

Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.315.5

Диффузия серы из подложки InP гетероэпитаксиальной структуры InGaAs/InP при изготовлении *pin*-фотодиодов

П. В. Горлачук, А. А. Мармалюк, Ю. Л. Рябоштан,
В. В. Сарайкин, П. Е. Хакуашев, И. В. Чинарева

*Исследованы причины появления повышенной емкости *pin*-фотодиодов на основе InGaAs/InP. Показана связь повышенной емкости с диффузией серы из высоколегированной подложки InP в эпитаксиальный слой InGaAs. Такое неожиданное поведение серы объясняется образованием вакансий при диффузии кадмия в слой InGaAs, которые способствуют увеличению коэффициента диффузии серы в InGaAs.*

PACS: 85.60.Dw

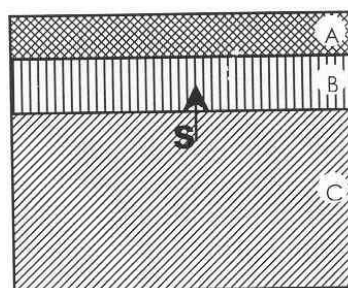
Ключевые слова: емкость, гетероэпитаксиальная структура, диффузия, профиль, концентрация, вакансии.

Введение

Одной из актуальных задач при производстве быстродействующих, малощумящих *pin*-фотодиодов на основе InGaAs/InP 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 обеспечиваются времена нарастания фотоотклика не более 1 нс и емкость не более 1,3 пФ (для фоточувствительного диаметра 200 мкм). Однако на практике при производстве *pin*-фотодиодов в некоторых случаях происходит неконтролируемый рост удельной емкости структур. Как показали CV-измерения, рост удельной емкости связан с повышенной концентрацией примеси на границе активной зоны с подложкой. Исследование причин этого повышения концентрации и является целью данной статьи.

Эксперимент

В данной работе исследовались образцы гетероэпитаксиальных структур $n\text{-InP}/n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/n^+\text{-InP}$ для *pin*-фотодиодов, выращенные в ОАО «НИИ "Полус"». Типовая структура показана на рис. 1.



Область	Материал	Концентрация	Толщина
A	$n\text{-InP}$	$(0,7-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$	2,5 мкм
B	$n\text{-InGaAs}$	$(0,7-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$	3,85 мкм
C	$n^+\text{-InP:S}$	$(2-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	350 мкм

Рис. 1. Гетероэпитаксиальная структура $n\text{-InP}/n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/n^+\text{-InP}$

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 Торр. Эпитаксиальные слои спе-

Горлачук Павел Владимирович, инженер.
Мармалюк Александр Анатольевич, начальник отдела.
Рябоштан Юрий Леонидович, ведущий инженер-технолог.
ОАО «НИИ "Полус"» им. М. Ф. Стельмаха.
Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3.
E-mail: A.Marmalyuk@siplus.ru
Сарайкин Владимир Васильевич, начальник сектора.
НИИ физических проблем им. Лукина.
Россия, 124460, Москва, г. Зеленоград, 4-й Западный проезд, 5.
E-mail: info@ckp.su
Хакуашев Павел Евгеньевич, главный специалист.
Чинарева Инна Викторовна, ведущий инженер-технолог.
ФГУП «НПО "Орион"».
Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2012 г.

© Горлачук П. В., Мармалюк А. А., Рябоштан Ю. Л., Сарайкин В. В., Хакуашев П. Е., Чинарева И. В., 2012

циально не легировались. Фоновая концентрация примеси $N = (0,7-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Толщины слоев $d_1 = 2,5 \text{ мкм}$, $d_2 = 3,85 \text{ мкм}$.

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

Распределение атомов серы по толщине гетеро-структуры исследовалось непосредственно после эпитаксиального выращивания и после диффузионного процесса внедрения легирующей примеси (кадмия) для создания $p-n$ -перехода в активной поглощающей области InGaAs , т. е. стандартного процесса диффузии для изготовления pin -фото-диодов. Процесс проводился в откачанной ампуле при температуре $585 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30—60 мин.

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 СAMEСА. Первичные ионы — Cs^+ , ускоряющее напряжение — 10 кВ, регистрация вторичных ионов — S^- . Для отделения масс-спектраль-

ной линии серы от побочных наложений измерения проводились с масс-спектральным разрешением 4000.

Образец сравнения изготавливался ионной имплантацией атомов серы с энергией $E = 100 \text{ кэВ}$ и дозой (флюэнсом) $D = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ в однослойную эпитаксиальную структуру InGaAs/InP , выращенную методом МОС-гидридной эпитаксии аналогично рабочим структурам.

На рис. 2 приведено распределение концентрации атомов серы N_s в гетероэпитаксиальной структуре непосредственно после эпитаксии.

На рис. 3 изображено распределение концентрации атомов серы N_s после процесса диффузии в течение 40 мин.

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

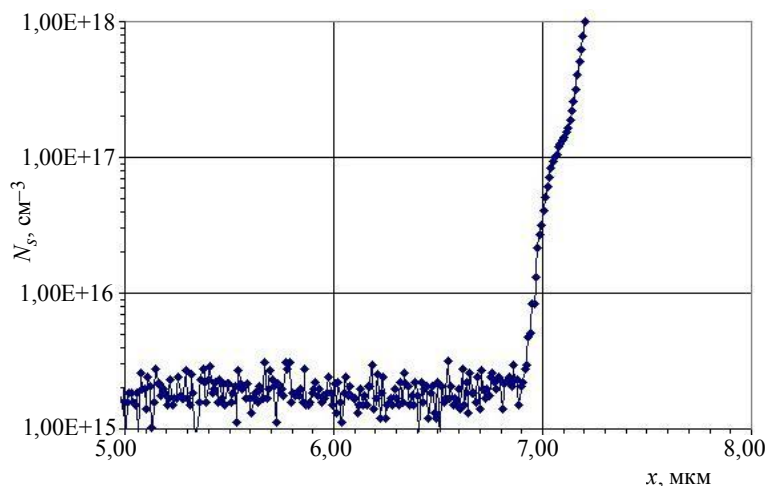


Рис. 2. Распределение концентрации атомов серы по глубине гетероэпитаксиальной структуры непосредственно после эпитаксии

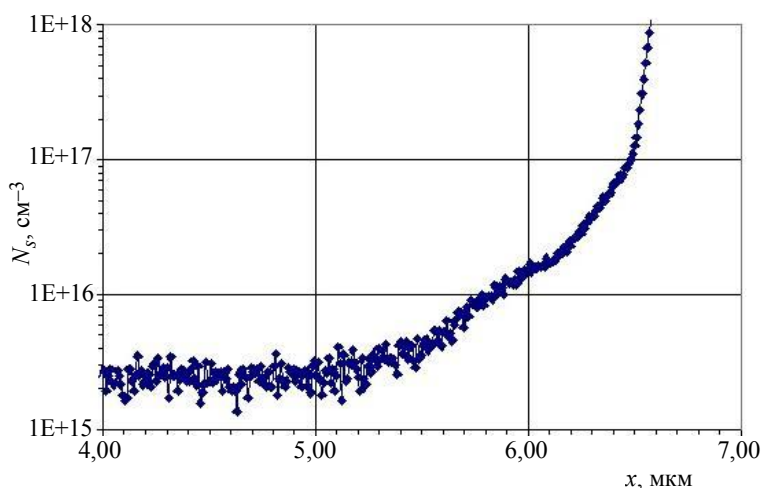


Рис. 3. Распределение концентрации атомов серы после процесса диффузии кадмия

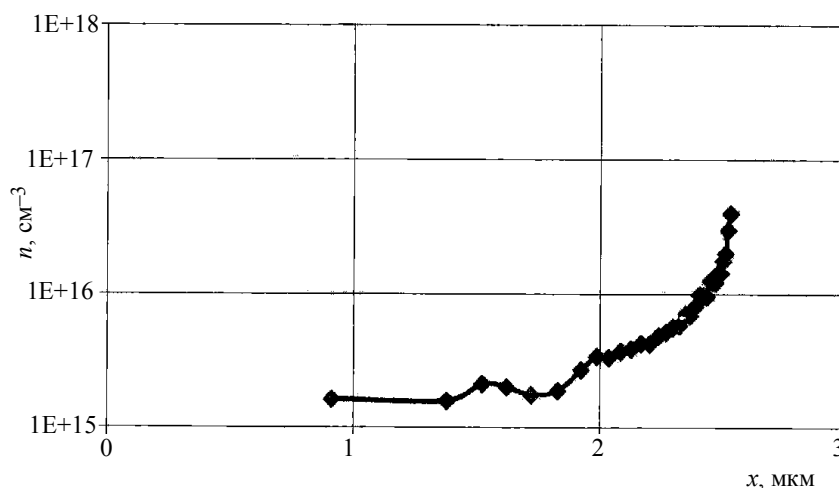


Рис. 4. Профиль распределения концентрации носителей заряда по глубине структуры

Обсуждение результатов

В нашем случае емкость *pin*-фотодиода определяется по формуле [1]:

$$C = \epsilon \epsilon_0 A / w, \tag{1}$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость InGaAs; ϵ_0 — электрическая постоянная; A — площадь *p-n*-перехода; w — ширина области пространственного заряда.

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

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon \epsilon_0 (U_{bi} + U)}{e N}}, \tag{2}$$

где e — заряд электрона;

N — концентрация носителей.

При фоновой концентрации примеси в поглощающей области InGaAs-гетероструктуры $N = (0,7-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ 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, поскольку температура диффузии 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 [2—6], 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 меха-

низм и для диффузии кадмия, принимая во внимание большое количество вакансий, сопровождающих эту диффузию.

Сопоставление рис. 3 и 4 показывает, что увеличение концентрации носителей заряда в поглощающем слое со стороны подложки увеличивается за счет диффузии серы из подложки.

Заключение

В данной работе исследовались гетероэпитаксиальные структуры InGaAs/InP, используемые в качестве материала для *pin*-фотодиодов в производстве фотоприемных устройств с высокой чувствительностью к коротким по длительности импульсам и большим динамическим диапазоном входных мощностей, работающих в спектральном диапазоне 1,0—1,6 мкм. 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, увеличению удельной емкости. Такое увеличение концентрации серы связано с диффузией ее из высоколегированной подложки $n^+ - \text{InP}$ 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.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку мер, предотвращающих появление подобного эффекта, либо устраняющего его последствия для *pin*-фотодиодов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «НПО "Орион"»

*А. В. Рыбакову и В. Е. Степанюку
за проведение диффузионных
и имплантационных процессов.*

Л и т е р а т у р а

1. Техника оптической связи. Фотоприемники/Под ред. У. Тсанга. — М.: Мир, 1988.

2. Sang Kee Si, Deok Ho Yeo, Kyung Hun Yoon, Sung June Kim//IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 1998. V. 4. No. 4. P. 619.

3. Holonyak Nick//IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronic. 1998. V. 4. No. 4. P. 584.

4. Sang-Kook Han, Sanjai Sinha, Ramu V. Ramaswamy // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 760.

5. Helmy Amr Saher, Johnson N. P., Ke M. L. et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 1998. V. 4. No. 4. P. 661.

6. Slotte J., Saarinen K., Salmi A. et al.//Physical Review. 2003. V. B 67. P. 115209.

Diffusion of sulphur from the InP substrate of the InGaAs/InP heteroepitaxial structure at *pin*-photodiodes creating

P. V. Gorlachuk, A. A. Marmalyuk, Yu. L. Ryaboshtan
Stelmakh Research Institute "Polyus"
3 Vvedenskogo str., Moscow, 117342, Russia

V. V. Sarayikin
Lukin Research Institute of Physical Problems
5 4-th West Passage, Moscow, Zelenograd, 124460, Russia

P. E. Khakushev, I. B. Chinareva
Orion R&P Association
46/2 Enthusiasts road, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

InGaAs/InP pin-photodiodes increases capacity causes are investigated. It is concluded that sulphur diffusion from the InP substrate is responsible for this effect in the InGaAs layer.

PACS: 85.60.Dw

Bibliography — 6 references.

Received February 25, 2012