

УДК 621.315

## ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ $Ar^+$ НА ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУИЗОЛИРУЮЩЕГО $GaAs$ <sup>1</sup>

П. Д. Бекрис<sup>2</sup>, А. С. Менунос<sup>2</sup>, П. К. Евфимиу<sup>2</sup>, В. С. Вавилов, К. Д. Куркутас<sup>3</sup>

*Приведены результаты измерений гальваномагнитных характеристик полуизолирующего  $GaAs$  (нелегированного, а также слабо- и сильнолегированного  $Cr$ ) до и после имплантации ионов  $Ar^+$ . Измерялись удельное сопротивление и магнетосопротивление, а также холловская постоянная (методом Ван дер Пау); получены данные о слоевой концентрации носителей заряда и о их подвижности. Измерения проводились как при повышенных, так и при низких температурах. Согласно результатам измерений, концентрация носителей заряда сильно возрастает после ионной имплантации, в то время как их подвижность существенно снижается при повышенных температурах. При низких температурах, прыжковая проводимость в  $GaAs$ , легированном  $Cr$ , по-видимому, существенна после ионной имплантации.*

Ионная имплантация становится в настоящее время одним из незаменимых методов модификации свойств полупроводников и других твердотельных материалов. В случае монокристаллов  $Si$ , основные результаты ионной имплантации и последующих отжигов хорошо изучены и предсказуемы [1]. Однако в случае  $GaAs$ , который является одним из наиболее важных полупроводниковых материалов, система дефектов, возникающих при

<sup>1</sup>Работа выполнена в рамках Соглашения между Грецией и Россией.

<sup>2</sup>Афинский университет, Физический факультет, кафедра физики твердого тела.

<sup>3</sup>Афинский технологический учебный институт.

ионной имплантации, значительно более сложная и заслуживает дальнейшего экспериментального исследования. В данной работе мы исследовали полуизолирующий  $GaAs$ . Первоначальные данные соответствующих экспериментов были приведены в работе [2], проведение которой было инициировано начавшимся использованием ионной имплантации в технологии СВЧ полевых транзисторов и других приборов, где требуется высокая подвижность носителей заряда. Выводы, сделанные авторами [2], были важны для улучшения технологии выращивания полуизолирующего  $GaAs$ . Дополнительные данные были получены в работе [3]. Влияние имплантации ионов  $Ar^+$  на удельную электропроводность  $GaAs$  было подробно изучено в работе [4], где было предположено, что наблюдавшиеся явления обусловлены аморфизацией материала. Было найдено, что доза насыщения составляет  $10^{12} Ar^+/cm^2$ . Методы определения профилей концентрации и подвижности носителей заряда были улучшены в работе [5]. В данном сообщении мы приводим данные о концентрации и подвижности носителей заряда в нелегированном и легированном  $Cr$  полуизолирующем  $GaAs$  до и после имплантации ионов  $Ar^+$ .

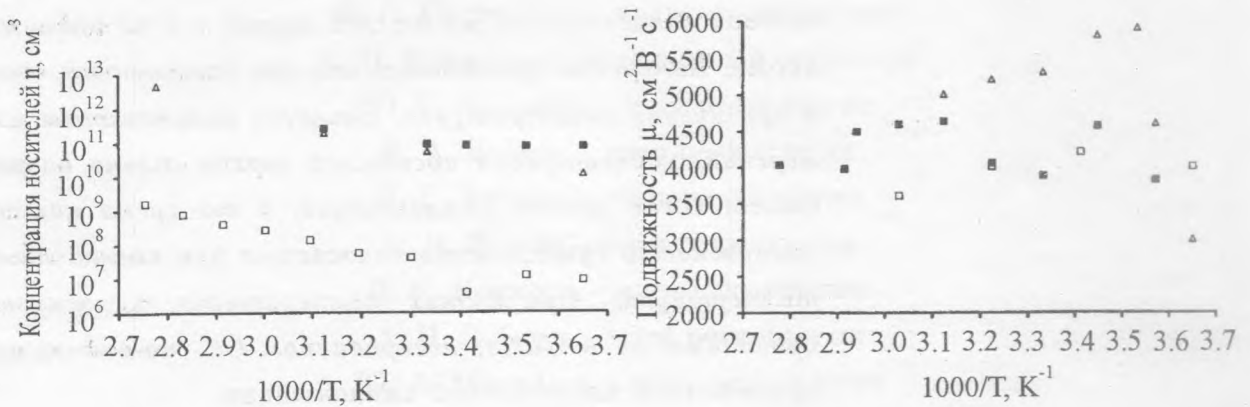


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в образце нелегированного полуизолирующего  $GaAs$  до и после имплантации ионов  $Ar^+$  с различными дозами: ( $\square$ ) неимплантированный, ( $\Delta$ )  $10^{12} cm^{-2}$ , ( $\blacksquare$ )  $10^{14} cm^{-2}$ .

Рис. 2. Температурная зависимость подвижности носителей заряда в нелегированном полуизолирующем  $GaAs$  до и после имплантации ионов  $Ar^+$  с различными дозами: ( $\square$ ) неимплантированный, ( $\Delta$ )  $10^{12} cm^{-2}$ , ( $\blacksquare$ )  $10^{14} cm^{-2}$ .

Образцы были вырезаны из пластин полуизолирующего  $GaAs$ , изготовленного фирмой Walker (Германия); толщина образцов была 0.3 мм. Исследовались 3 типа образцов:

(а) нелегированный  $GaAs$ ; (б) слаболегированный хромом ( $10^{15} \text{ см}^{-3}$ )  $GaAs$ ; (в) сильнолегированный хромом ( $10^{17} \text{ см}^{-3}$ )  $GaAs$ . Ток измерялся динамическим электрометром фирмы CARRY, а напряжение – электрометром фирмы Keithley. Имплантация ионов  $Ar^+$  с энергией  $100 \text{ кэВ}$  проводилась при комнатной температуре в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН (Москва). Образцы помещались в криостат. Согласно данным Гиббсона [6], толщина ионно-имплантированного слоя составляла примерно  $0.07 \text{ мкм}$ . Дозы ионов  $Ar^+$  были  $10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Измерения проводились как при повышенных, так и при пониженных температурах.

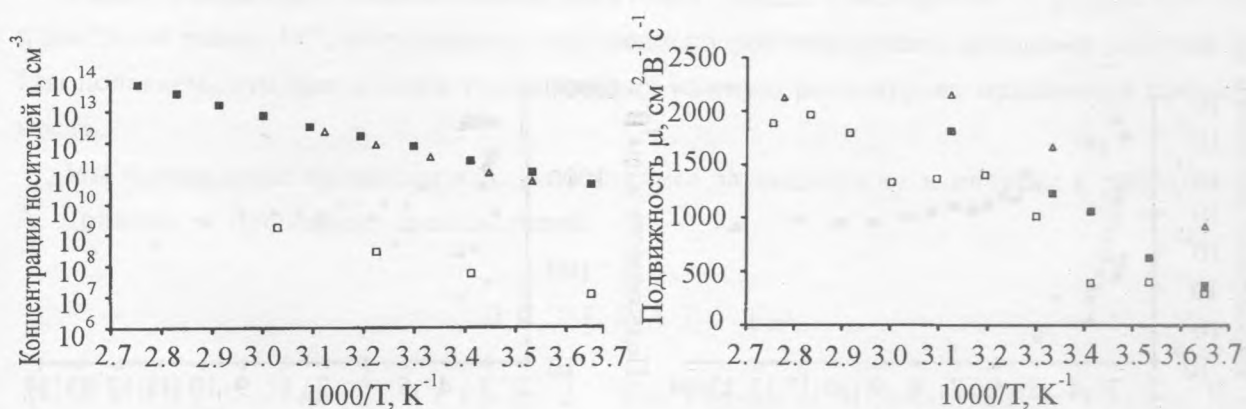


Рис. 3. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в образце 5 полуизолирующего  $GaAs$ , легированного хромом, до и после имплантации ионов  $Ar^+$  с различными дозами: (□) неимплантированный, (△)  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ , (■)  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

Рис. 4. Температурная зависимость подвижности носителей заряда в образце 5 полуизолирующего  $GaAs$ , легированного хромом, до и после имплантации ионов  $Ar^+$  с различными дозами: (□) неимплантированный, (△)  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ , (■)  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

В неимплантированном нелегированном полуизолирующем  $GaAs$  слоевая концентрация электронов  $n$  значительно ниже, чем в ионно-имплантированном материале при тех же температурах (рис. 1). Это связано с тем, что при имплантации создаются центры с энергетическими уровнями, приводящими к генерации свободных электронов. По данным емкостной спектроскопии глубоких уровней [7], существуют 3 типа таких центров, но наиболее важную роль играет центр с энергетическим уровнем на  $0.49 \text{ эВ}$  ниже дна зоны проводимости. Тот факт, что подвижность в нелегированном материале как до, так и после имплантации, достаточно высока (рис. 2), говорит о том, что подвижность относится к электронам в зоне проводимости, которые возбуждаются термически

с дефектов, введенных при имплантации.

В  $GaAs$ , легированном  $Cr$  (рис. 3, 4), уровень  $Cr$ , расположенный на  $0.7$  эВ ниже дна зоны проводимости, захватывает электроны с дефектов донорного типа; в результате, при пониженных температурах, когда термическое возбуждение создает лишь незначительную концентрацию электронов в зоне проводимости, механизм прыжковой проводимости оказывается предпочтительным. Очевидно, это явление наиболее существенно в случае имплантации с большой дозой ионов, когда концентрация носителей заряда достигает насыщения при температуре, несколько ниже  $300$  К.

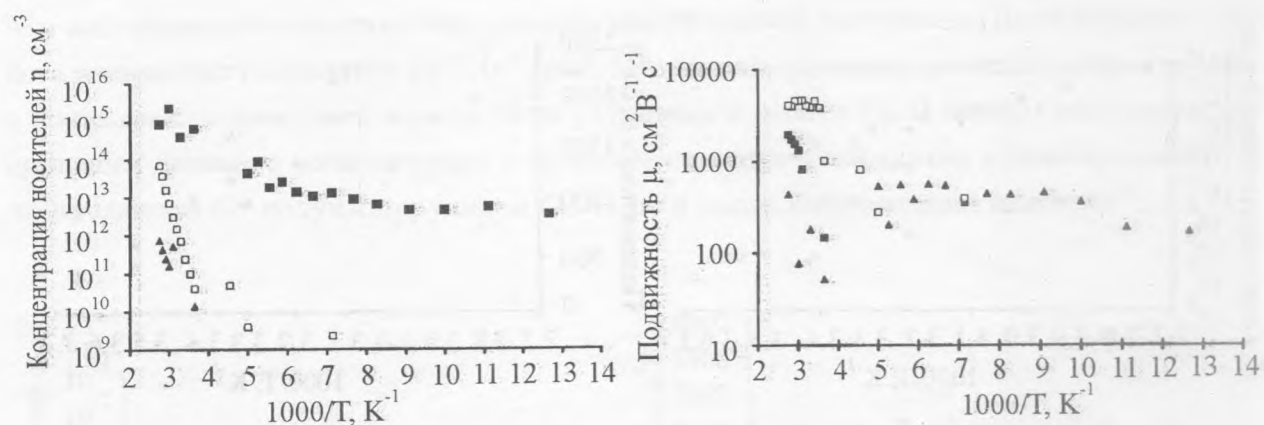


Рис. 5. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в нелегированном полуизолирующем  $GaAs$  ( $\square$ ) и в образцах 5 ( $\blacksquare$ ) и 6 ( $\blacktriangle$ ) полуизолирующего  $GaAs$ , легированного хромом, после имплантации  $10^{12} \text{Ar}^+/\text{cm}^2$ .

Рис. 6. Температурная зависимость подвижности носителей заряда в нелегированном полуизолирующем  $GaAs$  ( $\square$ ) и в образцах 5 ( $\blacktriangle$ ) и 6 ( $\blacksquare$ ) полуизолирующего  $GaAs$ , легированного хромом, после имплантации  $10^{12} \text{Ar}^+/\text{cm}^2$ .

Измерения проводились также и при более низких температурах. Для сравнения на рис. 5 приведены концентрации носителей заряда в образцах нелегированного  $GaAs$  и  $GaAs$ , легированного хромом (образцы 5 и 6); все образцы были имплантированы ионами  $Ar^+$  с дозой  $10^{12} \text{cm}^{-2}$ . Видно, что во всех случаях концентрация носителей заряда уменьшается на 3 – 4 порядка с понижением температуры до  $140$  К и при более низких температурах остается практически постоянной. При повышенных температурах концентрация электронов в образце 5 не сильно отличается от концентрации в нелегированном  $GaAs$ ; в то же время, концентрация носителей заряда в образце 6 значительно

ниже, поскольку в этом образце значительна проводимость ловушек  $Cr$ . На рис. 6 представлена подвижность носителей для трех имплантированных образцов. Подвижности в образце нелегированного  $GaAs$  и в образце  $GaAs$ , легированного хромом, достаточно высоки и отличаются незначительно при повышенных температурах, но эти подвижности резко уменьшаются с повышением температуры и достигают значений подвижности в образце 5, легированном хромом. В образце 5 подвижность носителей заряда снижается незначительно с повышением температуры. Как указано выше, это может быть связано с прыжковой проводимостью по уровням при низких температурах.

Резкое увеличение концентрации носителей заряда (электронов) в результате имплантации ионов  $Ar^+$ , по-видимому, обусловлено формированием донорных центров [7]. Мы полагаем, что при низких температурах важную роль играет прыжковая проводимость.

Мы благодарим профессора А. А. Гиппиуса за поддержку и интерес к работе и В. А. Дравина за проведение имплантаций.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Brodie J. and Murray J. The Physics of Microfabrication, Plenum, New York, 1982.
- [2] Das M. B. and Kim B. IEEE Trans. Electron Devices, **29**, T205 (1982).
- [3] Lee Kang, Shur M. S., Lee K w y r o, et al. IEEE Trans. Electron Devices, **31**, P339 (1984).
- [4] Deng X., Liu X. H., Bohringer K., and Kalbitzer S. Appl. Phys. A, **33**, 29 (1984).
- [5] Nipoti, Poggi D., Centronio A., and Lanzieri C. Appl. Surf. Sci., **50**, 410 (1991).
- [6] Gibbons J. Proc. IEEE, March 1968, p. 245.
- [7] Aleschenko Yu. A. et al. Radiat. Eff. Defects Solids, **25**, 321 (1993).

Поступила в редакцию 18 мая 1999 г.