

Радиационный отжиг арсенида галлия, имплантированного серой

© В.М. Ардышев, М.В. Ардышев[†]

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова при Томском государственном университете, 634050 Томск, Россия

(Получена 30 июля 2001 г. Принята к печати 13 октября 2001 г.)

Ионы серы имплантировали в полуизолирующий GaAs. Проводили фотонный ($805^{\circ}\text{C}/(10-12)\text{ с}$) и термический ($800^{\circ}\text{C}/30\text{ мин}$) отжики образцов GaAs под пленкой SiO_2 , полученной различными способами. Содержание компонентов GaAs в пленке определяли по спектрам резерфордовского обратного рассеяния, концентрационные профили электронов измеряли методом вольт-фарадных характеристик. Показано, что диффузия серы происходит в двух направлениях — к поверхности и в объем GaAs. Первый процесс стимулирован вакансиями, образующимися вблизи поверхности полупроводника при нанесении диэлектрика. Коэффициент "объемной" диффузии и диффузии серы к поверхности при фотонном отжиге на 2 порядка выше, чем при термическом; выше также степень активации примеси.

1. Введение

В [1,2] показано, что после радиационного отжига GaAs, имплантированного амфотерной примесью ^{28}Si , происходит диффузионное перераспределение и увеличение степени электрической активации кремния по сравнению с термическим отжигом (ТО). В [3] отмечалось влияние на эти процессы условий на границе полупроводник–(внешняя среда). Представляет интерес исследование этих явлений для примесей иной химической природы, например серы ^{32}S . Среди донорных примесей в GaAs при ТО ^{32}S имеет наибольшую диффузионную подвижность, чувствительность к физико-химическим свойствам на границе диэлектрик–полупроводник и сравнительно малую степень электрической активации. В этой связи в работе приведены результаты исследований поведения серы, имплантированной в GaAs при фотонном отжиге (ФО).

2. Методика эксперимента

Исследования выполнены на пластинах монокристаллического полуизолирующего GaAs, легированного хромом до концентрации 10^{16} см^{-3} , с удельным сопротивлением $> 10^7\text{ Ом}\cdot\text{см}$, с плотностью дислокаций $< 8\cdot 10^4\text{ см}^{-2}$, подвижностью электронов $\sim 4300\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при 300 К. Пластины были ориентированы в плоскости (100).

Перед имплантацией образцы обрабатывали в травителе $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:100$. Проводили имплантацию ионов ^{32}S с энергией 100 кэВ дозой $2\cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}$ при температуре 150°C . При имплантации принимали меры для исключения осевого и плоскостного каналирования [1]. Перед отжигом образцы делили на две группы. На поверхность пластин первой группы плазмохимическим методом осаждали SiO_2 (далее $\text{SiO}_2\text{-ПХО}$) при температуре 400°C . На пластинах второй группы SiO_2 создавали по способу [4] из пленкообразующего раствора, легированного самарием до концентрации $\sim 8\text{ вес}\%$

(в дальнейшем $\text{SiO}_2:\text{Sm}$). Толщина диэлектрика составляла 0.1 мкм для проведения ФО и 0.3 мкм — для ТО. Фотонный отжиг проводили в установке "Импульс-5", оснащенной галогеновыми лампами, в потоке азота с точкой росы не более -65°C при температуре 805°C в течение 10–12 с. Термический отжиг осуществляли в печах накаливания в потоке водорода при температуре 800°C в течение 30 мин.

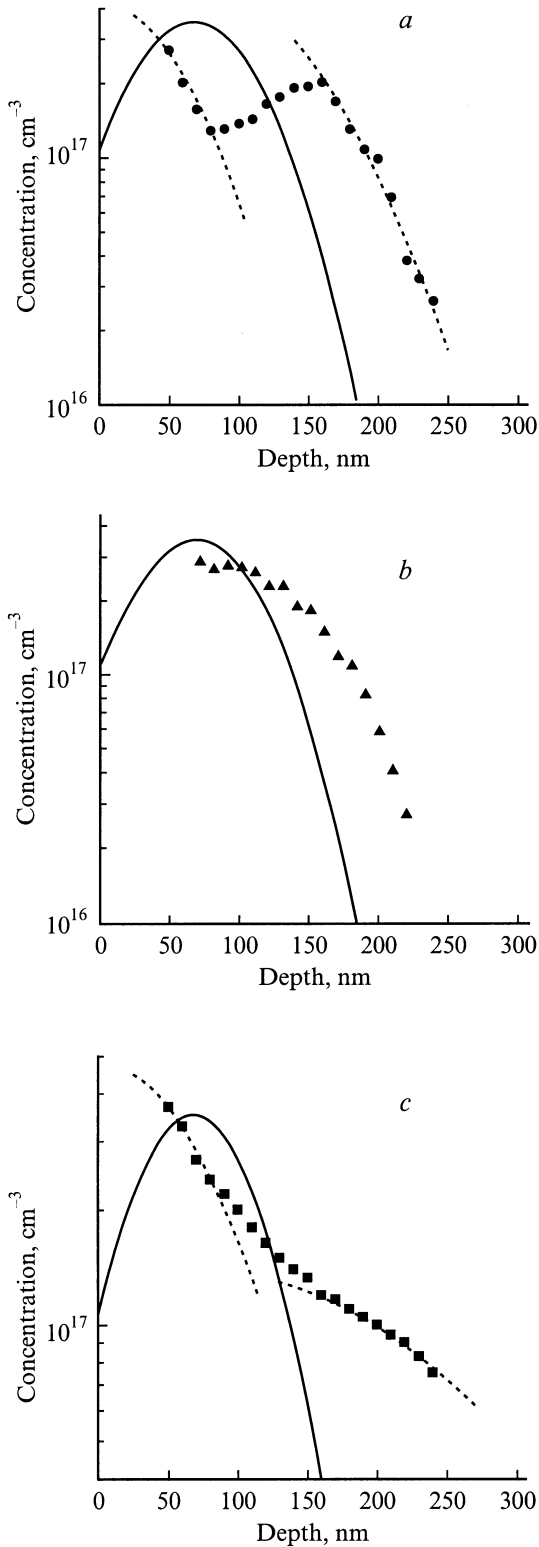
До и после отжига измеряли содержание компонентов GaAs в пленках диэлектрика методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР) [5]. После удаления диэлектрика проводили измерения концентрационных профилей электронов методом вольт-фарадных характеристик (ВФХ) на барьерах Шоттки размером $100\times 100\text{ мкм}^2$, окруженных омическими контактами. В качестве металлического покрытия при изготовлении барьеров Шоттки и омических контактов использовали сплав $\text{AuGe} + 14\%\text{Ni}$, который наносили испарением в вакууме.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рисунке приведены профили концентрации электронов $N(x)$ в ионно-легированных слоях GaAs:S после ФО (рисунок, *a* — защитный диэлектрик $\text{SiO}_2\text{-ПХО}$, далее ФО-1; рисунок, *b* — защитный диэлектрик $\text{SiO}_2:\text{Sm}$, далее ФО-2), после ТО (рисунок, *c* — защитный диэлектрик $\text{SiO}_2\text{-ПХО}$), а также концентрационный профиль внедренной серы, рассчитанный по теории Линдхарда–Шарффа–Шиотта [6].

Видно, что после ФО-1 на профиле концентрации электронов наблюдается провал на глубине вблизи R_p — просцированного пробега ионов ^{32}S . Вид зависимости $N(x)$ указывает на то, что это вызвано диффузией серы в двух направлениях — к поверхности и в объем GaAs. При диффузии в объем наблюдается "уширение" профиля относительно расчетного, хотя и незначительное. Практически такое же уширение $N(x)$ имеет место и после ФО-2, однако при этом отсутствует "восходящая"

[†] E-mail: detector@mail.tomsknet.ru



Профиль распределения ионов серы после имплантации (100 кэВ, $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$), рассчитанный по теории [6] (сплошная линия), экспериментальные концентрационные профили электронов $N(x)$ (точки) и результаты обработки экспериментальных кривых с помощью выражения (1) (пунктирная линия). Отжиг: *a* — ФО-1 (защитный диэлектрик $\text{SiO}_2\text{-ПХО}$), *b* — ФО-2 (защитный диэлектрик $\text{SiO}_2\text{:Sm}$), *c* — ТО (защитный диэлектрик $\text{SiO}_2\text{-ПХО}$).

Таблица 1. Концентрация атомов Ga (As) в SiO_2 до и после фотонного и термического отжига

Диэлектрик	Концентрация атомов Ga (As), ат%		
	до отжига	ТО (800°С/30 мин)	ФО (805°С/12 с)
$\text{SiO}_2\text{-ПХО}$	0.73–0.79	0.86	0.75
$\text{SiO}_2\text{:Sm}$	На уровне фона	–	На уровне фона

диффузия серы к поверхности, которая наблюдается после ФО-1. Наибольшее же уширение профиля реализуется после ТО, и хотя в этом случае провал на зависимости $N(x)$ выражен слабо, тем не менее рост концентрации электронов у поверхности свидетельствует, как и в случае ФО-1, о двух противоположных по направлениям диффузионных потоках.

Влияние границы диэлектрик–GaAs на перераспределение серы при термическом отжиге отмечалось многими исследователями (например, в [7,8]). В частности, в [8] восходящая диффузия серы связывается с взаимодействием примеси с избыточными вакансиями вблизи границы, которые образуются при диффузии атомов Ga (или As) из полупроводника в пленку при ТО, причем этот процесс зависит от состава и метода нанесения диэлектрика.

В табл. 1 приведены данные о содержании атомов Ga (As) в диэлектриках до и после ФО и ТО, полученные из спектров РОР. Видно, что после нанесения $\text{SiO}_2\text{-ПХО}$ в диэлектрике присутствуют атомы Ga (As) в значительных концентрациях. В пленках $\text{SiO}_2\text{:Sm}$ методом РОР атомов Ga (As) не обнаружено. После ТО наблюдается увеличение концентрации компонентов GaAs в диэлектрике $\text{SiO}_2\text{-ПХО}$, а после ФО она практически не изменилась. Так как уход атомов Ga (As) сопровождается образованием вакансий (V) в соответствующих подрешетках, можно сделать вывод, что диффузия серы при ФО в направлении к поверхности обусловлена высокой их концентрацией вблизи границы диэлектрик–GaAs. Заметим, что эти вакансии образуются при нанесении диэлектрика $\text{SiO}_2\text{-ПХО}$.

Из экспериментальных данных следует, что на глубинах $x < R_p$ концентрационный профиль серы будет определяться видом зависимости $[V](x, t)$, а при $x > R_p$ — диффузией серы в объеме GaAs. В последнем случае необходимым условием является превышение коэффициента диффузии серы над коэффициентом диффузии вакансий (вакансий, при взаимодействии с которыми сера проявляет донорные свойства). С учетом сделанных замечаний и, считая, что диффузия вакансий при ФО описывается в рамках модели диффузии из тонкого слоя с поверхностной концентрацией N_{V0} , а диффузия серы соответствует модели диффузии по [9,10], конечное распределение концентрации элект-

Таблица 2. Параметры концентрационных профилей электронов после фотонного и электронного отжига с защитным диэлектриком SiO₂

Вид отжига	$\eta_1 N_{V0}, \text{см}^{-2}$	$D_1, \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	$\eta_2, \%$	$D_2, \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
ТО	$4.1 \cdot 10^{20}$	$1.3 \cdot 10^{-14}$	27.5	$6.3 \cdot 10^{-14}$
ФО-1	$2.7 \cdot 10^{20}$	$1.2 \cdot 10^{-12}$	44.0	$1.3 \cdot 10^{-12}$

тронов можно представить в виде

$$N(x) = \frac{\eta_1 N_{V0}}{\sqrt{\pi D_1 t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_1 t}\right) + \frac{\eta_2 F}{\sqrt{2\pi(\Delta R_p^2 + 4D_2 t)}} \times \exp\left(-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2 + 4D_2 t}\right), \quad (1)$$

где η и D — степень электрической активации и коэффициент диффузии серы соответственно, F — доза имплантации, ΔR_p — среднеквадратичный разброс пробега, t — время отжига. Индексы 1 и 2 соответствуют диффузионным потокам серы к поверхности и в объем GaAs соответственно.

На рисунке, a, c показаны также результаты обработки экспериментальных кривых $N(x)$ после ФО-1 и ТО соответственно с помощью выражения (1), и в табл. 2 приведены параметры, входящие в (1) и обеспечивающие наилучшее совпадение экспериментальных и рассчитанных зависимостей $N(x)$.

Из табл. 2 следует, что при фотонном отжиге, по сравнению с термическим, наблюдаются более высокие значения коэффициентов диффузии D_1 и D_2 , а также степени электрической активации η_1 и η_2 серы в GaAs. При этом значения D_2 по порядку величины соответствуют коэффициенту диффузии кремния из слоя внедрения при радиационном отжиге GaAs, что наблюдалось в работах [1,2]. Из рисунка также видно, что в области глубин до $x \approx 100$ нм, соответствующих диффузии примеси к поверхности, наблюдается несоответствие экспериментальных и расчетных данных, более существенное при ФО и менее существенное при ТО. Причиной могут являться "сковывающие" примесь термоупругие напряжения в приповерхностных слоях полупроводника, возникающие вследствие различия коэффициентов термического расширения пленки и GaAs и не учитываемые в выражении (1). При сравнительно длительном ТО напряжения успевают частично релаксировать, в то время как при кратковременном ФО они максимальны. Несоответствие расчетной и экспериментальной кривых в области провала концентрации можно объяснить тем, что в выражении (1) отсутствует член, аналитически описывающий уход примеси в область повышенной концентрации вакансий [9], более быстрый при ФО (резкий провал) и медленный при ТО (сглаженный провал).

4. Заключение

При фотонном отжиге GaAs, имплантированного серой, происходит диффузионное перераспределение примеси в направлении поверхности и объема полупроводника. Первый процесс обусловлен взаимодействием серы с вакансиями, образующимися в GaAs при нанесении пленки SiO₂ на поверхность, второй — ускоренной диффузией серы (как и для кремния [1,2]). В обоих случаях коэффициент диффузии на 2 порядка выше, чем при термическом отжиге, выше также степень электроактивации примеси.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 00-02-17930, № 01-02-06405-мас и Министерства образования РФ № ТОО-7.4-2786, № 01.01.039.

Список литературы

- [1] В.М. Ардышев, М.В. Ардышев. ФТП, **32**, 1153 (1998).
- [2] В.М. Ардышев, М.В. Ардышев, С.С. Хлудков. ФТП, **34**, 28 (2000).
- [3] В.М. Ардышев, М.В. Ардышев, С.С. Хлудков. ФТП, **34**, 70 (2000).
- [4] В.М. Ардышев, Л.А. Козлова, О.Н. Коротченко, А.П. Мамонтов. А. с. № 235899 от 01.04.86.
- [5] В.М. Ардышев, И.Е. Буркова, А.А. Ятис. Поверхность, № 3, 77 (1985).
- [6] J. Lindhard, M. Scharff, H. Schiott. Kgl. Danske Videnskab. Selskab. Mat. Fys. Medd, **33**, 1 (1963).
- [7] F.H. Eisen, B.M. Velch. In: *Ion Implantation in Semiconductors* (N. Y., Plenum Press, 1977) p. 79.
- [8] В.М. Ардышев. Автореф. канд. дис. (Томск, 1987).
- [9] Е.Д. Горнушкина, И.В. Кириллова, Р.Ш. Малкович. ФТТ, **24**, 1088 (1982).
- [10] М.В. Ардышев. Автореф. канд. дис. (Томск, 2000).

Редактор Л.В. Шаронова

Radiation annealing of gallium arsenide implanted with sulphur

V.M. Ardyshev, M.V. Ardyshev

Kuznetsov Siberian Physicotechnical Institute
at Tomsk State University,
634050 Tomsk, Russia

Abstract Sulphur ions were implanted in a semi-insulating GaAs. Photon annealing (805°C/(10–12) s) and the thermal one (800°C/30 min) were conducted under SiO₂-films coating obtained by different ways. Contents of GaAs components in films were determined from Rutherford backscattering spectra; concentration profiles of electrons were measured by the voltage–capacitance method. Diffusion of sulphur was shown to go in two directions — to the surface and into bulk of GaAs. The first process was induced by vacancies that had been formed near the surface of semiconductors during the dielectric coating. The coefficient of the bulk-diffusion and diffusion-to-surface of sulphur ions under photon annealing was twice as much as that under thermal one. The doping efficiency was also larger.