

## СОВМЕСТНАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ В ПОЛУИЗОЛИРУЮЩИЙ АРСЕНИД ГАЛЛИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНОЙ И ИЗОВАЛЕНТНОЙ ПРИМЕСЕЙ

Абрамов В. С., Акимченко И. П., Дравин В. А., Дымова Н. Н.,  
Краснопевцев В. В., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В.

Исследованы свойства слоев, полученных имплантацией ионов Si, P, Ar, Se, Ga, Kг и их комбинациями Si+P, Si+Ar, Se+Ga, Se+Kг в подложки полупроводящего GaAs : Cr. Показано, что совместная имплантация изовалентной (P, Ga) и донорной (Si, Se) примесей позволяет повысить концентрацию и подвижность электронов в слое. Обсуждаются вероятные причины этого явления.

Имплантация ионов кремния в полупроводящие кристаллы арсенида галлия является распространенным методом получения слоев *n*-типа проводимости. Однако при увеличении дозы имплантируемого кремния его степень активации уменьшается из-за увеличения числа собственных дефектов решетки, вводимых в процессе имплантации и не отожженных при термообработке, а также из-за самокомпенсации кремния, проявляющего в арсениде галлия амфотерные свойства. Было обнаружено [1, 2], что совместная имплантация в GaAs ионов Si и изовалентной примеси P при определенном соотношении их концентраций позволяет увеличить слоевую концентрацию электронов  $N_{SS}$  в 1.5 раза по сравнению с GaAs, имплантированным только ионами Si.

Целью настоящей работы являются экспериментальное исследование и анализ возможных причин увеличения эффективности активации электрически активных примесей при совместной имплантации в GaAs следующих пар электрически активной и изовалентной примесей: Si+P и Se+Ga.<sup>1</sup>

Использовались пластины полупроводящего GaAs : Cr ориентации (100) с удельным сопротивлением  $10^7$ — $10^8$  Ом·см и толщиной 600 мкм. Ионы  $^{30}\text{Si}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{78}\text{Se}$ ,  $^{69}\text{Ga}$ ,  $^{84}\text{Kг}$  и их комбинации Si+P, Si+Ar, Se+Ga и Se+Kг внедрялись с распределенной энергией таким образом, чтобы вблизи поверхности подложек имелся равномерно имплантированный слой толщиной 0.3 мкм с концентрациями Si и Se, равными  $1 \cdot 10^{18}$ , а P, Ar, Ga, Kг —  $5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Схема имплантации представлена на рис. 1.

Отжиг структур проводился обычным термическим способом при температуре 800 °С в течение 20 мин в атмосфере H<sub>2</sub>. В качестве защитного покрытия использовался пиролитический Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Концентрация и подвижность носителей заряда измерялись методом Вандер-По при 300 К. Профили распределения примесей определялись методом масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС). Исследования фотолюминесценции (ФЛ) проводились при 4.2 К в диапазоне 0.8—1.0 мкм с разрешением не хуже 0.5 мэВ.

<sup>1</sup> Изовалентными принято называть примеси, обладающие той же валентностью и сходной структурой верхней электронной оболочки, что и соответствующие атомы матрицы. В этом смысле имплантируемый в GaAs галлий можно рассматривать как частный случай изовалентной примеси.

В таблице представлены результаты измерений слоевой концентрации  $N_{SS}$  и подвижности носителей заряда для исследованных образцов GaAs. Следует отметить, что после отжига участки пластины исходного неимплантированного GaAs и GaAs, имплантированного только ионами изовалентных примесей P и Ga

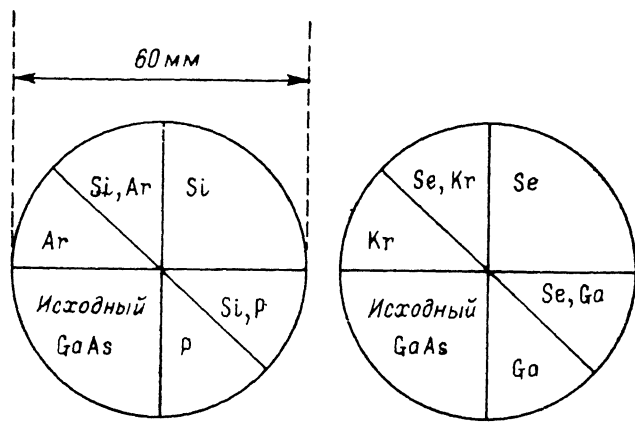


Рис. 1. -Схема имплантации пластин арсенида галлия.

и ионами инертных газов Ar и Kr, оставались высокоомными, т. е. можно заключить, что формирование проводящих слоев не является следствием введения дефектов при термообработке (например, из-за плохого качества защитного покрытия), а изовалентные примеси не обладают собственной электрической активностью.

Рассмотрим экспериментальные данные, полученные для серии образцов, имплантированных кремнием.

Из таблицы видно, что из этой серии наибольшей слоевой концентрацией обладают образцы, имплантированные совместно Si и P, а минимальной —

Электрофизические параметры при 300 К слоев GaAs, имплантированных ионами Si, P, Ar, Se, Ga, Kr

№ образца	Концентрация имплантированных примесей, см <sup>-3</sup>	Тип проводимости	Слоевая концентрация носителей, см <sup>-3</sup>	Подвижность носителей заряда, см <sup>2</sup> /В · с
1	$N_{Si}=1 \cdot 10^{18}$	<i>n</i>	$(2.2 \pm 0.1) \cdot 10^{13}$	2000 ± 40
2	$N_{Si}=1 \cdot 10^{18}$ $N_P=5 \cdot 10^{18}$	<i>n</i>	$(4.1 \pm 0.2) \cdot 10^{13}$	2200 ± 50
3	$N_{Si}=1 \cdot 10^{18}$ $N_{Ar}=5 \cdot 10^{18}$	<i>n</i>	$(5.1 \pm 0.3) \cdot 10^{12}$	2800 ± 60
4	$N_P=5 \cdot 10^{18}$	<i>n</i>	Высокоомные	«
5	$N_{Ar}=5 \cdot 10^{18}$	<i>n</i>		
6	$N_{Se}=1 \cdot 10^{18}$	<i>n</i>	$(7.5 \pm 0.3) \cdot 10^{12}$	2700 ± 60
7	$N_{Se}=1 \cdot 10^{18}$ $N_{Ga}=5 \cdot 10^{18}$	<i>n</i>	$(1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{13}$	2550 ± 50
8	$N_{Se}=1 \cdot 10^{18}$ $N_{Kr}=5 \cdot 10^{18}$	<i>n</i>	$(2.4 \pm 0.1) \cdot 10^{12}$	2900 ± 60
9	$N_{Se}=1 \cdot 10^{18}$ $N_{Ga}=1 \cdot 10^{19}$	<i>p</i>	$(3.7 \pm 0.2) \cdot 10^{10}$	140 ± 10
10	$N_{Se}=1 \cdot 10^{18}$ $N_{Kr}=1 \cdot 10^{19}$	<i>n</i>	$(3.2 \pm 0.1) \cdot 10^{11}$	1200 ± 10
11	$N_{Ga}=5 \cdot 10^{18}$	<i>n</i>	Высокоомные	»
12	$N_{Kr}=5 \cdot 10^{18}$	<i>n</i>		

образцы, имплантированные совместно Si и Ar.  $N_{SS}$  в образцах, совместно имплантированных Si и P, более чем в 2 раза превышает соответствующее значение для случая имплантации только ионов Si. Следует отметить, что подвижность электронов в слоях GaAs : Si, P несколько выше, чем в GaAs : Si.

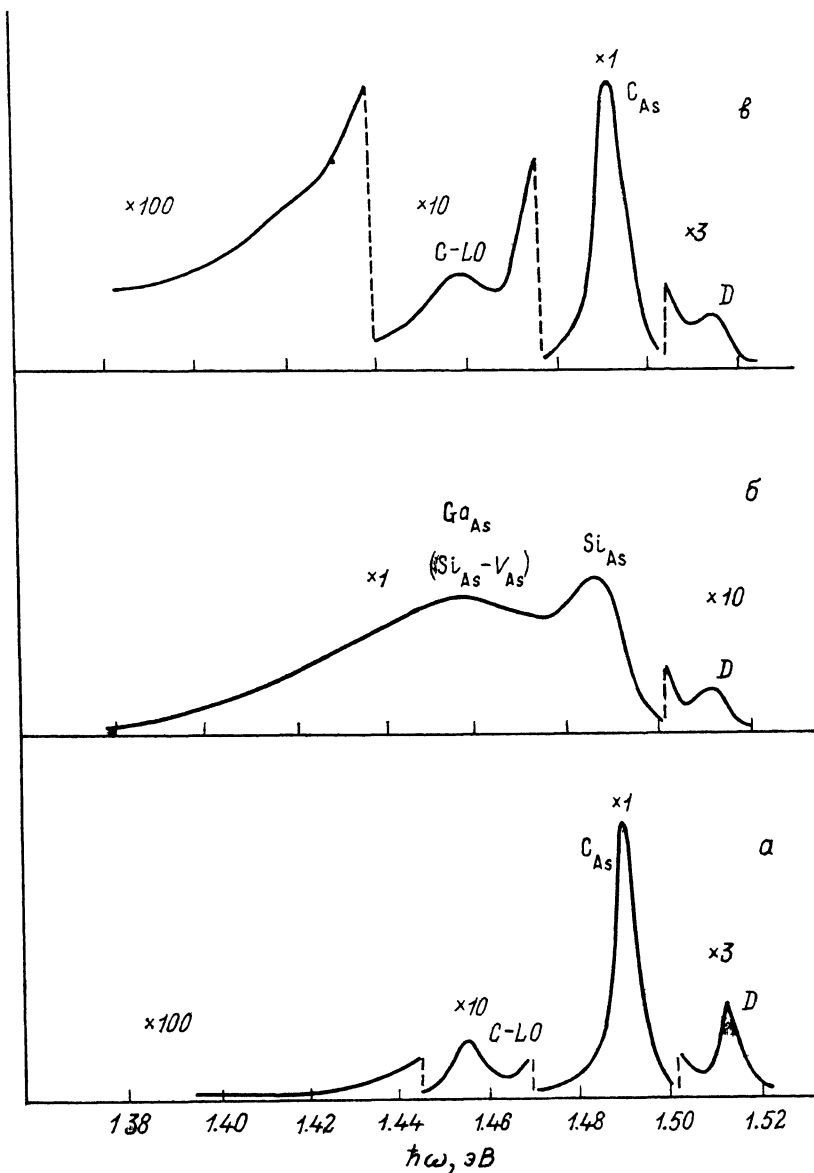


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции при 4.2 К арсенида галлия, отожженного при 800 °С в течение 20 мин.

*a* — исходный GaAs (без имплантации); *б* — GaAs : Si; *в* — GaAs : Si, P.

Таким образом, наши экспериментальные данные, как и данные [1, 2], свидетельствуют об увеличении степени активации кремния при совместной имплантации в GaAs кремния и фосфора

На рис. 2 приведены спектры фотолуминесценции при 4.2 К образцов GaAs, подвергнутых термообработке при температуре 800 °С в течение 20 мин: исходного (без имплантации) образца (*a*), имплантированного кремнием (*б*), и образца, имплантированного совместно кремнием и фосфором. В спектре исходного GaAs присутствуют краевая (донорная) полоса и линия рекомбинации носителей на фоновом мелком акцепторе, сопровождаемая фоновыми повторе-

ниями при 1.46 и 1.42 эВ. По энергетическому положению этой полосы можно заключить, что основным мелким акцептором в исходном материале является углерод. Как можно видеть из рис. 2, б, в GaAs : Si максимум акцепторной полосы смещен по сравнению с исходным материалом в длинноволновую область, что свидетельствует об изменении химической природы мелких акцепто-

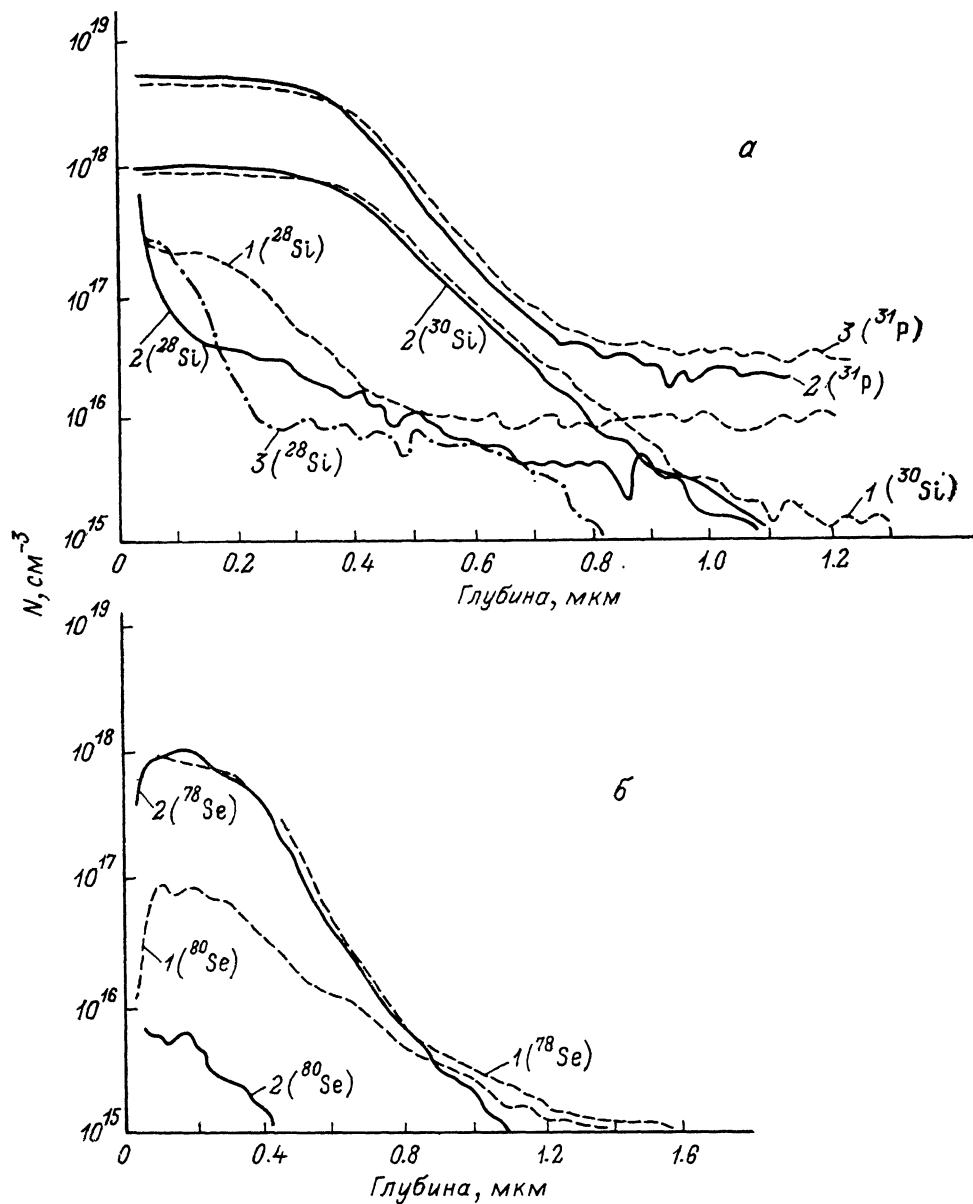


Рис. 3. Профили распределения концентраций имплантированных примесей, полученные методом ВИС.

а: 1 — GaAs : Si; 2 — GaAs : Si, P; 3 — GaAs : P. б: 1 — GaAs : Se, 2 — GaAs : Se, Ga.

ров. Мелким акцептором, преобладающим в спектрах фотолюминесценции этих образцов, является  $\text{Si}_{\text{As}}$ . Другой особенностью спектров фотолюминесценции GaAs : Si является интенсивная полоса с максимумом при 1.44—1.46 эВ (положение максимума зависело от концентрации внедренного кремния). Обычно эту линию связывают с антиструктурным дефектом  $\text{Ga}_{\text{As}}$ , а в образцах, имплантированных кремнием, также с дефектом типа  $\text{Ga}_i\text{—Si}_{\text{As}}$  или  $\text{V}_{\text{As}}\text{—Si}_{\text{As}}$  (см., например, [3-5]).

В отличие от GaAs : Si основным мелким акцептором в образцах, имплантированных совместно кремнием и фосфором, является, как и в исходном материале, углерод (рис. 2, *е*). Линию 1.46 эВ в спектрах ФЛ GaAs : Si, P исходя из ее энергетического положения, формы и интенсивности следует связать с фоновым повторением линии мелких акцепторов. Концентрация дефектов типа Ga<sub>As</sub> (Ga<sub>i</sub>—Si<sub>As</sub>, V<sub>As</sub>—Si<sub>As</sub>) в GaAs : Si, P, по-видимому, невелика, соответствующая этим дефектам линия ФЛ не наблюдается явно в спектре.

Следует также отметить, что отношение интенсивности донорной полосы к интенсивности акцепторной, а также интегральная интенсивность ФЛ в GaAs : Si, P выше, чем в GaAs : Si. Эти явления, по-видимому, обусловлены более высокой концентрацией доноров в GaAs : Si, P по сравнению с GaAs : Si и меньшей степенью компенсации за счет акцепторов Si<sub>As</sub> и собственных дефектов решетки.

На рис. 3, *а* представлены полученные методом ВИМС профили распределения концентрации имплантированных примесей для образцов GaAs : Si, P, GaAs : Si и GaAs : P. Видно, что образцы GaAs : P и GaAs : Si, P имеют сходные профили распределения фосфора, а образцы GaAs : Si и GaAs : Si, P — сходные профили распределения <sup>30</sup>Si. Можно заметить лишь незначительное уменьшение «хвостов» обоих распределений при совместной имплантации Si и P.

Следует отметить, что во всех имплантированных образцах присутствует <sup>28</sup>Si, наиболее вероятным источником которого является диэлектрик Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, используемый в качестве защитного покрытия при высокотемпературной обработке. Профили распределения концентрации <sup>28</sup>Si весьма существенно изменялись от образца к образцу, однако можно заключить, что наибольшей глубиной проникновения характеризуется образец GaAs : Si, наименьшей — GaAs : P, а GaAs : Si, P занимает промежуточное положение. Можно сделать вывод, что фосфор препятствует диффузии кремния из защитного покрытия в подложку.

Кроме совместной имплантации кремния и фосфора, нами исследовалась другая пара электрически активной и изовалентной примесей — селен и галлий. Оказалось, что и в этом случае совместная имплантация позволяет повысить степень активации электрически активной примеси. Как видно из таблицы, наибольшая слоевая концентрация электронов в исследованной серии образцов была получена при концентрации селена и галлия:  $1 \cdot 10^{18}$  и  $5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> соответственно. Увеличение концентрации имплантированного галлия до  $1 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> приводит к инверсии типа проводимости слоя, что, скорее всего, связано с высокой концентрацией дефектов типа Ga<sub>As</sub>. Отрицательное влияние таких дефектов на эффективность легирования донорной примесью необходимо учитывать при выборе оптимальных доз имплантации Se и Ga. Кроме того, для полного отжига дефектов, создаваемых в процессе ионной имплантации атомов Se и Ga, более тяжелых, чем Si и P, целесообразно, по-видимому, использовать температуру выше 800 °C.

На рис. 3, *б* представлены полученные методом ВИМС профили распределения концентрации селена для образцов GaAs : Se и GaAs : Se, Ga. Видно, что, как и в случае GaAs : Si, P, изовалентная примесь не оказывает существенного влияния на профиль распределения концентрации доноров.

Таким образом, несмотря на ряд специфических особенностей, изовалентная примесь Ga может быть использована для повышения эффективности легирования GaAs донором селеном методом ионной имплантации.

### Обсуждение результатов

Итак, экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, в соответствии с данными [1, 2] показали, что совместная имплантация изовалентной и электрически активной примесей позволяет существенно увеличить степень активации последней. Рассмотрим возможные причины этого эффекта.

Прежде всего следует подчеркнуть, что изовалентные примеси P и Ga не проявляют собственной электрической активности и, следовательно, их влияние на эффективность легирования может осуществляться только через взаимодействие с другими примесями или дефектами решетки.

Одной из важнейших причин снижения эффективности легирования является высокая концентрация дефектов решетки, возникающих в процессе ионной имплантации. Существенное увеличение дозы имплантированных ионов за счет электрически неактивных изовалентных примесей должно приводить к росту концентрации таких дефектов и понижению эффективности легирования, как это происходит, например, при совместной имплантации в арсенид галлия кремния и аргона или селена и криптона (см. таблицу). Тот факт, что при использовании изовалентных примесей происходит не снижение, а, напротив, увеличение концентрации электронов в слое, позволяет заключить, что изовалентные примеси (как P, так и Ga) способствуют залечиванию дефектов и восстановлению структуры нарушенного при ионной имплантации слоя. Подтверждением этого вывода можно, по-видимому, считать обнаруженные в GaAs : Si, P уменьшение диффузии  $^{28}\text{Si}$  из защитного покрытия в объем кристалла, подавление дефекта, ответственного за полосу ФЛ 1.44—1.46 эВ, а также возрастание интегральной интенсивности ФЛ.

Указанная выше причина повышения эффективности легирования при использовании изовалентных примесей не является единственной. Следует обратить внимание на то, что в использованных для совместной имплантации парах изовалентная и донорная примеси замещают атомы в различных подрешетках кристалла. Вследствие этого, помимо подавления компенсирующих дефектов типа  $\text{Ga}_{\text{As}}$  в GaAs : Si или  $V_{\text{Ga}}-\text{Se}_{\text{As}}$  в GaAs : Se, изовалентные примеси создают отклонение от стехиометрии, стимулирующее образование атомами Si и Se мелких донорных состояний в узлах Ga и As соответственно. Этот эффект, по-видимому, должен быть особенно важным для кремния, проявляющего в арсениде галлия ярко выраженные амфотерные свойства. Этот вывод подтверждают данные ФЛ, а именно подавление пика акцептора  $\text{Si}_{\text{As}}$  и увеличение интенсивности донорной полосы по отношению к акцепторной в GaAs : Si, P.

Таким образом, можно заключить, что совместная имплантация донорной и изовалентной примесей приводит к существенному увеличению концентрации электронов в слое (в  $\sim 2$  раза для GaAs : Si, P и в  $\sim 1.5$  раза для GaAs : Se, Ga) по сравнению со слоями, имплантированными только донорной примесью. Причина этого явления состоит во взаимодействии изовалентных примесей с собственными дефектами решетки, приводящем к залечиванию дефектов и восстановлению кристаллического совершенства нарушенного при ионной имплантации слоя, а также во взаимодействии с электрически активными примесями, способствующем активации последних в состояние мелких доноров.

#### Список литературы

- [1] Hyuga F., Yamazaki H., Watanabe K., Osaka J. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. N 22. P. 1592—1594.
- [2] Morrow R. A. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 4. P. 1889—1896.
- [3] Hiramoto T., Mochizuki Y., Ikoma T. // Japan. J. Appl. Phys. 1986. V. 25. N 10. P. L830—L832.
- [4] Лубышев Д. Я., Мигаль В. П., Преображенский В. В., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 10. С. 1913—1916.
- [5] Bindal A., Wang K. L., Chang S. L., Kaller M. A., Staffsudd O. M. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 3. P. 1246—1252.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получена 2.04.1991  
Принята к печати 4.04.1991