

О СПОСОБЕ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НА БАЗЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ. ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Е. Л. Панкратов^{1,2}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина 23

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
603950, Нижний Новгород, ул. Минина 24

Статья поступила в редакцию 9 октября 2019 г.

Аннотация. В данной работе предлагается способ увеличения плотности полевых гетеротранзисторов, входящих в состав загрузочного аналогового переключателя. В рамках данного способа рассматриваемый фильтр формируется на базе трехслойной гетероструктуры со специфической конфигурацией. Необходимые ее участки легируются с помощью диффузии или ионной имплантации. Далее рассматривается оптимизированный отжиг примеси и/или радиационных дефектов. В рамках данной работы также проводится анализ возможности уменьшения существующих в гетероструктурах механических напряжений. Предложена аналитическая методика анализа массо- и теплопереноса в гетероструктурах, протекающих в процессе производства интегральных схем, с учётом механических напряжений.

Ключевые слова: загрузочный аналоговый переключатель; оптимизация формирования; увеличение степени интеграции элементов.

Abstract. In this paper we introduce an approach to increase density of field-effect transistors framework a bootstrapped analogue switch. Framework the approach we consider manufacturing the inverter in heterostructure with specific configuration. Several required areas of the heterostructure should be doped by diffusion or ion implantation. After that dopant and radiation defects should by annealed framework optimized scheme. We also consider an approach to decrease value of mismatch-induced stress in the considered heterostructure. We introduce an analytical approach to analyze mass and heat transport in heterostructures during manufacturing of

integrated circuits with account mismatch-induced stress.

Keywords: bootstrapped analogue switch, optimization of manufacturing, increasing of element integration rate.

Введение

В настоящее время одним из актуальных вопросов является увеличение быстродействия устройств твердотельной электроники (диоды, полевые и биполярные транзисторы, ...) [1-6]. Для увеличения быстродействия данных устройств представляет интерес поиск материалов с большими значениями подвижностей носителей заряда [7-10]. Один из способов уменьшения размеров элементов интегральных схем является их формирование в тонкопленочных гетероструктурах [3-5,11]. В данном случае возможно использование неоднородности (многослойности) гетероструктуры и необходима оптимизация легирования электронных материалов [12], а также развитие эпитаксиальной технологии с целью улучшения свойств данных материалов (включая анализ механических напряжений) [13-15]. Альтернативным способом уменьшения размеров элементов интегральных схем является использование лазерного и микроволнового типов отжига [16-18].

В рамках данной работы предлагается метод формирования полевых гетеротранзисторов, позволяющий увеличить их плотность в составе интегральных схем с одновременным уменьшением их размеров. Также рассматривается возможность уменьшения присутствующих в гетероструктурах механических напряжений для уменьшения количества генерируемых из-за них дефектов гетероструктуры. В данной работе рассматривается представленная на рис. 1 гетероструктура, состоящая из подложки и эпитаксиального слоя. Между данными слоями сформирован буферный слой. После завершения формирования гетероструктуры в эпитаксиальном слое формируются секции из других материалов, которые потом легируются с помощью диффузии или ионной имплантации для формирования в нем необходимого типа проводимости (p или n). После легирования эпитаксиального слоя рассматривается оптимизированный отжиг

примеси и/или радиационных дефектов для увеличения плотности элементов в рассматриваемой схеме инвертора с одновременным увеличением их плотности. Основной целью данной работы является формулировка рекомендаций для увеличения плотности элементов в схеме загрузочного аналогового переключателя (см. рис. 1) с одновременным увеличением их плотности и уменьшения величины механических напряжений.

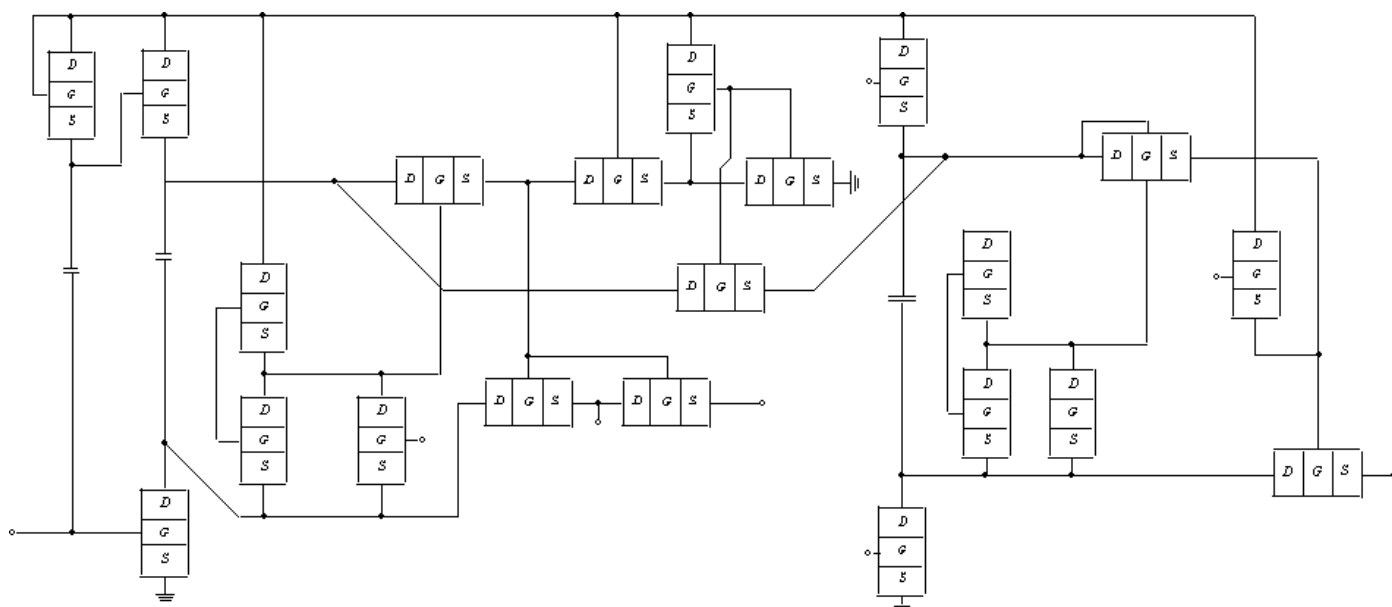


Рис. 1а. Структура рассматриваемого переключателя [24].

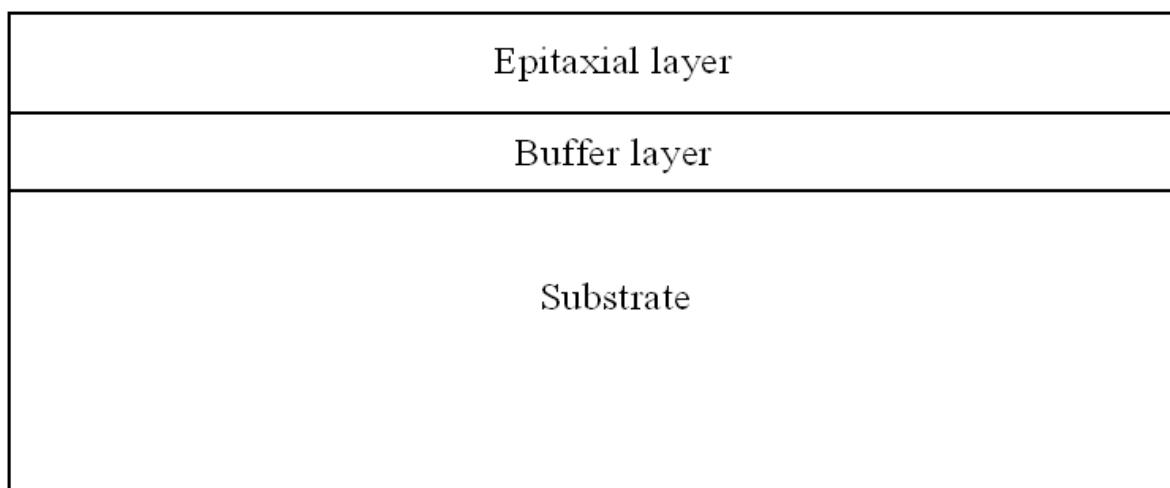


Рис. 1б. Трехслойная гетероструктура, состоящая из подложки, буферного и эпитаксиального слоев (вид сбоку).

Методика анализа

Для решения поставленной цели определим пространственно-временное распределение примеси в рассматриваемой гетероструктуре и проведем его анализ. Пространственно-временное распределение концентрации примеси

определим путем решения второго закона Фика [1,19-23]

$$\begin{aligned} \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + \\ & + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_s}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} C(x, y, W, t) dW \right] + \\ & + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_s}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} C(x, y, W, t) dW \right] \quad (1) \end{aligned}$$

с граничными и начальным условиями

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

В данных соотношениях введены следующие обозначения: $C(x, y, z, t)$ - пространственно- временное распределение концентрации примеси; Ω - атомный вес примеси; символ ∇_s обозначает поверхностный градиент; $\int_0^{L_z} C(x, y, z, t) dz$ - поверхностная концентрация примеси на границе раздела между слоями (в данном случае считалось, что ось Oz перпендикулярна границе раздела между слоями гетероструктуры); $\mu_1(x, y, z, t)$ - химический потенциал, обусловленный наличием механических напряжений; D и D_s - коэффициенты объемной и поверхностной (обусловленной механическими напряжениями) диффузий, величина которых зависит от свойств материалов слоев гетероструктуре, скорости прогрева и охлаждения гетероструктуре, а также от пространственно- временного распределения концентрации примеси. Зависимости коэффициентов диффузии от параметров могут быть аппроксимированы следующими соотношениями [21-23]

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

$$D_s = D_{sL}(x, y, z, T) \left[1 + \xi_s \frac{C^\gamma(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right] \left[1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, t)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, t)}{(V^*)^2} \right]. \quad (2)$$

В данных соотношениях $D_L(x, y, z, T)$ и $D_{sL}(x, y, z, T)$ - пространственные (за счет многослойности гетероструктуре) и температурные (в соответствии с законом Аррениуса) зависимости коэффициентов диффузии; T - температура отжига; $P^\gamma(x, y, z, T)$ - предел растворимости примеси; определяемый свойствами материала параметр γ может принимать целые значения в интервале $\gamma \in [1, 3]$ [21]; $V(x, y, z, t)$ - пространственно-временное распределение концентрации радиационных вакансий; V^* - равновесное распределение вакансий. Концентрационная зависимость коэффициентов диффузии подробно обсуждается в [21]. Пространственно-временные распределения концентраций радиационных дефектов определим с помощью следующей системы уравнений [19,22,23]

$$\begin{aligned} \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial z} \right] - k_{I,V}(x, y, z, T) I(x, y, z, t) V(x, y, z, t) - k_{I,I}(x, y, z, T) \times \\ & \times I^2(x, y, z, t) + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} I(x, y, W, t) dW \right] + \\ & + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} I(x, y, W, t) dW \right] + \quad (3) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{IS}}{\bar{V} kT} \frac{\partial \mu_2(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_{IS}}{\bar{V} kT} \frac{\partial \mu_2(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{D_{IS}}{\bar{V} kT} \frac{\partial \mu_2(x, y, z, t)}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial z} \right] - k_{I,V}(x, y, z, T) I(x, y, z, t) V(x, y, z, t) - k_{V,V}(x, y, z, T) \times \\
 & \times V^2(x, y, z, t) + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{VS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} V(x, y, W, t) dW \right] + \\
 & + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_{VS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} V(x, y, W, t) dW \right]
 \end{aligned}$$

с граничными и начальными условиями

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = 0, \quad \left. \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=L_y} = 0, \\
 \left. \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=L_z} = 0, \quad \left. \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = 0, \\
 \left. \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=L_y} = 0, \quad \left. \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=L_z} = 0, \\
 I(x, y, z, 0) &= f_I(x, y, z), \quad V(x, y, z, 0) = f_V(x, y, z). \tag{4}
 \end{aligned}$$

В соотношениях (3) и (4) $I(x, y, z, t)$ - пространственно-временное распределение концентрации междоузельных атомов; I^* - равновесное распределение междоузельных атомов; $D_I(x, y, z, T)$, $D_V(x, y, z, T)$, $D_{IS}(x, y, z, T)$, $D_{VS}(x, y, z, T)$ - коэффициенты объемной и поверхностной диффузий междоузельных атомов и вакансий; слагаемые $V^2(x, y, z, t)$ и $I^2(x, y, z, t)$ соответствуют образованию дивакансий и аналогичных комплексов междоузельных атомов (см., например, [23] и соответствующие ссылки в данной работе); $k_{I,V}(x, y, z, T)$, $k_{I,I}(x, y, z, T)$ 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 междоузельных атомов $\Phi_I(x, y, z, t)$ определим с помощью следующей системы уравнений [19,22,23]

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\
 &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{\Phi_I S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} \Phi_I(x, y, W, t) dW \right] + \\
 &+ k_I(x, y, z, T) I(x, y, z, t) + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_{\Phi_I S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} \Phi_I(x, y, W, t) dW \right] + \\
 &+ k_{I,I}(x, y, z, T) I^2(x, y, z, t) \tag{5}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\
 &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{\Phi_V S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} \Phi_V(x, y, W, t) dW \right] + \\
 &+ \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_{\Phi_V S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} \Phi_V(x, y, W, t) dW \right] + k_{V,V}(x, y, z, T) V^2(x, y, z, t) + \\
 &+ k_V(x, y, z, T) V(x, y, z, t)
 \end{aligned}$$

с граничными и начальными условиями

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \\
 \left. \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=L_y} &= 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=L_z} = 0, \\
 \left. \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \tag{6} \\
 \left. \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=L_y} &= 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=L_z} = 0,
 \end{aligned}$$

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

В последних соотношениях введены следующие обозначения: $D_{\phi I}(x,y,z,T)$, $D_{\phi V}(x,y,z,T)$, $D_{\phi IS}(x,y,z,T)$ и $D_{\phi VS}(x,y,z,T)$ - коэффициенты объемной и поверхностной диффузий комплексов точечных дефектов; $k_I(x,y,z,T)$ и $k_V(x,y,z,T)$ - параметры распада комплексов точечных дефектов.

Химический потенциал μ_1 в уравнении (1) может быть определен с помощью следующего соотношения [19]

$$\mu_1 = E(z)\Omega\sigma_{ij} [u_{ij}(x,y,z,t) + u_{ji}(x,y,z,t)]/2, \quad (7)$$

где E - модуль растяжения (Юнга); σ_{ij} - тензор напряжений; $u_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

- тензор деформаций; u_i, u_j - компоненты $u_x(x,y,z,t)$, $u_y(x,y,z,t)$ и $u_z(x,y,z,t)$ вектора смещений $\vec{u}(x,y,z,t)$; x_i, x_j - координаты x, y, z . Соотношение (7) может быть преобразовано к следующему виду

$$\begin{aligned} \mu_1(x,y,z,t) = E(z) \frac{\Omega}{2} \left[\frac{\partial u_i(x,y,z,t)}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j(x,y,z,t)}{\partial x_i} \right] \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i(x,y,z,t)}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j(x,y,z,t)}{\partial x_i} \right] - \right. \\ \left. - \varepsilon_0 \delta_{ij} + \frac{\sigma(z)\delta_{ij}}{1-2\sigma(z)} \left[\frac{\partial u_k(x,y,z,t)}{\partial x_k} - 3\varepsilon_0 \right] - K(z)\beta(z)[T(x,y,z,t) - T_0] \delta_{ij} \right\}, \end{aligned}$$

где σ - коэффициент Пуассона; $\varepsilon_0 = (a_s - a_{EL})/a_{EL}$ - параметр несоответствия решетки; a_s, a_{EL} - постоянные решеток подложки и эпитаксиального слоя; K - модуль всестороннего сжатия; β - коэффициент теплового расширения; T_r - совпадающая с комнатной равновесная температура. Компоненты вектора смещений могут быть определены с помощью следующей системы уравнений [25]

$$\begin{cases} \rho(z) \frac{\partial^2 u_x(x,y,z,t)}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}(x,y,z,t)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}(x,y,z,t)}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}(x,y,z,t)}{\partial z} \\ \rho(z) \frac{\partial^2 u_y(x,y,z,t)}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{yx}(x,y,z,t)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}(x,y,z,t)}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}(x,y,z,t)}{\partial z} \\ \rho(z) \frac{\partial^2 u_z(x,y,z,t)}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zx}(x,y,z,t)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}(x,y,z,t)}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}(x,y,z,t)}{\partial z} \end{cases}$$

где $\sigma_{ij} = \frac{E(z)}{2[1+\sigma(z)]} \left[\frac{\partial u_i(x, y, z, t)}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j(x, y, z, t)}{\partial x_i} - \frac{\delta_{ij}}{3} \frac{\partial u_k(x, y, z, t)}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial u_k(x, y, z, t)}{\partial x_k} \times$
 $\times K(z) \delta_{ij} - \beta(z) K(z) [T(x, y, z, t) - T_r]$, $\rho(z)$ - плотность материалов гетероструктуры, δ_{ij} - символ Кронекера. С учетом такого соотношения данная система уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} \rho(z) \frac{\partial^2 u_x(x, y, z, t)}{\partial t^2} &= \left\{ K(z) + \frac{5E(z)}{6[1+\sigma(z)]} \right\} \frac{\partial^2 u_x(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \left\{ K(z) - \frac{E(z)}{3[1+\sigma(z)]} \right\} \times \\ &\times \frac{\partial^2 u_y(x, y, z, t)}{\partial x \partial y} + \frac{E(z)}{2[1+\sigma(z)]} \left[\frac{\partial^2 u_y(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \left\{ K(z) + \frac{E(z)}{3[1+\sigma(z)]} \right\} \times \\ &\times \frac{\partial^2 u_z(x, y, z, t)}{\partial x \partial z} - K(z) \beta(z) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \\ \rho(z) \frac{\partial^2 u_y(x, y, z, t)}{\partial t^2} &= \frac{E(z)}{2[1+\sigma(z)]} \left[\frac{\partial^2 u_y(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x(x, y, z, t)}{\partial x \partial y} \right] - \beta(z) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \times \\ &\times K(z) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{E(z)}{2[1+\sigma(z)]} \left[\frac{\partial u_y(x, y, z, t)}{\partial z} + \frac{\partial u_z(x, y, z, t)}{\partial y} \right] \right\} + \left\{ \frac{5E(z)}{12[1+\sigma(z)]} + K(z) \right\} \times \\ &\times \frac{\partial^2 u_y(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \left\{ K(z) - \frac{E(z)}{6[1+\sigma(z)]} \right\} \frac{\partial^2 u_y(x, y, z, t)}{\partial y \partial z} + K(z) \frac{\partial^2 u_y(x, y, z, t)}{\partial x \partial y} \quad (8) \\ \rho(z) \frac{\partial^2 u_z(x, y, z, t)}{\partial t^2} &= \left[\frac{\partial^2 u_z(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x(x, y, z, t)}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u_y(x, y, z, t)}{\partial y \partial z} \right] \times \\ &\times \frac{E(z)}{2[1+\sigma(z)]} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(z) \left[\frac{\partial u_x(x, y, z, t)}{\partial x} + \frac{\partial u_y(x, y, z, t)}{\partial y} + \frac{\partial u_x(x, y, z, t)}{\partial z} \right] \right\} - K(z) \times \\ &\times \beta(z) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} + \frac{1}{6} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{E(z)}{1+\sigma(z)} \left[6 \frac{\partial u_z(x, y, z, t)}{\partial z} - \frac{\partial u_x(x, y, z, t)}{\partial x} - \frac{\partial u_y(x, y, z, t)}{\partial y} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{\partial u_z(x, y, z, t)}{\partial z} \right] \right\}. \end{aligned}$$

Система условий для данных уравнений представима в следующей форме

$$\frac{\partial \bar{u}(0, y, z, t)}{\partial x} = 0; \frac{\partial \bar{u}(L_x, y, z, t)}{\partial x} = 0; \frac{\partial \bar{u}(x, 0, z, t)}{\partial y} = 0; \frac{\partial \bar{u}(x, L_y, z, t)}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{\partial \bar{u}(x, y, 0, t)}{\partial z} = 0; \frac{\partial \bar{u}(x, y, L_z, t)}{\partial z} = 0; \bar{u}(x, y, z, 0) = \bar{u}_0; \bar{u}(x, y, z, \infty) = \bar{u}_0.$$

Пространственно-временное распределение концентрации примеси определим с помощью метода осреднения функциональных поправок [26]. Для применения данного метода запишем уравнения (1), (3) и (5) с учетом начальных распределений рассматриваемых концентраций, т.е.

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

$$+ f_c(x, y, z) \delta(t) + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_s}{kT} \nabla_s \mu(x, y, z, t) \int_0^{L_z} C(x, y, W, t) dW \right] +$$

$$+ \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_s}{kT} \nabla_s \mu(x, y, z, t) \int_0^{L_z} C(x, y, W, t) dW \right] \quad (1a)$$

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

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

$$\times \delta(t) - k_{I,I}(x, y, z, T) I^2(x, y, z, t) + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} I(x, y, W, t) dW \right] +$$

$$+ \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} I(x, y, W, t) dW \right] \quad (3a)$$

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

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_v(x, y, z, T) \frac{\partial V(x, y, z, t)}{\partial z} \right] - k_{I,v}(x, T) I(x, y, z, t) V(x, y, z, t) + f_v(x, y, z) \delta(t) + \\
 & - k_{v,v}(x, y, z, T) V^2(x, y, z, t) + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{vS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} V(x, y, W, t) dW \right] + \\
 & + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_{vS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} V(x, y, W, t) dW \right] \\
 \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial t} & = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\
 & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{\Phi_I S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} \Phi_I(x, y, W, t) dW \right] + \\
 & + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_{\Phi_I S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} \Phi_I(x, y, W, t) dW \right] + f_{\Phi_I}(x, y, z) \delta(t) + k_{I,I}(x, y, z, T) \times \\
 & \times I^2(x, y, z, t) + k_I(x, y, z, T) I(x, y, z, t) \tag{5a}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Phi_v(x, y, z, t)}{\partial t} & = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\Phi_v}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_v(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{\Phi_v}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_v(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\
 & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{\Phi_v}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_v(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{\Phi_v S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} \Phi_v(x, y, W, t) dW \right] + \\
 & + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_{\Phi_v S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} \Phi_v(x, y, W, t) dW \right] + k_{v,v}(x, y, z, T) V^2(x, y, z, t) + \\
 & + f_{\Phi_I}(x, y, z) \delta(t) + k_v(x, y, z, T) V(x, y, z, t).
 \end{aligned}$$

Далее заменим искомые функции в правых частях уравнений (1a), (3a) и (5a) на их пока неизвестные значения $\alpha_{I\rho}$. В результате получим уравнения для первых приближений искомым концентрациям в следующей форме

$$\frac{\partial C_1(x, y, z, t)}{\partial t} = f_c(x, y, z) \delta(t) +$$

$$+ \alpha_{1c} \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[z \frac{D_s}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \right] + \alpha_{1c} \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[z \frac{D_s}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \right] \quad (1б)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_1(x, y, z, t)}{\partial t} = & \alpha_{1I} z \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu(x, y, z, t) \right] + \alpha_{1I} \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[z \frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu(x, y, z, t) \right] + \\ & + f_I(x, y, z) \delta(t) - \alpha_{1I}^2 k_{I,I}(x, y, z, T) - \alpha_{1I} \alpha_{1V} k_{I,V}(x, y, z, T) \quad (3б) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_1(x, y, z, t)}{\partial t} = & \alpha_{1V} z \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{VS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \right] + \alpha_{1V} \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[z \frac{D_{VS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \right] + \\ & + f_V(x, y, z) \delta(t) - \alpha_{1V}^2 k_{V,V}(x, y, z, T) - \alpha_{1I} \alpha_{1V} k_{I,V}(x, y, z, T) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{1I}(x, y, z, t)}{\partial t} = & \alpha_{1\Phi_I} z \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{\Phi_I S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \right] + \alpha_{1\Phi_I} z \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_{\Phi_I S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \right] + \\ & + f_{\Phi_I}(x, y, z) \delta(t) + k_I(x, y, z, T) I(x, y, z, t) + k_{I,I}(x, y, z, T) I^2(x, y, z, t) \quad (5б) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{1V}(x, y, z, t)}{\partial t} = & \alpha_{1\Phi_V} z \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{\Phi_V S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \right] + \alpha_{1\Phi_V} z \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{D_{\Phi_V S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \right] + \\ & + f_{\Phi_V}(x, y, z) \delta(t) + k_V(x, y, z, T) V(x, y, z, t) + k_{V,V}(x, y, z, T) V^2(x, y, z, t). \end{aligned}$$

Интегрирование левых и правых частей уравнений (1б), (3б) и (5б) позволяет получить соотношения для первых приближений искомых концентраций в окончательной форме

$$\begin{aligned} C_1(x, y, z, t) = & \alpha_{1c} \Omega \frac{\partial}{\partial x} \int_0^t \frac{z}{kT} \left[1 + \frac{\xi_s \alpha_{1c}'}{P^r(x, y, z, T)} \right] \left[1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, \tau)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, \tau)}{(V^*)^2} \right] \times \\ & \times \nabla_s \mu_1(x, y, z, \tau) D_{sL}(x, y, z, T) d\tau \} + \alpha_{1c} \Omega \frac{\partial}{\partial y} \int_0^t \left[1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, \tau)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, \tau)}{(V^*)^2} \right] \times \\ & \times \nabla_s \mu_1(x, y, z, \tau) D_{sL}(x, y, z, T) \frac{z}{kT} \left[1 + \frac{\xi_s \alpha_{1c}'}{P^r(x, y, z, T)} \right] d\tau + f_c(x, y, z) \quad (1в) \end{aligned}$$

$$I_1(x, y, z, t) = \alpha_{1I} z \Omega \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t \frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, \tau) d\tau + \alpha_{1I} z \Omega \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t \frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, \tau) d\tau +$$

$$+ f_I(x, y, z) - \alpha_{1I}^2 \int_0^t k_{I,I}(x, y, z, T) d\tau - \alpha_{1I} \alpha_{1V} \int_0^t k_{I,V}(x, y, z, T) d\tau \quad (3\text{в})$$

$$V_1(x, y, z, t) = \alpha_{1V} z \Omega \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t \frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, \tau) d\tau + \alpha_{1V} z \Omega \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t \frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, \tau) d\tau +$$

$$+ f_V(x, y, z) - \alpha_{1V}^2 \int_0^t k_{V,V}(x, y, z, T) d\tau - \alpha_{1I} \alpha_{1V} \int_0^t k_{I,V}(x, y, z, T) d\tau$$

$$\Phi_{1I}(x, y, z, t) = \alpha_{1\Phi_I} z \Omega \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t \frac{D_{\Phi_I S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, \tau) d\tau + \alpha_{1\Phi_I} z \Omega \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t \frac{D_{\Phi_I S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, \tau) d\tau +$$

$$+ f_{\Phi_I}(x, y, z) + \int_0^t k_I(x, y, z, T) I(x, y, z, \tau) d\tau + \int_0^t k_{I,I}(x, y, z, T) I^2(x, y, z, \tau) d\tau \quad (5\text{в})$$

$$\Phi_{1V}(x, y, z, t) = \int_0^t k_V(x, y, z, T) V(x, y, z, \tau) d\tau + \alpha_{1\Phi_V} z \Omega \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t \frac{D_{\Phi_V S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, \tau) d\tau +$$

$$+ \alpha_{1\Phi_V} z \Omega \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t \frac{D_{\Phi_V S}}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, \tau) d\tau + f_{\Phi_V}(x, y, z) + \int_0^t k_{V,V}(x, y, z, T) V^2(x, y, z, \tau) d\tau.$$

Средние значение первых приближений искомым функций определим с помощью стандартного соотношения [26]

$$\alpha_{1\rho} = \frac{1}{\Theta L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} \rho_1(x, y, z, t) d z d y d x d t. \quad (9)$$

Подстановка соотношений (1в), (3в) и (5в) в соотношение (9) позволяет получить искомые средние значения в следующей форме

$$\alpha_{1C} = \frac{1}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_C(x, y, z) d z d y d x,$$

$$\alpha_{1I} = \sqrt{\frac{(a_3 + A)^2}{4 a_4^2} - 4 \left(B + \frac{\Theta a_3 B + \Theta^2 L_x L_y L_z a_1}{a_4} \right)} - \frac{a_3 + A}{4 a_4},$$

$$\alpha_{IV} = \frac{1}{S_{IV00}} \left[\frac{\Theta}{\alpha_{II}} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_I(x, y, z) dz dy dx - \alpha_{II} S_{II00} - \Theta L_x L_y L_z \right],$$

где $S_{\rho\rho ij} = \int_0^{\Theta} (\Theta - t) \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} k_{\rho, \rho}(x, y, z, T) I_1^i(x, y, z, t) V_1^j(x, y, z, t) dz dy dx dt$, $a_4 = S_{II00} \times$
 $\times (S_{IV00}^2 - S_{II00} S_{VV00})$, $a_2 = S_{IV00} S_{IV00}^2 \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_V(x, y, z) dz dy dx + S_{IV00} \Theta L_x^2 L_y^2 L_z^2 + S_{VV00} S_{II00} \times$
 $\times 2 \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_I(x, y, z) dz dy dx - \Theta L_x^2 L_y^2 L_z^2 S_{VV00} - S_{IV00}^2 \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_I(x, y, z) dz dy dx$, $a_1 = S_{IV00} \times$
 $\times \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_I(x, y, z) dz dy dx$, $a_0 = S_{VV00} \left[\int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_I(x, y, z) dz dy dx \right]^2$, $a_3 = S_{IV00} S_{II00} + S_{IV00}^2 -$
 $- S_{II00} S_{VV00}$, $A = \sqrt{8y + \Theta^2 \frac{a_3^2}{a_4^2} - 4\Theta \frac{a_2}{a_4}}$, $B = \frac{\Theta a_2}{6a_4} + \sqrt[3]{\sqrt{q^2 + p^3} - q} - \sqrt[3]{\sqrt{q^2 + p^3} + q}$,

$$q = \frac{\Theta^3 a_2}{24 a_4^2} \left(4a_0 - \Theta L_x L_y L_z \frac{a_1 a_3}{a_4} \right) - \Theta^2 \frac{a_0}{8 a_4^2} \left(4\Theta a_2 - \Theta^2 \frac{a_3^2}{a_4} \right) - \frac{\Theta^3 a_2^3}{54 a_4^3} - L_x^2 L_y^2 L_z^2 \frac{\Theta^4 a_1^2}{8 a_4^2},$$

$$p = \Theta^2 \frac{4a_0 a_4 - \Theta L_x L_y L_z a_1 a_3}{12 a_4^2} - \frac{\Theta a_2}{18 a_4},$$

$$\alpha_{1\Phi_I} = \frac{R_{I1}}{\Theta L_x L_y L_z} + \frac{S_{II20}}{\Theta L_x L_y L_z} + \frac{1}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_{\Phi_I}(x, y, z) dz dy dx$$

$$\alpha_{1\Phi_V} = \frac{R_{V1}}{\Theta L_x L_y L_z} + \frac{S_{VV20}}{\Theta L_x L_y L_z} + \frac{1}{L_x L_y L_z} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} f_{\Phi_V}(x, y, z) dz dy dx,$$

где $R_{\rho i} = \int_0^{\Theta} (\Theta - t) \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} k_I(x, y, z, T) I_1^i(x, y, z, t) dz dy dx dt$.

Приближения второго и более высокого порядков концентраций примеси и радиационных дефектов определим в рамках стандартной итерационной процедуры метода осреднения функциональных поправок [26]. В рамках данной процедуры для нахождения приближения n -го порядка концентраций примеси и радиационных дефектов заменим в правых частях уравнений (1a), (3a), (5a) искомые распределения концентраций $C(x, y, z, t)$, $I(x, y, z, t)$, $V(x, y, z, t)$, $\Phi_I(x, y, z, t)$ и $\Phi_V(x, y, z, t)$ 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

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_2(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left[1 + \xi \frac{[\alpha_{2c} + C_1(x, y, z, t)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right] \left[1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, t)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, t)}{(V^*)^2} \right] \times \right. \\ & \times D_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_1(x, y, z, t)}{\partial x} \left. \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left[1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, t)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, t)}{(V^*)^2} \right] \frac{\partial C_1(x, y, z, t)}{\partial y} \times \right. \\ & \times D_L(x, y, z, T) \left. \left\{ 1 + \xi \frac{[\alpha_{2c} + C_1(x, y, z, t)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right\} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left[1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, t)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, t)}{(V^*)^2} \right] \times \right. \\ & \times D_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_1(x, y, z, t)}{\partial z} \left. \left\{ 1 + \xi \frac{[\alpha_{2c} + C_1(x, y, z, t)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right\} \right) + f_c(x, y, z) \delta(t) + \\ & + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{D_s}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} [\alpha_{2c} + C(x, y, W, t)] dW \right\} + \\ & + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{D_s}{kT} \nabla_s \mu_1(x, y, z, t) \int_0^{L_z} [\alpha_{2c} + C(x, y, W, t)] dW \right\} \quad (1z) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_2(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I_1(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I_1(x, y, z, t)}{\partial y} \right] - \\ & - k_{I,I}(x, y, z, T) [\alpha_{I,I} + I_1(x, y, z, t)]^2 + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I_1(x, y, z, t)}{\partial z} \right] - [\alpha_{I,I} + I_1(x, y, z, t)] \times \\ & \times k_{I,V}(x, y, z, T) [\alpha_{I,V} + V_1(x, y, z, t)] + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu(x, y, z, t) \int_0^{L_z} [\alpha_{2I} + I_1(x, y, W, t)] dW \right\} + \\ & + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu(x, y, z, t) \int_0^{L_z} [\alpha_{2I} + I_1(x, y, W, t)] dW \right\} \quad (3z) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial V_2(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V_1(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V_1(x, y, z, t)}{\partial y} \right] +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V_1(x, y, z, t)}{\partial z} \right] - k_{I,V}(x, y, z, T) [\alpha_{1I} + I_1(x, y, z, t)] [\alpha_{1V} + V_1(x, y, z, t)] - \\
 & - k_{V,V}(x, y, z, T) [\alpha_{1I} + V_1(x, y, z, t)]^2 + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{D_{V,S}}{kT} \nabla_S \mu(x, y, z, t) \int_0^{L_z} [\alpha_{2I} + V_1(x, y, W, t)] dW \right\} + \\
 & + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{D_{V,S}}{kT} \nabla_S \mu(x, y, z, t) \int_0^{L_z} [\alpha_{2V} + V_1(x, y, W, t)] dW \right\} \\
 \frac{\partial \Phi_{2I}(x, y, z, t)}{\partial t} & = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{1I}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial \Phi_{1I}(x, y, z, t)}{\partial y} \times \right. \\
 & \times D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \left. \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{1I}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{D_{\Phi_I,S}}{kT} \nabla_S \mu(x, y, z, t) \times \right. \\
 & \times \int_0^{L_z} [\alpha_{2\Phi_I} + \Phi_{1I}(x, y, W, t)] dW \left. \right\} + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{D_{\Phi_I,S}}{kT} \nabla_S \mu(x, y, z, t) \int_0^{L_z} [\alpha_{2\Phi_I} + \Phi_{1I}(x, y, W, t)] dW \right\} + \\
 & + k_{I,I}(x, y, z, T) I^2(x, y, z, t) + k_I(x, y, z, T) I(x, y, z, t) + f_{\Phi_I}(x, y, z) \delta(t) \quad (5z)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Phi_{2V}(x, y, z, t)}{\partial t} & = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{1V}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{1V}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\
 & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{1V}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + \Omega \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{D_{\Phi_V,S}}{kT} \int_0^{L_z} [\alpha_{2\Phi_V} + \Phi_{1V}(x, y, W, t)] dW \times \right. \\
 & \times \nabla_S \mu(x, y, z, t) \left. \right\} + \Omega \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{D_{\Phi_V,S}}{kT} \nabla_S \mu(x, y, z, t) \int_0^{L_z} [\alpha_{2\Phi_V} + \Phi_{1V}(x, y, W, t)] dW \right\} + \\
 & + k_{V,V}(x, y, z, T) V^2(x, y, z, t) + k_V(x, y, z, T) V(x, y, z, t) + f_{\Phi_V}(x, y, z) \delta(t).
 \end{aligned}$$

Интегрирование левой и правой части уравнений (1z), (3z) и (5z) позволяет получить соотношения для второго приближения искомых концентраций примеси и радиационных дефектов в следующей форме

$$C_2(x, y, z, t) = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^t \left\{ 1 + \xi \frac{[\alpha_{2C} + C_1(x, y, z, \tau)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right\} \left[1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, \tau)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, \tau)}{(V^*)^2} \right] \times$$

$$\begin{aligned}
 & \times D_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_1(x, y, z, \tau)}{\partial x} d\tau + \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t D_L(x, y, z, T) \left[1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, \tau)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, \tau)}{(V^*)^2} \right] \times \\
 & \times \frac{\partial C_1(x, y, z, \tau)}{\partial y} \left\{ 1 + \xi \frac{[\alpha_{2c} + C_1(x, y, z, \tau)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right\} d\tau + \frac{\partial}{\partial z_0} \int_0^t \left[1 + \zeta_1 \frac{V(x, y, z, \tau)}{V^*} + \zeta_2 \frac{V^2(x, y, z, \tau)}{(V^*)^2} \right] \times \\
 & \times D_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_1(x, y, z, \tau)}{\partial z} \left\{ 1 + \xi \frac{[\alpha_{2c} + C_1(x, y, z, \tau)]^\gamma}{P^\gamma(x, y, z, T)} \right\} d\tau + \Omega \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t \nabla_s \mu(x, y, z, \tau) \times \\
 & \times \frac{D_s}{kT} \int_0^{L_z} [\alpha_{2c} + C_1(x, y, W, \tau)] dW d\tau + f_c(x, y, z) + \Omega \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t \int_0^{L_z} [\alpha_{2c} + C_1(x, y, W, \tau)] dW \times \\
 & \times \frac{D_s}{kT} \nabla_s \mu(x, y, z, \tau) d\tau \tag{1d}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_2(x, y, z, t) = & \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I_1(x, y, z, \tau)}{\partial x} d\tau + \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I_1(x, y, z, \tau)}{\partial y} d\tau + \\
 & + \frac{\partial}{\partial z_0} \int_0^t D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I_1(x, y, z, \tau)}{\partial z} d\tau - \int_0^t k_{I,I}(x, y, z, T) [\alpha_{2I} + I_1(x, y, z, \tau)]^2 d\tau - \\
 & - \int_0^t k_{I,V}(x, y, z, T) [\alpha_{2I} + I_1(x, y, z, \tau)] [\alpha_{2V} + V_1(x, y, z, \tau)] d\tau + \Omega \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t \nabla_s \mu(x, y, z, \tau) \times \\
 & \times \int_0^{L_z} [\alpha_{2I} + I_1(x, y, W, \tau)] dW \frac{D_{IS}}{kT} d\tau + \Omega \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t \frac{D_{IS}}{kT} \nabla_s \mu(x, y, z, \tau) \int_0^{L_z} [\alpha_{2I} + I_1(x, y, W, \tau)] dW d\tau + \\
 & + f_I(x, y, z) \tag{3d}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_2(x, y, z, t) = & \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V_1(x, y, z, \tau)}{\partial x} d\tau + \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V_1(x, y, z, \tau)}{\partial y} d\tau + \\
 & + \frac{\partial}{\partial z_0} \int_0^t D_V(x, y, z, T) \frac{\partial V_1(x, y, z, \tau)}{\partial z} d\tau - \int_0^t k_{V,V}(x, y, z, T) [\alpha_{2V} + V_1(x, y, z, \tau)]^2 d\tau - \\
 & - \int_0^t k_{I,V}(x, y, z, T) [\alpha_{VI} + I_1(x, y, z, \tau)] [\alpha_{2V} + V_1(x, y, z, \tau)] d\tau + \Omega \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t \nabla_s \mu(x, y, z, \tau) \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \frac{D_{VS}}{kT} \int_0^{L_z} [\alpha_{2V} + V_1(x, y, W, \tau)] dW d\tau + f_V(x, y, z) + \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t \frac{D_{VS}}{kT} \int_0^{L_z} [\alpha_{2V} + V_1(x, y, W, \tau)] dW \times \\
 & \quad \times \Omega \nabla_s \mu(x, y, z, \tau) d\tau \\
 \Phi_{2I}(x, y, z, t) &= \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{1I}(x, y, z, \tau)}{\partial x} d\tau + \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t \frac{\partial \Phi_{1I}(x, y, z, \tau)}{\partial y} \times (5d) \\
 & \times D_{\Phi_I}(x, y, z, T) d\tau + \frac{\partial}{\partial z_0} \int_0^t D_{\Phi_I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{1I}(x, y, z, \tau)}{\partial z} d\tau + \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t \frac{D_{\Phi_{IS}}}{kT} \nabla_s \mu(x, y, z, \tau) \times \\
 & \times \Omega \int_0^{L_z} [\alpha_{2\Phi_I} + \Phi_{1I}(x, y, W, \tau)] dW d\tau + \Omega \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t \nabla_s \mu(x, y, z, \tau) \int_0^{L_z} [\alpha_{2\Phi_I} + \Phi_{1I}(x, y, W, \tau)] dW \times \\
 & \times \frac{D_{\Phi_{IS}}}{kT} d\tau + \int_0^t k_{I,I}(x, y, z, T) 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) \\
 \Phi_{2V}(x, y, z, t) &= \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{1V}(x, y, z, \tau)}{\partial x} d\tau + \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t \frac{\partial \Phi_{1V}(x, y, z, \tau)}{\partial y} \times \\
 & \times D_{\Phi_V}(x, y, z, T) d\tau + \frac{\partial}{\partial z_0} \int_0^t D_{\Phi_V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{1V}(x, y, z, \tau)}{\partial z} d\tau + \frac{\partial}{\partial x_0} \int_0^t \frac{D_{\Phi_{VS}}}{kT} \nabla_s \mu(x, y, z, \tau) \times \\
 & \times \Omega \int_0^{L_z} [\alpha_{2\Phi_V} + \Phi_{1V}(x, y, W, \tau)] dW d\tau + \int_0^t k_{V,V}(x, y, z, T) V^2(x, y, z, \tau) d\tau + \int_0^t k_V(x, y, z, T) \times \\
 & \times V(x, y, z, \tau) d\tau + \Omega \frac{\partial}{\partial y_0} \int_0^t \frac{D_{\Phi_{VS}}}{kT} \nabla_s \mu(x, y, z, \tau) \int_0^{L_z} [\alpha_{2\Phi_V} + \Phi_{1V}(x, y, W, \tau)] dW d\tau + \\
 & \quad + f_{\Phi_V}(x, y, z).
 \end{aligned}$$

Средние значение вторых приближений искомым функций определим с помощью стандартного соотношения [26]

$$\alpha_{2\rho} = \frac{1}{\Theta L_x L_y L_z} \int_0^{\Theta} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} [\rho_2(x, y, z, t) - \rho_1(x, y, z, t)] dz dy dx dt. \quad (10)$$

Подстановка соотношений (1d), (3d), (5d) в соотношение (10) позволяет получить соотношения для искомым величин $\alpha_{2\rho}$

$$\alpha_{2C}=0, \alpha_{2\Phi I}=0, \alpha_{2\Phi V}=0, \alpha_{2V} = \sqrt{\frac{(b_3 + E)^2}{4b_4^2} - 4 \left(F + \frac{\Theta a_3 F + \Theta^2 L_x L_y L_z b_1}{b_4} \right)} - \frac{b_3 + E}{4b_4},$$

$$\alpha_{2I} = \frac{C_V - \alpha_{2V}^2 S_{VV00} - \alpha_{2V} (2S_{VV01} + S_{IV10} + \Theta L_x L_y L_z) - S_{VV02} - S_{IV11}}{S_{IV01} + \alpha_{2V} S_{IV00}},$$

где $b_4 = \frac{1}{\Theta L_x L_y L_z} S_{IV00}^2 S_{VV00} - \frac{1}{\Theta L_x L_y L_z} S_{VV00}^2 S_{II00}$, $b_3 = -(2S_{VV01} + S_{IV10} + \Theta L_x L_y L_z) \times$

$$\times \frac{S_{II00} S_{VV00}}{\Theta L_x L_y L_z} (2S_{VV01} + S_{IV10} + \Theta L_x L_y L_z) + \frac{S_{IV00} S_{VV00}}{\Theta L_x L_y L_z} (S_{IV01} + 2S_{II10} + S_{IV01} + \Theta L_x L_y L_z) +$$

$$+ S_{IV00}^2 \frac{2S_{VV01} + S_{IV10} + \Theta L_x L_y L_z}{\Theta L_x L_y L_z} - \frac{S_{IV00}^2 S_{IV10}}{\Theta^3 L_x^3 L_y^3 L_z^3}, b_2 = \frac{S_{II00} S_{VV00}}{\Theta L_x L_y L_z} (S_{VV02} + S_{IV11} + C_V) + \frac{S_{IV01} S_{VV00}}{\Theta L_x L_y L_z} \times$$

$$\times (\Theta L_x L_y L_z + 2S_{II10} + S_{IV01}) - (\Theta L_x L_y L_z - 2S_{VV01} + S_{IV10})^2 + (S_{IV01} + 2S_{II10} + 2S_{IV01} + \Theta L_x L_y \times$$

$$\times L_z) S_{IV00} \frac{2S_{VV01} + \Theta L_x L_y L_z + S_{IV10}}{\Theta L_x L_y L_z} - S_{IV00}^2 \frac{C_V - S_{VV02} - S_{IV11}}{\Theta L_x L_y L_z} + \frac{C_I S_{IV00}^2}{\Theta^2 L_x^2 L_y^2 L_z^2} - 2 \frac{S_{IV10} S_{IV00} S_{IV01}}{\Theta L_x L_y L_z},$$

$$b_1 = S_{II00} \frac{S_{IV11} + S_{VV02} + C_V}{\Theta L_x L_y L_z} (2S_{VV01} + S_{IV10} + \Theta L_x L_y L_z) + S_{IV01} \frac{\Theta L_x L_y L_z + 2S_{II10} + S_{IV01}}{\Theta L_x L_y L_z} (S_{IV01} +$$

$$+ 2S_{II10} + \Theta L_x L_y L_z) (2S_{VV01} + S_{IV10} + \Theta L_x L_y L_z) - S_{IV00} \frac{C_V - S_{VV02} - S_{IV11}}{\Theta L_x L_y L_z} (3S_{IV01} + 2S_{II10} + \Theta \times$$

$$\times L_x L_y L_z) + 2C_I S_{IV00} S_{IV01} - \frac{S_{IV10} S_{IV01}^2}{\Theta L_x L_y L_z}, b_0 = S_{II00} \frac{(S_{IV00} + S_{VV02})^2}{\Theta L_x L_y L_z} - S_{IV01} \frac{C_V - S_{VV02} - S_{IV11}}{\Theta L_x L_y L_z} \times$$

$$\times (\Theta L_x L_y L_z + 2S_{II10} + S_{IV01}) + 2C_I S_{IV01}^2 - S_{IV01} \frac{C_V - S_{VV02} - S_{IV11}}{\Theta L_x L_y L_z} (\Theta L_x L_y L_z + 2S_{II10} + S_{IV01}),$$

$$C_I = \frac{\alpha_{IV} \alpha_{IV}}{\Theta L_x L_y L_z} S_{IV00} + \frac{\alpha_{IV}^2 S_{II00}}{\Theta L_x L_y L_z} - \frac{S_{II20} S_{II20}}{\Theta L_x L_y L_z} - \frac{S_{IV11}}{\Theta L_x L_y L_z}, E = \sqrt{8y + \Theta^2 \frac{a_3^2}{a_4^2} - 4\Theta \frac{a_2}{a_4}}, C_V = \alpha_{IV} \times$$

$$\times \alpha_{IV} S_{IV00} + \alpha_{IV}^2 S_{VV00} - S_{VV02} - S_{IV11}, F = \frac{\Theta a_2}{6a_4} + \sqrt[3]{\sqrt{r^2 + s^3} - r} - \sqrt[3]{\sqrt{r^2 + s^3} + r}, r = \frac{\Theta^3 b_2}{24b_4^2} \times$$

$$\times \left(4b_0 - \Theta L_x L_y L_z \frac{b_1 b_3}{b_4} \right) - b_0 \frac{\Theta^2}{8b_4^2} \left(4\Theta b_2 - \Theta^2 \frac{b_3^2}{b_4} \right) - \frac{\Theta^3 b_2^3}{54b_4^3} - L_x^2 L_y^2 L_z^2 \frac{\Theta^4 b_1^2}{8b_4^2}, s = -\frac{\Theta b_2}{18b_4} +$$

$$+ \Theta^2 (4b_0 b_4 - \Theta L_x L_y L_z b_1 b_3) / 12b_4^2.$$

Далее определим решения уравнений системы (8), решения которых являются компонентами вектора смещений. Для определения первых приближений искомым компонент в рамках метода осреднения функциональных поправок подставим в правую часть рассматриваемых уравнений пока неизвестные средние значения α_i . Такая подстановка приводит к следующему результату

$$\begin{aligned} \rho(z) \frac{\partial^2 u_{1x}(x, y, z, t)}{\partial t^2} &= -K(z) \beta(z) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x}, \\ \rho(z) \frac{\partial^2 u_{1y}(x, y, z, t)}{\partial t^2} &= -K(z) \beta(z) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y}, \\ \rho(z) \frac{\partial^2 u_{1z}(x, y, z, t)}{\partial t^2} &= -K(z) \beta(z) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z}. \end{aligned}$$

Интегрирование правых и левых частей полученных соотношений по времени t приводит к следующему результату

$$\begin{aligned} u_{1x}(x, y, z, t) &= K(z) \frac{\beta(z)}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^t \int_0^g T(x, y, z, \tau) d\tau d\mathcal{G} - \\ &\quad - K(z) \frac{\beta(z)}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\infty \int_0^g T(x, y, z, \tau) d\tau d\mathcal{G} + u_{0x}, \\ u_{1y}(x, y, z, t) &= K(z) \frac{\beta(z)}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial y} \int_0^t \int_0^g T(x, y, z, \tau) d\tau d\mathcal{G} - \\ &\quad - K(z) \frac{\beta(z)}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial y} \int_0^\infty \int_0^g T(x, y, z, \tau) d\tau d\mathcal{G} + u_{0y}, \\ u_{1z}(x, y, z, t) &= K(z) \frac{\beta(z)}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^t \int_0^g T(x, y, z, \tau) d\tau d\mathcal{G} - \\ &\quad - K(z) \frac{\beta(z)}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^\infty \int_0^g T(x, y, z, \tau) d\tau d\mathcal{G} + u_{0z}. \end{aligned}$$

Приближения второго и более высоких порядков компонент вектора смещений определяются с помощью стандартной замены искомым функций в

правой части уравнений (8) на следующую сумму $\alpha_i + u_i(x, y, z, t)$ [26]. Такая замена приводит к следующему результату

$$\begin{aligned} \rho(z) \frac{\partial^2 u_{2x}(x, y, z, t)}{\partial t^2} &= \left\{ K(z) + \frac{5E(z)}{6[1 + \sigma(z)]} \right\} \frac{\partial^2 u_{1x}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \left\{ K(z) - \frac{E(z)}{3[1 + \sigma(z)]} \right\} \times \\ &\times \frac{\partial^2 u_{1y}(x, y, z, t)}{\partial x \partial y} + \frac{E(z)}{2[1 + \sigma(z)]} \left[\frac{\partial^2 u_{1y}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_{1z}(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \left\{ K(z) + \frac{E(z)}{3[1 + \sigma(z)]} \right\} \times \\ &\times \frac{\partial^2 u_{1z}(x, y, z, t)}{\partial x \partial z} - K(z) \beta(z) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \\ \rho(z) \frac{\partial^2 u_{2y}(x, y, z, t)}{\partial t^2} &= \frac{E(z)}{2[1 + \sigma(z)]} \left[\frac{\partial^2 u_{1y}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{1x}(x, y, z, t)}{\partial x \partial y} \right] - \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \times \\ &\times K(z) \beta(z) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{E(z)}{2[1 + \sigma(z)]} \left[\frac{\partial u_{1y}(x, y, z, t)}{\partial z} + \frac{\partial u_{1z}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] \right\} + \frac{\partial^2 u_{1y}(x, y, z, t)}{\partial y^2} \times \\ &\times \left\{ \frac{5E(z)}{12[1 + \sigma(z)]} + K(z) \right\} + \left\{ K(z) - \frac{E(z)}{6[1 + \sigma(z)]} \right\} \frac{\partial^2 u_{1y}(x, y, z, t)}{\partial y \partial z} + K(z) \frac{\partial^2 u_{1y}(x, y, z, t)}{\partial x \partial y} \\ \rho(z) \frac{\partial^2 u_{2z}(x, y, z, t)}{\partial t^2} &= \frac{E(z)}{2[1 + \sigma(z)]} \left[\frac{\partial^2 u_{1z}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{1z}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_{1x}(x, y, z, t)}{\partial x \partial z} + \right. \\ &+ \left. \frac{\partial^2 u_{1y}(x, y, z, t)}{\partial y \partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(z) \left[\frac{\partial u_{1x}(x, y, z, t)}{\partial x} + \frac{\partial u_{1y}(x, y, z, t)}{\partial y} + \frac{\partial u_{1z}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] \right\} + \\ &+ \frac{1}{6} \frac{\partial}{\partial z} \left[\left[6 \frac{\partial u_{1z}(x, y, z, t)}{\partial z} - \frac{\partial u_{1x}(x, y, z, t)}{\partial x} - \frac{\partial u_{1y}(x, y, z, t)}{\partial y} - \frac{\partial u_{1z}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] \times \right. \\ &\left. \times \frac{E(z)}{1 + \sigma(z)} \right\} - K(z) \beta(z) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z}. \end{aligned}$$

Интегрирование правых и левых частей полученных соотношений по времени t приводит к следующему результату

$$\begin{aligned}
 u_{2x}(x, y, z, t) = & \frac{1}{\rho(z)} \left\{ K(z) + \frac{5E(z)}{6[1+\sigma(z)]} \right\} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{1}{\rho(z)} \left\{ K(z) - \right. \\
 & \left. - \frac{E(z)}{3[1+\sigma(z)]} \right\} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{E(z)}{2\rho(z)} \left[\frac{\partial^2}{\partial y^2} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1z}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \right] \frac{1}{1+\sigma(z)} + \frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1z}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \left\{ K(z) + \right. \\
 & \left. + \frac{E(z)}{3[1+\sigma(z)]} \right\} - K(z) \frac{\beta(z)}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^t \int_0^{\vartheta} T(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \times \\
 & \times \frac{1}{\rho(z)} \left\{ K(z) + \frac{5E(z)}{6[1+\sigma(z)]} \right\} - \frac{1}{\rho(z)} \left\{ K(z) - \frac{E(z)}{3[1+\sigma(z)]} \right\} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta - \\
 & - \frac{1}{1+\sigma(z)} \frac{E(z)}{2\rho(z)} \left[\frac{\partial^2}{\partial y^2} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1z}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \right] - \frac{1}{\rho(z)} \times \\
 & \times \left\{ K(z) + \frac{E(z)}{3[1+\sigma(z)]} \right\} \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1z}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + u_{0x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^t \int_0^{\vartheta} T(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \times \\
 & \times K(z) \beta(z) / \rho(z) \\
 u_{2y}(x, y, z, t) = & \frac{E(z)}{2[1+\sigma(z)]} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \right] \times \\
 & \times \frac{1}{\rho(z)} + \frac{K(z)}{\rho(z)} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \left\{ K(z) + \right. \\
 & \left. + \frac{5E(z)}{12[1+\sigma(z)]} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{E(z)}{1+\sigma(z)} \left[\frac{\partial}{\partial z} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{\partial}{\partial y} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1z}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \right] \right\} \times \\
 & \times \frac{1}{2\rho(z)} - K(z) \frac{\beta(z)}{\rho(z)} \int_0^t \int_0^{\vartheta} T(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \times \\
 & \times \left\{ K(z) - \frac{E(z)}{6[1+\sigma(z)]} \right\} - \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \int_0^t \int_0^{\vartheta} u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \right] \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \frac{E(z)}{2\rho(z)} \frac{1}{1+\sigma(z)} - K(z) \frac{\beta(z)}{\rho(z)} \int_0^g \int_0^g T(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \int_0^g \int_0^g u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \times \\
 & \times \frac{K(z)}{\rho(z)} - \frac{1}{\rho(z)} \left\{ K(z) + \frac{5E(z)}{12[1+\sigma(z)]} \right\} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \int_0^g \int_0^g u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta - \frac{1}{2\rho(z)} \times \\
 & \times \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{E(z)}{1+\sigma(z)} \left[\frac{\partial}{\partial z} \int_0^g \int_0^g u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{\partial}{\partial y} \int_0^g \int_0^g u_{1z}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \right] \right\} + u_{0y} - \\
 & - \frac{1}{\rho(z)} \left\{ K(z) - \frac{E(z)}{6[1+\sigma(z)]} \right\} \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \int_0^g \int_0^g u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \\
 u_z(x, y, z, t) = & \frac{E(z)}{2[1+\sigma(z)]} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^g \int_0^g u_{1z}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \int_0^g \int_0^g u_{1z}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \int_0^g \int_0^g u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \int_0^g \int_0^g u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \right] \frac{1}{\rho(z)} + \frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(z) \times \right. \\
 & \times \left[\frac{\partial}{\partial x} \int_0^g \int_0^g u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{\partial}{\partial y} \int_0^g \int_0^g u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta + \frac{\partial}{\partial z} \int_0^g \int_0^g u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \right] \left. \right\} + \\
 & + u_{0z} + \frac{1}{6\rho(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{E(z)}{1+\sigma(z)} \left[6 \frac{\partial}{\partial z} \int_0^g \int_0^g u_{1z}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta - \frac{\partial}{\partial x} \int_0^g \int_0^g u_{1x}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{\partial}{\partial y} \int_0^g \int_0^g u_{1y}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta - \frac{\partial}{\partial z} \int_0^g \int_0^g u_{1z}(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \right] \right\} - \frac{\partial}{\partial z} \int_0^g \int_0^g T(x, y, z, \tau) d\tau d\vartheta \times \\
 & \times K(z)\beta(z)/\rho(z).
 \end{aligned}$$

В рамках данной работы искомые концентрации примеси и радиационных дефектов, а также компонент вектора смещения определены во втором приближении по методу осреднения функциональных поправок. Данного приближения обычно достаточно для получения качественных выводов и получения некоторых количественных результатов. Результаты аналитических расчетов проверялись путем их сопоставления с результатами численного моделирования.

Результаты анализа

В данном разделе проведем анализ динамики перераспределения примеси и радиационных дефектов в процессе их отжига с учетом релаксации механических напряжений. Типичные распределения концентраций примесей в гетероструктурах приведены на рис. 2 и 3 в случае диффузионного и ионного типов легирования. Данные распределения получены для случая, когда значение коэффициента диффузии примеси в легированной области превышает значение коэффициента диффузии примеси в подложки. Из данных рисунков следует, что неоднородность гетероструктуры позволяет увеличить резкость p - n -перехода. Одновременно увеличивается и равномерность распределения концентрации примеси в обогащенной ею области (в данном случае - в эпитаксиальном слое). Увеличение резкости p - n -перехода позволяет уменьшить время его переключения. Следствием второго эффекта является уменьшение разогрева легированного материала в процессе функционирования p - n -перехода или уменьшение его размера при фиксированной величине допуска на локальный разогрев материала. Однако в рамках данного метода формирования p - n -перехода необходима оптимизация длительности отжига. Причина данной оптимизации 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. Оптимизацию длительности отжига проведем с помощью введенного ранее критерия [15,25-32]. 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.

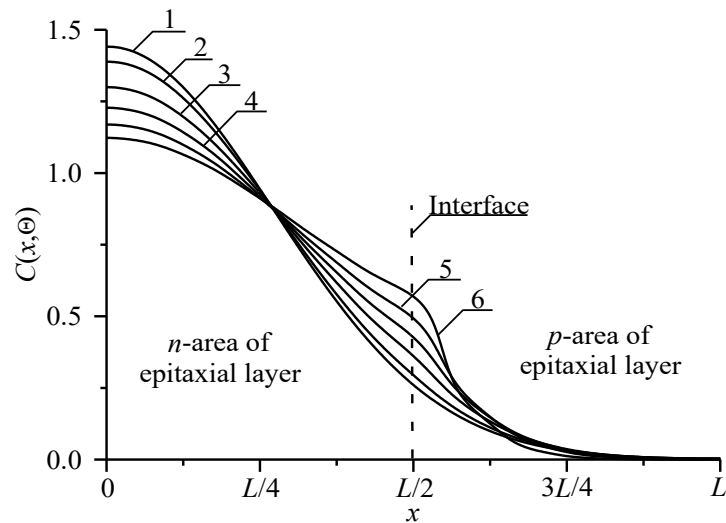


Рис.2. Распределения концентрации введенной диффузионно примеси в представленной на рис. 1 гетероструктуре в направлении, перпендикулярном границе раздела между подложкой и эпитаксиальными слоями. Увеличение номера кривой соответствует увеличению разницы между значениями коэффициента диффузии примеси в слоях для случая, когда коэффициент диффузии примеси в эпитаксиальном слое, чем в подложке

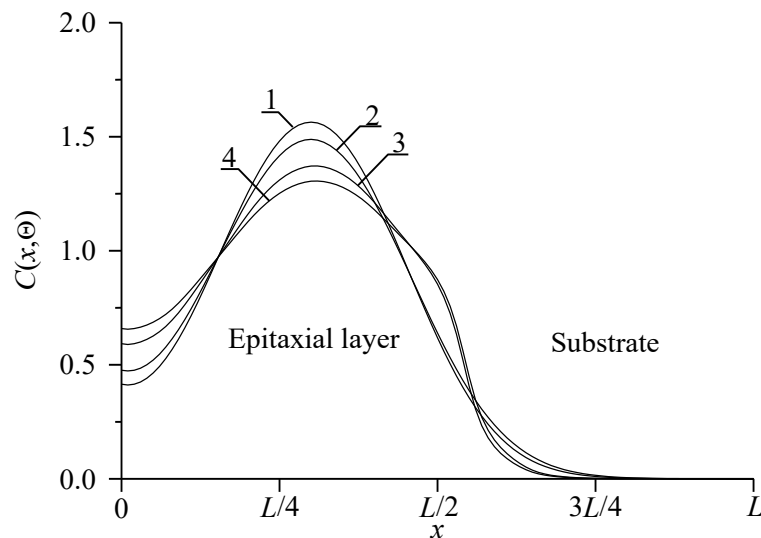


Рис.3. Пространственное распределение имп лантированной примеси после отжига длительностью $\Theta = 0,0048(L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)/D_0$ (кривые 1 и 3) и $\Theta = 0,0057(L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)/D_0$ (кривые 2 и 4). Кривые 1 и 2 – расчетные распределения в однородной структуре; кривые 3 и 4 - расчетные распределения примеси в многослойной структуре для случая, когда коэффициент диффузии примеси легированном слое больше, чем в эпитаксиальном слое, чем в подложке

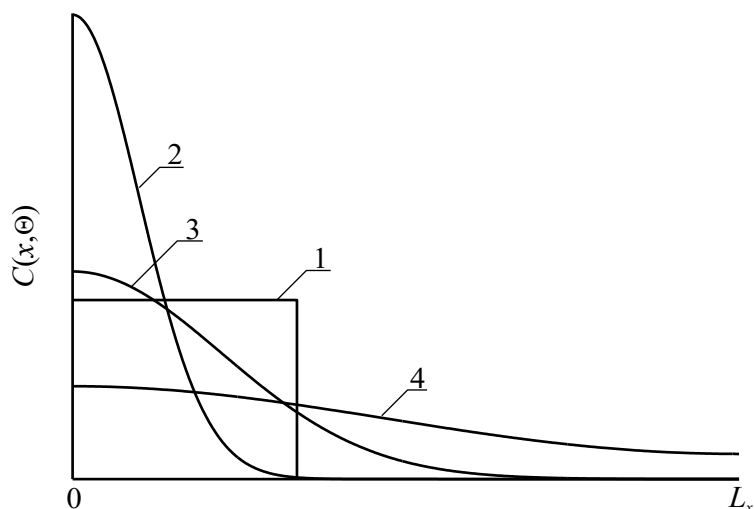


Рис.4. Пространственные распределения примеси в гетероструктуре при диффузионном легировании. Кривая 1 - требуемое идеализированное распределение примеси. Кривые 2-4 - реальные распределения примеси в различные моменты времени (увеличение номера кривой соответствует увеличению длительности отжига)

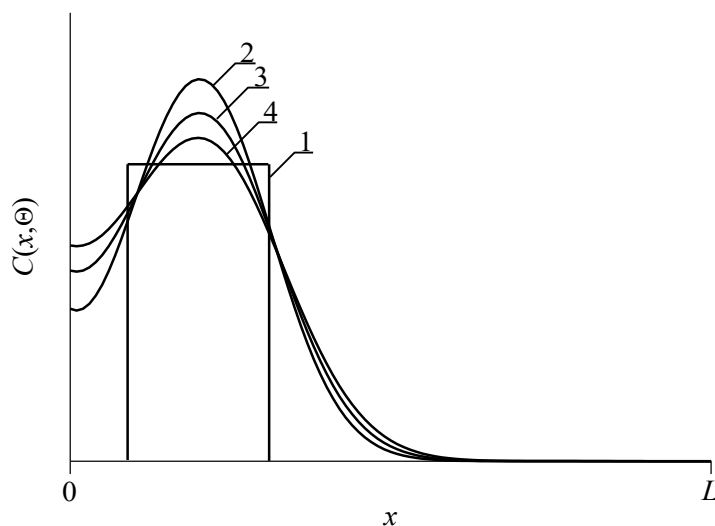


Рис.5. Пространственные распределения примеси в гетероструктуре при ионном легировании. Кривая 1 - требуемое идеализированное распределение примеси. Кривые 2-4 - реальные распределения примеси в различные моменты времени (увеличение номера кривой соответствует увеличению длительности отжига)

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.

На следующем этапе проведем анализ влияния механических напряжений на распределения примесей в легированных частях гетероструктуры. При условии $\varepsilon_0 < 0$ происходит сжатие распределения концентрации примеси в окрестности границ раздела между материалами гетероструктуры. В обратном случае (при $\varepsilon_0 > 0$) происходит уширение распределения концентрации примеси в данной области. Возникающее изменение распределения концентрации примеси может быть по крайней мере частично компенсировано использованием лазерного отжига [29]. Данный тип отжига за счет неоднородности температурного поля и закона Аррениуса позволяет ускорить диффузию примеси и дефектов, а также других процессов в отжигаемой лазерным лучом области. Наличие механических напряжений в гетероструктуре может изменять значения оптимальной длительности отжига. В тоже время наличие буферного слоя с постоянной решетки, имеющей промежуточное значение между постоянными решетки подложки и эпитаксиального слоя, позволяет уменьшить механические напряжения в рассматриваемой многослойной структуре. С одной стороны механические напряжения могли бы быть использованы для увеличения плотности элементов интегральных схем. С другой стороны наличие механических напряжений может привести к возникновению дислокаций несоответствия. На рис. 8 приведены зависимости компоненты вектора смещений от координаты, перпендикулярной к граница раздела между слоями гетероструктуры, в многослойной структуре с буферным слоем и без него.

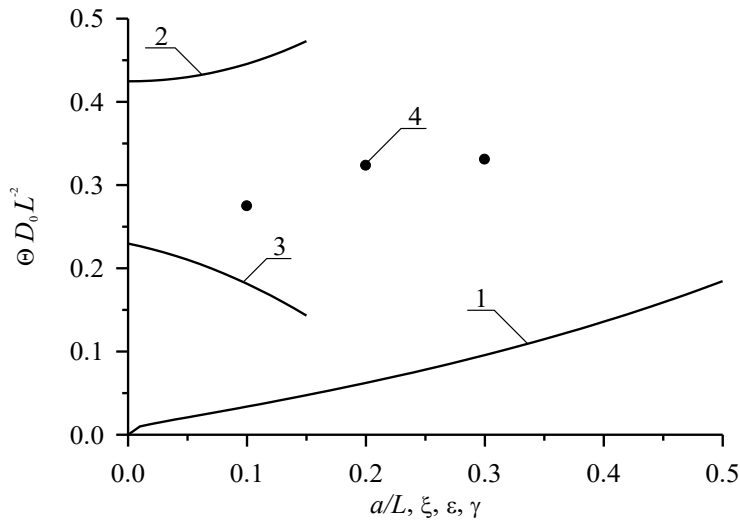


Рис.6. Зависимости безразмерного оптимального времени отжига введенной диффузионно примеси, полученного из условия минимума среднеквадратической ошибки, от различных параметров гетероструктуры.

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 ε при $a/L = 1/2$ и $\xi = \gamma = 0$. Кривая 3 - зависимость времени отжига от параметра ξ при $a/L = 1/2$ и $\varepsilon = \gamma = 0$. Кривая 4 - зависимость времени отжига от параметра γ при $a/L = 1/2$ и $\varepsilon = \xi = 0$

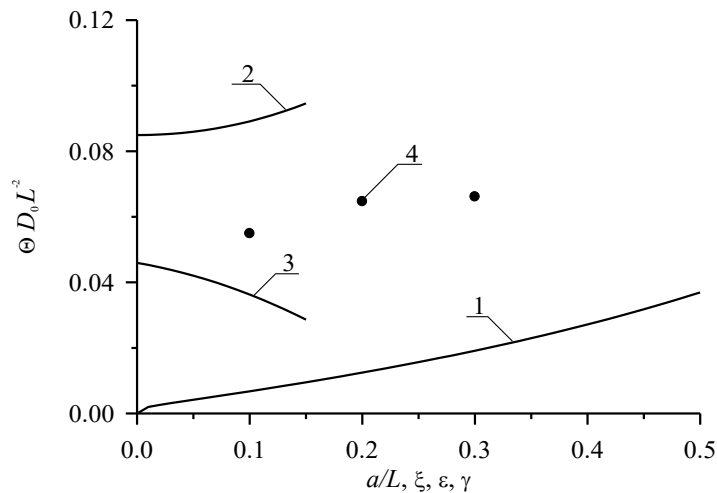


Рис.7. Зависимости безразмерного оптимального времени отжига введенной ионной имплантации примеси, полученного из условия минимума среднеквадратической ошибки, от различных параметров гетероструктуры.

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 ε при $a/L = 1/2$ и $\xi = \gamma = 0$. Кривая 3 - зависимость времени отжига от параметра ξ при $a/L = 1/2$ и $\varepsilon = \gamma = 0$. Кривая 4 - зависимость времени отжига от параметра γ при $a/L = 1/2$ и $\varepsilon = \xi = 0$

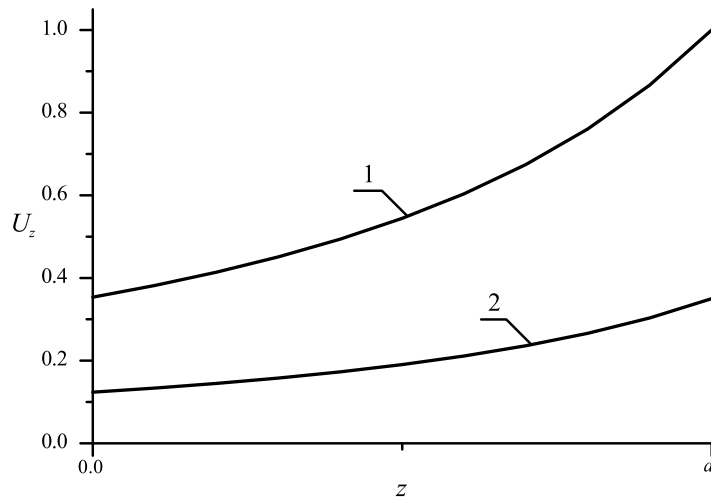


Рис.8. Нормированные зависимости компоненты вектора смещений u_z от координаты z для многослойной структуры без буферного слоя (кривая 1) и с буферным слоем (кривая 2)

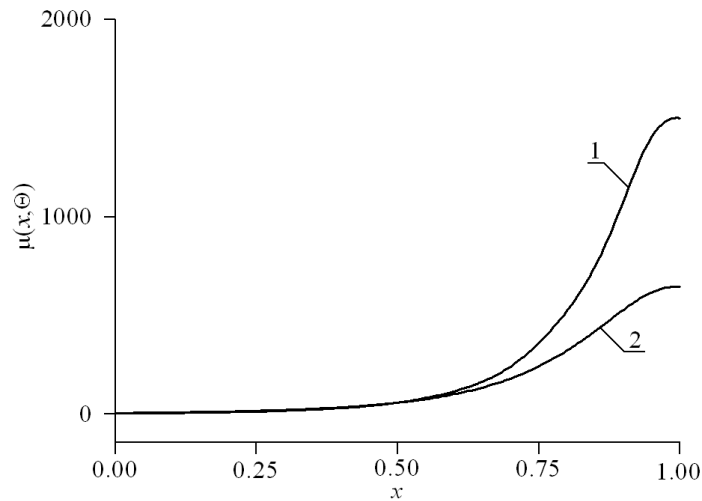


Рис. 9. Нормированные распределения подвижности носителей заряда в рассматриваемой гетероструктуре. Кривая 1 соответствует приведенной на рис. 1 трехслойной структуре. Кривая 2 соответствует материалу с усредненными параметрами приведенной на рис. 1 трехслойной структуры

Заключение

В данной работе проводился анализ перераспределения введенных с помощью диффузии и ионной имплантации примесей в процессе формирования полевых гетеротранзисторов, входящих в состав загрузочного аналогового переключателя. Сформулированы рекомендации по оптимизации отжига с целью уменьшения размеров гетеротранзисторов с одновременным увеличением их плотности, а также с целью уменьшения механических напряжений. Предложена аналитическая методика моделирования

диффузионного и ионного типов легирования, позволяющая одновременно учесть и пространственные, и временные изменения параметров, а также нелинейность рассматриваемых процессов.

Литература

1. В.И. Лачин, Н.С. Савелов. *Электроника*. Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. 446 с.
2. А. Полищук. Программируемые аналоговые ИС Anadigm: весь спектр аналоговой электроники на одном кристалле. Первое знакомство. *Современная электроника*. 2004. № 12. С. 8-11.
3. Г. Волович. Современные модели интегральных операционных усилителей. *Современная электроника*. 2006. № 2. С. 10-17.
4. А. Керенцев, В. Ланин. Сравнительная характеристика способов монтажа кристаллов MISFET силовых транзисторов. *Силовая электроника*. 2008. Вып. 1. С. 34-38.
5. 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-TiVx-n-6H-SiC: особенности токопереноса в выпрямляющих и невыпрямляющих контактах. *Физика и техника полупроводников*. 2009. Т. 43. № 7. С. 897-903.
6. Jung-Hui Tsai, Shao-Yen Chiu, Wen-Shiung Lour, Der-Feng Guo. High-performance InGaP/GaAs pnp δ -doped heterojunction bipolar transistor. *Semiconductors*. 2009. Vol. 43. No. 7. P. 939-942. DOI <https://doi.org/10.1134/S1063782609070227>.
7. О.В. Александров, А.О. Захарьин, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, М.М. Маковийчук, Е.О. Паршин. Образование донорных центров при отжиге кремния, имплантированного диспрозием и гольмием. *Физика и техника полупроводников*. 1998. Т. 32. № 9. С. 1029-1032.
8. И.Б. Ермолович, В.В. Миленин, Р.А. Редько, С.М. Редько. *Физика и техника полупроводников*. 2009. Т. 43. No. 8. С. 1016-1020.
9. P. Sinsersuksakul, K. Hartman, S.B. Kim, J. Heo, L. Sun, H.H. Park, R.

- Chakraborty, T. Buonassisi, R.G. Gordon. Enhancing the efficiency of SnS solar cells via band-offset engineering with a zinc oxysulfide buffer layer. *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102. No. 5. P. 053901-053905. DOI <https://doi.org/10.1063/1.4789855>.
10. J.G. Reynolds, C.L. Reynolds, Jr.A. Mohanta, J.F. Muth, J.E. Rowe, H.O. Everitt, D.E. Aspnes. Shallow acceptor complexes in *p*-type ZnO. *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102. No. 15. P. 152114-152118. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4802753>.
11. 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 включений в коллекторной области. *Физика и техника полупроводников.* 2001. Т. 35. № 8. С. 1013-1017.
12. E.L. Pankratov, E.A. Bulaeva. Doping of materials during manufacture *p-n*-junctions and bipolar transistors. Analytical approaches to model technological approaches and ways of optimization of distributions of dopants. *Reviews in Theoretical Science.* 2013. Vol. 1. No. 1. P. 58-82. DOI <https://doi.org/10.1166/rits.2013.1004>.
13. S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, A.I. Romanychev. Epitaxial growth of zinc oxide by the method of atomic layer deposition on SiC/Si substrates. *Physics of the Solid State.* 2016. Vol. 58. No 7. P. 1448-1452. DOI <https://doi.org/10.1134/S1063783416070246>
14. E.M. Trukhanov, A.V. Kolesnikov, I. D. Loshkarev. Long-range stresses generated by misfit dislocations in epitaxial films. *Russian Microelectronics.* 2015. Vol. 44. No 8. P. 552-558. DOI <https://doi.org/10.1134/S1063739715080119>
15. E.L. Pankratov, E.A. Bulaeva. About some ways to decrease quantity of defects in materials for solid state electronic devices and diagnostics of their realization. *Reviews in Theoretical Science.* 2015. Vol. 3. No 4. P. 365-398. DOI <https://doi.org/10.1166/rits.2015.1033>
16. K.K. Ong, K.L. Pey, P.S. Lee, A.T.S. Wee, X.C. Wang, Y.F. Chong. Dopant distribution in the recrystallization transient at the maximum melt depth induced

- by laser annealing. *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89. No. 17. P. 172111-172114. DOI <https://doi.org/10.1063/1.2364834>.
17. H.T. Wang, L.S. Tan, E. F. Chor. Pulsed laser annealing of Be-implanted GaN. *J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 98. No. 9. P. 094901-094905. DOI <https://doi.org/10.1063/1.2120893>.
18. 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.
19. Y.W. Zhang, A.F. Bower. Numerical simulation of island formation in a coherent strained epitaxial thin film system. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* 1999. Vol. 47. No. 11. P. 2273-2297. DOI [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(99\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(99)00026-5)
20. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теоретическая физика. Т.7. Теория упругости.* М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
21. З.Ю. Готра. *Технология микроэлектронных устройств.* М.: Радио и связь. 1991.
22. P.M. Fahey, P.B. Griffin, J.D. Plummer. Point defects and dopant diffusion in silicon. *Rev. Mod. Phys.* 1989. Vol. 61. No. 2. P. 289-388. DOI <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.61.289>
23. В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь. *Радиационная физика полупроводников.* Наукова Думка, Киев, 1979.
24. M. Liu, J. Wang, Zh. Zhu, W. Guo, L. Liu, R. Ding. A low distortion CMOS analogue switch with high-order compensation. *Analog. Integr. Circ. Sig. Process.* 2015. Vol. 82. No. 2. P. 495-500. DOI <https://doi.org/10.1007/s10470-014-0483-x>
25. E.L. Pankratov, E.A. Bulaeva. An approach to manufacture of bipolar transistors in thin film structures. On the method of optimization. *Int. J. Micro-Nano Scale Transp.* 2013. Vol. 4. No. 1. P. 17-31. DOI <http://dx.doi.org/10.1260/1759-3093.4.1-2.17>
26. Ю.Д. Соколов. Об определении динамических усилий в шахтных

подъемных канатах. 1955. *Прикладная Механика*. Т. 1. № 1. С. 23-35.

27. E.L. Pankratov. 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. No. 4-5. P. 187-197. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219581X08005328>
28. E.L. Pankratov, E.A. Bulaeva. On approach to increase integration rate of double-gate heterotransistors. *Int. J. Nanoscience*. 2017. Vol. 16. No. 4. P. 1650039-1650054. DOI <https://doi.org/10.1142/S0219581X16500393>
29. E.L. Pankratov, E.A. Bulaeva. Decreasing of quantity of radiation defects in an implanted-junction rectifiers by using overlayers. *Int. J. Micro-Nano Scale Transp.* 2012. Vol. 3. No. 3. P. 119-130.
30. E.L. Pankratov. Increasing of the sharpness of *p-n*-junctions by laser pulses. *Nano*. 2011. Vol. 6. No. 1. P. 31-40. DOI <https://doi.org/10.1142/S1793292011002329>
31. E.L. Pankratov, E.A. Bulaeva. Optimization of spatial dependence of diffusion coefficient for acceleration of dopant diffusion. *Multidiscipline modeling in materials and structures*. 2016. Vol. 12. No. 4. P. 672-677. DOI <https://doi.org/10.1108/MMMS-09-2015-0057>
32. E.L. Pankratov, E.A. Bulaeva. On optimization of manufacturing of transistors in hybrid cascaded multilevel inverter to increase their density. *Journal of computational and theoretical nanoscience*. 2017. Vol. 14. No. 7. P. 3548-3555. DOI <https://doi.org/10.1166/jctn.2017.6786>

Для цитирования:

Е.Л.Панкратов. О способе оптимизации формирования переключателя на базе гетероструктур с целью увеличения плотности его элементов. Влияние механических напряжений. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct19/7/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.10.7