

- [5] J. A. Dagata, J. Schneur, H. H. Harary, J. Bennett, W. Tseng. J. Vac. Sci. Techn., B9, 1384 (1991).  
[6] N. Barniol, F. Perez-Murana, X. Aymerich. Appl. Phys. Lett., 61, 462 (1992).  
[7] M. Grundner, D. Graf, P. O. Hahn, A. Schnegg. Sol. St. Techn., 34, 69 (1991).  
[8] Л. Н. Болотов, Б. Е. Деркач, Л. Ф. Иванцов, И. В. Макаренко, П. Б. Плеханов, В. И. Сафаров. ФТТ, 32, 1523 (1990).

Редактор Т. А. Полянская

ФТП, том 27, вып. 8, 1993

## ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ДОНОРНОЙ ПРИМЕСИ В ФОСФИД ИНДИЯ

Т. М. Галина, В. Г. Володько, Е. С. Демидов, О. В. Подчищаева

Нижегородский исследовательский физико-технический институт при Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского, 603600, Нижний Новгород, Россия  
(Получено 28 января 1993 г. Принято к печати 25 февраля 1993 г.)

В связи с тем что научный интерес к полупроводникам типа  $A^{III}B^V$  не ослабевает, возросло значение результатов исследований при легировании таких материалов методом ионной имплантации. Особые проблемы возникают при легировании  $InP$ , поскольку в этом соединении компоненты сильно различаются по массе. По этой причине в результате бомбардировки ионами не только повреждается решетка материала, но наблюдается неоднородное распределение атомов обеих компонент по глубине, т. е. имеет место нарушение стехиометрии [1].

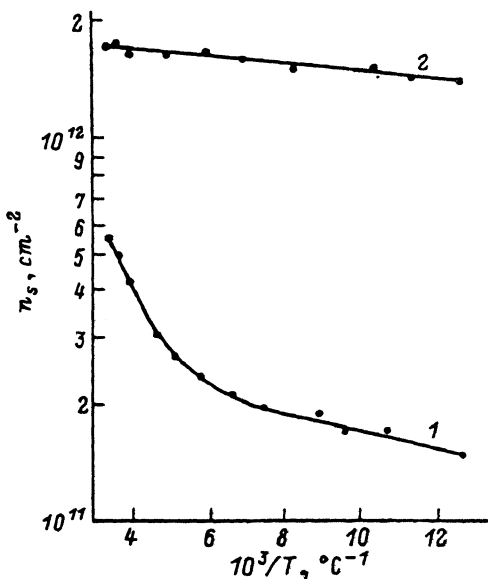
В данной работе исследовалось влияние режимов имплантации и отжига донорной примеси на качество ионно-легированных слоев фосфида индия. Имплантация примеси осуществлялась в полуизолирующий фосфид индия марки ФИП-1, легированный железом, ориентации (100), на установке типа «Везувий». Для уменьшения эффектов каналирования угол разориентации составлял  $7^\circ$ . Отжиг ионно-легированных структур проводился под защитой  $SiO_2$  в вакууме при  $600\text{--}650^\circ\text{C}$  в потоке водорода и под защитой фосфорно-силикатного стекла (ФСС) при  $700\text{--}730^\circ\text{C}$  в потоке аргона, а также без применения защитного покрытия в импульсном режиме на промышленной установке «Импульс-6» в интервале температур от  $700$  до  $900^\circ\text{C}$  с различной длительностью импульса от 5 до 30 с. Тип проводимости, слоиное сопротивление ( $\rho/d$ ), концентрацию ( $n$ ) и подвижность ( $\mu$ ) электронов контролировали с помощью эффекта Холла в диапазоне температур  $77\text{--}300\text{ K}$ . В качестве имплантируемых примесей были выбраны селен, германий и кремний. При имплантации ионов  $Se$  с энергией  $E = 200\text{ кэВ}$  в полуизолирующий фосфид индия с последующим отжигом при  $650^\circ\text{C}$  под защитой двуокиси кремния в течение 30 мин электрическая активация примеси проявляется лишь при дозах внедренных ионов  $\Phi = 1.25 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$ . Пороговая доза, при которой наблюдается активация германия, составляет  $3.2 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$ . При имплантации ионов  $Se$  и  $Ge$  подвижность электронов не превышает  $800\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , а поверхностная концентрация электронов составляет  $6 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}$  при  $300\text{ K}$ . Аналогичная картина имеет место и при имплантации кремния, однако пороговая доза в этом случае много меньше,  $6.25 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$ , при этом поверхностная концентрация достигает  $6 \cdot 10^{10}\text{ см}^{-2}$ . Большие значения пороговых доз при имплантации в полуизолирующий фосфид индия могут быть обусловлены, во-первых, высокой концентрацией глубокой акцепторной примеси железа [2], во-вторых, обеднением приповерхностной области фосфором во время

Электрофизические характеристики фосфида индия после предварительного введения фосфора и последующей имплантации ионов легирующей примеси

Тип иона	Режим имплантации		Режим отжига		$nd, 10^{12} \text{ см}^{-2}$	$\mu, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	
	Е, кэВ	$\Phi, 10^{13} \text{ см}^{-2}$	Температура, °С	Время, мин		77 К	300 К
Se	400	3.1	650	30	4.9	920	1510
Ge	400	0.62	650	30	3.0	100	300
Si	150	6.2	730	15	9.8	640	1450
Si	40	6.2	800	0.3	4.0	—	3000
Jl	40	31	800	0.3	40	—	2500

отжига [1, 3], в-третьих, неполным отжигом радиационных дефектов. Было установлено, что увеличение температуры и времени отжига, а также замена защитного покрытия  $\text{SiO}_2$  на ФСС не приводит к снижению пороговой дозы при имплантации ионов Se и Ge. Предполагая, что одной из основных причин низкой активации вводимых примесей является нарушение стехиометрии [1] — обеднение приповерхностной области легкой компонентой, т. е. фосфором, с последующим испарением его при постимплантационном отжиге, мы провели предварительную имплантацию ионов фосфора в различных режимах. Дополнительное введение фосфора позволило существенно снизить пороговую дозу при имплантации Se и Ge до величины  $6.25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

При имплантации в InP ионов кремния подлегирование ионами фосфора позволило получить слой  $n$ -типа проводимости с воспроизводимыми электрофизическими характеристиками (таблица). При этом были достигнуты максимальные значения подвижности —  $3 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  (доза  $6.25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ), поверхностной концентрации —  $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (доза  $3.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ). Следует отметить, что при легировании германием фосфида индия, предварительно нео-



Температурная зависимость поверхностной концентрации электронов  $n_s$  в фосфиде индия, легированного ионами германия с энергией 400 кэВ при дозе  $3.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ : внедрение в полуизолирующий фосфид индия (1) и в предварительно облученный ионами фосфора (2). Отжиг под защитой ФСС при 700 °С в течение 30 мин.

блужденного ионами фосфора, наблюдалась сильная зависимость концентрации от температуры (рисунок). Вероятно, при имплантации Ge и последующем отжиге образуется глубокий уровень с энергией ионизации, близкой к  $0.09 \div 0.11$  эВ, такой энергии ионизации соответствует комплекс  $[^4]$  типа вакансии — дефект внедрения (рисунок, кривая 1). Предварительная обработка ионами фосфора приводит к исчезновению глубокого уровня (рисунок, кривая 2). Поскольку такое явление не наблюдается при внедрении ионов кремния и селена, его можно объяснить амфотерным поведением германия в фосфиде индия и образованием в случае германия более сложных радиационных дефектов  $[^5]$ . Для температурных зависимостей  $\mu(T)$  в диапазоне  $T = 77 \div 300$  К характерно, что величина подвижности при 77 К значительно ниже, чем при 300 К (таблица), следовательно, при рассеянии носителей заряда в таких образцах имеется существенный вклад рассеяния, соответствующий закону  $\mu \sim T^P$ , где  $P > 0$ . К такому типу рассеяния относится рассеяние на ионизированной примеси и диполях, образованных парами противоположно заряженных ионов, что может быть связано с высокой концентрацией железа в узлах индия. С помощью измерений эффекта Холла на полуизолирующем InP установлено, что концентрация Fe составляет  $10^{17}$  см $^{-3}$ . В зависимости от режимов ионного легирования и постимплантационного отжига внедренная примесь и железо могут вести себя различным образом, неоднозначно влияя на общую картину легирования.

Эксперименты по облучению InP ионами кремния с предварительным введением фосфора и с последующим импульсным отжигом радиационных дефектов показали возможность получения донорных слоев с высокими и стабильными электрическими параметрами. Предварительное облучение ионами фосфора при легировании полуизолирующего InP кремнием и последующий импульсный отжиг позволили снизить контактное сопротивление для диодов Ганна в структуре Au/AuGe/Ni/InP с  $10^{-2}$  до  $10^{-6}$  Ом·см $^2$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] L. A. Christel, J. F. Gibbons. J. Appl. Phys., 52, 5050 (1981).
- [2] C. R. Zeisse, R. Reedy. J. Appl. Phys., 52, 3353 (1981).
- [3] D. E. Holmes, R. G. Wilson, P. W. Yu. J. Appl. Phys., 52, 3396 (1981).
- [4] А. А. Гринсон, А. А. Гуткин, С. Г. Метревели. Зарубежная радиоэлектроника, вып. 11, 57 (1987).
- [5] В. Д. Вернер, А. А. Пшеничный, Г. И. Радауцан. Зарубежная электронная техника, 9 (267), 73 (1983).

Редактор Л. В. Шаронова

ФТП, том 27, вып. 8, 1993

### МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЧИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ ИНДИЕМ МОНОКРИСТАЛЛОВ $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Г. В. Лашкарев, А. В. Бродовой, А. Л. Мирец, С. П. Колесник,  
Г. А. Зыков, М. С. Никитин

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича Академии наук Украины,  
252680, Киев, Украина

(Получено 25 декабря 1992 г. Принято к печати 15 марта 1993 г.)

В связи с разработкой приборов для инфракрасной области спектра не уменьшается интерес к твердым растворам теллурида кадмия и ртути. Однако прост-