

УДК 621.315.592

Активация и распределение кремния, имплантированного в арсенид галлия, при изотермическом радиационном отжиге

© В.М. Ардышев, М.В. Ардышев*

Томский политехнический университет,
634061 Томск, Россия*Томский государственный университет,
634034 Томск, Россия

(Получена 23 марта 1998 г. Принята к печати 2 апреля 1998 г.)

Методом ВФХ исследованы концентрационные профили $n(x)$ ^{28}Si , имплантированного в GaAs ($E = 50$ и 75 кэВ, $F = (1.88 \div 6.25) \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$) после "фотонного" и "электронного" отжигов с защитой поверхности диэлектриком и без нее. Показано, что в отличие от термического отжига (800°C , 30 мин) после фотонного и электронного отжигов наблюдается диффузионное перераспределение кремния в глубь GaAs. Коэффициент диффузии D и степень активации η с ростом температуры при фотонном отжиге и мощности при электронном отжиге увеличиваются. Значения энергии активации процессов для D и η при радиационном отжиге меньше аналогичных величин при термическом отжиге. Величины D и η после фотонного и электронного отжигов без защитного диэлектрика выше, чем при отжиге с диэлектриком.

Введение

Известно, что радиационный отжиг имплантированного GaAs осуществляется при температурах более 800°C в течение нескольких секунд [1,2]. При таких температурах доминирующая роль в процессах активации и распределения примеси отводится тепловым эффектам, а влияние ионизации в их ускорении считается пренебрежимо малым [3]. С другой стороны, малая длительность отжига позволяет проводить его без использования защитных покрытий [1,2,4]. В то же время при температурах более 450°C происходит испарение мышьяка, и в приповерхностной области GaAs концентрация вакансий в его подрешетке существенно повышается. Вакансии мышьяка, являясь центрами безызлучательной рекомбинации [5], могут привести к изменению профилей концентрации примеси.

Цель работы — исследование поведения кремния, имплантированного в GaAs, при радиационном отжиге с защитой имплантированной поверхности пленкой диэлектрика и без нее.

Методика эксперимента

Исследования выполнены на пластинах полуизолирующего GaAs толщиной 370 ± 20 мкм, ориентированных в плоскости (100), с удельным сопротивлением более 10^7 Ом · см, плотностью дислокаций не более $5 \cdot 10^4$ см $^{-2}$. Концентрация хрома в материале не превышала значения 10^{16} 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 с энергией 50 кэВ дозой $6.25 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$, а затем с энергией 75 кэВ дозой $1.88 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$, а также с энергией 75 кэВ дозой $4.37 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$ при 300 К в вакууме $6 \cdot 10^{-6}$ Па. Для исключения осевого и плоскостного каналирования [6]

пластины размещали таким образом, чтобы угол α между нормалью к поверхности и направлением ионного пучка в плоскости, параллельной базовому срезу, составлял 10° , после этого пластины разворачивали по часовой стрелке вокруг оси [100] на угол $\beta = 35^\circ$. Затем пластины делили на две части. На одну часть по способу [7] наносили пленку SiO_2 , легированную самарием ($N_{\text{Sm}} = 6 \div 12$ ат%). На другую часть диэлектрик не наносили. "Электронный" отжиг (ЭО) с пленкой диэлектрика и без нее проводили в установке "Модуль" [8] с энергией электронов в пучке 10 кэВ при плотности мощности $6.8 \div 8.8$ Вт/см 2 в течение 10 и 12 с в вакууме 10^{-5} Па. "Фотонный" отжиг (ФО) образцов без пленки диэлектрика осуществляли в установке "Импульс-5" в потоке азота (точка росы не более -65°C) с помощью галогенных ламп мощностью 1 кВт каждая в диапазоне температур $805 \div 925^\circ\text{C}$ в течение 10 с. Для сравнения ФО выполняли на образцах с пленкой диэлектрика при 870°C . Термический отжиг (ТО) образцов с пленкой диэлектрика проводили при температуре 800°C в течение 30 мин в потоке водорода. После отжига, удаления диэлектрика в очистки поверхности пластин формировали барьеры Шоттки (БШ) размером 100×100 мкм 2 с металлизацией на основе сплава $\text{AuGe} + 14\%\text{Ni}$. На БШ вольт-фарадным методом измеряли профили концентрации электронов.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1–3 приведены экспериментальные профили концентрации электронов, полученные после ФО (рис. 1), после ЭО (рис. 2 и 3), и расчетные профили концентрации внедренной примеси с использованием значений R_p и ΔR_p , определенных методом масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) [9]. Для

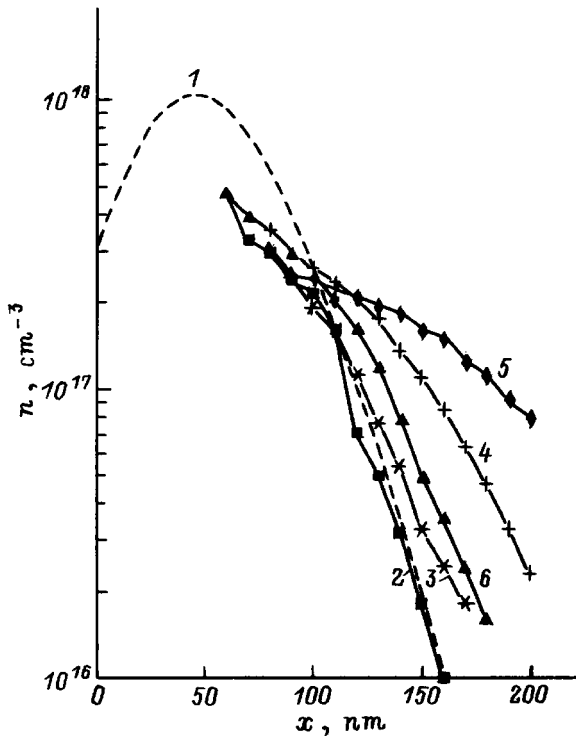


Рис. 1. Расчетный профиль концентрации внедренного кремния (1) ($E_1 = 50$ кэВ, $F_1 = 6.25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $E_2 = 75$ кэВ, $F_2 = 1.78 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) и профили концентрации электронов, полученные ФО 805°C без диэлектрика (2), ФО 825°C без диэлектрика (3), ФО 870°C без диэлектрика (4), ФО 925°C без диэлектрика (5), ФО 870°C с диэлектриком (6).

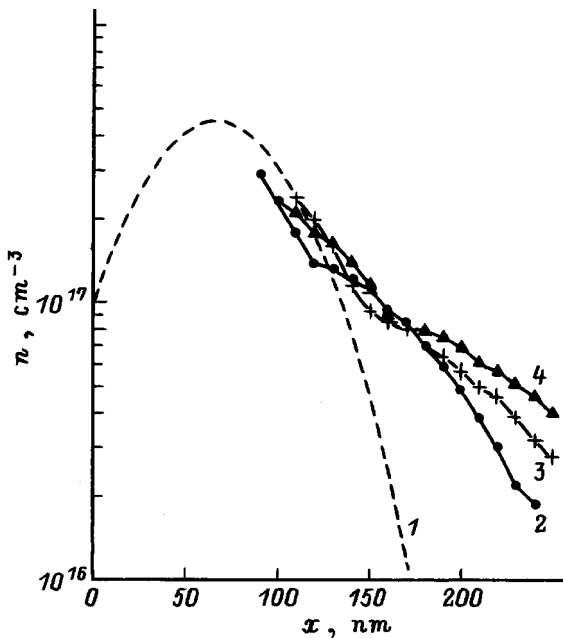


Рис. 2. Расчетный профиль концентрации внедренного кремния (1) ($E = 75$ кэВ, $F = 4.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) и профили концентрации электронов, полученные ЭО (6.8 Вт/см²) без диэлектрика (2), ЭО (7.2 Вт/см²) без диэлектрика (3), ЭО (7.6 Вт/см²) без диэлектрика (4).

сравнения на рис. 3 (кривая 4) представлен типичный профиль концентрации электронов после ТО.

Видно, что после ФО и ЭО профили концентрации электронов $n(x)$ залегают глубже (наблюдается "уширение" профилей) как относительно расчетного, так и относительно профиля, полученного ТО. Причем с увеличением температуры при ФО и мощности при ЭО толщина слоя с электрически активным кремнием возрастает. Кроме того, при ФО (рис. 1, кривая 6) и при ЭО (рис. 3, кривые 2, 3) арсенида галлия с защитной пленкой диэлектрика профили концентрации электронов располагаются ближе к поверхности по сравнению с профилем в GaAs, который отжигался без диэлектрика (рис. 1, 2). После ЭО (рис. 2) в отличие от ФО (рис. 1) наблюдаются участки быстрого (I участок) и медленного (II участок) изменения $n(x)$. Граница между этими участками с увеличением мощности ЭО смещается в глубь GaAs от 120 нм при 6.8 Вт/см² (рис. 2, кривая 2) до 160 нм при 7.6 Вт/см² (рис. 2, кривая 4). Причем при ЭО арсенида галлия с пленкой диэлектрика этой особенности в зависимости $n(x)$ не наблюдается (рис. 3).

Из сравнения результатов измерения $n(x)$ после ТО (рис. 3, кривая 4) с расчетным профилем концентрации внедренного кремния (рис. 3, кривая 1) следует, что при имплантации каналирование ионов кремния практически отсутствовало. Из этого можно сделать вывод, что наблюдаемое "уширение" не связано с каналированием.

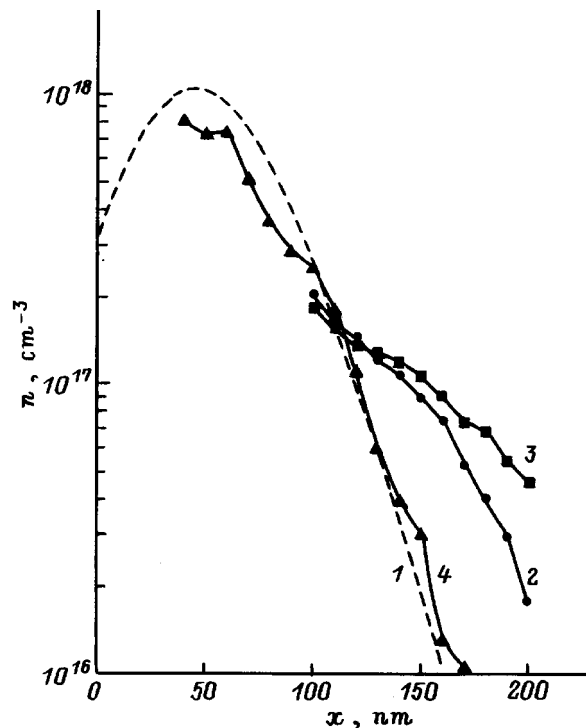


Рис. 3. Расчетный профиль концентрации внедренного кремния (1) ($E_1 = 50$ кэВ, $F_1 = 6.25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $E_2 = 75$ кэВ, $F_2 = 1.78 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) и профиль концентрации электронов, полученный ЭО (7.6 Вт/см²) с диэлектриком (2), ЭО (8.8 Вт/см²) с диэлектриком (3), ТО (800°C, 30 мин) (4).

Таблица 1. Значения диффузионных параметров и степени электрической активации кремния в GaAs для различных видов отжига

Вид отжига	$P, \text{Вт/см}^2$	$T, ^\circ\text{C}$	$D, \text{см}^2/\text{с}$	$\eta, \%$	Примечание
ТО	—	800	$2.3 \cdot 10^{-15}$	71.2	С диэлектриком
	6.8	—	—	74.5	Без диэлектрика (I участок)
	7.2	—	$5.1 \cdot 10^{-13}$	88.9	
	7.6	—	$1.18 \cdot 10^{-12}$	95.4	
ЭО	6.8	—	$2.7 \cdot 10^{-12}$	78.2	Без диэлектрика (II участок)
	7.2	—	$4.1 \cdot 10^{-12}$	81.9	
	7.6	—	$6.1 \cdot 10^{-12}$	88.1	
	7.6	—	$1.35 \cdot 10^{-12}$	56.3	С диэлектрика
	8.8	—	$3.8 \cdot 10^{-12}$	65.5	
ФО	—	805	$4.1 \cdot 10^{-13}$	61.0	Без диэлектрика
	—	825	$6.4 \cdot 10^{-13}$	63.2	
	—	870	$1.5 \cdot 10^{-12}$	76.8	
	—	925	$5.0 \cdot 10^{-12}$	89.9	
	—	870	$4.9 \cdot 10^{-13}$	71.1	С диэлектриком

Таблица 2. Значения энергии активации и предэкспоненциального множителя для D и η при исследуемых видах радиационного отжига

Параметр	Вид отжига							
	ЭО без герметика (I участок)		ЭО без герметика (II участок)		ЭО с герметиком		ФО без герметика	
	D	η	D	η	D	η	D	η
$E_a, \text{эВ}$	5.74	0.79	2.60 ± 0.05	0.38 ± 0.09	2.7	0.4	2.56 ± 0.01	0.31 ± 0.04
$D_0, \text{см}^2/\text{с}$	—	—	8.85	—	5.8	—	0.173	—

Предполагая, что распределение концентрации электрически активного Si после ФО и ЭО обусловлено диффузионными процессами, зависимость $n(x)$ может быть представлена в виде [10]

$$n(x) = \eta \cdot F \left[(2\pi)^{1/2} (\Delta R_p^2 + 2Dt)^{1/2} \right]^{-1} \times \exp \left[-(x - R_p)^2 (2\Delta R_p^2 + 4Dt)^{-1} \right], \quad (1)$$

где F — доза имплантации, η — степень электрической активации кремния, D — коэффициент диффузии кремния, t — время отжига.

Из (1) с использованием экспериментальных данных оценивали значения D и η (табл. 1).

Из табл. 1 следует: 1) коэффициент диффузии при ФО и при ЭО на 2 ÷ 3 порядка больше, чем при ТО; 2) при ЭО (мощность более 7.2 Вт/см^2) арсенида галлия без диэлектрика на I участке зависимости $n(x)$ степень активации кремния выше, чем на II участке; 3) при ФО и ЭО арсенида галлия с защитным покрытием D и η меньше аналогичных величин после радиационного отжига GaAs без покрытия; 4) с увеличением мощности при ЭО и температуры при ФО коэффициент диффузии и степень активации кремния возрастают.

На рис. 4 представлены зависимости D и η от обратной температуры при ФО и при ЭО. Температуру при ЭО рассчитывали с помощью уравнения

$$\rho \cdot C \cdot d \cdot dT/dt = P - 2 \times \varepsilon \cdot \sigma (T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

где ρ , C и d — плотность, теплоемкость и толщина пластин GaAs соответственно, T и T_0 — температура образца при воздействии электронного пучка в течение времени t и исходная температура соответственно, P — подводимая к образцу мощность, ε — отражательная способность GaAs, σ — постоянная Стефана–Больцмана.

Видно, что зависимости D и η от обратной температуры представляют собой прямые линии. Определенные по их наклону значения энергии активации E_a для D и η , а также значения предэкспоненциального множителя D_0 представлены в табл. 2.

Из приведенных результатов следует: 1) при ЭО (II участок) и при ФО значения E_a для D примерно на 0.7 эВ меньше значения 3.3 эВ [11] для термической диффузии кремния; для η энергия активации для этих условий отжига также меньше E_a (0.5 эВ [12]) для чисто термической активации кремния. 2) при ЭО множитель D_0 зависимости $D(T^{-1})$ больше значения D_0 при ФО.

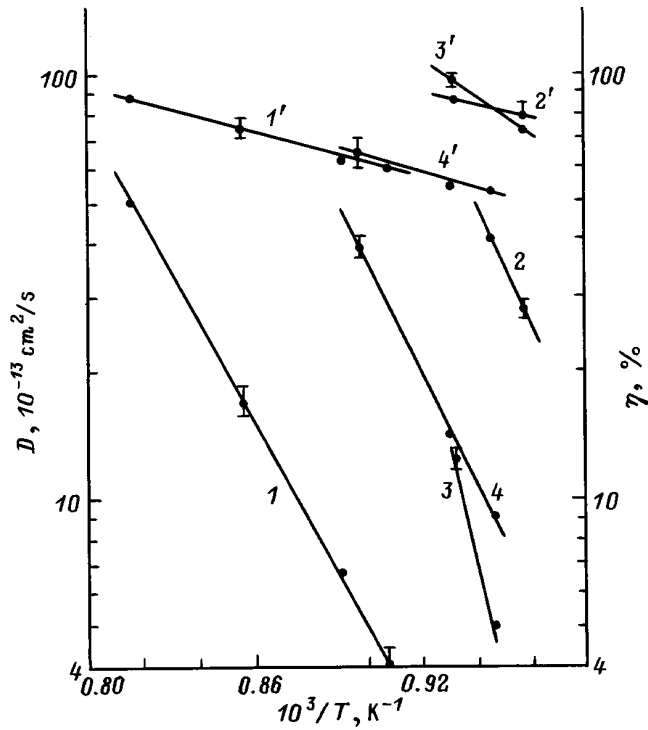


Рис. 4. Зависимость коэффициента диффузии (1–4) и степени электрической активации кремния (1'–4') от обратной температуры при ФО без диэлектрика (1, 1'), при ЭО: без диэлектрика II участок (2, 2'), без диэлектрика I участок (3, 3') и с диэлектриком (4, 4').

3) наименьшие значения E_a для η наблюдаются при ФО и при ЭО (II участок зависимости $n(x)$). Наибольшие значения E_a для η соответствуют активации кремния на I участке $n(x)$ при ЭО (табл. 2).

Если следовать радиационно-стимулированному механизму ускорения отжига [13,14] и считать, что вакансии в обеих подрешетках GaAs являются центрами безызлучательной рекомбинации [5], то необходимо предположить, что в исходном материале присутствует высокая концентрация этих вакансий, а также при радиационном отжиге GaAs без защитной пленки образующиеся вакансии мышьяка (V_{As}) мигрируют на значительные глубины (200 ÷ 250 нм) за время 10 ÷ 12 с. Первое предположение, вероятно, выполняется, так как суммарная концентрация вакансий в монокристаллическом GaAs может достигать значений $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [15]. Второе предположение также выполняется в результате уменьшения E_a процесса диффузии вакансий в глубь GaAs при воздействии радиации, как это наблюдается для Si.

С учетом этого результаты можно объяснить следующим образом. При воздействии радиации создаются электронно-дырочные пары (ЭДП). Они участвуют в актах безызлучательной рекомбинации на вакансиях в обеих подрешетках исходного GaAs, а также на V_{As} , которые образуются при испарении мышьяка при радиационном отжиге GaAs без диэлектрика. При этом

выделяется энергия E_R , которая превращается в энергию колебаний атомов, включая внедренную примесь, окружающих центр рекомбинации. Если величина барьера при ТО равна E_T , то при воздействии радиации энергия активации процессов миграции и электроактивации примеси может понизиться на величину $E_T - E_R$ [16]. Тем самым ЭДП через процесс рекомбинации способствуют ускорению миграции примеси и ее размещению в вакантных узлах галлиевой подрешетки. Так как темп рекомбинации зависит от концентрации центров рекомбинации, эффективность данного процесса будет выше в образцах с высокой концентрацией V_{As} , что наблюдается в эксперименте при отжиге GaAs без защитной пленки диэлектрика.

Заключение

1. После "фотонного" отжига и после "электронного" отжига по сравнению с термическим отжигом наблюдается диффузионное перераспределение кремния в глубь арсенида галлия. С увеличением температуры при ФО и мощности при ЭО возрастают коэффициент диффузии D и степень электрической активации примеси η .

2. При радиационном отжиге GaAs без защиты имплантированной поверхности пленкой диэлектрика значения D и η больше.

3. На зависимости $n(x)$ после ЭО арсенида галлия без защитной пленки наблюдаются участки быстрого (вблизи поверхности) и медленного (на глубинах $x > 120 \div 160$ нм) изменения концентрации электронов. После ЭО (мощность более 7.2 Вт/см^2) на быстром участке зависимости $n(x)$ значение η больше, чем на участке медленного изменения концентрации.

Авторы выражают благодарность Л.А. Козловой за помощь в проведении экспериментов, В.С. Будишевскому за выполнение "электронного" отжига.

Список литературы

- [1] А.В. Черняев. *Метод ионной имплантации в технологии приборов и интегральных схем на GaAs* (М., Радио и связь, 1990).
- [2] *Арсенид галлия в микроэлектронике*, пер. с англ. под ред. В.Н. Мордковича (М., Мир, 1988).
- [3] А.В. Двуреченский, Г.А. Качурин и др. *Импульсный отжиг полупроводниковых материалов* (М., Наука, 1982).
- [4] Ito Kazuhiko, Yoshida Masahiro et al. *Jap. J. Appl. Phys.*, **22**, L299 (1983).
- [5] S.Y. Chiang, G.L. Pearson. *J. Appl. Phys.*, **46**, 2986 (1975).
- [6] В.М. Ардышев, Л.А. Козлова и др. А.с. № 235899 от 01.04.86.
- [7] В.В. Титов. *Обзоры по электрон. техн. Сер. Полупроводниковые приборы*, **1**, вып. 10 (223), 62 (1974).
- [8] Ю.Е. Крейндел, Н.И. Лебедева и др. *Письма ЖТФ*, **8**, вып. 23, 1465 (1982).
- [9] D.H. Lee, R.M. Matbon. *Appl. Phys. Lett.*, **30**, 327 (1977).

- [10] МОП–СБИС. *Моделирование элементов и технологических процессов*, пер. с англ. под ред. Р.А. Суриса (М., Радио и связь, 1988).
- [11] Т.Т. Лаврищев, С.С. Хлудков. В сб.: *Арсенид галлия* (Томск, Изд-во ТГУ, 1974) вып. 5, с. 57.
- [12] Б.М. Горюнов, Е.И. Зорин и др. В сб.: *Арсенид галлия* (Томск, Изд-во ТГУ, 1974) вып. 4, с. 102.
- [13] В.М. Ленченко. ФТТ, **11**, 799 (1969).
- [14] D.V. Lang, L.C. Kimerling. Phys. Rev. Lett., **33**, 489 (1974).
- [15] М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский. *Структурные дефекты в монокристаллических полупроводниках* (М., Металлургия, 1984).
- [16] L.C. Kimerling. IEEE Trans. Nucl. Sci., **N5–23**, 1497 (1976).

Редактор В.В. Чалдышев

Activation and distribution of silicon implanted in gallium arsenide under isothermal radiation annealing

V.M. Ardyshev, M.V. Ardyshev*

Tomsk Polytechnical University,
634061 Tomsk, Russia

*Tomsk State University,
634034 Tomsk, Russia

Abstract The behavior of silicon implanted in gallium arsenide under photon and electron annealing has been studied. The diffusion redistribution of Si is shown to occur under annealing. The diffusivity and the doping efficiency increase with test temperature under photon annealing and with the power under the electron one. Use of dielectric coatings decreases the diffusivity and the doping efficiency values.