

УДК 621.315.5

Влияние диффузии серы из подложки InP гетероэпитаксиальной структуры InGaAs/InP на параметры *pin*-фотодиодов

Д.С. Андреев, А.К. Будтолаева, П.Е. Хакуашев, И.В. Чинарева

*Работа посвящена актуальной проблеме минимизации удельной емкости *pin*-фотодиодов на основе гетероэпитаксиальной структуры InGaAs/InP, выращенных МОС-гидридной эпитаксией. Проанализированы профили концентрации атомов серы, полученные методом масс-спектропии вторичных электронов (ВИМС), и рассчитаны по С-V-характеристикам профили концентрации неосновных носителей заряда в структуре *pin*-фотодиодов. Исследованы и выявлены причины появления повышенной емкости InGaAs/InP *pin*-фотодиодов, связанные с аномальной диффузией серы из подложки InP и разработаны меры по их устранению. В результате значительно повышен процент годных по емкости фотодиодов.*

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: емкость, гетероэпитаксиальная структура, диффузия, профиль, концентрация, вакансии.

Введение

Одной из актуальных задач при производстве быстродействующих, малощумящих InGaAs/InP *pin*-фотодиодов [1–4] является обеспечение низкой концентрации примеси ($\sim 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) в тонкой ($\sim 2 \text{ мкм}$) активной зоне. Только в этом случае при требуемом рабочем напряжении 5 В обеспечивается времена нарастания фотоотклика не более 1 нс и достигалась емкость не более 1,5 пФ (для фоточувствительного диаметра 200 мкм).

Однако, как показала практика, при производстве *pin*-фотодиодов в некоторых случаях происходит неконтролируемый рост удельной емкости структур. На основе СВ-измерений выяснено, что рост удельной емкости связан с повышенной концентрацией примеси на границе активной зоны с подложкой.

На первом этапе данной работы исследовались причины этого повышения концентрации, что и явилось целью данной статьи.

Эксперимент

В данной работе исследовались образцы гетероэпитаксиальных структур n-InP/n-In_{0.53}Ga_{0.47}As/n⁺-InP для *pin*-фотодиодов, выращенные в ФГУП «НИИ «Полус». Структура показана на рис.1.

Гетероструктуры InGaAs/InP выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии в горизонтальном щелевом реакторе при пониженном давлении. Источниками элементов III группы являлись триэтилгаллий и триметилиндий, а источниками элементов V группы – арсин и фосфин. Температура роста варьировалась в

диапазоне 620–650 °С, а давление в реакторе поддерживалось в интервале 60–100 Торр. Мольное отношение элементов V/III в парогазовой смеси соответствовало 50–100. Эпитаксиальные слои специально не легировались. Фоновая концентрация примеси $N = (0,7-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Толщины слоев $d_1 = 2,5 \text{ мкм}$, $d_2 = 3,3 \text{ мкм}$.

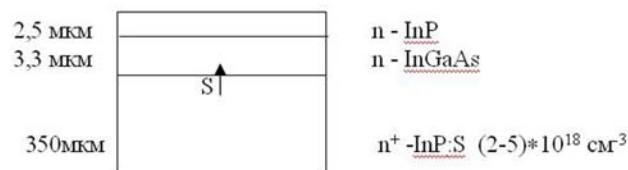


Рис. 1. Гетероэпитаксиальная структура n-InP/n-In_{0.53}Ga_{0.47}As/n⁺-InP.

В качестве подложек использовались пластины n-InP, легированные серой, с ориентацией (100). Концентрация примеси в подложке $N_n = (2-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Распределение атомов серы по толщине гетероструктуры исследовалось непосредственно после эпитаксиального выращивания и после диффузионного процесса внедрения легирующей примеси (кадмия) с целью создания *p-n*-перехода в активной поглощающей области InGaAs, т.е. стандартного процесса диффузии для изготовления *pin*-фотодиодов. Процесс проводился в откаченной ампуле при температуре 585 °С в течение 30–60 минут.

Измерение профилей концентрации атомов серы по толщине структуры исследовалось методом масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) в научно-исследовательском институте физических проблем им. Лукина на масс-спектрометре IMS-4F фирмы САМЕСА. Измерения проводились в следующих условиях: первичные ионы Cs⁺, 10кВ, регистрация вторичных ионов S⁻. Для отделения масс-спектральной линии серы от наложений измерения проводились с масс-спектральным разрешением 4000.

Образец сравнения изготавливался ионной имплантацией атомов серы с энергией $E = 100 \text{ кэВ}$ и дозой $D =$

Андреев Дмитрий Сергеевич, вед. инженер.
 Будтолаева Анна Константиновна, инженер.
 Хакуашев Павел Евгеньевич, начальник ПТЦ 1.
 Чинарева Инна Викторовна, вед. инженер.
 ОАО «НПО «Орион».
 Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.
 Тел.: (495) 672-20-31. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 14 мая 2014 г.
 © Андреев Д.С., Будтолаева А.К., Хакуашев П.Е., Чинарева И.В., 2014

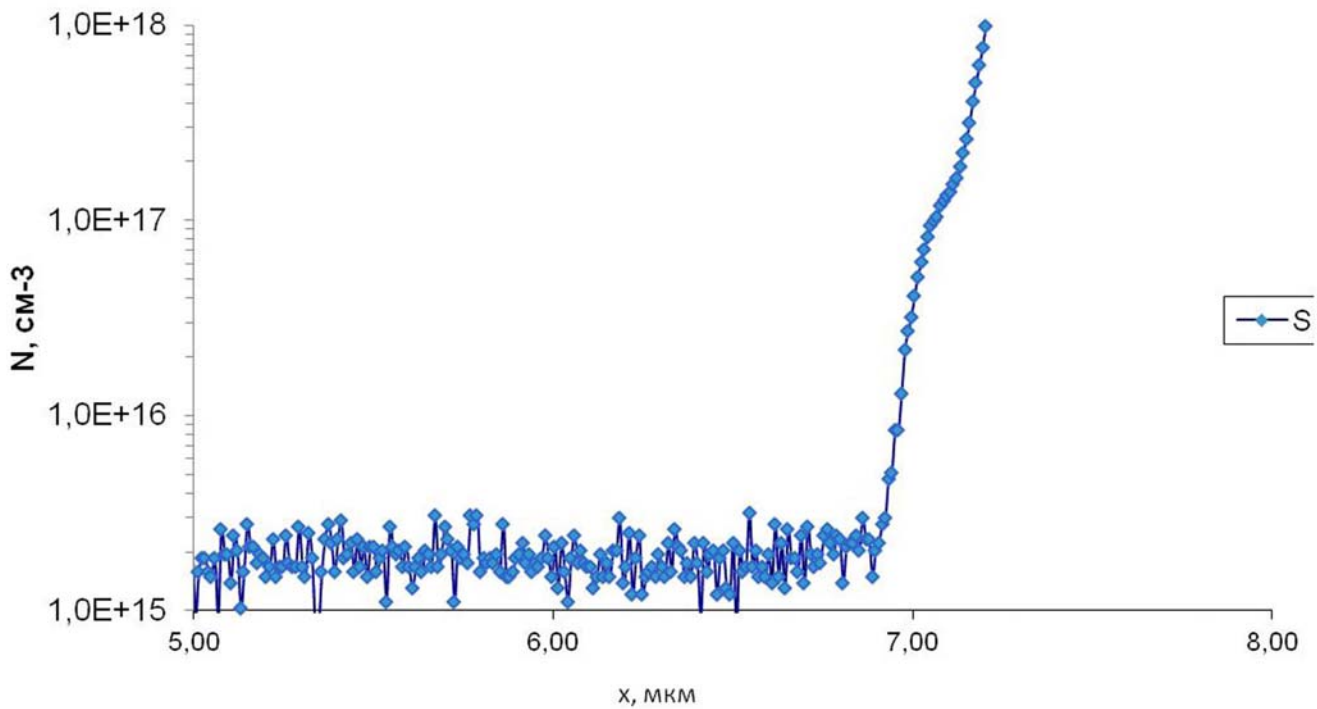


Рис. 2. Распределение атомов серы (ВИМС) в гетероэпитаксиальной структуре непосредственно после эпитаксии.

$1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ в однослойную эпитаксиальную структуру InGaAs/InP, выращенную методом МОС-гидридной эпитаксии аналогично рабочим структурам.

Распределение атомов серы в гетероэпитаксиальной структуре непосредственно после эпитаксии представлено на рис. 2.

На рис. 3 изображено распределение атомов серы после процесса диффузии в течение 40 минут.

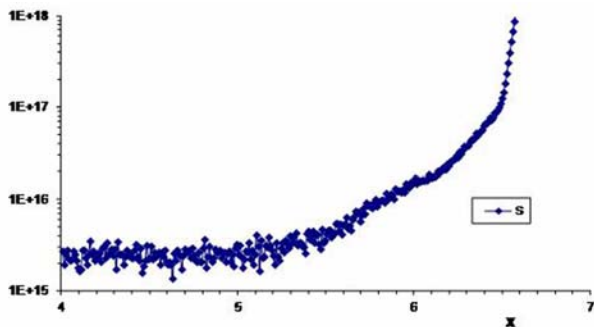


Рис. 3. Распределение атомов серы (ВИМС) после процесса диффузии кадмия.

На основе гетероэпитаксиальной структуры по планарно-диффузионной технологии был изготовлен *pin*-фотодиод площадью $A = 3,4169 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$. По результатам *CV*-измерений *p-n*-перехода был рассчитан профиль распределения концентрации носителей в глубине структуры вплоть до подложки *n+*-InP. Результаты приведены на рис. 4.

Обсуждение результатов

В нашем случае емкость *pin*-фотодиода определяется по формуле из работы [5]:

$$C = \xi \xi_0 A / w, \quad (1)$$

где ξ – диэлектрическая проницаемость InGaAs, ξ_0 – электрическая постоянная (в системе СИ), A – площадь *p-n*-перехода, w – ширина области пространственного заряда.

Ширина области пространственного заряда при приложенном напряжении U и встроенном потенциале U_{bi} :

$$w = \sqrt{\frac{2 \xi \xi_0 (U_{bi} + U)}{qN}}, \quad (2)$$

где q – заряд электрона, N – концентрация носителей.

При фоновой концентрации примеси в поглощающей области гетероструктуры (InGaAs) $N = (0,7-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ емкость ограничивается не шириной области пространственного заряда w , а толщиной этого слоя d_2 , т.е. $w > d_2$.

Как следует из сравнения рис. 2 и 3, процесс диффузии кадмия в гетероэпитаксиальную структуру сопровождается диффузией серы из высоколегированной подложки InP в эпитаксиальный слой InGaAs. Такое поведение серы является неожиданным, учитывая, что температура диффузии кадмия ниже температуры эпитаксиального выращивания. Возможно, что при диффузии кадмия в слое InGaAs происходит образование вакансий, которые способствуют увеличению коэффициента диффузии серы в InGaAs при данной температуре. В литературе представлены статьи [6–10], в которых упоминается о влиянии диффузии цинка на профили распределения компонентов в различных гетероструктурах и InP. Безусловно, прямо здесь не говорится об увеличении диффузии примеси из подложки, но мы можем предположить этот механизм и для диффузии кадмия, принимая во внимание большое количество вакансий, сопровождающих эту диффузию. Похожее явление аномальной диффузии Sb наблюдалось при

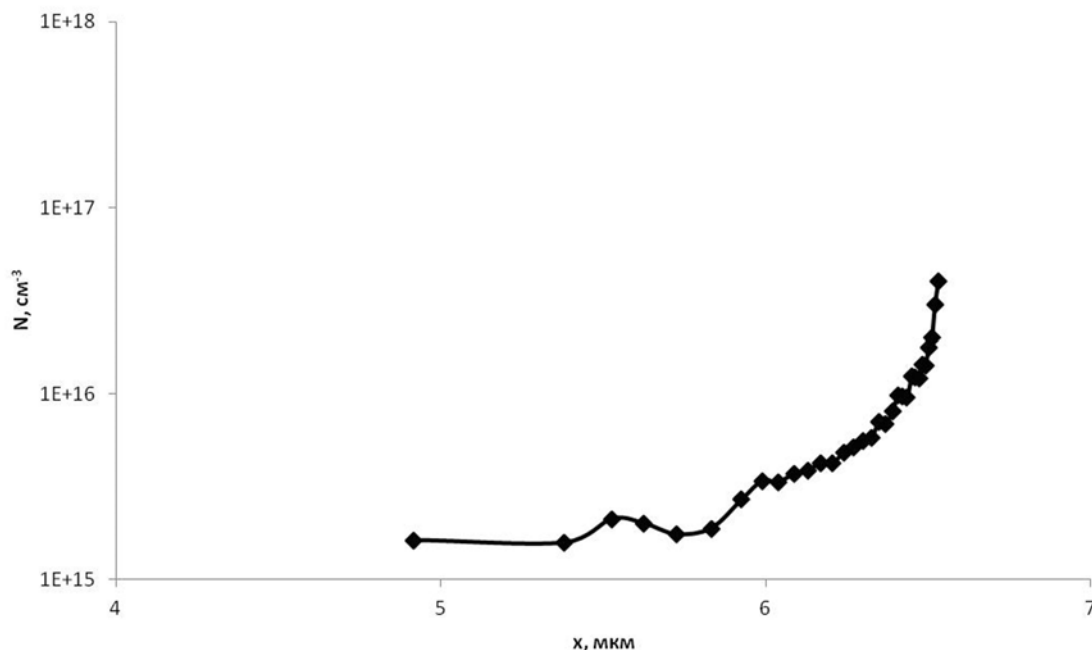


Рис. 4. Профиль распределения концентрации носителей в глубине структуры.

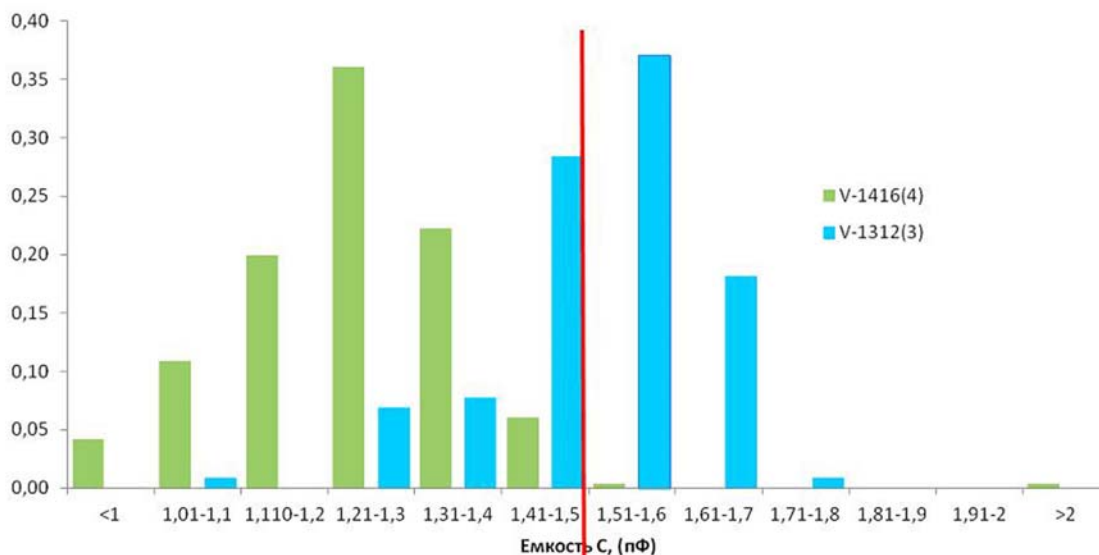


Рис. 5. Результаты контроля емкости pin-ФД на стандартных и усовершенствованных структурах.

диффузионных процессах в гомоэпитаксиальных структурах $n-n^+Si$.

Как видно из сравнения рис. 4 и 3, увеличение концентрации носителей заряда в поглощающем слое со стороны подложки увеличивается за счет диффузии серы из подложки.

В результате исследований было установлено, что увеличение емкости фотодиода связано с аномальным увеличением концентрации серы в поглощающем слое InGaAs на границе с подложкой InP. Это приводит к увеличению концентрации носителей заряда и, следовательно, к увеличению удельной емкости. Такое увеличение концентрации серы связано с диффузией серы из высоколегированной подложки n^+-InP в процессе диффузии кадмия при формировании $p-n$ -перехода в гетероструктуре. Предположительно, этот процесс можно объяснить аномальным увеличением коэффициента

диффузии серы в соединении InGaAs после диффузии кадмия, связанного с образованием вакансий в этом слое.

На 2-м этапе работы были скорректированы требования к эпитаксиальным структурам. Толщина поглощающей области InGaAs была увеличена с 3,3 до 3,7 мкм, то есть на глубину проникновения серы в этот слой.

На новых структурах по стандартной технологии изготавливались pin -фотодиоды (pin -ФД). Измерялось значение емкости на годных по темновым токам кристаллах при рабочем напряжении 5 В.

На рис. 5 представлены результаты контроля емкости pin -ФД на стандартных и усовершенствованных структурах. Из рисунка видно, что на усовершенствованных структурах со скорректированной толщиной поглощающего слоя InGaAs выход годных ФД по емкости вырос и составил 99%.

Заключение

На структурах с толщиной активного слоя InGaAs 3,7 мкм 99% ФД имели требуемую емкость $C < 1,5$ пФ (при 5 В). Для сравнения, на структурах с толщиной слоя 3,3 мкм только 44% диодов имели такую же емкость. При этом требования к инерционности, предъявляемые к ФД для ФПУ соблюдались.

Таким образом, проведенные исследования использованы для повышения процента годных фотоприемных устройств с высокой чувствительностью к коротким по длительности импульсам и большим динамическим диапазоном входных мощностей, чувствительных в спектральном диапазоне 1,0–1,6 мкм.

Авторы выражают благодарность сотруднику НИИ Физ. проблем В.В. Сарайкину, ОАО «НИИ«Полус» П.В. Горланчуку, сотрудникам ОАО «НПО «Орион» А.В. Рыбакову и В.Е. Степанюку за проведение диффузионных и имплантационных процессов.

Литература

1. Андреев Д.С., Гришина Т.Н., Залетаев Н.Б., Тришенков М.А. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 86.
2. Горлачук П.В., Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л. и др. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 77.
3. Андреев Д.С., Горлачук П.В., Мармалюк А.А. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 374.
4. Андреев Д.С., Залетаев Н.Б., Тришенков М.А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 76.
5. Техника оптической связи. Фотоприемники. Под ред. У. Тсанга. Перевод под ред. М.А. Тришенкова. – М.: Мир. 1988.
6. Si S. K., Yeo D. H., Yoon K. H., et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 1998. V. 4. No. 4. P. 619.
7. Holonyak N., Fellow Jr. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 1998. V. 4. No. 4. P. 584.
8. Han S., Sinha S., Ramaswamy R. V. // Appl. Phys. L. 1994. V. 64. P. 760.
9. Helmy A. S., Johnson N. P., Ke M. L., et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 1998. V. 4. No. 4. P. 661.
10. Slotte J., Saarinen K., Salmi A., et al. // Physical Review. B. 2003. V. 67. P. 115209.

Influence of sulphur diffusion from the InP substrate on *pin*-photodiode parameters

D. S. Andreev, A. K. Budtolaeva., P. E. Khakushev, and I. V. Chinareva

Orion R&P Association
46/2 Enthusiaste highwqy, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received may 14, 2014

Problems of minimization for the pin-photodiode specific capacity are investigated in this work.

PACS: 85.60.-q

Keywords: ecapacity, heteroepitaxial structure, diffusion, profile, density, vacancy.

References

1. D. S. Andreev, T. N. Grishina, N. B. Zaletaev, et al., Prikladnaya Fizika, No. 4, 86 (2012).
2. P. V. Gorlachuk, A. A. Marmalyuk, Yu. L. Ryaboshtan, et al., Prikladnaya Fizika, No. 5, 77 (2012).
3. D. S. Andreev, P. V. Gorlachuk, A. A. Marmalyuk, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 374 (2013).
4. D. S. Andreev, N. B. Zaletaev, M. A. Trishenkov, et al., Prikladnaya Fizika, No. 6, 76 (2013).
5. *Technique of Optical Communications. Photoreceivers.* (Mir, Moscow, 1988) [in Russian].
6. S. K. Si, D. H. Yeo, K. H. Yoon, et al., IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics. **4**, 619 (1998).
7. N. Holonyak and Jr. Fellow, IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics **4**, 584 (1998).
8. S. Han, S. Sinha, and R. V. Ramaswamy, Appl. Phys. L. **64**, 760 (1994).
9. A. S. Helmy, N. P. Johnson, M. L. Ke, et al., IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics. **4**, 661 (1998).
10. J. Slotte, K. Saarinen, A. Salmi, et al., Physical Review. B. **67**, 115209 (2003).