DETERMINATION OF THE INVERSION TEMPERATURE OF CONDUCTIVITY TYPE IN InAs EPITAXIAL LAYERS OBTAINED FROM INDIUM MELTS DOPED BY SILICON

© Vakiv M.M., Krukovsky R.S., 2012

Досліджено залежність концентрації електронів та дірок в епітаксійних шарах InAs, отриманих із індієвих розплавів легованих кремнієм, в інтервалі температур 880–820 °С та 780–630 °С. Встановлено, що у високотемпературному інтервалі кристалізуються епітаксійні шари InAs р- типу провідності, а в низькотемпературному п-типу провідності. Цей ефект пояснюється амфотерною поведінкою кремнію в шарах InAs.

Ключові слова: РФЕ, InAs, епітаксія.

The dependence of concentration of electrons and holes in InAs epitaxial layers, obtained from indium melts doped by silicon in the temperature range of 880–820 °C and 780–630 °C was investigated. It was found that in high-temperature range InAs epitaxial layers of p-type conductivity are intended to crystallize, and in low-temperature – of n-type conductivity. This effect is explained by amphoteric behavior of silicon in InAs layers.

Key words: LPE, InAs, epitaxy.

У технології виготовлення приладів опто- та мікроелектроніки на основі арсеніду індію одним із основних методів створення р⁺-областей є дифузія цинку. Низький ступінь активації атомів цинку в матриці арсеніду індію і висока концентрація дефектів, що виникають при такому способі формування р–п-переходів, істотно погіршують параметри багатьох приладів та їх надійність. Значна концентрація вакансій арсену, що утворюється внаслідок випаровування арсену під час дифузії утворює нейтральні комплекси, до складу яких входять атоми цинку та вакансії арсену [1]. Ймовірність такого процесу є більша, ніж входження цинку в індієву решітку [2]. Тому

така технологія потребує врахування багатьох чинників, що впливають на якість р–п-переходів. Отже, є потреба в пошуку універсальних способів формування р–п-переходів на основі арсеніду індію, які б спростили технологію виготовлення приладних структур на його основі. Відомий спосіб отримання високоякісних компенсованих р–п-переходів на основі арсеніду галію для високо-ефективних електролюмінісцентних діодів з використанням амфотерних домішок кремнію та германію [3]. Так, істотного збільшення (на порядок) зовнішнього квантового виходу було досягнуто завдяки формуванню плавного р–п-переходу зумовленого формуванням у забороненій зоні “хвостів” густини станів. Використання амфотерних домішок в більш вузькощілинних напівпровідниках, таких як арсенід індію, антимонід галію та інших, складніша задача, оскільки потребує врахування багатьох технологічних параметрів процесу, що впливають на дефектну структуру напівпровідникового матеріалу.

Мета роботи – дослідження поведінки електрофізичних параметрів епітаксійних шарів арсеніду індію, отриманих методом рідиннофазної епітаксії (РФЕ) за температур 880–600 °С під впливом легування розплавів індію домішкою кремнію.

Проведено чотири серії експериментів з нарощування р- та n-шарів із індієвого розплаву. Індієвий розплав у всіх випадках легували кремнієм. Перша серія експериментів проводилась в інтервалі температур 880–860 °С. Друга серія – в інтервалі температур 780–750 °С. На основі зразків, отриманих у цих експериментах визначали концентраційні залежності основних носіїв заряду в шарах від вмісту кремнію в розплаві індію. Третя та четверта серії експериментів проводили в інтервалах температур відповідно 880–820 °С та 780–630 °С. В епітаксійних шарах, отриманих в цих серіях експериментів, визначали профіль розподілу основних носіїв заряду по товщині.

Для визначення електрофізичних параметрів використовували методики ефекту Холла та електрохімічне вольт-фарадне профілювання (CV-профілювання) на установці PN4300PC. Для встановлення профілю розподілу основних носіїв заряду по товщині шару серію зразків готували таким способом. Епітаксійні шари розколювались на кілька частин, кожна з яких травили у травнику $H_2SO_4 : H_2O : H_2O_2 = 1 : 1 : 1$ упродовж різного часу (5–30 хв). Швидкість травлення становила 15 – 20 мкм/хв за температури $T_{tr} = 65$ °С. В результаті були отримані зразки з різною товщиною нарощеного шару. На поверхні отриманих таким способом зразків, концентрацію носіїв заряду визначали з вольт-фарадних характеристик бар'єру електроліт–напівпровідник.

На рис. 1 зображено залежність концентрації дірок в епітаксійних шарах InAs, в інтервалі температур 880–860 °С від вмісту кремнію в розплаві індію. На рис. 2 зображена залежність концентрації електронів в епітаксійних шарах InAs, в інтервалі температур 780–750 °С від вмісту кремнію в розплаві індію. Залежність концентрації дірок в епітаксійних шарах InAs за вмісту кремнію в індієвому розплаві в інтервалі 0,2–1,4 % ат. є лінійна, а далі прямує до насичення. Схожі залежності концентрації електронів від вмісту кремнію в епітаксійних шарах InAs наведена на рис. 2.

Епітаксійні шари InAs, вирощені у високотемпературному та низькотемпературному інтервалах р- та n-типу провідності відповідно. Отже, можна вважати, що в епітаксійних шарах, кристалізованих у більших температурних інтервалах (880–820 °С та 780–630 °С) є неоднорідний профіль розподілу електронів та дірок по товщині. Для підтвердження цього припущення проведено дослідження профілю розподілу концентрації електронів і дірок в епітаксійних шарах р- та n-типів провідності з використанням вищеписаних методик підготовки та вимірювання зразків. Вміст кремнію для легування в розчині-розплаві індію вибирали на основі залежностей, наведених на рис. 1,2 з урахуванням виходу їх на насичення. Тому, вміст кремнію при нарощуванні шарів р-InAs становив 1,4 % ат., а вміст кремнію при нарощуванні шарів n-InAs – 1,8 % ат.

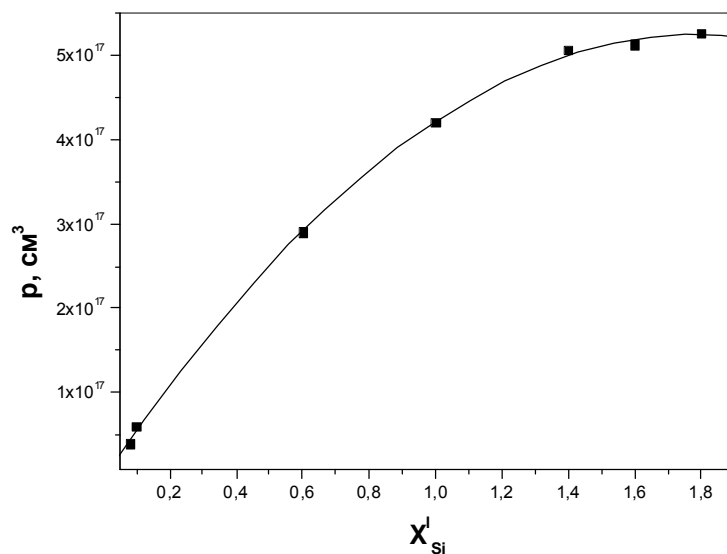


Рис. 1. Залежність концентрації дірок в епітаксійних шарах InAs, отриманих РФЕ, від вмісту кремнію в розплаві індію

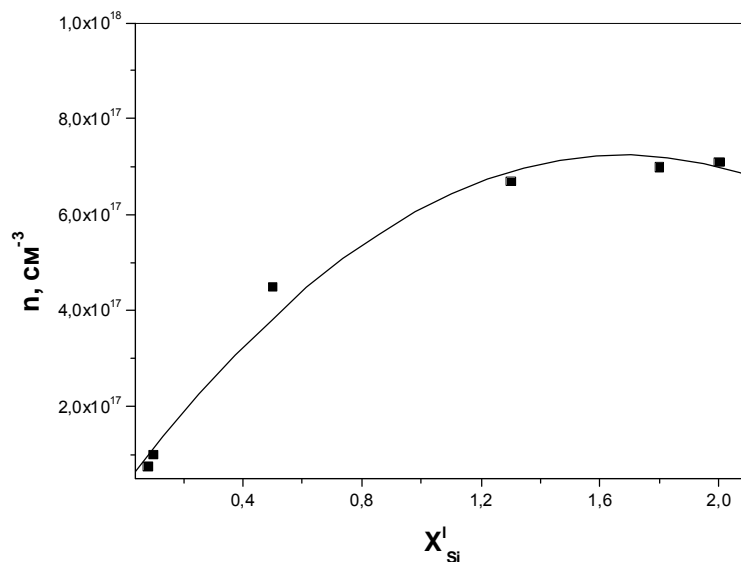


Рис. 2. Залежність концентрації електронів в епітаксійних шарах InAs, отриманих РФЕ, від вмісту кремнію в розплаві індію

Профіль розподілу дірок в епітаксійних шарах p-InAs зображено на рис. 3. Бачимо, що в частині епітаксійного шару, що знаходиться поблизу границі розділу підкладки/епітаксійний шар, концентрація дірок висока (близько $8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). На відстані приблизно 200 мкм від підкладки спостерігається істотне зменшення концентрації дірок і на поверхні вона становить близько $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Профіль розподілу електронів в епітаксійних шарах n-InAs зображено на рис. 4. Бачимо, що концентрація електронів найбільша на поверхні епітаксійного шару, і майже не змінюється до глибини 100 мкм. Середнє значення концентрації електронів становить $8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. На глибині від 100 до 150 мкм від поверхні епітаксійного шару відбувається різке зниження концентрації електронів і поблизу границі розділу з епітаксійним шаром її значення досягає величини $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Отже, на основі отриманих профілів розподілу електронів та дірок по товщині епітаксійних шарів n-InAs та p-InAs можна припускати про існування точки інверсії провідності в інтервалі температур 820–780 °С.

На основі отриманих результатів можна стверджувати, що кремній, будучи амфотерною домішкою в InAs за високих температур кристалізації входить переважно в решітку As проявляючи акцепторні властивості. Зі зниженням температури вміст кремнію, що входить в підгратку індію, зростає, а в підгратку арсену навпаки зменшується. Про це свідчить профіль розподілу дірок по товщині шару p-InAs. За достатньо низьких температур епітаксії близько 780 °С кремній переважно входить в підгратку індію і є донорною домішкою. За температур 650–630 °С концентрація електронів істотно зростає і досягає значення $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (див. рис. 4). Тобто, кремній вбудовується в основному в підгратку елемента третьої групи, виявляючи донорні властивості. Аналіз залежностей, зображених на рис. 3 і 4, свідчить про існування точки інверсії під час кристалізації епітаксійного шару InAs у широкому температурному інтервалі.

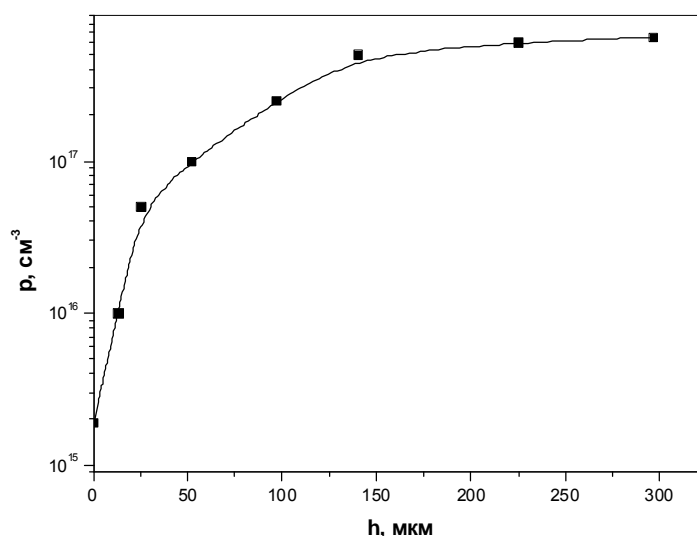


Рис. 3. Розподіл концентрації дірок в епітаксійних шарах InAs легованих кремнієм 1,4% ат

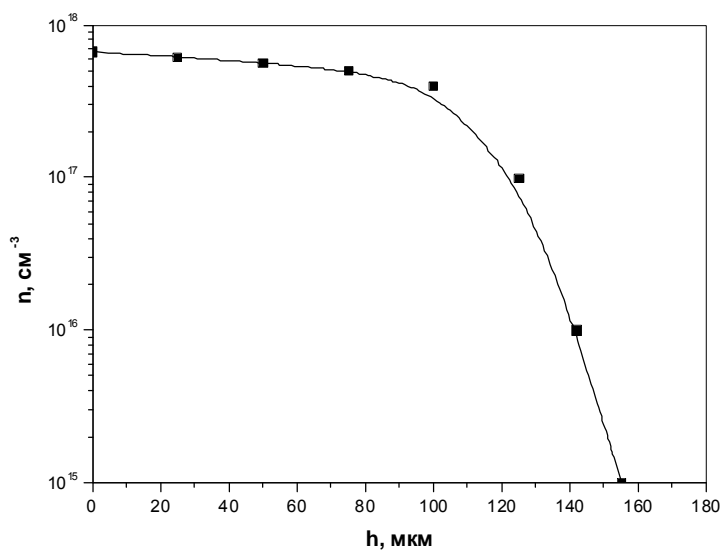


Рис. 4. Розподіл концентрації електронів в епітаксійних шарах InAs легованих кремнієм 1,8 % ат.

Ефект перерозподілу амфотерного кремнію в епітаксійних шарах InAs, кристалізованих в широкому температурному інтервалі (880 – 630 °С) можна використовувати для формування в одному технологічному процесі плавних р–п-переходів з одного розчину-розплаву.

Висновки

Встановлено, що у високотемпературному інтервалі (880 – 860 °С) із індієвих розчинів-розплавів легованих кремнієм в кількості 0,2–1,4 % ат. кристалізуються епітаксійні шари InAs р-типу провідності, а в низькотемпературному (780–750 °С), при кількостях кремнію 0,4–1,8 % ат. – n-типу провідності. В р-InAs та n-InAs шарах спостерігається нерівномірний розподіл дірок та електронів по товщині. В р-InAs концентрація дірок зменшується від границі розділу підкладка/епітаксійний шар до поверхні від близько $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а в n-InAs шарах зростає від близько $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Цей ефект можна пояснити амфотерною поведінкою кремнію в шарах InAs, кристалізованих у високотемпературному 880–820 °С та низькотемпературному 780–630 °С інтервалах.

1. Карлина Л.Б., Власов А.С., Кулагина М.М., Ракова Е.П., Тимошина Н.Х., Андреев В.М. Высокоэффективные фотоэлементы на основе твердых растворов $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ с изовалентным легированием // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. – Вып. 2. – С. 240–245.
2. Андриевский В.Ф., Гуцинская Е.В., Мальшев С.А. Диффузия цинка в незащищенную поверхность InP // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – Вып. 1. – С. 68–71.
3. Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. – М.: Советское радио, 1975.