

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЕВЫХ ГЕТЕРОТРАНЗИСТОРОВ В СОСТАВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПАМЯТИ DRAM С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ИХ ПЛОТНОСТИ**

**Е. Л. Панкратов<sup>1,2</sup>, Е.А. Булаева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> **Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
03950, Нижний Новгород, пр. Гагарина 23**

<sup>2</sup> **Волго-вятский филиал Московского технического университета связи и информатики,  
603011, Нижний Новгород, ул. Менделеева 15**

Статья поступила в редакцию 25 января 2017 г.

**Аннотация.** В данной работе рассматривается способ увеличения плотности полевых транзисторов в составе элементов памяти DRAM с одновременным уменьшением их размеров. В рамках предлагаемого способа необходимо легировать с помощью диффузии или ионной имплантации необходимые участки гетероструктуры специфической конфигурации и оптимизировать отжиг примеси и/или радиационных дефектов (после имплантации ионов примеси). Анализ перераспределения примеси с учетом перераспределения радиационных дефектов с целью оптимизации рассматриваемого отжига проводился с помощью предложенной ранее методики, позволяющей проводить анализ массо- и теплопереноса в многослойных структурах без сшивки решений на границах раздела между слоями с учетом нелинейности рассматриваемых процессов и изменения во времени их параметров.

**Ключевые слова:** полевые гетеротранзисторы, элементы памяти DRAM, оптимизация формирования, увеличение плотности гетеротранзисторов.

**Abstract.** In this paper we consider an approach to increase density of field-effect transistors framework elements of DRAM and at the same time to decrease their dimensions. In the framework of this approach it is necessary to dope required areas of heterostructure with specific configuration by diffusion or ion implantation and to optimize annealing of dopant and/or radiation defects (after ion implantation). Analysis of redistribution of dopant with account of redistribution of radiation defects

for optimization of annealing of dopant and /or radiation defects has been done by using recently introduced analytical approach. The approach gives a possibility to analyze mass and heat transports in a heterostructure without crosslinking of solutions on interfaces between layers of the heterostructure with account to nonlinearity of these transports and variation in time of their parameters.

**Keywords:** field-effect heterotransistors, DRAM elements, optimization of manufacturing, increasing of density of heterotransistors.

## Введение

Интенсивное развитие твердотельной электроники позволяет увеличить плотность элементов интегральных схем, быстродействие и надежность их элементов (таких как диоды, полевые и биполярные транзисторы и т.д.), а также их дискретных аналогов. Увеличение плотности интегральных схем приводит к необходимости уменьшения их размеров. Один из способов уменьшения размеров элементов интегральных схем является их формирование в тонкопленочных гетероструктурах [1-5]. Альтернативным способом уменьшения размеров элементов интегральных схем является использование лазерного и микроволнового типов отжига [6-8]. Во время применения данных типов отжига формируется неоднородное распределение температурного поля, что в силу закона Аррениуса приводит к неоднородности коэффициента диффузии и других параметров процессов. Эта неоднородность и позволяет уменьшить размеры элементов интегральных схем. К изменению свойств легируемых материалов также приводит их радиационная обработка [9,10].

В данной работе рассматривается схема элемента памяти DRAM базе полевых транзисторов (см. рис. 1). Будем считать, что рассматриваемая схема формируются на базе гетероструктуры, состоящей из эпитаксиального слоя и подложки. Эпитаксиальный слой содержит несколько секций, сформированных из других материалов (см. рис. 1). Данные секции легируются с помощью диффузии или ионной имплантации с целью формирования в них требуемого типа проводимости ( $n$  или  $p$ ) для их дальнейшего использования в качестве

истоков, стоков и затворов. В рамках данной статьи проводится анализ динамики перераспределения примеси в процессе отжига примеси и/или радиационных дефектов с целью формулировки условий, при которых уменьшаются размеры рассматриваемых схем.

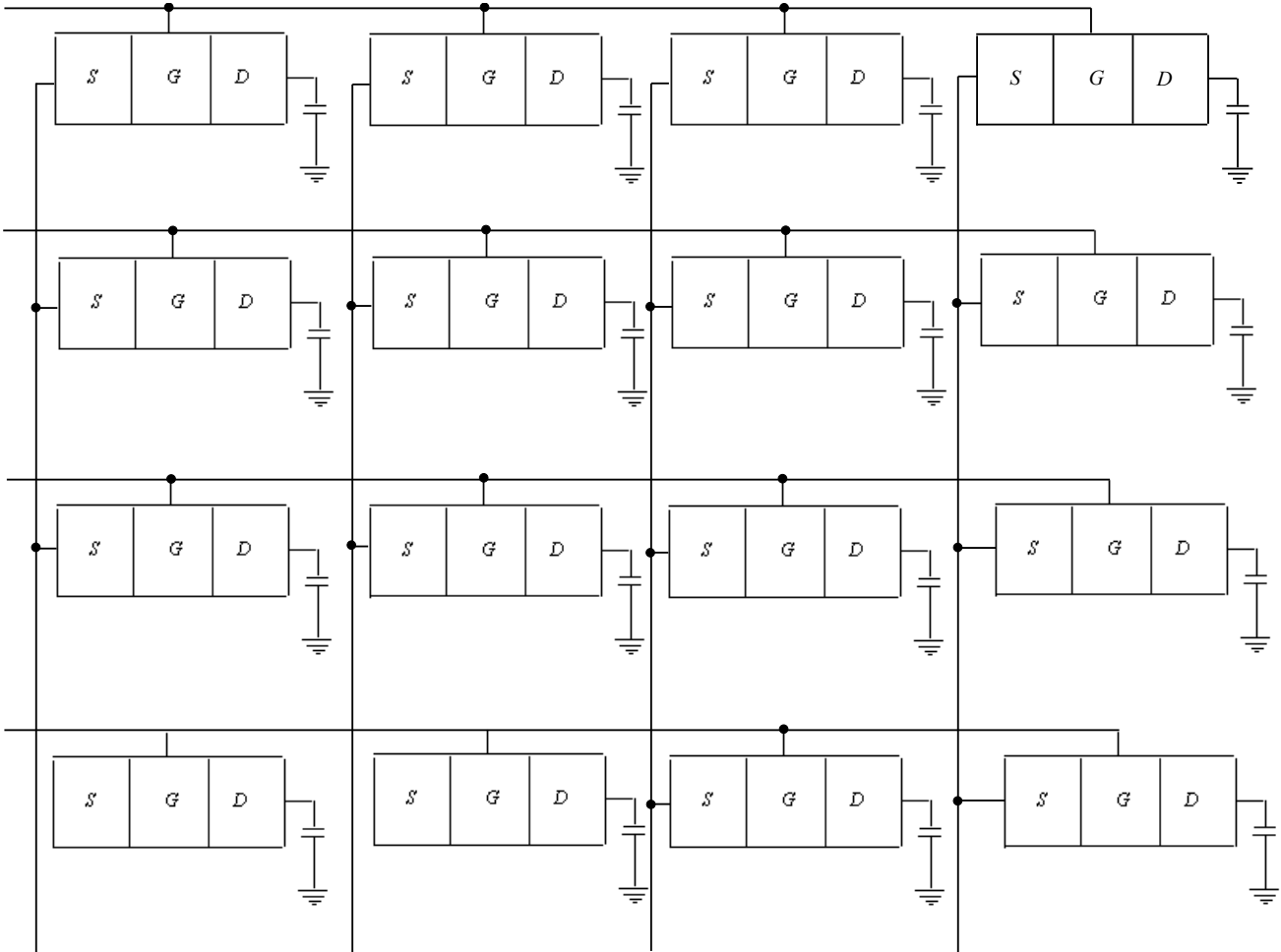


Рис. 1. Структура элемента памяти 4×4. Вид сверху на эпитаксиальный слой

### Методика анализа

Пространственно-временное распределение концентрации примеси определим путем решения следующей краевой задачи

$$\frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_c \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_c \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_c \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial z} \right] \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \left. \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = 0, \left. \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \left. \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=L_y} = 0, \\ \left. \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \left. \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=L_z} = 0, C(x, y, z, 0) = f(x, y, z). \quad (2)$$

В соотношениях (1) и (2) введены следующие обозначения:  $C(x, y, z, t)$  - пространственно-временное распределение концентрации примеси,  $T$  - температура отжига,  $D_C$  - коэффициент диффузии примеси. Величина коэффициента диффузии определяется свойствами материалов в слоях гетероструктуры, скорости прогрева и охлаждения гетероструктуры (в соответствии с законом Аррениуса). Зависимости коэффициента диффузии от параметров могут быть аппроксимированы следующим соотношением [9,11,12]

$$D_C = D_L(x, y, z, T) \left[ 1 + \xi \frac{C^\gamma(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right] \left[ 1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, t)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, t)}{(V^*)^2} \right], \quad (3)$$

где  $D_L(x, y, z, T)$  - зависимость коэффициента диффузии от координаты (за счет многослойности гетероструктуры) и температуры (по закону Аррениуса);  $P(x, y, z, T)$  – предел растворимости примеси; определяемый свойствами материала параметр  $\gamma$  может принимать целые значения в интервале  $\gamma \in [1, 3]$  [11];  $V(x, y, z, t)$  - пространственно-временное распределение концентрации радиационных вакансий;  $V^*$  - равновесное распределение вакансий. Концентрационная зависимость коэффициента диффузии подробно обсуждается в [11]. Следует заметить, что в случае диффузионного легирования радиационные повреждения отсутствуют и  $\zeta_1 = \zeta_2 = 0$ . Пространственно-временные распределения концентраций радиационных дефектов определялись путем решения следующей системы уравнений [9,12]

$$\frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial z} \right] - k_{I,V}(x, y, z, T) I(x, y, z, t) V(x, y, z, t) -$$

$$-k_{I,I}(x, y, z, T)I^2(x, y, z, t) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial z} \right] - k_{I,V}(x, y, z, T)I(x, y, z, t)V(x, y, z, t) - \\ & - k_{V,V}(x, y, z, T)V^2(x, y, z, t) \end{aligned}$$

с начальными и граничными условиями

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \rho(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \rho(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = 0, \quad \left. \frac{\partial \rho(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \rho(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=L_y} = 0, \\ \left. \frac{\partial \rho(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \rho(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=L_z} = 0, \quad \rho(x, y, z, 0) = f_\rho(x, y, z). \end{aligned} \quad (5)$$

В системе уравнений (4) и условиях (5) используются следующие обозначения:  $\rho = I, V$ ;  $I(x, y, z, t)$  - пространственно-временное распределение концентрации междуузельных атомов;  $D_\rho(x, y, z, T)$  - коэффициенты диффузии междуузельных атомов и вакансий; слагаемые  $V^2(x, y, z, t)$  и  $I^2(x, y, z, t)$  соответствуют образованию дивакансий и аналогичных комплексов междуузельных атомов;  $k_{I,V}(x, y, z, T)$ ,  $k_{I,I}(x, y, z, T)$  и  $k_{V,V}(x, y, z, T)$  - соответственно, параметры рекомбинации точечных дефектов и образования комплексов.

Пространственно-временные распределения концентраций дивакансий  $\Phi_V(x, y, z, t)$  и аналогичных комплексов междуузельных атомов  $\Phi_I(x, y, z, t)$  определим с помощью следующей системы уравнений [11,12]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + k_{I,I}(x, y, z, T)I^2(x, y, z, t) - k_I(x, y, z, T)I(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + k_{V,V}(x, y, z, T) V^2(x, y, z, t) - k_V(x, y, z, T) V(x, y, z, t)$$

с граничными и начальными условиями

$$\left. \frac{\partial \Phi_\rho(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_\rho(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_\rho(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \\ \left. \frac{\partial \Phi_\rho(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=L_y} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_\rho(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_\rho(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=L_z} = 0,$$

$$\Phi_I(x, y, z, 0) = f_{\Phi I}(x, y, z), \quad \Phi_V(x, y, z, 0) = f_{\Phi V}(x, y, z). \quad (7)$$

В последних соотношениях введены следующие обозначения:  $D_{\Phi I}(x, y, z, T)$  и  $D_{\Phi V}(x, y, z, T)$  - коэффициенты диффузии комплексов точечных радиационных дефектов;  $k_I(x, y, z, T)$  и  $k_V(x, y, z, T)$  - параметры распада комплексов точечных дефектов.

Пространственно-временные распределения концентрации примеси и радиационных дефектов определим с помощью метода осреднения функциональных поправок [13] с уменьшенным количеством итерационных шагов [14]. В рамках данной методики в качестве исходных приближений распределений примеси и радиационных дефектов выберем распределения их концентраций в образце с усредненными коэффициентами диффузии  $D_{0L}$ ,  $D_{0I}$ ,  $D_{0V}$ ,  $D_{0\Phi I}$ ,  $D_{0\Phi V}$  и нулевыми значениями параметров рекомбинации дефектов, генерации и распада их комплексов. Соответствующие решения представимы в следующих формах

$$C_1(x, y, z, t) = \frac{F_{0C}}{L_x L_y L_z} + \frac{2}{L_x L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t), \\ I_1(x, y, z, t) = \frac{F_{0I}}{L_x L_y L_z} + \frac{2}{L_x L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} F_{nI} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nI}(t),$$

$$V_1(x, y, z, t) = \frac{F_{0V}}{L_x L_y L_z} + \frac{2}{L_x L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} F_{nV} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nV}(t),$$

$$\Phi_{I1}(x, y, z, t) = \frac{F_{0\Phi_I}}{L_x L_y L_z} + \frac{2}{L_x L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} F_{n\Phi_I} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{n\Phi_I}(t),$$

$$\Phi_{V1}(x, y, z, t) = \frac{F_{0\Phi_V}}{L_x L_y L_z} + \frac{2}{L_x L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} F_{n\Phi_V} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{n\Phi_V}(t),$$

где  $e_{n\rho}(t) = \exp\left[-\pi^2 n^2 D_{0\rho} t \left(\frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} + \frac{1}{L_z^2}\right)\right]$ ,  $F_{n\rho} = \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} f_\rho(u, v, w) \times$   
 $\times c_n(v) dw dv du$ ,  $c_n(\chi) = \cos(\pi n \chi / L_\chi)$ .

Приближения второго и более высокого порядков концентрации примеси и радиационных дефектов определим в рамках стандартной итерационной процедуры метода осреднения функциональных поправок [13,14]. В рамках данной процедуры для нахождения приближения  $n$ -го порядка концентраций примеси и радиационных дефектов заменим в правых частях уравнений (1), (4), (6) искомые распределения концентраций  $C(x, y, z, t)$ ,  $I(x, y, z, t)$ ,  $V(x, y, z, t)$ ,  $\Phi_I(x, y, z, t)$ ,  $\Phi_V(x, y, z, t)$  на сумму среднего значения  $n$ -го приближения и  $n-1$ -го приближения данных функций, т.е. на сумму  $\alpha_{n\rho} + \rho_{n-1}(x, y, z, t)$ . После такой замены получаем соотношения для вторых приближений искомых концентраций

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_2(x, y, z, t)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \left[ 1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, t)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, t)}{(V^*)^2} \right] \left\{ 1 + \xi \frac{[\alpha_{2C} + C_1(x, y, z, t)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right\} \times \right. \\ &\times D_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_1(x, y, z, t)}{\partial x} \Big) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_L(x, y, z, T) \left[ 1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, t)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, t)}{(V^*)^2} \right] \times \right. \\ &\times \left. \left\{ 1 + \xi \frac{[\alpha_{2C} + C_1(x, y, z, t)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right\} \frac{\partial C_1(x, y, z, t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_1(x, y, z, t)}{\partial z} \times \right. \\ &\times \left. \left[ 1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, t)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, t)}{(V^*)^2} \right] \left\{ 1 + \xi \frac{[\alpha_{2C} + C_1(x, y, z, t)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right\} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_2(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I_1(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I_1(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I_1(x, y, z, t)}{\partial z} \right] - [\alpha_{2I} + I_1(x, y, z, t)] [\alpha_{2V} + V_1(x, y, z, t)] \times \\ & \times k_{I,V}(x, y, z, T) - k_{I,I}(x, y, z, T) [\alpha_{2I} + I_1(x, y, z, t)]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_2(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V_1(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V_1(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V_1(x, y, z, t)}{\partial z} \right] - [\alpha_{2I} + I_1(x, y, z, t)] [\alpha_{2V} + V_1(x, y, z, t)] \times \\ & \times k_{I,V}(x, y, z, T) - k_{V,V}(x, y, z, T) [\alpha_{2V} + V_1(x, y, z, t)]^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{I2}(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{I1}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \times \right. \\ & \times \left. \frac{\partial \Phi_{I1}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{I1}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + k_{I,I}(x, y, z, T) \times \\ & \times I^2(x, y, z, t) - k_I(x, y, z, T) I(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{V2}(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{V1}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \times \right. \\ & \times \left. \frac{\partial \Phi_{V1}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{V1}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + k_{V,V}(x, y, z, T) \times \\ & \times V^2(x, y, z, t) - k_V(x, y, z, T) V(x, y, z, t). \end{aligned}$$

Интегрирование левой и правой части уравнений (8)-(10) позволяет получить соотношения для второго приближения искомых концентраций примеси и радиационных дефектов, а также температурного поля в следующей форме:



$$\begin{aligned}
 C_2(x, y, z, t) = & \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^t \left[ 1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, \tau)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, \tau)}{(V^*)^2} \right] \left\{ 1 + \xi \frac{[\alpha_{2c} + C_1(x, y, z, \tau)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right\} \times \right. \\
 & \times D_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_1(x, y, z, \tau)}{\partial x} \Big) d\tau + \frac{\partial}{\partial y} \left( \int_0^t \left[ 1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, \tau)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, \tau)}{(V^*)^2} \right] \times \right. \\
 & \times D_L(x, y, z, T) \left\{ 1 + \xi \frac{[\alpha_{2c} + C_1(x, y, z, \tau)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right\} \frac{\partial C_1(x, y, z, \tau)}{\partial y} d\tau \Big) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \int_0^t D_L(x, y, z, T) \times \right. \\
 & \times \left. \left[ 1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, \tau)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, \tau)}{(V^*)^2} \right] \left\{ 1 + \xi \frac{[\alpha_{2c} + C_1(x, y, z, \tau)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right\} \frac{\partial C_1(x, y, z, \tau)}{\partial z} d\tau \right) + \\
 & + f_c(x, y, z) \tag{8a}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_2(x, y, z, t) = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ \int_0^t D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I_1(x, y, z, \tau)}{\partial x} d\tau \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \int_0^t D_I(x, y, z, T) \times \right. \\
 & \times \frac{\partial I_1(x, y, z, \tau)}{\partial y} d\tau \Big] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \int_0^t D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I_1(x, y, z, \tau)}{\partial z} d\tau \right] - \int_0^t k_{I,I}(x, y, z, T) \times \\
 & \times [\alpha_{2I} + I_1(x, y, z, \tau)]^2 d\tau + f_I(x, y, z) - \int_0^t k_{I,V}(x, y, z, T) [\alpha_{2I} + I_1(x, y, z, \tau)] \times \\
 & \times [\alpha_{2V} + V_1(x, y, z, \tau)] d\tau \tag{9a}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_2(x, y, z, t) = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ \int_0^t D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V_1(x, y, z, \tau)}{\partial x} d\tau \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \int_0^t D_V(x, y, z, T) \times \right. \\
 & \times \frac{\partial V_1(x, y, z, \tau)}{\partial y} d\tau \Big] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \int_0^t D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V_1(x, y, z, \tau)}{\partial z} d\tau \right] - \int_0^t k_{V,V}(x, y, z, T) \times \\
 & \times [\alpha_{2I} + V_1(x, y, z, \tau)]^2 d\tau + f_V(x, y, z) - \int_0^t k_{I,V}(x, y, z, T) [\alpha_{2I} + I_1(x, y, z, \tau)] \times \\
 & \times [\alpha_{2V} + V_1(x, y, z, \tau)] d\tau
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{I2}(x, y, z, t) = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ \int_0^t D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{I1}(x, y, z, \tau)}{\partial x} d\tau \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \int_0^t D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \times \right. \\ & \times \frac{\partial \Phi_{I1}(x, y, z, \tau)}{\partial y} d\tau \left. \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \int_0^t D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{I1}(x, y, z, \tau)}{\partial z} d\tau \right] + \int_0^t k_{I,I}(x, y, z, T) \times \\ & \times I^2(x, y, z, \tau) d\tau - \int_0^t k_I(x, y, z, T) I(x, y, z, \tau) d\tau + f_{\Phi_I}(x, y, z) \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{V2}(x, y, z, t) = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ \int_0^t D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{V1}(x, y, z, \tau)}{\partial x} d\tau \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \int_0^t D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \times \right. \\ & \times \frac{\partial \Phi_{V1}(x, y, z, \tau)}{\partial y} d\tau \left. \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \int_0^t D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{V1}(x, y, z, \tau)}{\partial z} d\tau \right] + \int_0^t k_{V,V}(x, y, z, T) \times \\ & \times V^2(x, y, z, \tau) d\tau - \int_0^t k_V(x, y, z, T) V(x, y, z, \tau) d\tau + f_{\Phi_V}(x, y, z) \end{aligned}$$

Средние значение вторых приближений искомым функций определим с помощью стандартного соотношения [13,14]

$$\alpha_{2\rho} = \frac{1}{\Theta L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} [\rho_2(x, y, z, t) - \rho_1(x, y, z, t)] dz dy dx dt. \quad (11)$$

Подстановка соотношений (8a)-(10a) в соотношение (11) позволяет получить соотношения для искомым величин  $\alpha_{2\rho}$

$$\alpha_{2C} = \frac{1}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_C(x, y, z) dz dy dx, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{2I} = & \frac{1}{2A_{II00}} \left\{ (1 + A_{IV01} + A_{II10} + \alpha_{2V} A_{IV00})^2 - 4A_{II00} [\alpha_{2V} A_{IV10} - A_{II20} + A_{IV11} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_I(x, y, z) dz dy dx \right\}^{\frac{1}{2}} - \frac{1 + A_{IV01} + A_{II10} + \alpha_{2V} A_{IV00}}{2A_{II00}} \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\alpha_{2V} = \frac{1}{2B_4} \sqrt{\frac{(B_3 + A)^2}{4} - 4B_4 \left( y + \frac{B_3 y - B_1}{A} \right) - \frac{B_3 + A}{4B_4}}, \quad (13b)$$

где  $A_{abij} = \frac{1}{\Theta L_x L_y L_z} \int_0^\Theta (\Theta - t) \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} k_{a,b}(x, y, z, T) I_1^i(x, y, z, t) V_1^j(x, y, z, t) dz dy dx dt$ ,

$$B_4 = A_{IV00}^2 A_{IV00}^2 - 2(A_{IV00}^2 - A_{II00} A_{VV00})^2, B_3 = A_{IV00} A_{IV00}^2 + A_{IV01} A_{IV00}^3 + A_{IV00} A_{II10} A_{IV00}^2 -$$

$$- 4(A_{IV00}^2 - A_{II00} A_{VV00}) [2A_{IV01} A_{IV00} + 2A_{IV00} (1 + A_{IV01} + A_{II10}) - 2A_{II00} (A_{IV10} + A_{VV10} + 1)] -$$

$$- 4A_{IV10} A_{II00} A_{IV00}^2 + 2A_{IV00} A_{IV01} A_{IV00}^2, B_2 = A_{IV00}^2 \left\{ (1 + A_{IV01} + A_{II10})^2 + A_{IV00}^2 A_{IV01}^2 + A_{IV00} \times \right.$$

$$\times 2A_{IV00} (A_{IV00} + A_{IV00} A_{IV01} + A_{IV00} A_{II10} - 4A_{IV10} A_{II00}) - 4A_{II00} \left[ A_{IV11} - A_{II20} - \frac{1}{L_x L_y L_z} \times \right.$$

$$\times \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_I(x, y, z) dz dy dx \left. \right\} \left\{ [2A_{IV01} A_{IV00} + 2A_{IV00} (1 + A_{IV01} + A_{II10}) - 2A_{II00} (A_{IV10} + 1 + \right.$$

$$+ A_{VV10})]^2 + 2 \left[ A_{IV01} (1 + A_{IV01} + A_{II10}) + \frac{2}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_V(x, y, z) dz dy dx - 2A_{II00} (A_{VV20} - \right.$$

$$- A_{IV11}) + A_{IV01} (1 + A_{IV01} + A_{II10}) \right] [2A_{IV00} (1 + A_{IV01} + A_{II10}) + 2A_{IV01} A_{IV00} - 2A_{II00} (A_{IV10} + 1 + \right.$$

$$+ A_{VV10}) \left. \right\}, B_1 = 2A_{IV00} A_{IV01} (1 + A_{IV01} + A_{II10})^2 - 8 \left[ A_{IV11} - \frac{1}{L_x} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_I(x, y, z) dz dy dx \times \right.$$

$$\times \frac{1}{L_y L_z} - A_{II20} \left. \right] + A_{IV00} A_{IV01} A_{II00} + A_{IV01}^2 (A_{IV00} + A_{IV00} A_{IV01} + A_{IV00} A_{II10} - 4A_{IV10} A_{II00}) -$$

$$- 2 \left[ \frac{2A_{II00}}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_I(x, y, z) dz dy dx + A_{IV01} (1 + A_{IV01} + A_{II10}) - 2A_{II00} (A_{VV20} - A_{IV11}) + \right.$$

$$+ A_{IV01} (1 + A_{IV01} + A_{II10}) \left. \right] [2A_{IV00} (1 + A_{IV01} + A_{II10}) - 2(A_{IV10} + A_{VV10} + 1)A_{II00} + 2A_{IV01} A_{IV00}],$$

$$B_0 = 4A_{II00} A_{IV01}^2 \left[ A_{II20} + \frac{1}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_I(x, y, z) dz dy dx - A_{IV11} \right] + A_{IV01}^2 (A_{IV01} + A_{II10} +$$

$$+ 1)^2 - \left[ \frac{2A_{II00}}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_V(x, y, z) dz dy dx + A_{IV01} (1 + A_{IV01} + A_{II10}) - 2A_{II00} (A_{VV20} - A_{IV11}) + \right.$$

$$+ A_{IV01} (1 + A_{IV01} + A_{II10}) \left. \right]^2, y = \sqrt[3]{\sqrt{q^2 + p^3} - q} - \sqrt[3]{\sqrt{q^2 + p^3} + q} + \frac{B_2}{6}, q = (2B_1 B_3 - 8B_0) \times$$

$$\times \frac{B_2}{48} + \frac{B_2^3}{216} + \frac{B_0(4B_2 - B_3^2) - B_1^2}{8}, p = [3(2B_1 B_3 - 8B_0) - 2B_2^2] / 72, A = \sqrt{8y + B_3^2 - 4B_2},$$

$$\alpha_{2\Phi_I} = A_{II20} - \frac{1}{\Theta L_x L_y L_z} \int_0^\Theta (\Theta - t) \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} k_I(x, y, z, T) I(x, y, z, t) dz dy dx dt +$$

$$+ \frac{1}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_{\Phi_I}(x, y, z) dz dy dx \quad (14)$$

$$\alpha_{2\Phi_V} = A_{VV20} - \frac{1}{\Theta L_x L_y L_z} \int_0^\Theta (\Theta - t) \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} k_V(x, y, z, T) V(x, y, z, t) dz dy dx dt +$$

$$+ \frac{1}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_{\Phi_V}(x, y, z) dz dy dx.$$

Рассматриваемая подстановка позволяет получить уравнение для параметра  $\alpha_{2C}$ , решение которого зависит от значения параметра  $\gamma$ . Анализ пространственно-временных распределений концентраций примеси и радиационных дефектов проводился аналитически во втором приближении по методу осреднения функциональных поправок с уменьшенным количеством итерационных шагов. Данного приближения обычно достаточно для проведения качественного анализа и получения некоторых количественных результатов. Результаты аналитических расчетов проверялись путем их сопоставления с результатами численного моделирования.

### Результаты анализа

В данном разделе проведем анализ изменения концентрации примеси в пространстве и времени с учетом пространственно-временного распределения концентрации радиационных дефектов. Типичные пространственные распределения концентраций примесей в гетероструктурах приведены на рис. 2 и 3. На рис. 2 приведены пространственные распределения концентрации введенной диффузионно примеси в направлении, перпендикулярном границе раздела между материалами гетероструктуры, при фиксированной длительности отжига. Увеличение номера кривой соответствует увеличению разницы между значениями коэффициента диффузии примеси при условии, что коэффициент диффузии примеси в легированном материале больше, чем в соседнем.

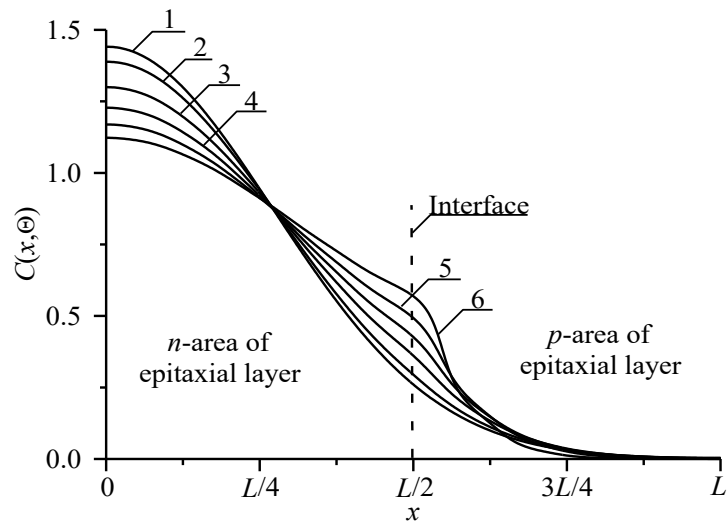


Рис.2. Пространственные распределения концентрации введенной диффузионной примеси

На рис. 3 приведены пространственные распределения концентрации имплантированной примеси в направлении, перпендикулярном границе раздела между материалами гетероструктуры, после отжига длительностью  $\Theta = 0,0048(L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)/D_0$  (кривые 1 и 3) и  $\Theta = 0,0057(L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)/D_0$  (кривые 2 и 4).

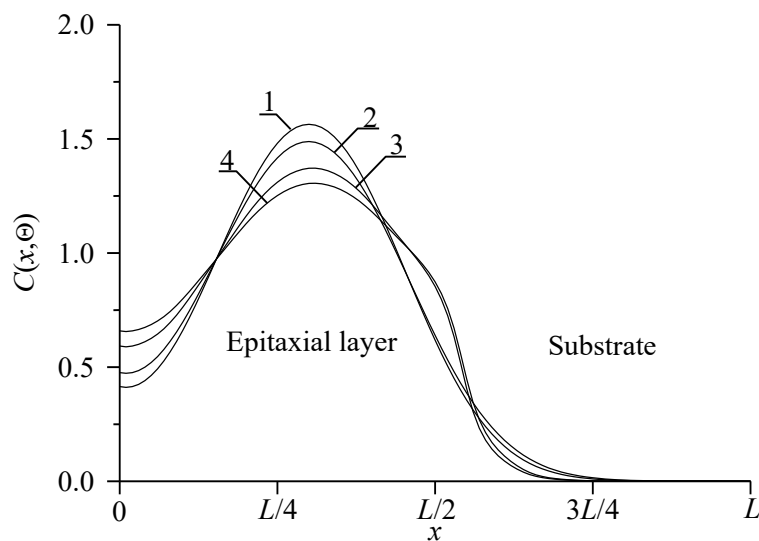


Рис. 3. Пространственные распределения имплантированной примеси

Кривые 1 и 2 - расчетные распределения в однородной структуре; кривые 3 и 4 - расчетные распределения примеси в двухслойной структуре при условии, что коэффициент диффузии примеси в легированном материале больше, чем в соседнем. Из данных рисунков следует, что неоднородность гетероструктуры позволяет сформировать более компактное распределение концентрации примеси в обогащенной ею области. Одновременно увеличивается ее

равномерность в данной области. Следует заметить, что в рамках данного метода формирования транзистора необходима оптимизация отжига. Причина данного отжига заключается в следующем. При малой длительности отжига примесь не успевает достичь границы раздела между слоями гетероструктуры, что не приводит к изменению распределения концентрации примеси. При большой длительности отжига распределение концентрации примеси становится слишком равномерным.

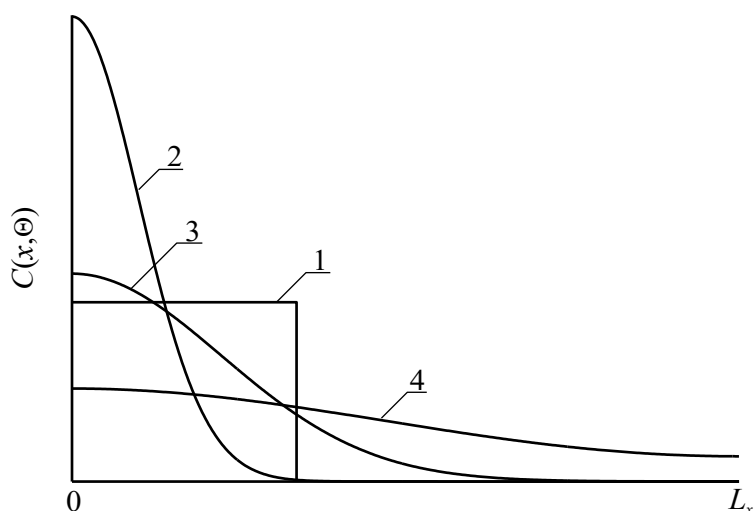


Рис.4. Пространственные распределения примеси в гетероструктуре при диффузионном легировании. Кривая 1 - требуемое идеализированное распределение при меси. Кривые 2-4 - реальные распределения примеси в различные моменты времени (увеличение номера кривой соответствует увеличению длительности отжига)

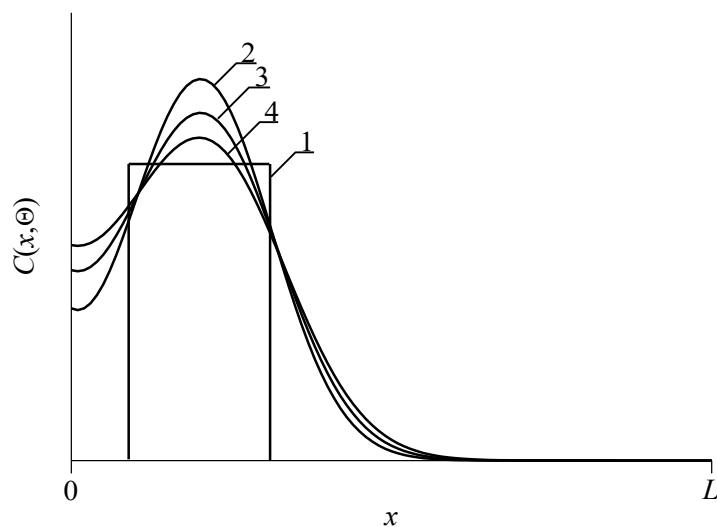


Рис.5. Пространственные распределения примеси в гетероструктуре при ионном легировании. Кривая 1 - требуемое идеализированное распределение при меси. Кривые 2-4 - реальные распределения примеси в различные моменты времени (увеличение номера кривой соответствует увеличению длительности отжига)

Оптимизацию длительности отжига проведем с помощью введенного ранее критерия [15-20]. В рамках данного критерия реальное распределение примеси аппроксимируем с помощью скачкообразной функции (см. рис. 4 и 5).

Далее определим оптимальные значения длительности отжига определим из условия минимума среднеквадратической ошибки

$$U = \frac{1}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} [C(x, y, z, \Theta) - \psi(x, y, z)]^2 dz dy dx, \quad (15)$$

где  $\psi(x, y, z)$  - аппроксимирующая функция. Зависимости оптимальной длительности отжига от параметров приведены на рис. 6 и 7 для диффузионного и ионного типов легирования, соответственно.

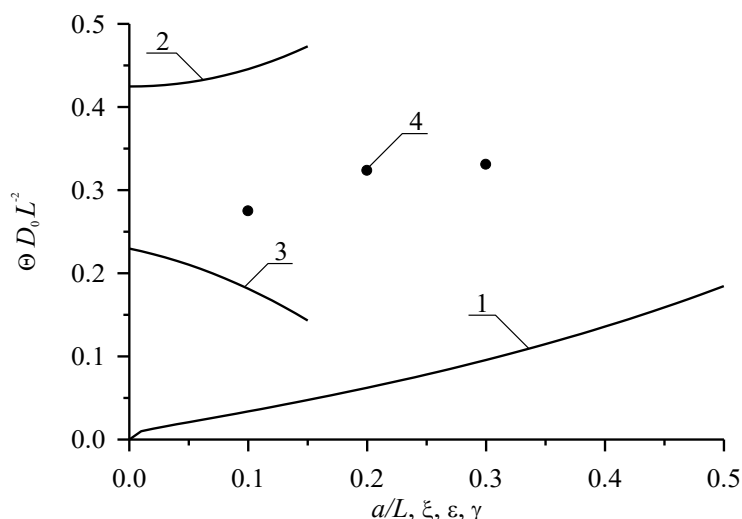


Рис.6. Зависимости безразмерного оптимального времени отжига введенной диффузионно примеси, полученного из условия минимума среднеквадратической ошибки, от различных параметров гетероструктуры.

Кривая 1 - зависимость времени отжига от отношения  $a/L$  и  $\xi = \gamma = 0$  при попарном равенстве коэффициентов диффузии. Кривая 2 - зависимость времени отжига от параметра  $\epsilon$  при  $a/L = 1/2$  и  $\xi = \gamma = 0$ . Кривая 3 - зависимость времени отжига от параметра  $\xi$  при  $a/L = 1/2$  и  $\epsilon = \gamma = 0$ . Кривая 4 - зависимость времени отжига от параметра  $\gamma$  при  $a/L = 1/2$  и  $\epsilon = \xi = 0$

Следует заметить, что после проведения ионной имплантации проводится отжиг радиационных дефектов. В течении данного отжига происходит уширение распределения примеси. В идеальном случае с окончанием отжига радиационных дефектов примесь достигает границы раздела между материалами гетероструктуры. Если к моменту окончания отжига

радиационных дефектов примесь не достигает границы раздела между материалами гетероструктуры, целесообразно проводить дополнительный отжиг примеси. По этой причине оптимальная величина дополнительного отжига имплантированной примеси принимает меньшие значения, чем в случае диффузионного легирования.

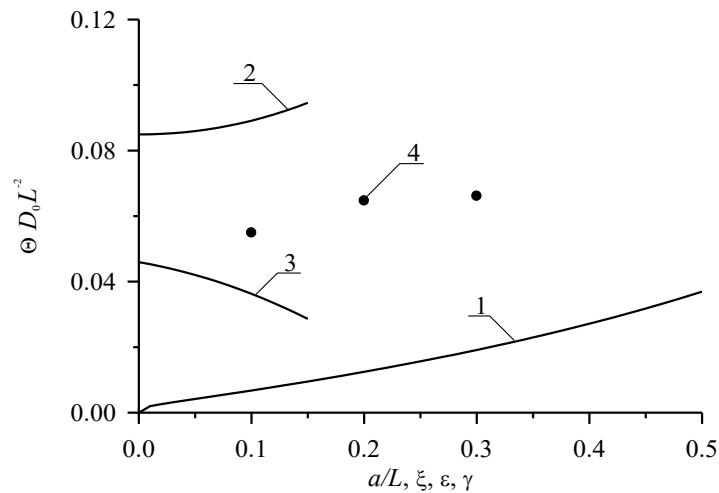


Рис.7. Зависимости безразмерного оптимального времени отжига введенной с помощью ионной имплантации примеси, полученного из условия минимума среднеквадратической ошибки, от различных параметров гетероструктуры.

Кривая 1 - зависимость времени отжига от отношения  $a/L$  и  $\xi = \gamma = 0$  при попарном равенстве коэффициентов диффузии. Кривая 2 - зависимость времени отжига от параметра  $\epsilon$  при  $a/L=1/2$  и  $\xi = \gamma = 0$ . Кривая 3 – зависимость времени отжига от параметра  $\xi$  при  $a/L=1/2$  и  $\epsilon = \gamma = 0$ . Кривая 4 - зависимость времени отжига от параметра  $\gamma$  при  $a/L=1/2$  и  $\epsilon = \xi = 0$

### Заключение

В данной работе предлагается способ увеличения плотности элементов в схеме DRAM, сформированного на базе полевых гетеротранзисторов. Сформулированы рекомендации по оптимизации технологического процесса с целью формирования более компактного распределения примесей для увеличения плотности транзисторов в рассматриваемой схеме. Анализ перераспределения примеси с учетом перераспределения радиационных дефектов (после имплантации ионов примеси) с целью оптимизации рассматриваемого отжига проводился с помощью предложенной ранее методики, позволяющей проводить анализ массо- и теплопереноса в многослойных структурах без сшивки решений на границах раздела между



слоями с учетом изменения во времени их параметров и нелинейности рассматриваемых процессов.

### Литература

- [1] Г. Волович. Современные модели интегральных операционных усилителей // Современная электроника. 2006. № 2. С. 10-17.
- [2] А. Керенцев, В. Ланин. Конструктивно-технологические особенности MOSFET-транзисторов. // Силовая электроника. 2008. № 1. С. 34-38.
- [3] А.О. Агеев, А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец, В.Н. Иванов, Р.В. Конакова, Я.Я. Кудрик, П.М. Литвин, В.В. Миленин, А.В. Саченко. Диоды с барьером Шоттки Au-TiB<sub>x</sub>-n-6H-SiC: особенности токопереноса в выпрямляющих и невыпрямляющих контактах. // ФТП. 2009. Т. 43, № 7. С. 897-903.
- [4] Н.И. Волокобинская, И.Н. Комаров, Т.В. Матюхина, В.И. Решетников, А.А. Руш, И.В. Фалина, А.С. Ястребов. Исследование технологических процессов изготовления мощных высоковольтных биполярных транзисторов с решеткой включения в коллекторной области. // ФТП. 2001. Т. 35, № 8. С. 1013-1017.
- [5] Gaska R., Gaevski M., Jain R., Deng J., Islam M., Simin G., Shur M. Novel AlInN/GaN integrated circuits operating up to 500°C. *Solid-State Electronics*, 2015, Vol. 113, pp. 22-27.
- [6] Ong K.K., Pey K.L., Lee P.S., Wee A.T.S., Wang X.C., Chong Y.F. Dopant distribution in the recrystallization transient at the maximum melt depth induced by laser annealing. *Appl. Phys. Lett*, 2006, Vol. 89, № 17, pp. 172111-172114.
- [7] Wang H.T., Tan L.S., Chor E.F. Pulsed laser annealing of Be-implanted GaN. *J. Appl. Phys.*, 2006, Vol. 98, № 9, pp. 094901-094905.
- [8] Ю.В. Быков, А.Г. Еремеев, Н.А. Жарова, И.В. Плотников, К.И. Рыбаков, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, В.Д. Скупов. Диффузионные процессы в полупроводниковых структурах при микроволновом отжиге. // Известия вузов. Радиофизика. 2003. Т. 43, № 3. С. 836-843.
- [9] В.В. Козловский. *Модификация полупроводников пучками протонов* (Наука, С.-Петербург, 2003).

- [10] В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь. *Радиационная физика полупроводников* (Наукова Думка, Киев, 1979).
- [11] З.Ю. Готра. *Технология микроэлектронных устройств*. - М.: Радио и связь. 1991. 528с.
- [12] Fahey P.M., Griffin P.B., Plummer J.D. Point defects and dopant diffusion in silicon. *Rev. Mod. Phys.*, 1989, Vol. 61, № 2, pp 289-388.
- [13] Ю.Д. Соколов. Прикладная Механика. Т.1 (1). С. 23-35 (1955).
- [14] Pankratov E.L.. Dynamics of delta-dopant redistribution during heterostructure growth. *The Eur. Phys. J. B.*, 2007, Vol. 57, № 3, pp. 251-256.
- [15] Pankratov E.L.. Dopant diffusion dynamics and optimal diffusion time as influenced by diffusion-coefficient nonuniformity. *Russian Microelectronics*, 2007, Vol. 36, № 1, pp. 33-39 2007.
- [16] Pankratov E.L. Redistribution of dopant during annealing of radiative defects in a multilayer structure by laser scans for production an implanted-junction rectifiers. *Int. J. Nanoscience*, 2008, Vol. 7, № 4-5, pp. 187-197.
- [17] Pankratov E.L. Decreasing of depth of implanted-junction rectifier in semiconductor heterostructure by optimized laser annealing. *J. Comp. Theor. Nanoscience*, 2010, Vol. 7, № 1, p. 289-295.
- [18] Pankratov E.L., Bulaeva E.A. Application of native inhomogeneities to increase compactness of vertical field-effect transistors. *J. Comp. Theor. Nanoscience*, 2013, Vol. 10, № 4, pp. 888-893.
- [19] Pankratov E.L., Bulaeva E.A. An approach to manufacture of bipolar transistors in thin film structures. On the method of optimization. *Int. J. Micro-Nano Scale Transp.*, 2014, Vol. 4, № 1, pp. 17-31.
- [20] Pankratov E.L., Bulaeva E.A. Increasing of sharpness of diffusion-junction heterorectifier by using radiation processing. *Int. J. Nanoscience*, 2012, Vol. 11, № 5, pp. 1250028-1250035 (2012).

**Ссылка на статью:**

Е.Л.Панкратов, Е.А. Булаева. Оптимизация формирования полевых гетеротранзисторов в составе элементов памяти DRAM с целью увеличения их плотности. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar17/3/text.pdf>