

Радиационно-термическая активация кремния, имплантированного в арсенид галлия

© В.М. Ардышев, А.П. Суржиков

Томский политехнический университет,
634004 Томск, Россия

(Получена 19 октября 1998 г. Принята к печати 10 ноября 1998 г.)

Исследованы слоевая концентрация, концентрационный профиль и подвижность электронов в легированных ионами ^{28}Si слоях полуизолирующего GaAs после радиационного отжига с энергией электронов выше и ниже порога образования дефектов и после термического отжига в диапазоне температур $T_a = 590 \div 830^\circ\text{C}$. Показано, что при энергии радиационного отжига выше порога образования дефектов формируются ионно-легированные слои при существенно меньших температурах отжига, они имеют высокую степень электрической активации кремния и малую концентрацию дефектов, ограничивающих подвижность электронов.

Введение

Известно, что изотермический радиационный отжиг (РО) проводится при температурах, соизмеримых с температурой термического отжига (ТО) [1]. В то же время генерация точечных дефектов при изохронном ТО позволяет существенно снизить температуру отжига радиационных дефектов в аморфизированных слоях кремния и арсенида галлия [2]. В этой связи цель работы заключается в исследовании электрической активации и распределения по глубине кремния, имплантированного в арсенид галлия, а также подвижности электронов в слоях в условиях генерации точечных дефектов и нагрева материала.

Данные условия были реализованы посредством воздействия на полупроводник интенсивных электронных пучков с энергией частиц выше порога образования точечных дефектов.

Методика эксперимента

Исследования выполнены на пластинах полуизолирующего GaAs (Cr_2O_3 , In) толщиной 400 мкм, ориентированных в плоскости (100) с удельным сопротивлением $\rho \geq 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, подвижностью электронов $3900 \div 4200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 300 К, плотностью дислокаций $N_D \leq 8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. После обработки пластин в травителе $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:10$ проводили имплантацию ионов ^{28}Si последовательно с энергией 30 кэВ дозой $8.75 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и с энергией 100 кэВ дозой $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при 300 К. При имплантации принимали меры для исключения осевого и плоскостного каналирования [3]. После имплантации на обе стороны пластины наносили плазмохимическим осаждением пленку SiO_2 толщиной 100 нм для проведения РО и толщиной 300 нм для проведения ТО. Затем по способу [4] выполняли "высокоэнергетичный электронный отжиг" (ВЭО) с энергией электронов $1 \div 2 \text{ МэВ}$ при плотности тока $0.3 \div 0.6 \text{ мА}/\text{см}^2$ в течение $13 \div 21 \text{ с}$ на воздухе. При отжиге температура контролировалась хромель-алюмелевой термопарой

и изменялась в диапазоне $T_a = 590 \div 800^\circ\text{C}$. На контрольных пластинах проводили ТО при температурах $T_a = 660 \div 830^\circ\text{C}$ в течение 30 мин в потоке водорода, а также "низкоэнергетичный электронный отжиг" (НЭО) в установке "Модуль" [5] с энергией электронов 10 кэВ при плотности мощности $6.8 \text{ Вт}/\text{см}^2$ в течение 16 с в вакууме при остаточном давлении не более 10^{-5} Па .

После удаления диэлектрика проводили измерения слоевой концентрации N_s и подвижности μ электронов в ионно-легированных слоях методом Ван-дер-Пау. Затем с применением фотолитографии на пластинах изготавливали барьеры Шоттки площадью $100 \times 100 \text{ мкм}^2$, окруженные омическими контактами, для измерения профиля концентрации $n(x)$ электронов вольт-фарадным методом. Для металлизации при изготовлении барьеров Шоттки и омических контактов использовали сплав $86\% \text{ AuGe} + 14\% \text{ Ni}$, который наносили методом термического испарения. Омические контакты формировали при 420°C в течение $2 \div 5 \text{ мин}$ в атмосфере водорода. Измерения емкости выполняли на частоте 1 МГц, обратное смещение модулировали с частотой 50 Гц.

Из измерений подвижности определяли концентрацию N_I центров рассеяния с помощью выражения [6]

$$N_I[\text{см}^{-3}] = 10^{17} \left(10^4 / \mu[\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}] - 1 \right)^2 \quad (1)$$

и оценивали параметр $K = 1 - (N_{\text{idl}} + N_0)/N_I$, где N_{idl} , N_0 — концентрации ионизированной примеси в ионно-легированных слоях и в исходном материале соответственно. N_0 определяли из измерений подвижности электронов в исходном GaAs. $N_{\text{idl}} = N_s/d$, где $d = R_p + 2(2/\pi)^{1/2} \Delta R_p$ [7], R_p и ΔR_p — пробеги ионов ^{28}Si в GaAs. В нашем случае $d = 168 \text{ нм}$. Значения $K > 0$ нами интерпретировались как свидетельство наличия в ионно-легированных слоях дополнительных центров рассеяния электронов по сравнению с n -GaAs, легированным другими способами до соизмеримых концентраций электронов. Эти дополнительные центры могут быть обусловлены, например, неполным отжигом радиационных дефектов.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Слоевая концентрация и параметр K

На рис. 1 приведены результаты измерений N_s и значения параметра K в зависимости от температуры ВЭО (кривые 1, 1') и ТО (кривые 2, 2'). Видно, что электрическая активация кремния (слои n -типа проводимости) на уровне $N_s \approx 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ наблюдается после ВЭО при меньшей температуре (на $\sim 90^\circ\text{C}$) по сравнению с ТО (кривые 1 и 2). Отметим, что после ТО при $T_a < 680^\circ\text{C}$ измерить N_s в ионно-легированных слоях методом Ван-дер-Пау не удалось, что свидетельствует о низкой степени активации кремния (переход в элек-

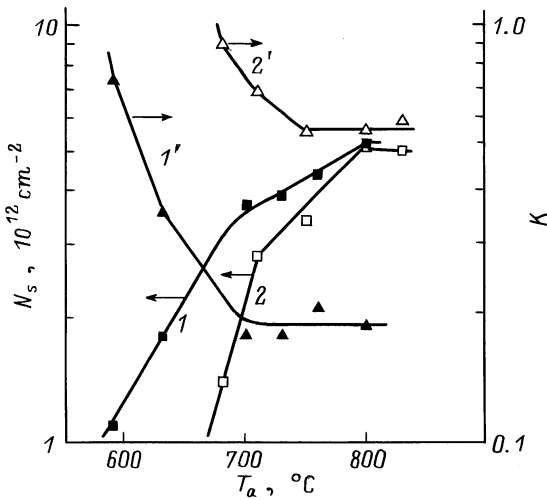


Рис. 1. Зависимость слоевой концентрации N_s (1, 2) и параметра K (1', 2') от температуры отжига T_a . 1, 1' — ВЭО, 2, 2' — ТО.

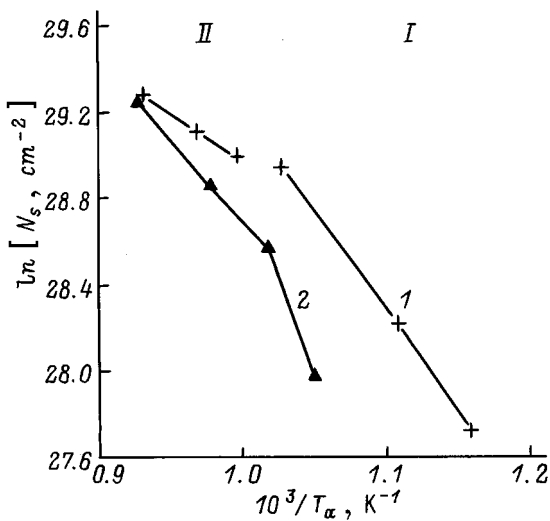


Рис. 2. Зависимость логарифма слоевой концентрации N_s от обратной температуры отжига T_a . 1 — ВЭО, 2 — ТО.

Таблица 1. Энергии активации процесса формирования ионно-легированных слоев при ВЭО и ТО

Вид отжига	E_A , эВ	
	I стадия	II стадия
ВЭО	0.83	0.38
ТО	1.87	0.57

трически активное состояние) и, возможно, о высокой концентрации компенсирующих дефектов, что обусловлено сравнительно большим значением K ($K \approx 0.91$ при $T_a = 680^\circ\text{C}$ — рис. 1, кривая 2'). С увеличением температуры отжига различия в значениях N_s после ВЭО и ТО уменьшаются, и при $T_a = 800^\circ\text{C}$ эти значения практически совпадают. Параметр K после ВЭО уменьшается от 0.74 (590°C) до 0.18 (700°C) и затем с ростом температуры не изменяется (кривая 1'). После ТО в исследованном диапазоне температур значения K в 3 ÷ 4 раза больше (кривая 2'). Отмеченные различия в значениях K в целом согласуются с существенно меньшей концентрацией глубоких уровней в ионно-легированных слоях после ВЭО по сравнению с ТО (данные о концентрациях получены методом неравновесной емкостной спектроскопии глубоких уровней [8]).

На рис. 2 приведены зависимости $\ln N_s$ от обратной температуры ВЭО (кривая 1) и ТО (кривая 2). Видно, что эти зависимости представляют собой прямые линии и для обоих видов отжига имеют две стадии формирования ионно-легированных слоев: меньше (I стадия) и больше (II стадия) $T_a \approx 710^\circ\text{C}$. Оцененные по наклону прямых энергии активации E_A приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что на I стадии значение E_A после ТО на 1 эВ, а на II стадии — на 0.2 эВ больше по сравнению с аналогичными величинами после ВЭО. Величина $E_A = 1.87$ эВ, полученная для I стадии ТО, несколько больше значения $E_A = 1.0 \div 1.4$ эВ [9], характерного для отжига точечных дефектов в GaAs. Это различие, вероятно, обусловлено тем, что при формировании ионно-легированного слоя одновременно протекают два процесса: отжиг компенсирующих дефектов с энергией активации ~ 1.3 эВ и встраивание кремния в узлы галлиевой подрешетки с энергией активации вблизи 0.57 эВ. Возможно также, что на I стадии происходит отжиг комплексов дефект-примесь с последующей электрической активацией кремния. Величина 0.57 эВ близка к $E_A = 0.5$ эВ [10], характерной для энергии электрической активации Si в GaAs при ТО. С другой стороны, $E_A = 0.38$ эВ в диапазоне температур $730 \div 800^\circ\text{C}$ практически совпадает со значением E_A активации Si при НЭО с защитным диэлектрическим покрытием [3], хотя значения N_s в ионно-легированных слоях, отнесенные к дозе имплантации, в среднем в 1.6 раза больше, чем после НЭО.

Профили концентрации электронов

На рис. 3 представлены профили концентрации электрически активного кремния $n(x)$ в ионно-легированных слоях после ВЭО (кривые 1–4), после НЭО (кривая 5) и после ТО (кривая 6). Кривая 7 — распределение

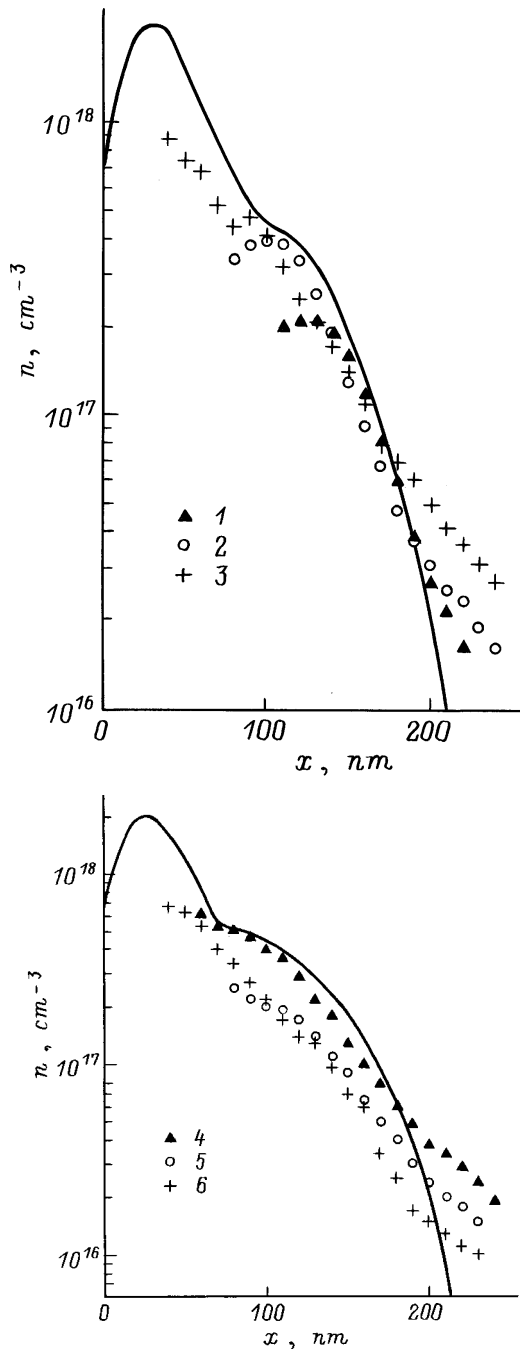


Рис. 3. Профиль концентрации электронов в ионно-легированных слоях после ВЭО (1–4), НЭО (5) и ТО (6). Режим ВЭО, $T_a, ^\circ\text{C}/t_a, \text{с}$: 1 — 590/21; 2 — 630/15; 3 — 800/21; 4 — 730/13. Режим НЭО: 5 — $T_a = 730^\circ\text{C}$, $t_a = 16$ с. Режим ТО: 6 — $T_a = 750^\circ\text{C}$, $t_a = 30$ мин. t_a — продолжительность отжига. Сплошная линия — расчетный профиль концентрации внедренного кремния.

Таблица 2. Параметры ионно-легированных слоев после отжига различных видов

Вид отжига	$T_a, ^\circ\text{C}$	$t_a, \text{с}$	$N_s, 10^{12}\text{см}^{-3}$	$\mu, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	K	$\eta, \%$
ТО	750	1800	3.4	2380	0.56 ± 0.18	56.8
НЭО	730	16	1.8	3100	0.35 ± 0.12	52.8
ВЭО	730	13	3.9	2930	0.18 ± 0.06	95.0

концентрации внедренного кремния, рассчитанное в приближении двух полуГауссианов [11] с использованием центральных моментов распределения из [12]. Отметим, что первые два момента в [12] удовлетворительно согласуются со значениями R_p и ΔR_p , определенными методом масс-спектрометрии вторичных ионов [13].

Из рис. 3 видно, что после ВЭО при $T_a = 590^\circ\text{C}$ (кривая 1) концентрация электронов n составляет $2.0 \cdot 10^{17}\text{см}^{-3}$ на глубине $x = 110$ нм. Причем, при $x > 140$ нм экспериментальный профиль хорошо соответствует расчетному (ср. точки 1 и сплошную кривую). С увеличением температуры ВЭО n увеличивается в результате электрической активации кремния в слое, прилегающем к границе $\text{SiO}_2\text{-GaAs}$, и при 800°C достигает значения $8.8 \cdot 10^{17}\text{см}^{-2}$ на глубине 40 нм (кривая 3). Кроме этого, с ростом температуры ВЭО концентрация электронов при $x \geq 220$ нм увеличивается (кривые 1–3).

При соизмеримых температурах отжига (рис. 3, кривые 4–6) концентрация электронов в слое $x \geq 60$ нм после ВЭО выше, чем после НЭО и после ТО, что свидетельствует о более эффективной активации кремния. В то же время после ТО концентрационный профиль измеряется с меньшей глубины (40 нм, кривая 6) по сравнению с ВЭО и НЭО. Кроме того, распределение $n(x)$ после ТО при $x < 110$ нм располагается выше, а при $x > 110$ нм ниже, чем после НЭО. Этот результат, возможно, обусловлен диффузионным перераспределением кремния в глубь GaAs при НЭО [3], так как концентрация электронов в "хвосте" распределения выше (кривые 5 и 6). Отмеченные особенности концентрационных профилей электронов свидетельствуют о различной степени активации кремния для радиационных видов отжига и ТО в слоях, непосредственно прилегающих к границе $\text{SiO}_2\text{-GaAs}$, и в более глубоких слоях.

В табл. 2 приведены значения N_s , μ , а также рассчитанные средние значения K и степени электроактивации кремния η . Последняя величина определялась как отношение площади под экспериментальной кривой $n(x)$ (рис. 3, б) к соответствующей площади под расчетным распределением концентрации внедренного кремния.

Из табл. 2 следует, что при ВЭО формируется ионно-легированный слой с наибольшей степенью электроактивации кремния и с наименьшей концентрацией остаточных дефектов (параметр K), ограничивающих подвижность электронов. После НЭО слоевая концентрация электронов N_s меньше, чем после ТО. По данным

рис. 3 (кривые 5 и 6), это обусловлено более высокой активацией кремния в слое $x < 110$ нм после ТО. По величине K НЭО занимает промежуточное положение между ТО и ВЭО.

Различия в характеристиках ионно-легированных слоев, полученных в результате радиационных отжигов и ТО, обусловлены, на наш взгляд, ионизацией при НЭО и как ионизацией, так и генерацией точечных дефектов при ВЭО. Эти процессы стимулируют активацию кремния и отжига радиационных дефектов, образованных при внедрении ионов ^{28}Si .

Заключение

1. Формирование ионно-легированных слоев при ВЭО происходит при существенно меньших температурах отжига по сравнению с ТО, причем уже при $T_a = 590^\circ\text{C}$ концентрационный профиль электронов совпадает с расчетным профилем внедренного кремния на глубине $x \geq 140$ нм.

2. С увеличением температуры ВЭО в диапазоне $T_a = 630 \div 800^\circ\text{C}$ увеличение слоевой концентрации N_s обусловлено активацией примеси в слое, расположенном непосредственно вблизи границы $\text{SiO}_2\text{-GaAs}$, и уже при $T_a = 730^\circ\text{C}$ степень активации кремния достигает 95% по результатам измерений концентрационных профилей.

3. Процесс формирования ионно-легированных слоев при ВЭО имеет две стадии, различающиеся энергией активации E_A , причем значение E_A на обеих стадиях меньше соответствующих величин при ТО.

4. При ВЭО параметр K имеет наименьшее значение по сравнению с НЭО и ТО. По величине K НЭО занимает промежуточное место между ВЭО и ТО.

Авторы выражают благодарность В.В. Пешеву в проведении ВЭО.

Список литературы

- [1] А.В. Черняев. *Метод ионной имплантации в технологии приборов и интегральных схем на арсениде галлия* (М., Радио и связь, 1980).
- [2] А.В. Двуреченский, Б.П. Кашников, Л.С. Смирнов. ФТП, **14**, 1837 (1980).
- [3] В.М. Ардышев, М.В. Ардышев. ФТП, **32**, 1153 (1998).
- [4] В.М. Ардышев, В.В. Пешев, А.П. Суржиков. А. с. № 1554670.
- [5] Ю.Е. Крейнфельд, Н.И. Лебедева, В.Я. Мартенс, Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровская. Письма ЖТФ, **8**, вып. 23, 1465 (1982).
- [6] S. Nilsum. Electron. Lett., **10**, N 10, 259 (1974).
- [7] *Полевые транзисторы на арсениде галлия* [Пер. с англ. под ред. Г.В. Петрова] (М., Радио и связь, 1988).
- [8] В.М. Ардышев, В.В. Пешев, А.П. Суржиков. ФХОМ, № 4 (в печати) (1998).
- [9] Д. Ланг. В кн.: *Точечные дефекты в твердых телах* [Пер. с англ. под ред. Б.И. Болтакса и др.] (М., Мир, 1979) с. 187.

- [10] Б.М. Горюнов, Е.И. Зорин, П.В. Павлов и др. В сб.: *Арсенид галлия* (Томск, ТГУ, 1974) вып. 4, с. 102.
- [11] *МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов*, под ред. П. Антонетти и др. [Пер. с англ. под ред. Р.А. Сурица] (М., Радио и связь, 1988).
- [12] А.В. Буренков, Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов, М.М. Темкин. *Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей* (Минск, Изд-во Минск. ун-та, 1980).
- [13] D.H. Lee, R.M. Malbon. Appl. Phys. Lett., **30**, N 7, 327 (1977).

Редактор Л.В. Шаронова

Radiation-thermal activation of silicon implanted in gallium arsenide

V.M. Ardyshev, A.P. Surzhikov

State Polytechnical University,
634004 Tomsk, Russia

Abstract The layer concentration, the concentration profile, and the electron mobility in ^{28}Si ion-implanted semi-insulating GaAs layers after radiation annealing by electrons with higher and lower than the damage threshold energies and after thermal annealing in the range of temperatures $509 \div 830^\circ\text{C}$ have been studied. The ion-implanted layers are shown to be formed under essentially lower annealing temperatures. They have high ^{28}Si activation efficiency and low concentration of defects limiting the electron mobility.