

# Влияние предварительного легирования и режимов имплантации на диффузию кремния в GaAs при радиационном отжиге

© М.В. Ардышев<sup>†</sup>, В.М. Ардышев, Ю.Ю. Крючков\*

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

\* Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия

(Получена 16 мая 2003 г. Принята к печати 3 июня 2003 г.)

Методами вольт-фарадных характеристик и резерфордовского обратного рассеяния исследованы диффузионные параметры кремния  $^{28}\text{Si}$  при диффузии из предварительно созданных  $n$ -слоев в полуизолирующий GaAs при „электронном“ и термическом отжиге. Слои были легированы серой или кремнием. Отмечается, что степень активации  $^{28}\text{Si}$  и коэффициент диффузии зависят от лигатуры, используемой при формировании  $n$ -слоя, и от режима имплантации (непрерывный или частотно-импульсный с длительностью импульса  $1.3 \cdot 10^{-2}$  с и скважностью 100).

## 1. Введение

В работе [1] отмечается, что при радиационном отжиге GaAs, имплантированного  $^{28}\text{Si}$ , наблюдается диффузионное перераспределение примеси в глубь полупроводника. Показано, что этот процесс обусловлен снижением потенциальных барьеров миграции и активации кремния и зависит от условий на поверхности полупроводника [2], от степени дефектности исходного материала [3]. На диффузию примесей часто оказывают влияние внутренние электрические поля, режимы имплантации (в частности, известна зависимость коэффициента диффузии от дозы имплантации примесей). В этой связи в работе исследовали диффузию кремния в GaAs при „электронном отжиге“ (ЭО) из предварительно созданных  $n$ -слоев в материал с собственным типом проводимости.

## 2. Методика экспериментов

Исследования выполнены на пластинах монокристаллического полуизолирующего GaAs с удельным сопротивлением более  $10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , с плотностью дислокаций не более  $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$  и на эпитаксиальных структурах  $n-n_i$ -типа с концентрацией электронов в  $n$ -слое  $\sim 1.1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и толщиной  $\sim 0.22 \text{ мкм}$ . Эпитаксиальные слои были легированы серой и получены газотранспортным методом на подложках полуизолирующего GaAs. Пластины были ориентированы в плоскости (100). После обработки пластин 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  $^{28}\text{Si}$  при комнатной температуре в частотно-импульсном (длительность импульса  $1.3 \cdot 10^{-2}$  с, скважность 100) и непрерывном режимах последовательно с энергией 50 кэВ, дозой  $5.62 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и с энергией 75 кэВ, дозой  $1.88 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , а также с энергией

100 кэВ, дозой  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (монокристаллический материал) и с энергией 50 кэВ, дозой  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , а затем с энергией 100 кэВ, дозой  $5.62 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (эпитаксиальный материал). Плотность тока ионов не превышала  $0.1 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ . При имплантации принимали меры для исключения осевого и плоскостного каналирования, как в [4]. После имплантации по способу [5] на поверхность пластин наносили пленку  $\text{SiO}_2:\text{Sm}$  из пленкообразующего раствора толщиной 0.1–0.2 мкм. Электронный отжиг проводили в установке „Модуль“ (ИСЭ ТФ РАН, г. Томск) с энергией электронов в пучке 10 кэВ, с плотностью мощности  $8.2 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  в течение 10–16 с в вакууме  $10^{-5}$  Па. Термический отжиг выполняли при температуре  $800^\circ\text{C}$  в течение 30 мин.

После формирования вблизи поверхности GaAs слоев  $n$ -типа проводимости пластины делили на две части. Вторые части пластин подвергали дополнительному ЭО.

После отжига и удаления диэлектрика измеряли концентрационные профили электронов методом вольт-фарадных характеристик, как в [1]. С помощью метода резерфордовского обратного рассеяния каналированных ионов (РОРКИ) гелия с энергией частиц 1.86 МэВ определяли дефектность материала после имплантации и после отжига. Экспериментальные профили легирования обрабатывали с помощью выражения [6]

$$n(x, t) = \frac{\eta F}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

где  $\sigma^2 = \Delta R_p^2 + 2Dt$  — дисперсия концентрационного профиля;  $F$ ,  $R_p$  и  $\Delta R_p$  — доза имплантации, пробег и страгглинг пробегов ионов соответственно;  $D$  и  $\eta$  — коэффициент диффузии и степень электроактивации примеси соответственно;  $x$  — координата;  $t$  — время.

При использовании выражения (1) предполагалось, что отсутствует диффузия примеси через границу полупроводника и что экспериментальный профиль можно описать аналитически. В случае профилей, не имеющих аналитического представления, коэффициент диффузии

<sup>†</sup> E-mail: ard.rff@elefot.tsu.ru, detector@mail.tomsknet.ru

определяли методом Больцмана-Мотано (см., например, [7]):

$$D_i = -N_i(x_i - R_p) \left[ 2t \frac{dN}{dx} \Big|_{x=x_i} \right]^{-1}, \quad (2)$$

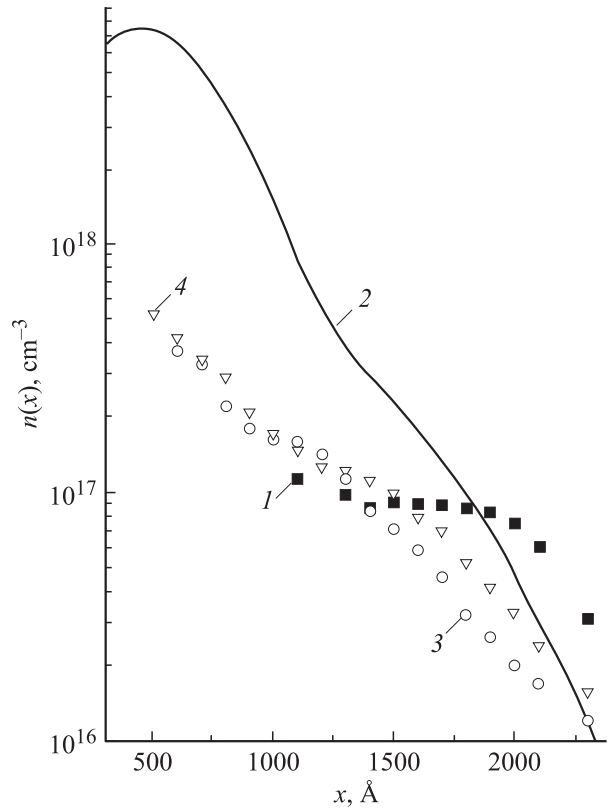
где  $N_i$  и  $dN/dx|_{x=x_i}$  — концентрация и градиент концентрации примеси на глубине  $x_i$  соответственно.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

#### 3.1. Влияние предварительного легирования

На рис. 1 представлены экспериментальные профили концентрации электронов в исходной структуре, после имплантации кремния и электронного отжига, а также расчетный профиль внедренного кремния. Видно, что с увеличением длительности ЭО возрастает глубина, на которую мигрирует кремний (кривые 3 и 4). Причем на концентрационных профилях можно выделить два участка: до глубины  $x \approx 1100 \text{ \AA}$  и после этой глубины. При  $x < 1100 \text{ \AA}$  не происходит перераспределения примеси и электронов относительно профиля внедренного кремния для обеих длительностей отжига (кривая 2). Максимум концентрации электронов  $n_{\max}$  в слоях и степень электроактивации примеси  $\eta$  лежат в диапазонах  $(4-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и 4.3–4.6% соответственно (кривые 3 и 4). При  $x > 1100 \text{ \AA}$  диффузионные и активационные параметры профилей легирования для длительностей отжига 10 и 16 с различаются (табл. 1).

Отличаются они и от результатов отжига имплантированного полупроводящего GaAs, в частности значение  $\eta$  более чем в 2 раза, а коэффициент диффузии — на порядок меньше. Следует также отметить, что при ЭО в течение 10 с значение  $D/t \cong 4.3 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \text{ с}^{-2}$ , что больше, чем при отжиге в течение 16 с ( $D/t \cong 3.5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \text{ с}^{-2}$ ), т.е. имеет место уменьшение коэффициента в единицу времени в среднем на 20%. Обращает на себя внимание также тот факт, что после ЭО в измеренных концентрационных профилях (кривые 3 и 4) отсутствует „ступенька“ — исходное (до отжига) распределение электронов по глубине (кривая 1). Так как легирующей примесью в  $n$ -слое эпитаксиальной



**Рис. 1.** Профили концентрации внедренного кремния при непрерывном режиме имплантации примеси в эпитаксиальную структуру  $n-n_i$ -типа: 1 — исходный профиль электронов в  $n$ -слое; 2 — расчетный профиль для режима имплантации 50 кэВ,  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  + 100 кэВ,  $5.62 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ; профили концентрации электронов, полученные после электронного отжига в течение 10 с (3) и 16 с (4).

**Таблица 1.** Характеристики концентрационных профилей электронов в  $n-n_i$ -GaAs:S после имплантации  $^{28}\text{Si}$  и ЭО с различной длительностью ( $x > 1100 \text{ \AA}$ )

Время отжига, с	$n_{\max}, \text{ см}^{-3}$	$\eta, \%$	$\sigma^2, \text{ \AA}^2$	$D, \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$
10	$1.42 \cdot 10^{17}$	34	$2.9 \cdot 10^5$	$4.33 \cdot 10^{-13}$
16	$3.9 \cdot 10^{17}$	42	$3.84 \cdot 10^5$	$5.64 \cdot 10^{-13}$
10*	Нет данных	78*	Нет данных	$(2.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-12}$ *

*Примечание.* Параметры, отмеченные звездочкой (\*), взяты из [1] и относятся к миграции  $^{28}\text{Si}$  из слоя внедрения не в эпитаксиальной структуре, а в полупроводящем GaAs.

структуры является сера, то, вероятно, в процессе имплантации и ЭО происходит перераспределение серы в направлении к поверхности в область с высокой концентрацией радиационных дефектов (РД). Возможно также, что в процессе отжига наряду с кремнием в глубь полупроводника мигрируют РД, в частности вакансии галлия  $V_{\text{Ga}}$ , с которыми, как известно, сера образует нейтральные комплексы. Если предположить, что сера связывает часть  $V_{\text{Ga}}$  в нейтральные комплексы, то это должно приводить, с одной стороны, к уменьшению степени электроактивации кремния в слоях до и после глубины  $1100 \text{ \AA}$ , а с другой — к уменьшению коэффициента диффузии  $^{28}\text{Si}$ , если кремний диффундирует по вакансиям галлия. Это и наблюдается в эксперименте (табл. 1, рис. 1).

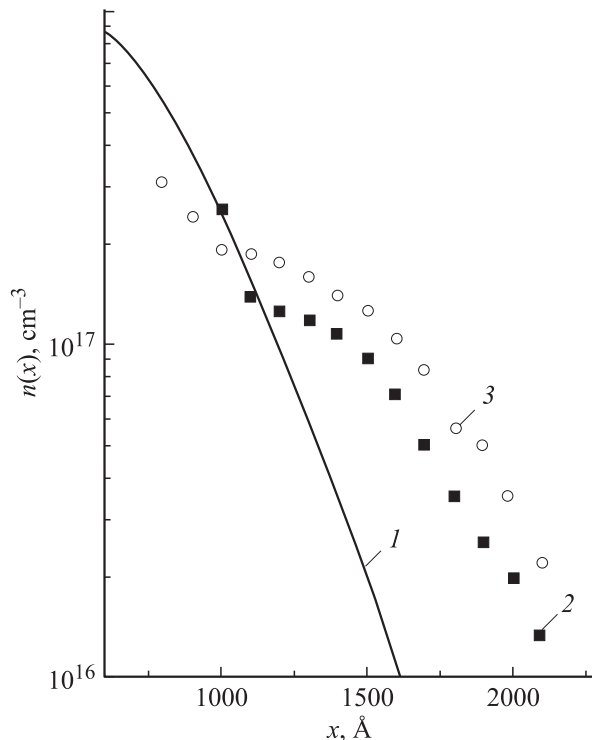
На рис. 2 приведены экспериментальные профили концентрации электронов после имплантации кремния и последовательно проведенных электронных отжигов, а также расчетный профиль внедренного кремния. В табл. 2 представлены параметры концентрационных профилей легирования.

Видно, что после второго ЭО наблюдается несколько более глубокое проникновение кремния в GaAs (рис. 2) и возрастает концентрация и степень электроактивации примеси по сравнению с первым ЭО. Коэффициент диффузии увеличивается незначительно, хотя миграция кремния происходит из слоя  $n$ -типа проводимости в собственный GaAs, т.е. фактически в электрическом поле  $n-n_i$ -перехода. Изгиб зон на границе этого перехода приводит к образованию встроенного отрицательного заряда со стороны собственного GaAs, который нейтрализуется в  $n$ -слое. В этой отрицательной области  $n-n_i$ -перехода возможна аккумуляция  $V_{Ga}$ , которые, как известно [8], могут нести единичный, двойной или тройной отрицательный заряд. Увеличение концентрации  $V_{Ga}$  должно приводить к увеличению коэффициента диффузии  $D$  в соответствии с соотношением [8]

$$D_{\text{eff}} = D_0 + D_- \left( \frac{n}{n_i} \right) + D_{2-} \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 + D_{3-} \left( \frac{n}{n_i} \right)^3, \quad (3)$$

где индексы при соответствующих коэффициентах обозначают заряд вакансий.

Необходимо отметить, что уравнение (3) справедливо лишь в предположении, что концентрация носителей заряда всегда определяется только концентрацией заряженных вакансий.



**Рис. 2.** Профили концентрации внедренного кремния при непрерывном режиме имплантации примеси в полуизолирующий GaAs: 1 — расчетный профиль для режима имплантации 50 кэВ,  $5.62 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} + 75 \text{ кэВ}$ ,  $1.88 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ; профили концентрации электронов, полученные после первого (2) и второго (3) электронного отжига в течение 10 с.

**Таблица 2.** Основные диффузионные параметры кремния в полуизолирующем GaAs после ЭО в течение 10 с

Отжиг	$n_{\text{max}}, \text{ см}^{-3}$	$\eta, \%$	$\sigma^2, \text{ \AA}^2$	$D, \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$
Первый ЭО	$2.24 \cdot 10^{17}$	54.2	$5.275 \cdot 10^5$	$1.88 \cdot 10^{-12}$
Второй ЭО	$2.59 \cdot 10^{17}$	76.0	$7.753 \cdot 10^5$	$3.12 \cdot 10^{-12}$

Однако к рассматриваемым процессам нужно относиться с большой осторожностью. Дело в том, что при воздействии электронов в материале генерируются неравновесные носители заряда и ионизованные атомы матрицы полупроводника в концентрации  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  [9]. Расчеты, выполненные по методике [10], показали, что для использованной в работе энергии электронов (100 кэВ) толщина ионизированного слоя значительно больше глубины залегания  $n-n_i$ -перехода. Поэтому исследуемые процессы осуществляются в сильно ионизованном материале. Наблюдаемые эффекты обусловлены не столько влиянием электрического поля  $n-n_i$ -перехода, потенциал которого при температуре отжига не превышает 0.5 эВ, сколько ионизационно-термическим уменьшением высоты барьеров миграции и электроактивации примеси [1], как в случае первого ЭО. На это указывает, в частности, близость значений коэффициентов диффузии (табл. 2) для обеих длительностей отжига.

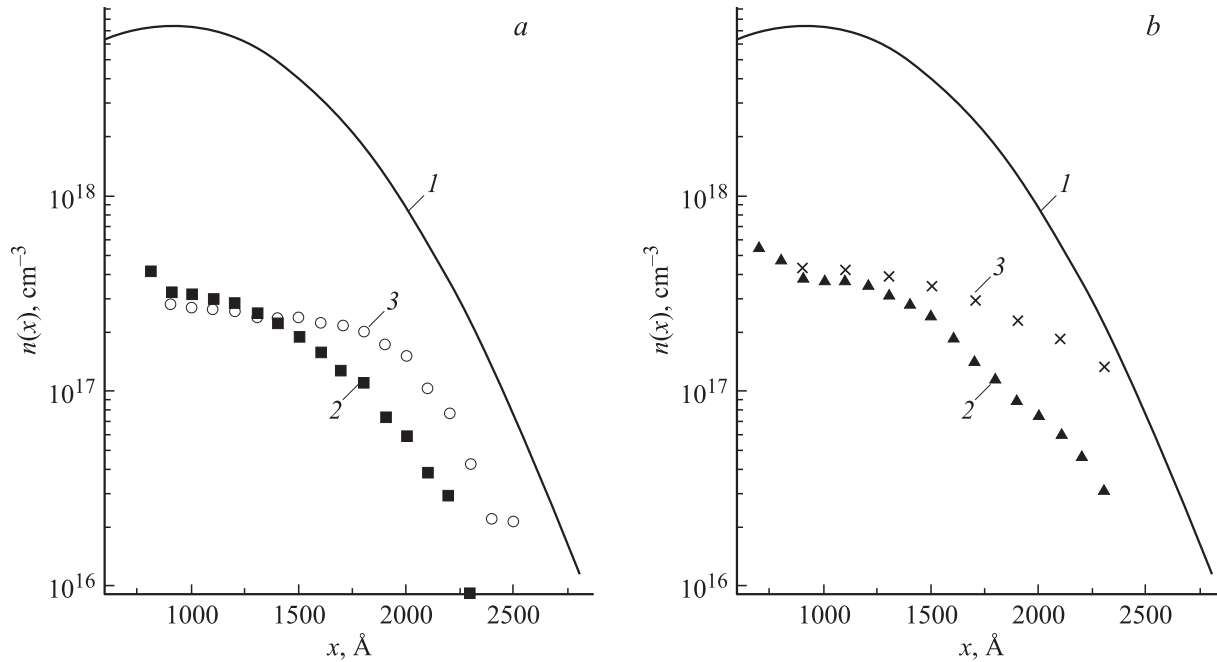
### 3.2. Влияние режимов имплантации

На рис. 3, *a, b* приведены концентрационные профили электронов после термического и последующего электронного отжига для двух режимов имплантации. Здесь также представлен профиль концентрации внедренного кремния. В табл. 3 представлены значения коэффициентов диффузии кремния после отжига.

**Таблица 3.** Коэффициенты диффузии кремния в полуизолирующем GaAs для различных режимов имплантации после термического и последующего электронного отжига

Режим имплантации	Коэффициент диффузии, $\text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$	
	ТО	ЭО
Непрерывный	$1.6 \cdot 10^{-15}$	$4.5 \cdot 10^{-13}$
Частотно-импульсный	$3.0 \cdot 10^{-15}$	$3.1 \cdot 10^{-12}$

Из рис. 3 и табл. 3 следует, что после ТО и особенно после ЭО слоев, полученных имплантацией кремния в частотно-импульсном режиме, перераспределение примеси более значительно по сравнению с непрерывным режимом имплантации, на что указывают значения коэффициентов  $D$ . Величина  $D$  после ЭО практически совпадает со значениями, приведенными в табл. 2. Наиболее вероятная причина наблюдаемых различий в поведении



**Рис. 3.** Профили концентрации внедренного кремния при непрерывном (а) и частотно-импульсном (б) режимах имплантации примеси в полужолирующий GaAs: 1 — расчетный профиль для режима имплантации 100 кэВ,  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ; профили концентрации электронов, полученные после термического отжига (2) и последующего электронного отжига (3).

$^{28}\text{Si}$  для исследуемых режимов имплантации связана с различной дефектностью материала как после внедрения примеси, так и после термического отжига.

**Таблица 4.** Степень дефектности GaAs после имплантации и после термического отжига

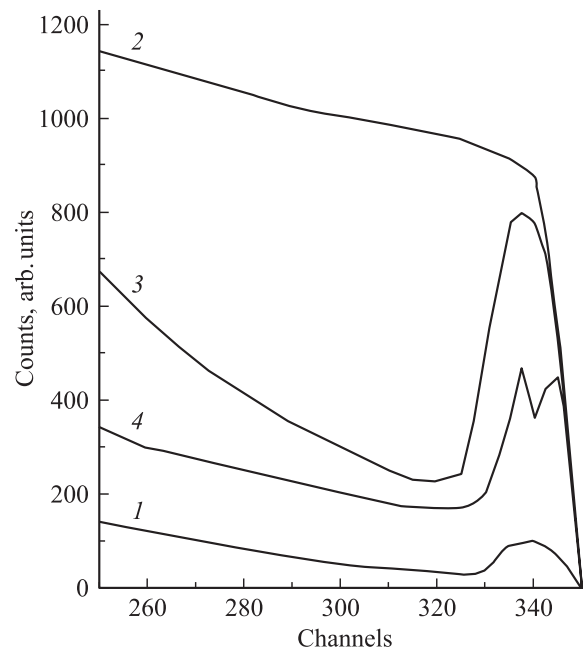
Режим имплантации	После имплантации			После ТО		
	$\chi_{\min}^{ex}$	$\chi_{\min}^{in}$	$\chi_{\min}^{th}$	$N_d/N_0$ , ат%	$N_d/N_0$ , ат%	$N_d/N_0$ , ат% (после удаления 1500 Å)
Непрерывный	0.29	0.06	0.035	25	~ 0.10	~ 0.09
Частотно-импульсный	0.13	0.06	0.035	8	0.00	0.00

На рис. 4 приведены спектры резерфордского обратного рассеяния для образцов GaAs. В табл. 4 представлены значения минимального выхода  $\chi_{\min}$  и степень дефектности материала. Рассчитывалась относительная концентрация дефектов в имплантированном слое [11]:

$$\frac{N_D}{N_0} = \frac{\chi_{\min}^{ex} - \chi_{\min}^{in}}{1 - \chi_{\min}^{in}}, \quad (4)$$

где  $N_D, N_0$  — концентрация дефектов и атомная плотность GaAs соответственно;  $\chi_{\min}^{in}$  и  $\chi_{\min}^{ex}$  — значение  $\chi_{\min}$  до и после имплантации соответственно. Область интегрирования для расчета  $\chi_{\min}^{ex}$  была выбрана за пиком дефектов на глубине  $R_p + 2\Delta R_p$ . В табл. 4 также приведены значения теоретического  $\chi_{\min}^{th}$  выхода ионов гелия.

Видно, что после имплантации (рис. 4, табл. 4) в непрерывном режиме степень дефектности материала существенно больше по сравнению с частотно-



**Рис. 4.** Энергетические спектры ионов гелия ( $E = 1.86 \text{ МэВ}$ ), рассеянных кристаллом  $(100) \text{ GaAs}$ , имплантированного кремнием с энергией 100 кэВ дозой  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  с плотностью тока  $0.1 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$  при 300 К в непрерывном (3) и частотно-импульсном (4) режимах. 1 — исходный осевой; 2 — исходный случай.

импульсным режимом, хотя энергия, доза, плотность ионного тока и температура внедрения кремния были одинаковыми. После отжига (табл. 4) дефекты отжигаются не полностью, причем удаление с поверхности слоя полупроводника толщиной 1500 Å практически не изменяет остаточную дефектность в материале. Последнее обстоятельство указывает на то, что дефекты проникают за пределы имплантированного слоя. Из сопоставления результатов, приведенных в табл. 3 и 4, можно сделать вывод о том, что остаточные дефекты после непрерывной имплантации и ТО выступают в качестве ловушек для кремния, препятствуя его миграции в глубь GaAs. Эти дефекты не отжигаются и при последующем ЭО. Учитывая результаты работ [1–3], можно также констатировать, что этот эффект проявляется при сравнительно больших дозах имплантации ( $\geq 10^{14}$  см<sup>-2</sup>), так как в цитируемых работах они составляли  $\sim 10^{13}$  см<sup>-2</sup>.

#### 4. Заключение

1. Электронный отжиг эпитаксиальных структур GaAs:S  $n-n_i$ -типа, предварительно легированных кремнием <sup>28</sup>Si в непрерывном режиме дозой  $\leq 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>, приводит к уменьшению коэффициента диффузии кремния и к снижению степени электроактивации примеси по сравнению с аналогичными характеристиками диффузии при электронном отжиге имплантированного <sup>28</sup>Si полуизолирующего GaAs.

2. При дополнительном электронном отжиге структуры  $n-n_i$ -типа, в которой  $n$ -слой создан имплантацией <sup>28</sup>Si в непрерывном режиме дозой  $< 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и электронным отжигом, коэффициент диффузии примеси увеличивается незначительно по сравнению с первым отжигом, хотя миграция кремния осуществляется в поле  $n-n_i$ -перехода. При этом степень электроактивации кремния возрастает примерно в 1.5 раза.

3. При частотно-импульсной имплантации <sup>28</sup>Si (длительность импульса  $1.3 \cdot 10^{-2}$  с, скважность 100) дозой  $10^{14}$  см<sup>-2</sup> и последующем термическом отжиге в GaAs образуется существенно меньшая концентрация остаточных дефектов по сравнению с непрерывным режимом облучения. Дефектный слой простирается в глубь GaAs на глубину, превышающую толщину  $n$ -слоя после термического отжига. Наличие этого слоя уменьшает коэффициент диффузии кремния как при термическом, так и при электронном отжиге. При этом в последнем случае диффузия происходит в поле  $n-n_i$ -перехода.

Работа поддержана грантом РФФИ № 02-02-16280.

#### Список литературы

- [1] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев. ФТП, **32**, 1153 (1998).
- [2] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев, С.С. Хлудков. ФТП, **34**, 70 (2000).

- [3] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев, С.С. Хлудков. ФТП, **34**, 28 (2000).
- [4] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев. Изв. вузов. Физика, **41** (11), 44 (1998).
- [5] В.М. Ардышев, В.А. Селиванова, О.Н. Коротченко, А.П. Мамонтов. А.с. № 235899 от 01.04.1986.
- [6] Х. Риссел, И. Руге. *Ионная имплантация* (М., Наука, 1983).
- [7] A. Bakowski. J. Electrochem. Soc.: Sol. St. Sci. and Technol., **127**, 1644 (1980).
- [8] E.L. Allen, M.D. Deal, J.D. Plummer. J. Appl. Phys., **67**, 3311 (1990).
- [9] М.В. Ардышев, В.М. Ардышев, С.С. Хлудков. Тр. 5-й Межд. конф. „Актуальные проблемы электронного приборостроения «АПЭП-2000»“ (Новосибирск, Россия, 2000) т. 2, с. 119.
- [10] Н.А. Аброян, А.Н. Андронов, А.И. Титов. *Физические основы электронной и ионной технологии* (М., Высш. шк., 1984).
- [11] Дж. Мейер, Дж. Эрикссон. *Ионное легирование полупроводников* (М., Мир, 1973).

Редактор Л.В. Беляков

#### Effect of pre-doping and implantation regime on silicon diffusion in gallium arsenide subject to radiation annealing

M.V. Ardyshev, V.M. Ardyshev, Yu.Yu. Krjuchkov\*

Kuznetsov Siberian Physicotechnical Institute,  
634050 Tomsk, Russia  
\* Tomsk Polytechnical University,  
634050 Tomsk, Russia

**Abstract** Using voltage-capacitance and Rutherford backscattering techniques, parameters of silicon diffusion from preformed  $n$ -type layers to semiinsulating GaAs, caused by electron-beam annealing and conventional thermal treatment, have studied in the work. The layers were doped either with sulphur or silicon. A degree of <sup>28</sup>Si electrical activation and diffusion coefficient are found to depend upon dopant, which was utilized for shaping the layer, and upon implantation regime (continuous or pulse-frequency with duration of pulse  $1.3 \cdot 10^{-2}$  s and the on-off time ratio 100).