

п, значит, не может быть причиной изменения скорости введения центра $E4$. Поэтому указанный центр нельзя отнести к первичным дефектам. Следовательно, уменьшение скорости введения центра $E4$ может быть вызвано изменением реакционной способности первичных дефектов к комплексообразованию при понижении температуры облучения. В таком случае либо в подрешетке мышьяка по крайней мере один из компонентов пары Френкеля подвижен, либо в образовании центра $E4$ участвуют подвижные дефекты из подрешетки галлия.

Вывод о подвижности дефектов сделан также авторами работы [6], изучавшими полуизолирующий арсенид галлия, облученный гамма-квантами ^{60}Co при 33 К. Методом термостимулированного тока они обнаружили центр 0.13 эВ, который отжигался при температуре ниже 83 К. Нагрев образца до 152 К приводил к появлению в спектре при 65 К пика 0.18 эВ, амплитуда которого росла при увеличении температуры. Скорость введения этого дефекта, полученная после низкотемпературного облучения и последующего часового отжига при 300 К, равна $2.9 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, что на порядок меньше скорости введения центра 0.13 эВ. Близкое значение скорости введения дефекта 0.18 эВ получено и в случае облучения при 300 К ($3.3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$). Авторы предполагают, что дефект является вторичным и соответствует известному центру $E2$. Дополнительно отметим, что скорость введения этого дефекта близка к скорости введения $E2$ в арсениде галлия n -типа ($3.8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ [7]).

Таким образом, исследование влияния температуры облучения на спектр радиационных дефектов позволило определить параметры центра $E9$ и сделать вывод о том, что в арсениде галлия n -типа в процессе облучения при 300 К образуются подвижные первичные дефекты, участвующие в комплексообразовании, а дефект $E4$ с энергией активации термоэмиссии электронов 0.63 эВ и сечением захвата $\sigma_n = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ представляет собой комплекс. Вопрос же о природе радиационных дефектов в арсениде галлия остается по-прежнему открытым.

Список литературы

- [1] Pons D., Bourgoin J. C. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1985. V. 18. N 20. P. 3839—3874.
- [2] Thommen K. // Rad. Eff. 1970. V. 2. N 2. P. 201—210.
- [3] Rezazaden A. A., Palmer D. W. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1985. V. 18. N 1. P. 43—54.
- [4] Guillot G., Nouailhat A., Vincent G., Baldy M. // Rev. Phys. Appl. 1980. V. 15. N 3. P. 679—686.
- [5] Вопросы радиационной технологии полупроводников // Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1980. 296 с.
- [6] Tomozane M., Nannichi Y., Kamada H., Ando K. // Japan. J. Appl. Phys. 1987. V. 26. N 7. P. L1076—L1078.
- [7] Мамонтов А. П., Пешев В. В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 10. С. 1774—1774.

Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко
БГУ им. В. И. Ленина
Минск

Получено 15.08.1988
Принято к печати 11.08.1989

ФТП, том 24, вып. 1, 1990

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ СОСТАВА ОТ СТЕХИОМЕТРИИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЯДЕРНО ЛЕГИРОВАННОГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

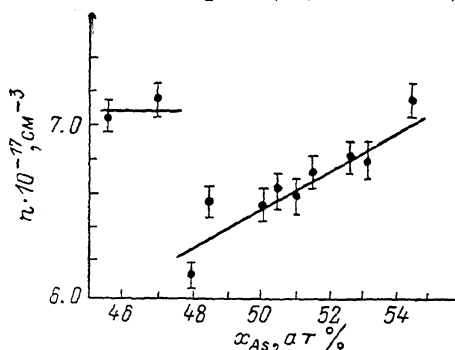
Колин Н. Г., Королева И. А., Марков А. В.,
Освенский В. Б.

Ядерное легирование арсенида галлия является перспективным способом получения монокристаллов n -типа проводимости с высокой однородностью распределения электрофизических параметров в объеме [1, 2]. Однако полу-

чаемый в настоящее время путем облучения тепловыми нейтронами и последующего активирующего отжига материал с концентрацией носителей заряда в диапазоне $n \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ имеет в несколько раз более высокую степень компенсации, чем материал с такой же концентрацией носителей, полученный путем легирования GaAs при выращивании. В связи с этим важное значение приобретают исследование природы акцепторов, образующихся в облученном GaAs, и поиск путей снижения их концентраций. В настоящей работе исследовано влияние состава исходного нелегированного GaAs на электрофизические параметры ядерно легированного арсенида галлия (ЯЛАГ).

В качестве исходных образцов были использованы пластины, вырезанные из нелегированных монокристаллов GaAs, выращенных методом Чохральского из расплавов различного состава. Состав расплава, соответствующий каждой пластине, рассчитывали с помощью известной весовой методики [3]. При этом был охвачен диапазон составов расплава от 45.5 до 54.4 ат% As. Зависимость электрофизических свойств и структуры исходных образцов от состава расплава описана в работе [4].

Облучение образцов нейтронами проводили в вертикальных каналах реактора ВВР-ц при температуре $T \leq 50^\circ \text{C}$ и соотношении плотностей потоков тепловых и быстрых ($E > 0.3 \text{ МэВ}$) нейтронов $\varphi_t/\varphi_0 \sim 10$. При этом $\varphi_t \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Флюенс нейтронов выбирался таким образом, чтобы суммарная концентрация вводимых примесей (германия и селена) в материале в результате ядерных реакций на тепловых нейтронах составила $N \approx 1.4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [1].



Зависимость концентрации носителей заряда (n) в отожженных образцах ядерно легированного GaAs от состава расплава исходного материала.

Отжиг облученных образцов проводили в запаянных кварцевых ампулах в атмосфере паров мышьяка при температуре 900°C в течение 2 ч. Скорость нагрева и охлаждения при температурах выше 500°C не превышала 1.5 град/мин .

Для определения электрических параметров полученного материала использовали метод Холла, при этом из каждой пластины вырезали 6—7 расположенных вдоль диаметра образцов и полученные на них значения усредняли.

На рисунке приведена зависимость концентрации носителей заряда n при комнатной температуре в отожженных ядерно легированных образцах GaAs от состава расплава, из которого была получена соответствующая пластина. В диапазоне составов 48.0—54.4 ат% As наблюдается закономерный рост концентрации носителей заряда, однако область изменения n была невелика ($\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Вместе с тем при составе расплава $\sim 47.5 \text{ ат\% As}$ наблюдается резкое изменение концентрации носителей практически на такую же величину. Выполненные измерения не выявили существенной зависимости подвижности электронов от состава кристалла. Средние значения подвижности при комнатной температуре для всех образцов составляли $(2.3 \div 2.5) \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Величина степени компенсации в полученных образцах меняется в интервале $K = 0.5 \div 0.55$. Это означает, что концентрация доноров в них составляет $N_D \sim 1.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (что соответствует суммарной концентрации введенных примесей), а концентрация акцепторов меняется в интервале $N_A \sim (7 \div 8) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

В исходном нелегированном GaAs разностная концентрация акцепторов и доноров, связанных с остаточными примесями и собственными точечными дефектами структуры, возрастает при увеличении содержания галлия в расплаве, однако не превосходит при этом величины $\sim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [4]. Из этого следует, что наблюдаемая зависимость $n(x_{As})$ отражает влияние состава неле-

Свойства ядерно легированного арсенида галлия

Концентрация носителей заряда n после облучения и отжига при 900 °С (2 ч), см ⁻³	Степень компенсации $K = \frac{N_A}{N_D}$	Концентрация носителей заряда n после облучения и отжига при 900 °С (2 ч), см ⁻³	Степень компенсации $K = \frac{N_A}{N_D}$
2.10 ¹⁷	0.58	1.0·10 ¹⁸	0.67
1.10 ¹⁸	0.44	2.3·10 ¹⁷	0.74
1.1·10 ¹⁸	0.54	1.12·10 ¹⁸	0.60
1.2·10 ¹⁸	0.53	1.25·10 ¹⁸	0.74
1.25·10 ¹⁸	0.73		

гированных кристаллов на генерацию акцепторов при ядерном легировании. Отсутствие данных о природе генерируемых акцепторов не позволяет дать однозначного объяснения эффектам уменьшения концентрации N_D с ростом содержания мышьяка в расплаве при $x_{As} \geq 48.0$ ат% As. Можно предположить, что наблюдаемое возрастание концентрации носителей заряда с ростом x обусловлено уменьшением концентрации акцепторных атомов германия, занимающих анионные узлы в решетке GaAs. Малая доля таких атомов по отношению к полной концентрации введенного германия определяет и малую величину наблюдаемого эффекта. Следует отметить также, что величина состава расплава $x_{As} \sim 47.5$ ат% As отмечалась ранее как критическая с точки зрения изменения свойств выращенных кристаллов GaAs [3].

Относительно слабое влияние состава исходных нелегированных кристаллов GaAs на степень компенсации после ядерного легирования позволяет сформулировать следующие выводы.

Во-первых, при получении ядерно легированного GaAs нет нужды в использовании исходного материала строго определенного состава. Некоторый выигрыш, достигаемый при использовании кристаллов, выращенных из расплавов с большим избытком галлия или мышьяка, перекрывается технологическими трудностями получения таких монокристаллов. Сделанный вывод, по-видимому, можно распространить на весь диапазон легирования $n=10^{17}-10^{18}$ см⁻³, поскольку, как видно из таблицы, в этом диапазоне величина степени компенсации практически не зависит от уровня легирования, т. е. концентрация генерируемых акцепторов пропорциональна концентрации введенной примеси.

Во-вторых, исходя из полученных данных, следует ожидать слабого влияния неоднородности состава исходных кристаллов в поперечном сечении [5] на неоднородность параметров ядерно легированного GaAs. Очевидно, что изменения состава в пределах одного сечения кристалла не превышают исследованных в настоящей работе. Соответственно максимальные изменения N_A , обусловленные неоднородностью состава в пределах пластины, не должны превышать ~10 %.

Список литературы

- [1] Колин Н. Г., Куликова Л. В., Освенский В. Б. и др. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 12. С. 2187—2192.
- [2] Колин Н. Г., Освенский В. Б., Юрова Е. С. и др. // Физ. и хим. обр. матер. 1987. № 4. С. 4—8.
- [3] Holmes D. E., Chen R. T., Ellicott K. R., Kirkpatrick C. B. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. N 1. P. 46—48.
- [4] Ковальчук И. А., Марков А. В., Мильвидский М. Г. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1988. Т. 24. В. 2. С. 324—326.
- [5] Ковальчук И. А., Марков А. В., Меженный М. В., Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 2. С. 106—110.

Филиал Научно-исследовательского физико-химического института им. Л. Я. Карпова
Обнинск

Получено 13.07.1989
Принято к печати 11.08.1989