

## Влияние ионизации на поведение кремния в арсениде галлия при радиационном отжиге

© М.В. Ардышев<sup>¶</sup>, В.М. Ардышев

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

(Получена 13 февраля 2001 г. Принята к печати 25 мая 2001 г.)

Методом вольт-фарадных характеристик исследовано поведение кремния, имплантированного в GaAs, после электронного отжига в режиме  $7.6 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}/10 \text{ с}$ . Электронный пучок воздействовал как на имплантированную, так и на тыльную поверхности пластин. Контрольные образцы отжигали термически в печи в режиме  $800^\circ\text{C}/30 \text{ мин}$ . Показано, что при электронном отжиге имплантированной стороны коэффициент диффузии  $D$  более чем на 3 порядка больше, чем при термическом отжиге, и почти на 2 порядка больше, чем при электронном отжиге тыльной поверхности. Предполагается, что это обусловлено длительным временем существования высокой стационарной концентрации неравновесных электронов и дырок из-за их пространственного разделения.

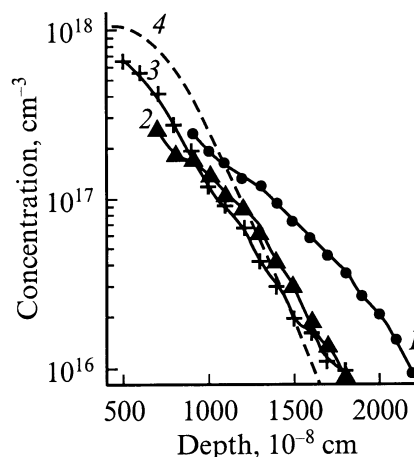
В [1,2] обнаружено, что при радиационном отжиге GaAs наблюдаются существенно бóльшие значения коэффициента диффузии и степени электрической активации имплантированного  $^{28}\text{Si}$  по сравнению с термическим отжигом (ТО) при тех же температурах. Предполагается, что это обусловлено влиянием генерируемых во время радиационного отжига "электронных возбуждений" (неравновесные носители заряда, оже-процессы, плазмоны) на перераспределение примеси. Однако данное предположение нельзя считать однозначным. Во-первых, в этом случае необходимо принять длительное время существования высокой концентрации неравновесных носителей заряда (ННЗ), более  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , что многими авторами подвергается критике [3]. Во-вторых, наблюдаемые эффекты могут быть обусловлены радиационно-стимулированной диффузией, которая при радиационном отжиге, возможно, протекает иначе, чем при термическом, из-за значительного различия скоростей нагрева материала.

В этой связи цель настоящей работы состояла в выявлении роли ионизационно-термических эффектов в диффузионном перераспределении и электрической активации кремния, имплантированного в арсенид галлия.

Исследования выполнены на пластинах полупроводящего нелегированного GaAs с удельным сопротивлением более  $10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Осуществляли имплантацию ионов  $^{28}\text{Si}$  с энергией 50 кэВ дозой  $6.25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , а затем с энергией 75 кэВ дозой  $1.88 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при комнатной температуре. Для исключения каналирования ионов принимали меры, описанные в [1]. Перед отжигом на обе стороны пластин плазмохимическим способом осаждали пленку  $\text{SiO}_2$  толщиной 0.1–0.3 мкм. Электронный отжиг (ЭО) выполняли в установке "Модуль" с плотностью мощности  $7.6 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  в течение 10 с в вакууме, причем электронным пучком воздействовали как на имплантированную сторону пластин, так и на тыльную. Контрольный

термический отжиг осуществляли в печах накаливания при температуре  $800^\circ\text{C}$  в течение 30 мин в потоке водорода. После удаления диэлектрика измеряли концентрационные профили электронов методом вольт-фарадных характеристик на барьерах Шоттки, окруженных омическими контактами.

На рисунке приведены концентрационные профили электронов в ионно-легированных слоях GaAs:Si после ЭО с имплантированной стороны (кривая 1) и тыльной стороны пластины (кривая 2), а также после ТО (кривая 3); кривая 4 — профиль концентрации внедренного кремния, рассчитанный с использованием параметров распределения  $R_p$  и  $\Delta R_p$ , определенных методом масс-спектропии вторичных ионов. Экспериментальные профили легирования обрабатывали методом Больцмана–Мотано [1,4].



Профили концентрации электронов в GaAs:Si после электронного отжига в режиме  $7.6 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}/10 \text{ с}$  при воздействии пучка на имплантированную (1) и тыльную (2) поверхности пластин, после термического отжига в режиме  $800^\circ\text{C}/30 \text{ мин}$  (3), а также расчетный профиль внедренного кремния (4) при имплантации ионов с энергией 50 кэВ, дозой  $6.25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и затем с энергией 75 кэВ, дозой  $1.88 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (1).

<sup>¶</sup> E-mail: ard.rff@elefot.tsu.ru

**Таблица 1.** Параметры концентрационных профилей электронов в GaAs:Si после различных видов отжига

Вид и режим отжига	Коэффициент диффузии Si $D, \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	Степень активации Si $\eta, \%$
ТО(800°C/30 мин)	$2.0 \cdot 10^{-15}$	34.3
ЭО(7.6 Вт · см <sup>-2</sup> /10 с):		
имплантированная поверхность	$1.6 \cdot 10^{-12}$	40.1
тыльная поверхность	$5.9 \cdot 10^{-14}$	52.6

В табл. 1 представлены параметры экспериментальных профилей электронов.

Из рисунка и табл. 1 следует, что после ЭО имплантированной стороны пластины значения коэффициента диффузии  $D$  и степени электроактивации  $\eta$  больше, чем после отжига тыльной стороны, которые в свою очередь больше, чем после ТО. Следует отметить, что при исследуемом ЭО за характерное время  $\tau_c \geq 10^{-3}$  с ( $\tau_c = d^2/\theta$ , где  $d$  — толщина пластины,  $\theta$  — коэффициент температуропроводности) тепловое поле распространяется на всю толщину пластины, так что температура на обеих сторонах будет практически одинаковой.

Из решения уравнения теплового баланса получено, что температура насыщения  $T_s$ , время достижения насыщения  $t_s$  и скорость нагрева пластин  $dT/dt$  составляют соответственно 803°C, 2.94 с и 741°C · с<sup>-1</sup>. Так как  $t_s \gg \tau_c$ , скорость нагрева на обеих поверхностях пластины практически одинакова. Следует отметить, что в случае ТО значение  $dT/dt$  составило  $\sim 2.8^\circ\text{C} \cdot \text{с}^{-1}$ . Если предположить, что во время ЭО тыльной стороны происходит миграция дефектов в объем GaAs, то различие в коэффициентах диффузии при ЭО и при ТО обусловлено диффузией примеси, стимулированной дефектами. Есть основания считать, что данный процесс является следствием высокой скорости нагрева материала при радиационном отжиге, благодаря чему отжиг имплантационных нарушений и активация примеси происходят одновременно [5]. Однако радиационно-стимулированная диффузия приводит к незначительному увеличению  $D$  (в 4 раза — см. табл. 1). Учитывая, что в случае ЭО имплантированной стороны увеличение  $D$  составляет несколько порядков и ННЗ генерируются в слое локализации внедренной примеси, то наиболее вероятной причиной наблюдаемых высоких значений  $D$  и  $\eta$  являются ионизационные эффекты.

Ранее в качестве механизмов ускорения диффузии возбуждением электронной подсистемы предлагались: механизм рекомбинационной  $\theta$ -вспышки В.М. Ленченко [6], механизм инверсных потенциалов Б.Л. Оксенгендлера [7], а также механизм Корбетта–Бургуэна [8] и другие [9]. Однако каждый из предложенных механизмов имеет те или иные недостатки.

Кинетику накопления концентрации ННЗ  $\Delta n$  представим в виде

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = G - \frac{\Delta n}{\tau} - \gamma(\Delta n)^3 + D_{n,p} \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $G$  — темп генерации,  $\tau$  — время жизни ННЗ, определяемое их рекомбинацией на центрах с глубокими уровнями,  $\gamma$  — коэффициент оже-рекомбинации,  $D_{n,p}$  — коэффициент амбиполярной диффузии ННЗ.

В процессе исследуемого ЭО реализуется стационарная концентрация ННЗ, т.е.  $\partial \Delta n / \partial t = 0$ . При малых темпах генерации убыль концентрации ННЗ будет определяться вторым членом в правой части (1), при больших — третьим. Доминирование оже-рекомбинации произойдет, когда  $\gamma(\Delta n)^3 > \Delta n / \tau$ . Принимая  $\tau = 10^{-8}$  с,  $\gamma = 3 \cdot 10^{-31} \text{см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$  [10], получим  $\Delta n > 2 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$ . Для обеспечения такой концентрации ННЗ необходимо выполнение условия  $G \gtrsim \gamma(\Delta n)^3 = 2.4 \cdot 10^{27} \text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ . Оценку  $G = \sigma_i N_0 j / e$ , где  $\sigma_i$  — сечение ионизации,  $N_0 = 4.45 \cdot 10^{22} \text{см}^{-3}$  — концентрация атомов полупроводника,  $j$  — плотность тока электронов ( $j = 7.6 \cdot 10^{-4} \text{А/см}^2$ ),  $e$  — заряд электрона, выполняли по [11]. Значение  $\sigma_i$  определяли с помощью выражения

$$\sigma_i = (\langle I \rangle N_0)^{-1} dE/dx, \quad (2)$$

где  $\langle I \rangle$  — средний потенциал ионизации атомов GaAs,  $dE/dx$  — удельные потери энергии электронов с учетом обратно рассеянных частиц.

В табл. 2 приведены результаты расчета. Видно, что для реализованного режима ЭО темп генерации существенно меньше значения, при котором доминирует оже-рекомбинация. Поэтому стационарная концентрация ННЗ  $\Delta n_{st}$  будет определяться 1-м, 2-м и 4-м членами правой части уравнения (1). Далее учтем, что

**Таблица 2.** Результаты расчета взаимодействия электронов с GaAs

Энергия электронов $E, \text{кэВ}$	Сечение ионизации $\sigma_i, 10^{-17} \text{см}^2$	Темп генерации $G, 10^{20} \text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$
5	8.5	12
10*	5.4	7.5
15	4.2	5.8

*Примечание.\** В настоящей работе реализован электронный отжиг с энергией электронов в пучке 10 кэВ.

в GaAs подвижность электронов  $\mu_n$  значительно больше подвижности дырок  $\mu_p$ , т. е. будет происходить пространственное разделение носителей заряда. Предполагая, что поверхностная рекомбинация незначительна, а также, что на глубине  $x = 3L$  ( $L$  — диффузионная длина носителей) при температуре отжига  $T_{\text{ann}}$  концентрация "термических" носителей заряда  $n_0(T_{\text{ann}})$  равна  $\Delta n_{\text{st}}$ , получим следующее выражение для стационарной концентрации ННЗ:

$$\Delta n_{\text{st}} = n_0(T_{\text{ann}}) \left[ \exp \left( \frac{eU_D}{kT_{\text{ann}}} \frac{\mu_n + \mu_p}{\mu_n - \mu_p} \right) - 1 \right], \quad (3)$$

где  $n_0(T_{\text{ann}}) = [N_c(T_{\text{ann}})N_v(T_{\text{ann}})]^{1/2} \exp[-\Delta E(T_{\text{ann}})/2kT_{\text{ann}}]$ ,  $N_c(T_{\text{ann}})$  и  $N_v(T_{\text{ann}})$  — плотность состояний в зоне проводимости и в валентной зоне соответственно при температуре отжига  $T_{\text{ann}}$ ,  $\Delta E(T_{\text{ann}})$  — ширина запрещенной зоны GaAs при  $T_{\text{ann}}$ ,  $U_D$  — потенциальный барьер.

Подвижности  $\mu_n$  и  $\mu_p$  при  $T_{\text{ann}} \approx 800^\circ\text{C}$  будут определяться в основном рассеянием на оптических колебаниях решетки. Оценки показывают, что в этом случае  $\mu_n/\mu_p \approx 5$ . С другой стороны,  $n_0(800^\circ\text{C}) \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Для выполнения условия  $\Delta n_{\text{st}} \gtrsim 10n_0(T_{\text{ann}})$  необходимо, чтобы  $U_D \approx 2(kT_{\text{ann}}/e)$ , т. е. при  $T_{\text{ann}} \approx 800^\circ\text{C}$   $U_D \approx 0.2 \text{ В}$ . Эта величина представляется разумной.

Таким образом, экспериментально обоснована определяющая роль ионизационно-термических процессов в ускорении диффузии и увеличении степени электрической активации  $^{28}\text{Si}$  в имплантированных слоях GaAs при электронном отжиге, а также показано, что наиболее вероятной причиной длительного существования высокой концентрации неравновесных носителей заряда является их пространственное разделение.

## Список литературы

- [1] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев. Изв. вузов. Физика, **41**, 89 (1998).
- [2] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев. ФТП, **32**, 1153 (1998).
- [3] А.В. Двуреченский, Г.А. Качурин, Е.В. Нидаев, Л.С. Смирнов. *Импульсный отжиг полупроводниковых материалов* (М., Наука, 1982).
- [4] A. Wakowski. J. Electrochem. Soc., **127**, 1644 (1980).
- [5] А.В. Черняев. *Метод ионной имплантации в технологии приборов и интегральных схем на GaAs* (М., Радио и связь, 1990).
- [6] В.М. Ленченко. ФТТ, **11**, 799 (1969).
- [7] Б.Л. Оксенгендлер. Письма ЖЭТФ, **24**, 12 (1976).
- [8] J. Bourgoin, J. Corbett. Phys. Lett. A, **38**, 135 (1972).
- [9] Б. Аскарлов, А.Ш. Махмудов, Б.Л. Оксенгендлер, М.С. Юнусов. *Радиоактивируемые процессы в кремнии* (Ташкент, Фан, 1977).
- [10] J. Smith. Phys. Rev. B, **3**, 4330 (1971).
- [11] И.А. Аброян, А.Н. Андронов, А.И. Титов. *Физические основы электронной и ионной технологии* (М., Высш. шк., 1984).

Редактор Л.В. Шаронова

## Effect of ionization on silicon behavior in gallium arsenide during radiation annealing

M.V. Ardyshev, V.M. Ardyshev

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

**Abstract** Using the voltage-capacitance method, the behavior of Si that was implanted in GaAs, has been studied after electron annealing ( $7.6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}/10 \text{ s}$ ). The electron beam irradiated both implanted and rear plate surfaces. The control samples were annealed thermally in furnace ( $800^\circ\text{C}/30 \text{ min}$ ). The coefficient of diffusion  $D$  during annealing the implanted surface was shown to be more than by 3 orders of magnitude greater than that under thermal annealing, and almost by 2 orders greater as compared to the rear-surface one. It could be caused by long time availability of nonequilibrium electrons and holes stationary concentration because of their space separation.