

СПЕКТРОСКОПИЯ КРС ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ GaAs

Артамонов В. В., Валах М. Я., Громашевский В. Л., Нечипорук Б. Д.,
Стрельчук В. В., Юхимчук В. А.

Методом комбинационного рассеяния света исследован процесс структурного разупорядочения полупроводникового GaAs, имплантированного ионами Ag^+ при варьировании дозы и энергии. Проанализированы особенности спектров кристаллической и аморфной фаз. Показано, что процесс структурного разупорядочения GaAs, имплантированного ионами Ag^+ , носит немонотонный характер, что объясняется конкурирующими процессами разупорядочения кристаллической структуры и ее самоотжига, обусловленного процессами диффузии и рекомбинации точечных дефектов.

Введение. Имплантация ионов химически активных элементов широко используется в полупроводниковом приборостроении для управления свойствами и структурой поверхностных слоев полупроводниковых материалов с целью создания легированных приповерхностных слоев с заданными электрическими характеристиками [1]. Промышленное внедрение и эффективность технологии ионной имплантации ограничиваются сложностью физических процессов в поверхностном слое и недостаточной изученностью их кинетики. Для решения этих задач используется информация, получаемая различными методами диагностики. При этом все большее распространение приобретают неструктурные методы анализа, в том числе оптические [эллипсометрия [2], отражение и пропускание [3], люминесценция [4], комбинационное рассеяние света (КРС) [5] и др.].

Спектроскопия КРС используется преимущественно для контроля возникающего при имплантации разупорядочения и последующего восстановления кристаллической структуры при термическом или лазерном отжиге [6], возникающих локальных колебаний примесей [7], влияния имплантации на напряжения в полупроводниковых структурах [8]. Важно при этом отметить, что КРС позволяет не только качественно характеризовать состояние приповерхностного слоя, но и в ряде случаев количественно характеризовать исследуемые эффекты.

Повреждения, образованные при имплантации ионов в кристаллическую поверхность, представляя собой кластерные высокоразупорядоченные области. С увеличением дозы имплантации разупорядоченные области увеличиваются и перекрываются вплоть до образования сплошного аморфного слоя [1]. Последний характеризуется оптическими и структурными свойствами, аналогичными таковым для аморфных пленок.

В спектрах КРС основными эффектами, которые наблюдаются при разупорядочении кристаллической структуры и образовании аморфного слоя, являются асимметричное уширение фононных полос с оттенением низкочастотного крыла и смещением в низкочастотную сторону, а также появление широкого непрерывного спектра, характерного для аморфной фазы. Достоинством метода КРС является то, что с его помощью можно одновременно наблюдать резкий максимум, соответствующий рассеянию в кристаллической фазе, и непрерывный спектр, характерный для аморфной фазы. В результате можно исследовать динамику их взаимных превращений.

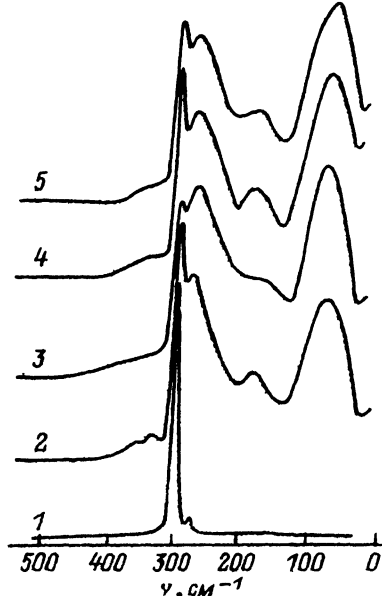


Рис. 1. Спектры КРС GaAs исходного образца (1), имплантированных ионами Ag^+ (2–5) с энергией $E = 150$ кэВ и дозами $6 \cdot 10^{12}$, $3 \cdot 10^{13}$, $1 \cdot 10^{14}$, $1.2 \cdot 10^{15}$ см^{-2} соответственно.

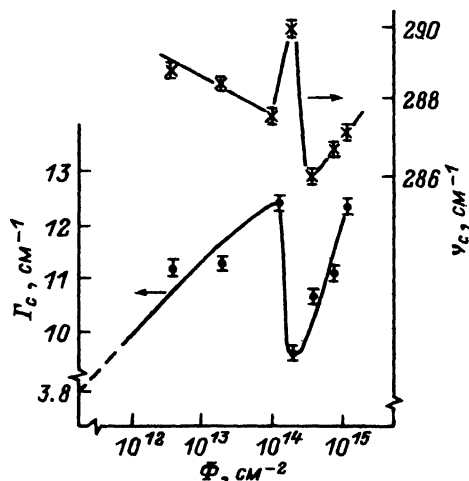


Рис. 2. Зависимость изменения частоты и полудирины LO-полосы с-GaAs от дозы имплантации Ag^+ в пределах от $6 \cdot 10^{12}$ до $1.2 \cdot 10^{15}$ см^{-2} , $E = 150$ кэВ.

В данной работе приведены экспериментальные результаты исследования методом КРС процессов разупорядочения полуизолирующего GaAs, имплантированного Ag^+ при варьировании дозы и энергии ионов.

Методика исследования

Исследовались пластины монокристаллического полуизолирующего (100) GaAs (АГП), имплантированного при комнатной температуре ионами Ag^+ в диапазоне доз $6 \cdot 10^{12}$ – $1.2 \cdot 10^{15}$ см^{-2} с энергиями 50–175 кэВ. Во избежание эффекта каналирования образцы разориентировались на 7° относительно ионного пучка.

Спектры КРС регистрировались при комнатной температуре на установке, собранной на базе спектрометра ДФС-52. Возбуждение спектров КРС осуществлялось аргоновым лазером ($\lambda = 514.5$ и 487.9 нм) в области собственного поглощения. Мощность возбуждающего пучка не превышала 100 мВт. Регистрация сигнала производилась охлаждаемым ФЭУ-136 в режиме счета фотонов. Геометрия эксперимента — «на отражение». Спектральная ширина щели при записи однофононной кристаллической линии и кривой аморфного GaAs составляла 3 см^{-1} . Точность определения частоты максимума полосы была не хуже 0.2 см^{-1} , что обеспечивалось одновременной записью линий разряда Ne.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны спектры КРС исходного образца GaAs (1) и четырех образцов (2–5), имплантированных дозами $6 \cdot 10^{12}$, $3 \cdot 10^{13}$, $1 \cdot 10^{14}$, $1.2 \cdot 10^{15}$ см^{-2} соответственно ионов Ag^+ ($E = 150$ кэВ). В спектре КРС исходного образца присутствует интенсивная полоса рассеяния на продольных фонах (LO) центра зоны

Бриллюэна с частотой $\nu = 292 \text{ см}^{-1}$ и полушириной $\Gamma = 3.8 \text{ см}^{-1}$. Кроме того, наблюдается слабая полоса рассеяния на поперечных фононах центра зоны Бриллюэна с $\nu = 269 \text{ см}^{-1}$. Эта полоса для ориентации (100) запрещена правилами отбора в геометрии рассеяния «назад» и ее проявление связано, по-видимому, с некоторым отклонением использованной геометрии измерения от идеальной 180-градусной. С увеличением дозы имплантации ионов Ag^+ до $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (кривые 2—3) происходит монотонное уменьшение полосы рассеяния на LO -фононах, сдвиг ее максимума в низкочастотную сторону и асимметричное увеличение полуширины. Кроме того, в спектрах появляются новые широкие полосы в диапазоне 200—300 (TO -полоса), 150—200 (LA -полоса), 50—100 см^{-1} (TA -полоса). Появление этих полос свидетельствует о том, что в процессе имплантации происходит фазовый переход $c\text{-GaAs}$ — $a\text{-GaAs}$ и исследуемый слой представляет собой смесь аморфной и кристаллической фаз, в результате чего в спектрах присутствуют полосы, характерные для обеих фаз GaAs .

Дальнейшее увеличение дозы имплантации $\Phi > 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ приводит к немонотонным изменениям в спектрах КРС (кривые 4, 5), о чем будет идти речь далее.

На рис. 2 показана зависимость изменения полуширины Γ_c и частотного положения ν_c полосы кристаллической фазы от дозы имплантации. Видно, что с увеличением дозы имплантации до $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ происходит монотонное увеличение полуширины от 3.8 до 12.3 см^{-1} . При дальнейшем увеличении дозы Γ_c уменьшается до 8 см^{-1} , а при $\Phi > 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ вновь увеличивается. Аналогичные немонотонные изменения наблюдаются и для частотного положения LO -полосы $c\text{-GaAs}$ и они полностью коррелируют с изменениями Γ_c от дозы имплантации (рис. 2). Последнее не является неожиданным, поскольку при структурном разупорядочении монокристаллов $c\text{-GaAs}$ наблюдаемое увеличение полуширины Γ_c LO -полосы GaAs должно сопровождаться уменьшением ее частоты, что связано с характером дисперсии фононных ветвей GaAs [9].

В рамках модели «пространственной корреляции фононов» [10] такой характер изменения спектра КРС обусловлен «размерным эффектом». Исходя из этой модели следует заключить, что при $\Phi < 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ увеличение дозы имплантации ионов Ag^+ ведет к уменьшению микрокристаллитов. Дальнейшее увеличение дозы имплантации сопровождается немонотонными изменениями размеров микрокристаллитов, что может быть обусловлено частичной рекристаллизацией аморфных областей GaAs в процессе имплантации. Такой «самоиндуцированный» процесс упорядочения наблюдался нами для Si [11].

Нами также были проанализированы изменения параметров TO -полосы $a\text{-GaAs}$ в зависимости от дозы имплантации. Как видно из рис. 3, при $\Phi < 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ происходит монотонное увеличение полуширины TO -полосы, которое в дальнейшем приобретает осциллирующий характер. Скоррелированные изменения наблюдаются и для частотного положения TO -полосы.

Известно [1], что в процессе имплантации GaAs тяжелыми ионами трек каждого иона окружает разупорядоченная область, ядро которой является аморфным. Границы разупорядоченной области являются местом скопления точечных дефектов. Увеличение дозы имплантации приводит к увеличению числа разупорядоченных областей, их перекрытию, что в конечном итоге может привести к образованию сплошного аморфного слоя. Конечный результат имплантации определяется конкуренцией двух процессов: разупорядочения кристаллической структуры и ее самоотжига, обусловленного процессами диффузии и рекомбинации точечных дефектов.

Таким образом, следует заключить, что при $\Phi < 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ преобладает процесс разупорядочения структуры, приводящий к монотонным изменениям полуширины и частотного положения полос КРС кристаллической и аморфной фаз GaAs .

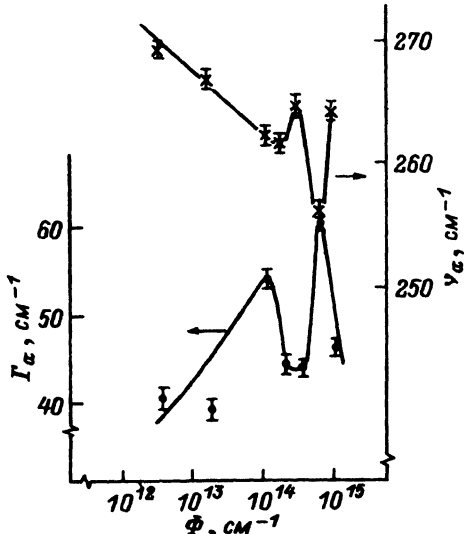


Рис. 3. Зависимость изменения частоты и полуширины полосы аморфной фазы от дозы имплантации ионов Ag^+ в пределах от $6 \cdot 10^{12}$ до $1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $E = 150 \text{ кэВ}$.

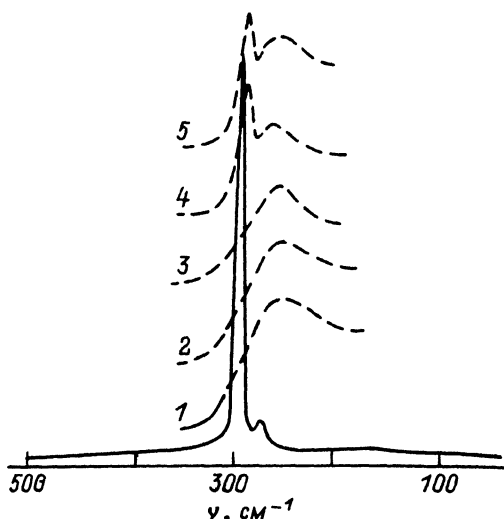


Рис. 4. Спектры КРС GaAs исходного образца и имплантированного ионами Ag^+ дозой $1.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с энергиями 50, 75, 125, 150, 175 кэВ (1—5) соответственно.

При $\Phi > 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ более существенную роль начинают играть процессы самоотжига и соответственно увеличение размеров микрокристаллитов, о чем свидетельствуют не только уменьшение полуширины и смещение максимума полосы рассеяния на LO -фононах в высокочастотную сторону, но и увеличение интенсивности полосы. Поскольку увеличение размеров микрокристаллитов в зондируемой области приводит к уменьшению объемного содержания аморфной фазы, является неудивительным и скоррелированное изменение параметров TO -полосы α -GaAs. Как отмечалось, аналогичный эффект наблюдался в работе [11] для случая имплантации монокристаллов Si ионами Ag^+ .

На рис. 4 показаны спектры КРС исходного образца (сплошная линия) и образцов, имплантированных ионами Ag^+ дозой $1.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с энергиями 50, 75, 125, 150, 175 кэВ (1—5) соответственно. Видно, что в спектрах КРС имплантированных образцов при изменении энергии от 50 до 125 кэВ присутствует лишь TO -полоса. В случае же энергий 150 и 175 кэВ присутствуют как TO -полоса, так и полоса рассеяния на LO -фононах. Это свидетельствует о том, что в первом случае тестируется слой, состоящий из аморфной фазы, а во втором случае он представляет собой смесь аморфной и кристаллической фаз GaAs. Эти изменения обусловлены тем, что проекционный пробег ионов Ag^+ R_p и его среднеквадратичное отклонение зависят от энергии. Глубина тестируемого слоя GaAs в КРС определяется коэффициентом поглощения вещества на длине возбуждающего излучения и составляет для c -GaAs $d = 110 \text{ нм}$ и α -GaAs $d = 30 \text{ нм}$ ($\lambda = 514.4 \text{ нм}$). Поскольку для ионов Ag^+ , имплантированных в GaAs с энергиями 50, 75, 125, 150, 175 кэВ, R_p и ΔR_p соответственно будут 335 и 207, 500 и 280, 760 и 410, 1000 и 500, 1200 и 580 Å, для случая $E < 125 \text{ кэВ}$ проекционный пробег ионов Ag^+ $R_p < d$ и сигнал КРС формируется в аморфном слое толщиной R_p , так как коэффициент поглощения α для α -GaAs больше, чем для c -GaAs. При $E > 150 \text{ кэВ}$, $R_p > d$ в КРС зондируются как аморфный слой α -GaAs, так и слабонарушенный слой c -GaAs, лежащий перед α -GaAs. По этой причине в спектре КРС присутствуют полосы как аморфной, так и кристаллической фаз GaAs.

Таким образом, при использовании энергии $E = 150$ кэВ для исследования дозовых зависимостей (рис. 1, 2) получаемая информация непосредственно характеризует разупорядоченный имплантацией слой GaAs. Установлено, что процесс разупорядочения кристаллической структуры при изменении дозы имплантации носит немонотонный характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ионная имплантация и лучевая технология / Под ред. Дж. С. Вильямса, Дж. М. Поута. Киев, 1988. 358 с.
- [2] Bloyo N., Drevillon B. // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 57. N 8. P. 786—788.
- [3] Оптические свойства полупроводников (полупроводниковые соединения типа $A^{III}B^V$) / Под ред. Р. Уиллардсона, А. Бира. М., 1970. 488 с.
- [4] Пека Г. П., Коваленко В. Ф., Куценко В. Н. Люминесцентные методы контроля параметров полупроводниковых материалов и приборов. Киев, 1986. 152 с.
- [5] Рассеяние света в твердых телах / Под ред. М. Кардоны, Г. Гюнтеродта. М., 1979—1986. № 4. 408 с.
- [6] Shukla A. K., Jain K. P. // *Phys. Rev. B.* 1987. V. 35. N 17. P. 9240—9244.
- [7] Morhange J. F., Beserman R., Balkanski A. // *Phys. St. Sol. (a).* 1974. V. 23. N 2. P. 383—391.
- [8] Takahashi J., Makino T. // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 63. N 1. P. 87—91.
- [9] Pollak F. H., Tsu R. // *SPIE.* 1983. V. 452. P. 26—43.
- [10] Tiong K. K., Amirfharaj P. M., Pollak F. H. // *Appl. Phys. Lett.* V. 44. N 1. P. 122—124.
- [11] Артамонов В. В., Валах М. Я., Лисица М. П., Литовченко В. Г., Романюк Б. Н., Рудской И. В., Стрельчук В. В. // *ФТП.* 1988. Т. 22. В. 11. С. 1961—1966.

Институт полупроводников
АН Украины
Киев

Получена 10.09.1991

Принята к печати 4.12.1991