

Влияние границы диэлектрик–арсенид галлия на поведение кремния при радиационном отжиге

© В.М. Ардышев, М.В. Ардышев*, С.С. Хлудков*

Томский политехнический университет,
634004 Томск, Россия

* Сибирский физико-технический институт при Томском государственном университете,
634050 Томск, Россия

(Получена 29 марта 1999 г. Принята к печати 8 июня 1999 г.)

Методом измерения вольт-фарадных характеристик исследовались концентрационные профили $n(x)$ ^{28}Si , имплантированного в полуизолирующий GaAs ($E_1 = 50 \text{ кэВ}$, $F_1 = 8.75 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $E_2 = 75 \text{ кэВ}$, $F_2 = 1.88 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) после "электронного" отжига ($P = 7.6 \text{ Вт/см}^2$, $t = 10 \text{ с}$) с защитными покрытиями: $\text{SiO}_2:\text{Sm}$; SiO_2 , осажденный путем окисления моносилана; Si_3N_4 ; а также и без диэлектрика. Показано, что профили после электронного отжига залегают глубже по сравнению с расчетным и профилем после термического отжига (800°C , 30 мин). Глубина залегания профилей зависит от диэлектрика. Наибольшее "уширение" профиля наблюдается при электронном отжиге GaAs без диэлектрика, а наименьшее — при электронном отжиге с пленкой $\text{SiO}_2:\text{Sm}$. На зависимостях $n(x)$ можно выделить два участка — вблизи и вдали от границы раздела. Значения диффузионных параметров и степени электроактивации Si на втором участке больше, чем на первом. Результаты интерпретируются в предположении термоупругих напряжений в GaAs вблизи границы диэлектрик–полупроводник.

В работе [1] показано, что при радиационном отжиге GaAs, имплантированного изотопом ^{28}Si , происходит диффузионное перераспределение примеси в глубь полупроводника. При этом "уширение" профиля распределения и степень электроактивации кремния зависят от наличия или отсутствия диэлектрика на поверхности GaAs при отжиге. Известно, что при термическом отжиге GaAs электрофизические характеристики ионно-легированных слоев (ИЛС) существенно зависят от типа и метода получения защитных диэлектриков [2,3]. В этой связи в данной работе исследовалось влияние материала диэлектрика на концентрационные профили (зависимость концентрации от глубины залегания слоя) электрически активного Si в GaAs при изотермическом электронном отжиге.

Исследования выполнены на пластинах полуизолирующего GaAs с удельным сопротивлением $\rho \geq 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, подвижностью электронов $\mu = 4200 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ (при 300 К), плотностью дислокаций $N_D \leq 10^4 \text{ см}^{-2}$, ориентированных в плоскости (100), толщиной 400 мкм. Концентрация хрома в материале не превышала значения $N_{\text{Cr}} \leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Перед имплантацией пластины обрабатывали в травителе $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:10$. Ионы ^{28}Si имплантировали в GaAs с энергией $E_1 = 50 \text{ кэВ}$ дозой $F_1 = 8.75 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а затем с энергией $E_2 = 75 \text{ кэВ}$ дозой $F_2 = 1.88 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при 300 К в вакууме не хуже $6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$. Для исключения осевого и плоскостного канализирования пластины ориентировали относительно ионного пучка так же, как и в работе [1]. Затем пластины делили на 4 части. На одну часть по способу [4] наносили пленкообразующий раствор диоксида кремния, легированного самарием до концентрации 2–8.0 вес % (далее $\text{SiO}_2:\text{Sm}$). После нанесения раствора образцы подвергались инфракрасной сушке при 80 и 130°C , а затем проводилась термодеструкция при 450°C в течение

25 мин. На вторую часть пластин плазмо-химическим методом осаждали пленку SiO_2 окислением моносилана при температуре 400°C (далее $\text{SiO}_2(\text{ПХО})$). На третью часть пластин наносили Si_3N_4 катодным распылением в трехэлектродной системе в атмосфере активированного азота [5]. Толщина исследуемых диэлектриков составляла 110–130 нм (пленки SiO_2) и 98–110 нм (Si_3N_4). На четвертую часть пластин диэлектрик не наносился. Затем проводился электронный отжиг (ЭО) в установке "Модуль" [6] с энергией электронов 10 кэВ, плотностью $P = 7.6 \text{ Вт/см}^2$ в течение времени $t = 10 \text{ с}$ в вакууме не хуже 10^{-5} Па . На контрольных пластинах с защитным диэлектриком SiO_2 толщиной 300 нм, полученным плазмо-химическим осаждением, проводился термический отжиг (ТО) при температуре 800°C в течение 30 мин в потоке водорода.

После отжига и удаления диэлектрика на барьерах Шоттки площадью $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ проводились измерения профиля концентрации электронов $n(x)$ $C-V$ -методом.

На рис. 1 и 2 приведены концентрационные профили $n(x)$ после ЭО (рис. 1, кривые 2–4 и рис. 2, кривая 1) и после ТО (рис. 2, кривая 3'). Штриховые кривые на рис. 1 и 2 описывают расчетный профиль концентрации внедренного кремния, построенный с использованием первых двух моментов распределения R_p и ΔR_p — проецированный пробег и среднеквадратичный разброс пробегов (страгглинг) соответственно, определенных методом масс-спектропии на вторичных ионах (ВИМС) [7].

Видно, что профили $n(x)$ после ЭО залегают глубже по сравнению с расчетным профилем и профилем после ТО. Наибольшее перераспределение электрически активного Si наблюдается после отжига без диэлектрика (рис. 2, кривая 1). "Уширение" концентрационных профилей

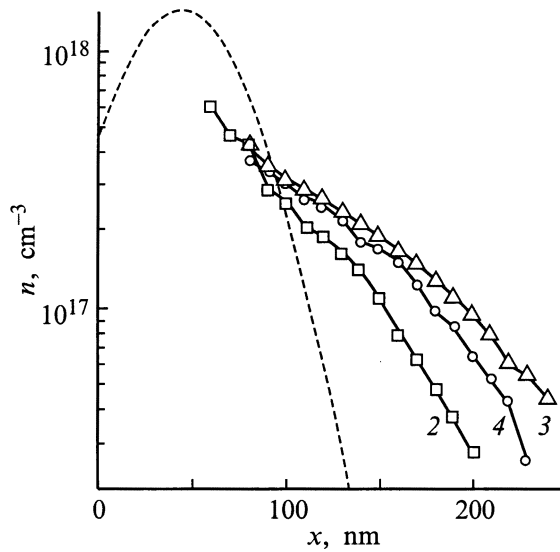


Рис. 1. Распределение концентрации по глубине залегания слоя (x): штриховая линия — расчет $N_{Si}(x)$ для внедренного ^{28}Si в условиях, описанных в тексте; 2–4 — экспериментальные профили концентрации электронов $n(x)$ после электронного отжига (условия отжига см. в тексте) для пластин GaAs с типом защитного покрытия, указанным в таблице. Номера у кривых соответствуют номерам в таблице.

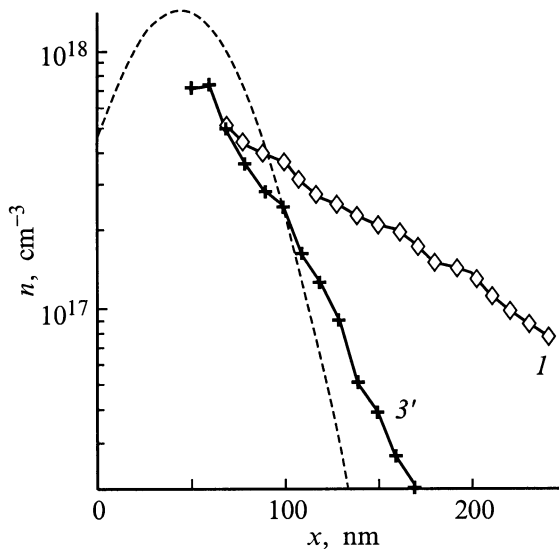


Рис. 2. То же, что на рис. 1, за исключением зависимости $3'$, полученной после термического отжига (условия — см. в тексте) контрольной пластины GaAs с защитным покрытием типа 3 (см. таблицу).

после ЭО с использованием диэлектрика зависит от его типа, метода получения и состава (рис. 1, кривые 2–4). Причем после ЭО с диэлектриком $SiO_2:Sm$ (рис. 1, кривая 2) наблюдается наименьшее перераспределение Si в глубь GaAs по сравнению с ЭО при других покрытиях пластины. Анализ показывает, что экспериментальные

зависимости $n(x)$ можно представить в виде суммы двух профилей легирования:

$$n_i(x) = \sum_{i=1}^2 n_i^{\max} \exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\sigma_i^2} \right], \quad (1)$$

где $n_i^{\max} = \eta_i F / 2.5\sigma_i$ — концентрация электронов в максимуме распределения, F — суммарная доза имплантации, η_i — степень электроактивации кремния, $\sigma_i = (\Delta R_p^2 + 2D_i t)^{1/2}$ — дисперсия концентрационного профиля, D_i — коэффициент диффузии кремния, t — время отжига. Значения R_p и ΔR_p в нашем случае равны 44.1 и 38.9 нм соответственно.

В таблице представлены параметры концентрационных профилей, полученные из экспериментальных данных (рис. 1, 2). Из таблицы следует, что для исследуемых диэлектрических покрытий слой GaAs, легированные методом имплантации, имеют различающиеся диффузионные параметры и степень электроактивации Si. Значения σ_1^2 , n_1^{\max} и η_1 профилей легирования вблизи границы диэлектрик–GaAs (глубины до 100 нм) меньше аналогичных параметров профилей на глубинах более 100 нм, причем σ_1^2 меньше ΔR_p^2 . При ЭО с использованием Si_3N_4 параметры σ_1^2 , n_1^{\max} и η_1 имеют сравнительно меньшие значения. Наибольшие значения диффузионных параметров и степени электроактивации Si соответствуют отжигу без диэлектрика.

Приведенные результаты можно объяснить следующим образом. Во-первых, в процессе ЭО в гетероструктуре диэлектрик–GaAs возникают поля термоупругих напряжений, которые обусловлены различием коэффициентов термического расширения (КТР) диэлектрика и полупроводника. Если допустить, что электроактивация Si в слоях $x < 100$ нм лимитируется диффузией атомов кремния или вакансий галлия и справедливы соотношения $\sigma_1 \sim \exp(-E_m/2kT)$, $\eta_1 \sim \exp(-E_b/2kT)$, где E_m и E_b — энергии миграции атомов Si (или V_{Ga}) и высота барьера при взаимодействии Si и V_{Ga} соответственно, то низкие значения σ_1 и η_1 обусловлены увеличением E_m и E_b в результате влияния этих напряжений. Оценки показывают, что по отношению к ЭО без диэлектрика увеличение E_m и E_b при температуре отжига составляет соответственно kT и $0.74kT$ для структуры Si_3N_4 –GaAs, $0.83kT$ и $0.48kT$ для SiO_2 (ПХО)–GaAs, $0.69kT$ и $0.15kT$ для $SiO_2:Sm$ –GaAs. Большое изменение E_m и E_b в структуре Si_3N_4 –GaAs в целом коррелирует с большим различием КТР нитрида кремния и арсенида галлия по сравнению с различием КТР SiO_2 и GaAs. Следует также отметить, что наибольшее влияние полей термоупругих напряжений относится к слою GaAs толщиной ~ 100 нм, соизмеримой с толщиной диэлектрика. С другой стороны, при ЭО без диэлектрика концентрация вакансий в GaAs существенно выше, чем при отжиге с защитным покрытием, и также больше коэффициент диффузии D_2 (см. таблицу). Учитывая, что вакансии в обеих подрешетках GaAs являются центрами безызлучательной рекомбинации [8], то в условиях высокой концентрации

Значения диффузионных параметров и степени электроактивации кремния в GaAs для разных типов защитных покрытий

Типы защитных покрытий	Глубина $x < 100$ нм			Глубина $x > 100$ нм			
	σ_1^2 , нм ²	n_1^{\max} , 10^{17} см ⁻³	η_1	σ_2^2 , нм ²	n_2^{\max} , 10^{17} см ⁻³	η_2	D_2 , 10^{-12} см ² · с ⁻¹
1 Без диэлектрика	$1.16 \cdot 10^3$	2.58	0.21	$1.33 \cdot 10^4$	3.28	0.88	5.6
2 SiO ₂ :Sm	$5.80 \cdot 10^2$	3.18	0.18	$4.73 \cdot 10^3$	3.53	0.57	1.6
3 SiO ₂ (ПХО)	$5.07 \cdot 10^2$	2.48	0.13	$8.86 \cdot 10^3$	3.69	0.78	3.7
4 Si ₃ N ₄	$4.24 \cdot 10^2$	2.10	0.10	$7.18 \cdot 10^3$	3.70	0.73	2.8

Примечание. σ_1, σ_2 — дисперсии зависимостей $n(x)$; η_1, η_2 — степень электроактивации Si; n_1^{\max}, n_2^{\max} — концентрации электронов в максимуме распределения $n(x)$.

электронных возбуждений наиболее вероятным является рекомбинационно-стимулированный механизм ускорения диффузии [9]. Так как ускорение миграции пропорционально скорости рекомбинации [10], малая концентрация центров безызлучательной рекомбинации приводит к меньшим значениям коэффициента D_2 при ЭО с защитным диэлектриком. Причем величина D_2 каким-то образом зависит от свойств границы диэлектрик–GaAs. Можно предположить, что граница SiO₂:Sm–GaAs является стоком для центров безызлучательной рекомбинации радиационного или иного происхождения, а границы Si₃N₄–GaAs, и особенно SiO₂ (ПХО)–GaAs, напротив, являются поставщиками этих центров в объем GaAs.

Таким образом, при изотермическом отжиге степень электроактивации Si в GaAs и диффузионное его перераспределение в глубь полупроводника зависят от типа, состава и метода получения защитного диэлектрического покрытия.

Список литературы

- [1] В.М. Ардышев, М.В. Ардышев. ФТП, **10**, 1153 (1998).
- [2] D.V. Morgan. IEEE Proceeding A, **128**, 109 (1981).
- [3] В.М. Ардышев. Автореф. дис. канд. техн. наук (Томск, ТГУ, 1988).
- [4] В.М. Ардышев, Л.А. Козлова, О.Н. Коротченко, А.П. Мамонтов. А. с. на изобретение № 235899 от 01.04.86.
- [5] В.А. Бурдовицын. Автореф. дис. канд. техн. наук (Томск, ТГУ, 1981).
- [6] Ю.Е. Крейндель, Н.И. Лебедева, В.Я. Мартенс. Письма ЖТФ, **8** (23), 1465 (1982).
- [7] D.H. Lee, R.M. Matbon. Appl. Phys. Lett., **30**, 327 (1977).
- [8] S.Y. Chiang, G.L. Pearson. J. Appl. Phys., **46**, 2986 (1975).
- [9] В.М. Ленченко. ФТТ, **11**, 799 (1969).
- [10] L.C. Kimerling. IEEE Trans. Nucl. Sci., **5–23**, 1497 (1976).

Редактор Т.А. Полянская

Effect of insulator–gallium arsenide boundary on silicon behavior under radiation annealing

V.M. Ardyshev, M.V. Ardyshev*, S.S. Khludkov*

Tomsk Polytechnical University,
634004 Tomsk, Russia

*Siberian Physicotechnical Institute
under Tomsk State University,
634050 Tomsk, Russia

Abstract Using capacitance-voltage technique, the concentration profiles $n(x)$ of ²⁸Si implanted in semi-insulating GaAs ($E_1 = 50$ keV, $F_1 = 8.75 \cdot 10^{12}$ cm⁻² and $E_2 = 75$ keV, $F_2 = 1.88 \cdot 10^{12}$ cm⁻²) after "electron" annealing (EA) ($P = 7.6$ W/cm², $t = 10$ s) with dielectric caps SiO₂:Sm, SiO₂ (plasma-chemical evaporation), Si₃N₄ and without any coatings have been researching. The EA profile depth is shown to be deeper than the calculated one and than the profile after thermal annealing (TA) (800°C, 300 min). The profile depth depends upon dielectric. The uncapped GaAs profile is deepest and the SiO₂:Sm-film coated profile is flattest. Two parts can be determinate on the $n(x)$ dependence — near and far from boundary. The diffusion parameters and the Si doping efficiency in the far part are more than in the near one. The results are interpreted in supposition of thermal-elastic stresses in GaAs near the dielectric–semiconductor boundary.