

О СПОСОБЕ УВЕЛИЧЕНИЯ СТЕПЕНИ ИНТЕГРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ В СХЕМЕ ДВУХКАСКАДНОГО УСИЛИТЕЛЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ МИЛЛЕРА

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. Алексева, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина 24

Статья поступила в редакцию 10 июля 2019 г.

Аннотация. В данной работе рассматривается способ увеличения степени интеграции элементов в схеме двухкаскадного усилителя с компенсацией Миллера. В рамках данного метода необходимо формирование гетероструктуры специальной конфигурации, легировать необходимые участки данной гетероструктуры с помощью диффузии или ионной имплантации и оптимизировать отжиг примеси и/или радиационных дефектов.

Ключевые слова: двухкаскадный усилитель с компенсацией Миллера; увеличение плотности полевых транзисторов; прогноз технологического процесса; аналитическая методика анализа.

Abstract. In this paper we introduce an approach to increase integration rate of elements of a two stage amplifier with Miller compensation. Framework the approach we consider a heterostructure with special configuration. Several specific areas of the heterostructure should be doped by diffusion or ion implantation. Annealing of dopant and/or radiation defects should be optimized.

Keywords: two stage amplifier with Miller compensation; increasing integration rate of field-effect heterotransistors; optimization of manufacturing.

Введение

Одной из интенсивно решаемых проблем производства устройств твердотельной электроники является увеличение степени интеграции элементов интегральных схем (*p-n*-переходов, их систем и т.д.) [1-8]. Увеличение степени интеграции элементов интегральных схем приводит к необходимости

уменьшения их размеров. Для уменьшения размеров элементов интегральных схем используются различные методы. К ним относятся лазерный и микроволновый типы отжига введенных с помощью диффузии или имплантации примесей и/или радиационных дефектов [9-17]. При использовании данных типов отжига формируется неоднородное распределение температурного поля и, как следствие, в силу закона Аррениуса [1,3] уменьшаются размеры элементов интегральных схем [18]. Другим методом формирования элементов интегральных схем с меньшими размерами является легирование гетероструктуры с помощью диффузии или ионной имплантации [1-3]. Однако в данном случае необходима оптимизация отжига примеси и/или радиационных дефектов [18].

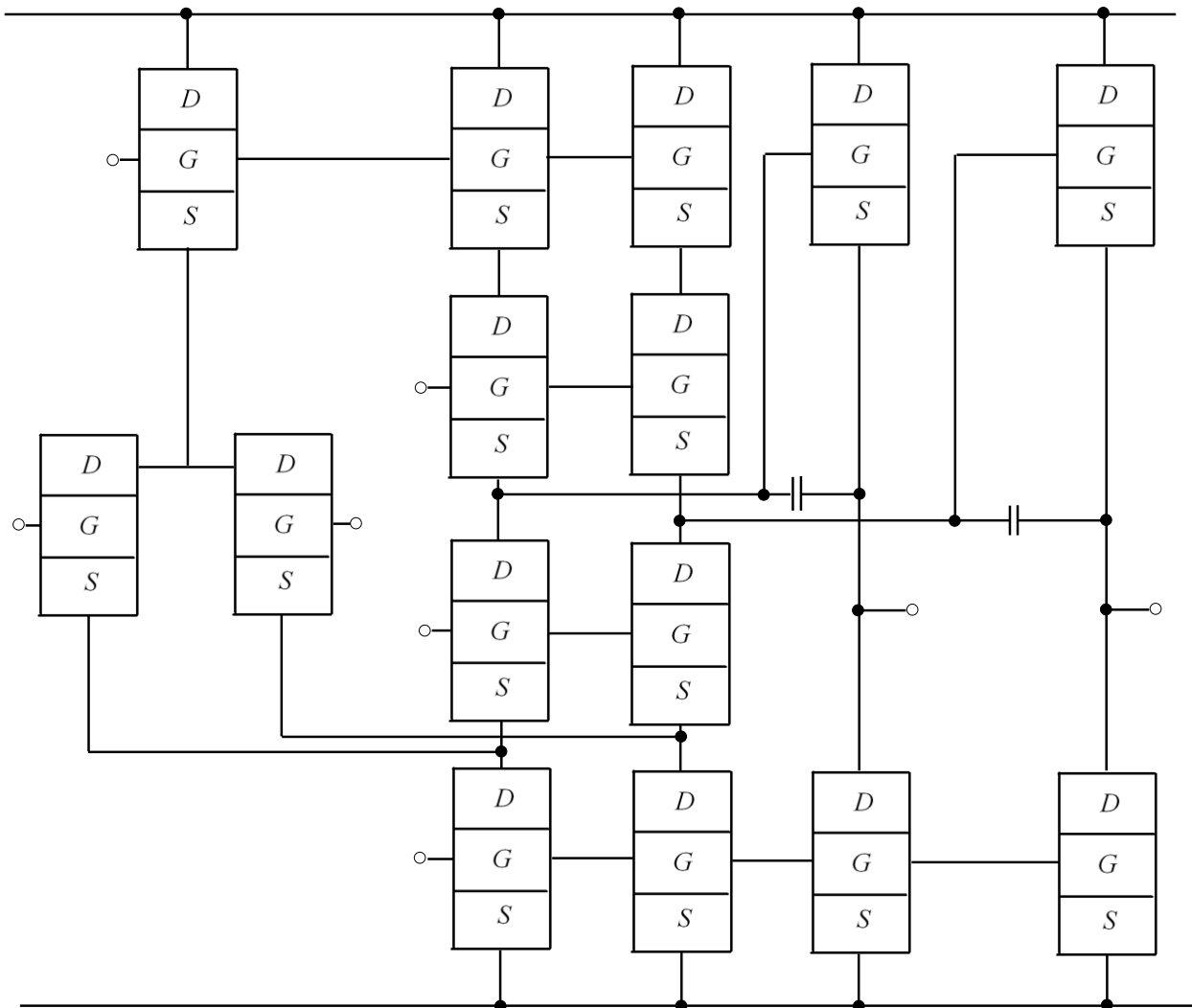


Рис. 1. Схема рассматриваемого усилителя [4].

В данной работе рассматривается гетероструктура, состоящая из подложки и нескольких эпитаксиальных слоев. В данных эпитаксиальных слоях формируются секции из других материалов. Далее эти секции легируются с помощью диффузии или ионной имплантации с целью формирования полевых транзисторов в рамках приведенной на рис. 1 схемы двухкаскадного усилителя с компенсацией Миллера [4]. Далее проводится отжиг примеси и/или радиационных дефектов. Основной целью данной работы является анализ динамики примеси и радиационных дефектов в процессе их отжига.

1. Методика анализа

Для достижения поставленных целей определим пространственно-временные распределения концентраций примесей. Искомые распределения найдем путем решения второго закона Фика [1,3,19,20]

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

с граничными и начальным условиями

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

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

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 [20-22]

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

где $D_L(x, y, z, T)$ - пространственная (за счет многослойности гетероструктуры) и температурная (по закону Аррениуса) зависимости коэффициента диффузии; $P(x, y, z, T)$ - предел растворимости примеси; определяемый свойствами материала параметр γ может принимать целые значения в интервале $\gamma \in [1, 3]$ [20]; $V(x, y, z, t)$ - пространственно-временное распределение концентрации радиационных вакансий; V^* - равновесное распределение вакансий. Концентрационная зависимость коэффициента диффузии подробно обсуждается в [20]. 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 [21,22]

$$\begin{aligned} \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_I(x, y, z, T) \frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial z} \right] - k_{I,V}(x, y, z, T) I(x, y, z, t) V(x, y, z, t) - \\ & - k_{I,I}(x, y, z, T) I^2(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (4)$$

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

с граничными и начальными условиями

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

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

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 [21,22]

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

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

с граничными и начальными условиями

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

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

$$\Phi_{\rho}(x, y, z, 0) = f_{\Phi_{\rho}}(x, y, z). \quad (7)$$

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

Для определения пространственно-временных распределений концентраций точечных радиационных дефектов, следуя работе [18], представим коэффициенты диффузии точечных дефектов в следующем виде: $D_{\rho}(x, y, z, T) = D_{0\rho}[1 + \varepsilon_{\rho} g_{\rho}(x, y, z, T)]$, где $D_{0\rho}$ - средние значения коэффициентов диффузии, $0 \leq \varepsilon_{\rho} < 1$, $|g_{\rho}(x, y, z, T)| \leq 1$, $\rho = I, V$. В аналогичной форме представим и параметры рекомбинации точечных дефектов и генерации их комплексов: $k_{I,V}(x, y, z, T) = k_{0I,V}[1 + \varepsilon_{I,V} g_{I,V}(x, y, z, T)]$, $k_{I,I}(x, y, z, T) = k_{0I,I}[1 + \varepsilon_{I,I} g_{I,I}(x, y, z, T)]$ и $k_{V,V}(x, y, z, T) = k_{0V,V}[1 + \varepsilon_{V,V} g_{V,V}(x, y, z, T)]$, где $k_{0\rho 1, \rho 2}$ - соответствующие средние значения, $0 \leq \varepsilon_{I,V} < 1$, $0 \leq \varepsilon_{I,I} < 1$, $0 \leq \varepsilon_{V,V} < 1$, $|g_{I,V}(x, y, z, T)| \leq 1$, $|g_{I,I}(x, y, z, T)| \leq 1$, $|g_{V,V}(x, y, z, T)| \leq 1$. Введем следующие безразмерные величины: $\chi = x/L_x$, $\tilde{I}(x, y, z, t) = I(x, y, z, t)/I^*$, $\tilde{V}(x, y, z, t) = V(x, y, z, t)/V^*$, $\vartheta = \sqrt{D_{0I} D_{0V}} t/L^2$, $\eta = y/L_y$, $\phi = z/L_z$, $\omega = L^2 k_{0I,V} / \sqrt{D_{0I} D_{0V}}$, $\Omega_{\rho} = L^2 k_{0\rho, \rho} / \sqrt{D_{0I} D_{0V}}$. Такая замена изменяет форму записи уравнений (4) и условий (5)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{I}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} &= \frac{D_{0I}}{\sqrt{D_{0I} D_{0V}}} \frac{\partial}{\partial \chi} \left\{ [1 + \varepsilon_I g_I(\chi, \eta, \phi, T)] \frac{\partial \tilde{I}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right\} + \frac{D_{0I}}{\sqrt{D_{0I} D_{0V}}} \times \\ &\times \frac{\partial}{\partial \eta} \left\{ [1 + \varepsilon_I g_I(\chi, \eta, \phi, T)] \frac{\partial \tilde{I}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial}{\partial \phi} \left\{ [1 + \varepsilon_I g_I(\chi, \eta, \phi, T)] \frac{\partial \tilde{I}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right\} \times \\ &\times \frac{D_{0I}}{\sqrt{D_{0I} D_{0V}}} - \omega [1 + \varepsilon_{I,V} g_{I,V}(\chi, \eta, \phi, T)] \tilde{I}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) - \Omega_I \tilde{I}^2(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \times \\ &\times [1 + \varepsilon_{I,I} g_{I,I}(\chi, \eta, \phi, T)] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \tilde{V}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} &= \frac{D_{0v}}{\sqrt{D_{0l} D_{0v}}} \frac{\partial}{\partial \chi} \left\{ [1 + \varepsilon_v g_v(\chi, \eta, \phi, T)] \frac{\partial \tilde{V}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right\} + \frac{D_{0v}}{\sqrt{D_{0l} D_{0v}}} \times \\
 &\times \frac{\partial}{\partial \eta} \left\{ [1 + \varepsilon_v g_v(\chi, \eta, \phi, T)] \frac{\partial \tilde{V}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial}{\partial \phi} \left\{ [1 + \varepsilon_v g_v(\chi, \eta, \phi, T)] \frac{\partial \tilde{V}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right\} \times \\
 &\times \frac{D_{0v}}{\sqrt{D_{0l} D_{0v}}} - \omega [1 + \varepsilon_{l,v} g_{l,v}(\chi, \eta, \phi, T)] \tilde{I}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) - \Omega_l \tilde{V}^2(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \times \\
 &\times [1 + \varepsilon_{v,v} g_{v,v}(\chi, \eta, \phi, T)], \\
 \left. \frac{\partial \tilde{\rho}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right|_{\chi=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial \tilde{\rho}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right|_{\chi=1} = 0, \quad \left. \frac{\partial \tilde{\rho}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right|_{\eta=0} = 0, \\
 \left. \frac{\partial \tilde{\rho}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right|_{\eta=1} &= 0, \quad \left. \frac{\partial \tilde{\rho}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right|_{\phi=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \tilde{\rho}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right|_{\phi=1} = 0, \\
 \tilde{\rho}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) &= f_\rho(\chi, \eta, \phi, \vartheta) / \rho^*. \tag{12}
 \end{aligned}$$

Решение уравнений (11) с условиями (12) будем искать, следуя [18], в виде степенных рядов

$$\tilde{\rho}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) = \sum_{i=0}^{\infty} \varepsilon_\rho^i \sum_{j=0}^{\infty} \omega^j \sum_{k=0}^{\infty} \Omega_\rho^k \tilde{\rho}_{ijk}(\chi, \eta, \phi, \vartheta). \tag{13}$$

Подстановка ряда (13) в уравнения (11) и условия (12) позволяет получить уравнения для исходных приближений концентраций точечных дефектов $\tilde{\rho}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)$ и поправочных функций к ним $\tilde{\rho}_{ijk}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)$, $i \geq 1, j \geq 1, k \geq 1$. Данные уравнения и условия к ним приведены в Приложении. Их решения могут быть получены стандартными методами (см., например, метод Фурье [23,24]). Полученные решения приведены в Приложении.

Далее определим пространственно-временные распределения концентраций комплексов точечных радиационных дефектов. Для этого представим соответствующие коэффициенты диффузии в следующей форме: $D_{\phi\rho}(x, y, z, T) = D_{0\phi\rho} [1 + \varepsilon_{\phi\rho} g_{\phi\rho}(x, y, z, T)]$, где $D_{0\phi\rho}$ - средние значения коэффициентов диффузии, $0 \leq \varepsilon_{\phi\rho} < 1$, $|g_{\phi\rho}(x, y, z, T)| \leq 1$. Тогда уравнения (6) преобразуются к

следующей форме

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial t} = D_{0\Phi I} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ [1 + \varepsilon_{\Phi I} g_{\Phi I}(x, y, z, T)] \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial y} \times \right. \\ \left. \times [1 + \varepsilon_{\Phi I} g_{\Phi I}(x, y, z, T)] \right\} D_{0\Phi I} + D_{0\Phi I} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ [1 + \varepsilon_{\Phi I} g_{\Phi I}(x, y, z, T)] \frac{\partial \Phi_I(x, y, z, t)}{\partial z} \right\} + \\ + k_{I,I}(x, y, z, T) I^2(x, y, z, t) - k_I(x, y, z, T) I(x, y, z, t) \\ \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial t} = D_{0\Phi V} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ [1 + \varepsilon_{\Phi V} g_{\Phi V}(x, y, z, T)] \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial y} \times \right. \\ \left. \times [1 + \varepsilon_{\Phi V} g_{\Phi V}(x, y, z, T)] \right\} D_{0\Phi V} + D_{0\Phi V} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ [1 + \varepsilon_{\Phi V} g_{\Phi V}(x, y, z, T)] \frac{\partial \Phi_V(x, y, z, t)}{\partial z} \right\} + \\ + k_{V,V}(x, y, z, T) V^2(x, y, z, t) - k_V(x, y, z, T) V(x, y, z, t). \end{aligned}$$

Будем искать решение данных уравнений в виде степенного ряда

$$\Phi_\rho(x, y, z, t) = \sum_{i=0}^{\infty} \varepsilon_{\Phi\rho}^i \Phi_{\rho i}(x, y, z, t). \quad (14)$$

Подстановка ряда (14) в уравнения (6) и соответствующие им граничные и начальные условия позволяет получить уравнения для исходных приближений распределений концентраций комплексов радиационных дефектов $\Phi_{\rho 0}(x, y, z, t)$ и поправочных функций к ним $\Phi_{\rho i}(x, y, z, t)$, $i \geq 1$, а также граничных и начальных условий к ним. Данные уравнения и условия приведены в Приложении. Решения данных уравнений получены стандартными методами [23,24] и приведено в Приложении.

Пространственно-временное распределение концентрации примеси определим аналогично пространственно-временному распределению концентрации радиационных дефектов. В рамках данной методики представим аппроксимацию коэффициента диффузии примеси в виде суммы постоянной и переменной составляющих, т.е. $D_L(x, y, z, T) = D_{0L} [1 + \varepsilon_L g_L(x, y, z, T)]$, где D_{0L} - среднее значение коэффициента диффузии примеси, $0 \leq \varepsilon_L < 1$, $|g_L(x, y, z, T)| \leq 1$. Далее будем

искать решение уравнения (1) в виде степенного ряда

$$C(x, y, z, t) = \sum_{i=0}^{\infty} \varepsilon_L^i \sum_{j=1}^{\infty} \xi^j C_{ij}(x, y, z, t).$$

Подстановка данного ряда в уравнение (1) и условия (2) позволяет получить уравнения для исходного приближения концентрации примеси $C_{00}(x, y, z, t)$, поправочных функций к ним $C_{ij}(x, y, z, t)$ ($i \geq 1, j \geq 1$), граничные и начальные условия к ним. Данные уравнения и условия к ним приведены в Приложении. Их решения могут быть получены стандартными методами (см., например, [23,24]). Решения данных уравнений приведены в Приложении.

Анализ пространственно-временных распределений концентраций примеси и радиационных дефектов проводился аналитически во втором приближении по параметрам, используемых в соответствующих рядах. Данного приближения обычно достаточно для проведения качественного анализа и получения некоторых количественных результатов. Результаты аналитических расчетов проверялись путем их сопоставления с результатами численного моделирования.

2. Результаты анализа

Проведем анализ пространственно-временного распределения концентраций примесей. На рис. 2 приведены типичные пространственные распределения концентраций примесей в окрестностях границ раздела между слоями гетероструктур. Данные распределения были получены при условии, в рамках которого значение коэффициента диффузии примеси в легированной области превышает значение коэффициента диффузии примеси в соседних областях. Из данных рисунков следует возможность увеличения компактности легированных областей с одновременным увеличением равномерности распределения концентрации примеси в обогащенной ею области. Изменение соотношения между величинами коэффициентов диффузии приводит к противоположному результату (см. рис. 3).

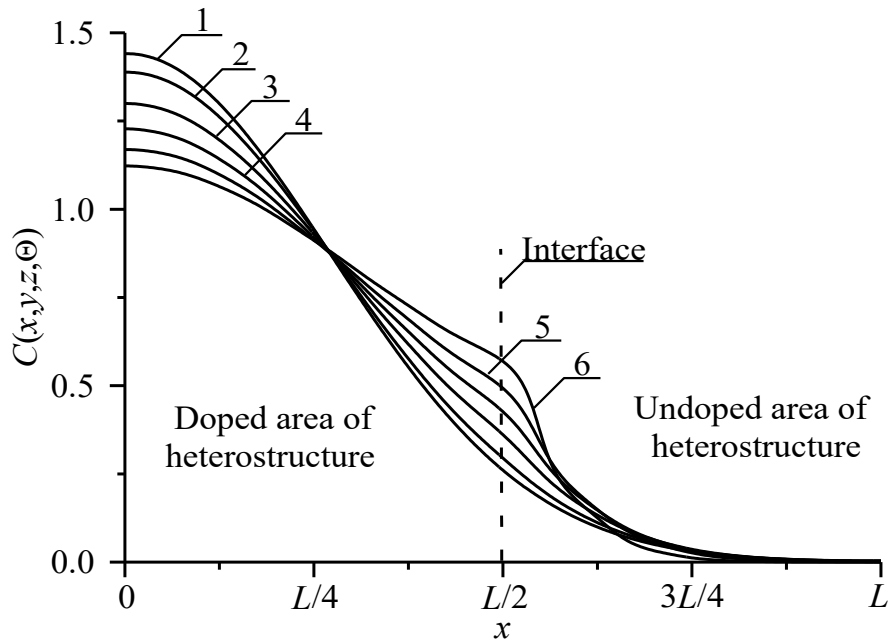


Рис.2а. Распределения концентрации введенной диффузионно примеси в представленной на рис. 1 гетероструктуре в направлении, перпендикулярном границе раздела между подложкой и эпитаксиальными слоями. Увеличение номера кривой соответствует увеличению разницы между значениями коэффициента диффузии примеси в слоях при условии, что коэффициент диффузии примеси в легированной области больше, чем в соседней.

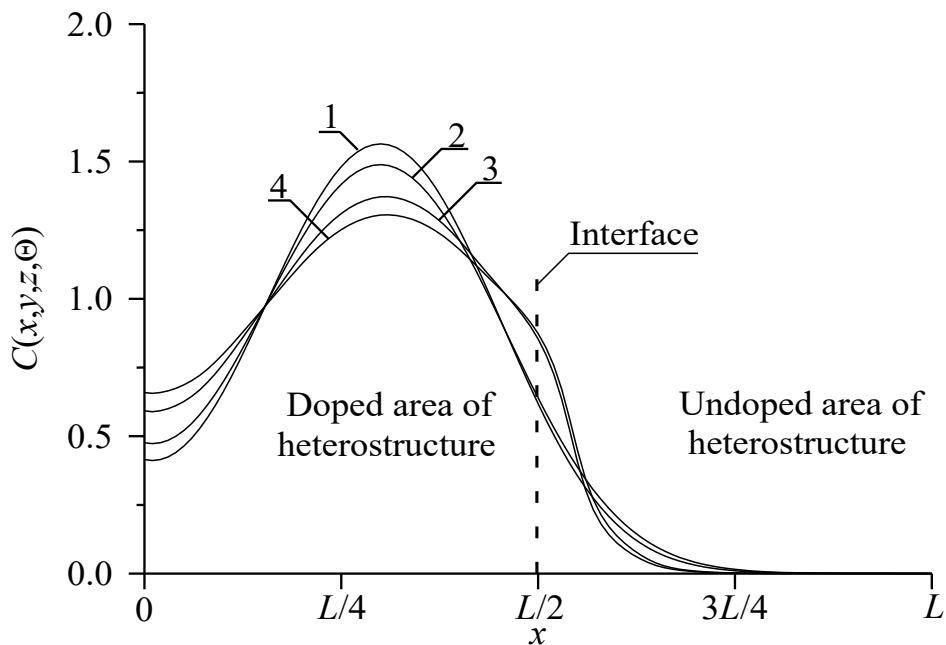


Рис. 2б. Пространственное распределение имплантированной примеси после отжига длительностью $\Theta = 0,0048(L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)/D_0$ (кривые 1 и 3) и $\Theta = 0,0057(L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)/D_0$ (кривые 2 и 4). Кривые 1 и 2 – расчетные распределения в однородной структуре; кривые 3 и 4 – расчетные распределения примеси в двухслойной структуре при условии, что коэффициент диффузии примеси легированном слое больше, чем в соседнем.

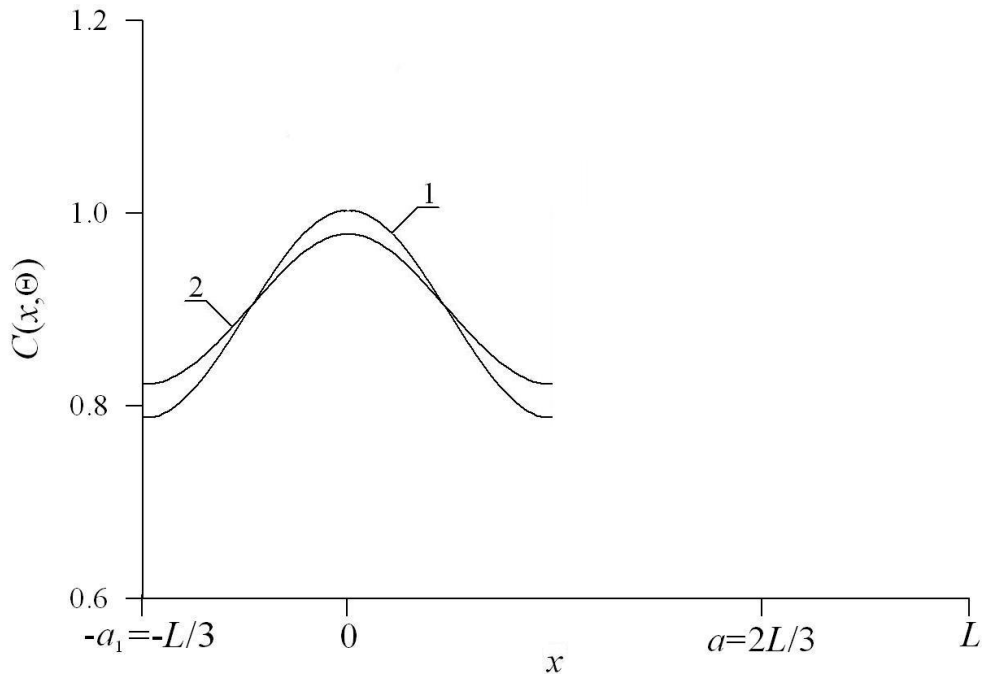


Рис.3а. Распределения концентрации введенной диффузионно примеси в представленной на рис. 1 гетероструктуре в направлении, перпендикулярном границе раздела между подложкой и эпитаксиальными слоями. Увеличение номера кривой соответствует увеличению разницы между значениями коэффициента диффузии примеси в слоях при условии, что коэффициент диффузии примеси в легированной области меньше, чем в соседней.

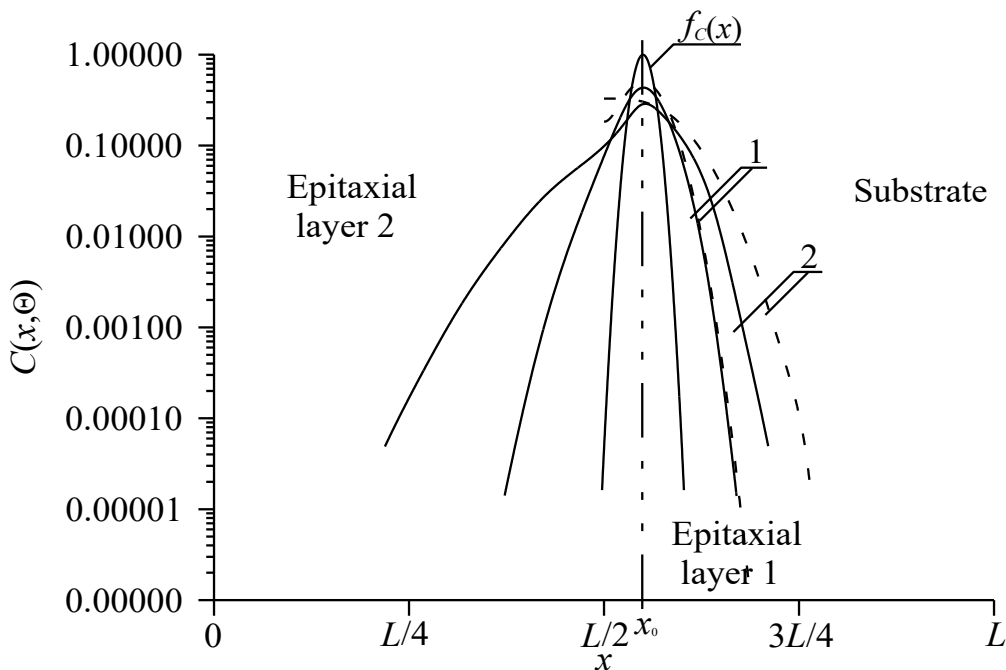


Рис.3б. Распределения имплантированной примеси в представленной на рис. 1 гетероструктуре при условии, что коэффициент диффузии примеси в легированной области больше, чем в соседней (сплошные линии). Пунктирные линии соответствуют отсутствию внешнего эпитаксиального слоя с большим значением коэффициента диффузии.

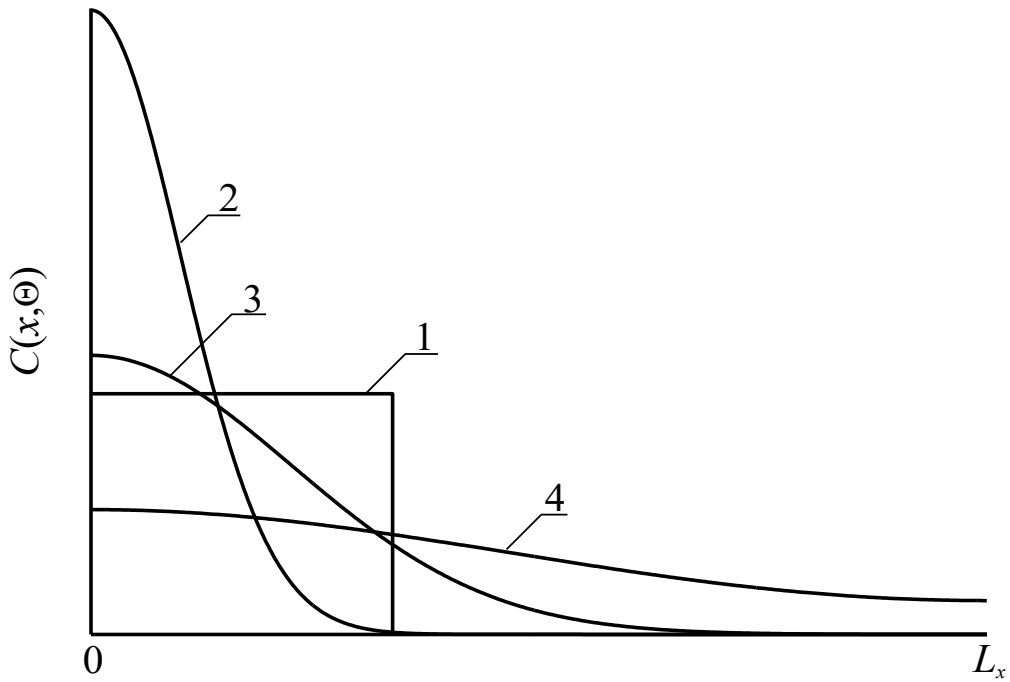


Рис. 4а. Пространственные распределения примеси в гетероструктуре при диффузионном легировании. Кривая 1 - требуемое идеализированное распределение примеси. Кривые 2-4 - реальные распределения примеси в различные моменты времени (увеличение номера кривой соответствует увеличению длительности отжига)

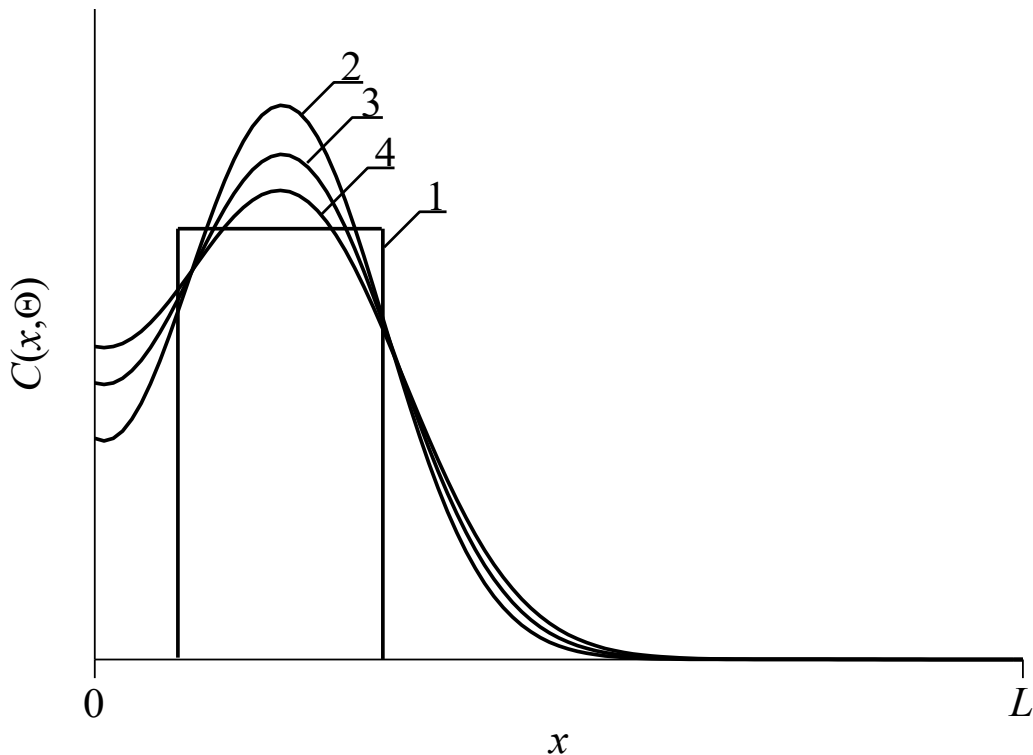


Рис.4б. Пространственные распределения примеси в гетероструктуре при ионном легировании. Кривая 1 - требуемое идеализированное распределение примеси. Кривые 2-4 - реальные распределения примеси в различные моменты времени (увеличение номера кривой соответствует увеличению длительности отжига)

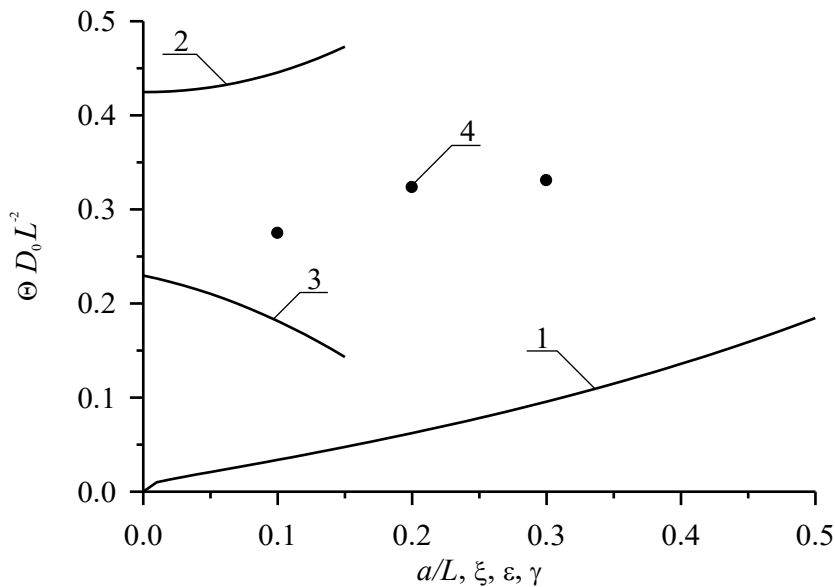


Рис.5а. Зависимости безразмерного оптимального времени отжига введенной диффузионно примеси, полученного из условия минимума среднеквадратической ошибки, от различных параметров гетероструктуры.

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

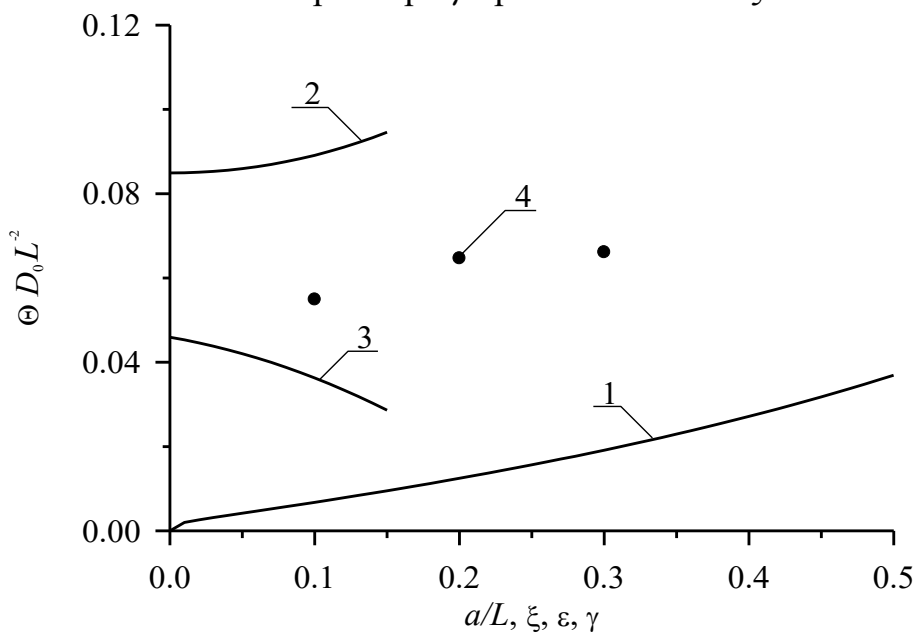


Рис.5б. Зависимости безразмерного оптимального времени отжига введенной с помощью ионной имплантации примеси, полученного из условия минимума среднеквадратической ошибки, от различных параметров гетероструктуры.

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

В рамках рассматриваемого метода необходима оптимизация отжига примеси и/или радиационных дефектов. Проведем данную оптимизацию в рамках введенного ранее критерия [25-33]. В рамках данного критерия аппроксимируем реальное распределение концентрации примеси с помощью скачкообразной функции $\psi(x, y, z)$ (см. рис. 4). Далее искомые значения оптимальной длительности отжига определим путем минимизации следующей среднеквадратической ошибки

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

Зависимости оптимальной длительности отжига приведены на рис. 5. Известно, что стандартным этапом формирования ионно-легированных структур является отжиг радиационных дефектов. В идеальном случае после проведения данного отжига примесь достигает границы раздела между слоями гетероструктуры. Если примесь не успевает достигнуть данной границы, целесообразно проводить дополнительный отжиг примеси. На рис. 5б приведены зависимости именно длительности дополнительного отжига. Необходимость проведения отжига радиационных дефектов приводит к меньшим значениям оптимальной длительности отжига имплантированной примеси по сравнению с оптимальной длительностью отжига примеси, введенной диффузионно.

Заключение

В данной работе предлагается способ увеличения степени интеграции элементов в схеме двухкаскадного усилителя с компенсацией Миллера. Данный метод позволяет уменьшить площадь данной схемы с одновременным уменьшением его толщины.

Литература

1. В.И. Лачин, Н.С. Савелов. *Электроника*. Ростов-на-Дону: Феникс, 2001.
2. А.Г. Алексенко, И.И. Шагурин. *Микросхемотехника*. М.: Радио и связь, 1990.
3. Н.А. Аваев, Ю.Е. Наумов, В.Т. Фролкин. *Основы микроэлектроники*. М.:

Радио и связь, 1991.

4. Z. Wang, H. J., Ch. Zhang, H. Jiang, Zh. Wang. A chopper current feedback instrument amplifier with bandpass amplification stage. *Analog. Integr. Circ. Sig. Process.* 2014. Vol. 81. No. 3. P. 763-775. DOI: [10.1007/s10470-014-0415-9](https://doi.org/10.1007/s10470-014-0415-9).
5. D. Fathi, B. Forouzandeh, N. Masoumi. New enhanced noise analysis in active mixers in nanoscale technologies. *Nano.* 2009. Vol. 4. No. 4. P. 233-238. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1793292009001708>.
6. S.A. Chachuli, P.N.A. Fasyar, N. Soin, N.M. Karim, N. Yusop. Pareto ANOVA analysis for CMOS 0.18 μ m two-stage Op-amp. *Mat. Sci. Sem. Proc.* 2014. Vol. 24. P. 9-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.02.035>.
7. 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_x-n-6H-SiC: особенности токопереноса в выпрямляющих и невыпрямляющих контактах. *Физика и техника полупроводников.* 2009. Т. 43. № 7. С. 897-903.
8. Z. Li, J. Waldron, T. Detchprohm, C. Wetzel, R.F. Karliceck, Jr.T.P. Chow. Monolithic integration of light-emitting diodes and power metal-oxide-semiconductor channel high-electron-mobility transistors for light-emitting power integrated circuits in GaN on sapphire substrate. *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102. No. 19. P. 192107-192109. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4807125>.
9. 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>.
10. 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.
11. M.J. Kumar, T.V. Singh. Quantum confinement effects in strained silicon MOSFETS *Int. J. Nanoscience.* 2008. Vol. 7. No. 2-3. P. 81-84. DOI:

<https://doi.org/10.1142/S0219581X08005195>.

12. P. Sinsermsuksakul, 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>.
13. 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>.
14. 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>.
15. 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>.
16. С.Т. Шишияну, Т.С. Шишияну, С.К. Райлян. Мелкие *p-n*-переходы в *Si*, изготовленные методом импульсного фотонного отжига. *Физика и техника полупроводников*. 2002. Т. 36. № 5. С. 611-617.
17. 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.
18. 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: [10.1166/rits.2013.1004](https://doi.org/10.1166/rits.2013.1004).
19. Ю.Н. Ерофеев. *Импульсные устройства*. М.: Высшая школа, 1989.
20. В.В. Козловский. *Модифицирование полупроводников пучками протонов*. Санкт-Петербург: "Наука", 2003.

21. З.Ю. Готра. *Технология микроэлектронных устройств*. М.: Радио и связь. 1991.
21. В.Л. Винетский, Г.А. Холодарь. *Радиационная физика полупроводников*. Киев: Наукова думка, 1979.
22. P.M. Fahey, P.B. Griffin, J.D. Plummer. Point defects and dopant diffusion in silicon. *Rev. Mod. Phys.* 1989. Vol. 61 (2). P. 289-388. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.61.289>.
23. А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. *Уравнения математической физики*. М.: Наука, 1972.
24. H.S. Carslaw, J.C. Jaeger. *Conduction of heat in solids*. London: Oxford University Press, 1964.
26. Е.Л. Панкратов. Динамика примеси при формировании *p-n*-переходов в неоднородных структурах. Оптимизация времени отжига. *Микроэлектроника*. 2007. Т. 36. № 1. С. 37-44.
- Е.Л. 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>
27. E.L. Pankratov. Decreasing of Depth of Implanted-Junction Rectifier in Semiconductor Heterostructure by Optimized Laser Annealing *J. Comp. Theor. Nanoscience*. 2010. Vol. 7. No. 1. P. 289-295. DOI: <https://doi.org/10.1166/jctn.2010.1361>
28. E.L. Pankratov. On approach to optimize manufacturing of bipolar heterotransistors framework circuit of an operational amplifier to increase their integration rate. Influence mismatch-induced stress. *J. Comp. Theor. Nanoscience*. 2017. Vol. 14. No. 10. P. 4885-4899. DOI: <https://doi.org/10.1166/jctn.2017.6899>
29. E.L. Pankratov. On optimization of manufacturing of two-phase logic circuit based on heterostructures to increase density of their elements. *Advanced science, engineering and medicine*. 2017. Vol. 9. No. 9. P. 787-801. DOI: <https://doi.org/10.1166/ asem.2017.2043>

30. E.L. Pankratov, E.A. Bulaeva. On increasing of density of transistors in a hybrid cascaded multilevel inverter. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2017. Vol. 13. No. 4. P. 664-677. DOI: <https://doi.org/10.1108/MMMS-05-2017-0041>
31. 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>
32. E.L. Pankratov. On Approach to Optimize Manufacturing of a Modified Circuit of Domino Element to Increase Integration Rate of Field-Effect Heterotransistor. Influence Mismatch-Induced Stress. *J. Comp. Theor. Nanoscience*. 2017. Vol. 14. No. 10. P. 4839-4853. DOI: <https://doi.org/10.1166/jctn.2017.6896>
33. E.L. Pankratov, E.A. Bulaeva. An approach to increase the integration rate of planar drift heterobipolar transistors. *Materials science in semiconductor processing*. 2015. Vol. 34. P. 260-268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.02.054>

Приложение

Уравнения для функций $\tilde{I}_{ijk}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)$ и $\tilde{V}_{ijk}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)$, $i \geq 0, j \geq 0, k \geq 0$ и условия

к ним

$$\frac{\partial \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} = \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \frac{\partial^2 \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \frac{\partial^2 \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \frac{\partial^2 \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2},$$

$$\frac{\partial \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} = \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \frac{\partial^2 \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \frac{\partial^2 \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \frac{\partial^2 \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{I}_{i00}(\chi, \vartheta)}{\partial \vartheta} &= \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{I}_{i00}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{i00}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{i00}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] + \\ &+ \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \chi} \left[g_I(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{I}_{i-100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[g_I(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{I}_{i-100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial}{\partial \phi} \left[g_I(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{I}_{i-100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right] \right\}, i \geq 1, \\ \frac{\partial \tilde{V}_{i00}(\chi, \vartheta)}{\partial \vartheta} &= \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_{i00}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{i00}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{i00}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] + \\ &+ \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \chi} \left[g_V(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{V}_{i-100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[g_V(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{V}_{i-100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial}{\partial \phi} \left[g_V(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{V}_{i-100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right] \right\}, i \geq 1; \\ \frac{\partial \tilde{I}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} &= \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{I}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] - \\ &\quad - [1 + \varepsilon_{I,V} g_{I,V}(\chi, \eta, \phi, T)] \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta), \\ \frac{\partial \tilde{V}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} &= \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] - \\ &\quad - [1 + \varepsilon_{I,V} g_{I,V}(\chi, \eta, \phi, T)] \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta); \\ \frac{\partial \tilde{I}_{020}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} &= \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{I}_{020}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{020}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{020}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] - \\ &\quad - [1 + \varepsilon_{I,V} g_{I,V}(\chi, \eta, \phi, T)] [\tilde{I}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) + \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)], \\ \frac{\partial \tilde{V}_{020}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} &= \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_{020}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{020}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{020}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] - \end{aligned}$$

$$- [1 + \varepsilon_{I,V} g_{I,V}(\chi, \eta, \phi, T)] [\tilde{I}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) + \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)];$$

$$\frac{\partial \tilde{I}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} = \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{I}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] -$$

$$- [1 + \varepsilon_{I,I} g_{I,I}(\chi, \eta, \phi, T)] \tilde{I}_{000}^2(\chi, \eta, \phi, \vartheta),$$

$$\frac{\partial \tilde{V}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} = \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] -$$

$$- [1 + \varepsilon_{I,I} g_{I,I}(\chi, \eta, \phi, T)] \tilde{V}_{000}^2(\chi, \eta, \phi, \vartheta);$$

$$\frac{\partial \tilde{I}_{110}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} = \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{I}_{110}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{110}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{110}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] +$$

$$+ \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \chi} \left[g_I(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{I}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[g_I(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{I}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial}{\partial \phi} \left[g_I(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{I}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right] \right\} - [1 + \varepsilon_{I,I} g_{I,I}(\chi, \eta, \phi, T)] [\tilde{I}_{100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \times$$

$$\times \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) + \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)],$$

$$\frac{\partial \tilde{V}_{110}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} = \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_{110}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{110}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{110}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] +$$

$$+ \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \chi} \left[g_V(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{V}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[g_V(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{V}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial}{\partial \phi} \left[g_V(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{V}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right] \right\} - [1 + \varepsilon_{V,V} g_{V,V}(\chi, \eta, \phi, T)] [\tilde{V}_{100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \times$$

$$\times \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) + \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{I}_{100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)];$$

$$\frac{\partial \tilde{I}_{002}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} = \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{I}_{002}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{002}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{002}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] -$$

$$\begin{aligned}
 & - [1 + \varepsilon_{I,I} g_{I,I}(\chi, \eta, \phi, T)] \tilde{I}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta), \\
 \frac{\partial \tilde{V}_{002}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} & = \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_{002}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{002}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{002}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] - \\
 & - [1 + \varepsilon_{V,V} g_{V,V}(\chi, \eta, \phi, E)] \tilde{V}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta); \\
 \frac{\partial \tilde{I}_{101}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} & = \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{I}_{101}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{101}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{101}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] + \\
 & + \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \chi} \left[g_I(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{I}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[g_I(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{I}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right] + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial}{\partial \phi} \left[g_I(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{I}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right] \right\} - [1 + \varepsilon_I g_I(\chi, \eta, \phi, T)] \tilde{I}_{100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta), \\
 \frac{\partial \tilde{V}_{101}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} & = \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_{101}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{101}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{101}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] + \\
 & + \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \chi} \left[g_V(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{V}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[g_V(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{V}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right] + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial}{\partial \phi} \left[g_V(\chi, \eta, \phi, T) \frac{\partial \tilde{V}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right] \right\} - [1 + \varepsilon_V g_V(\chi, \eta, \phi, T)] \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{100}(\chi, \eta, \phi, \vartheta); \\
 \frac{\partial \tilde{I}_{011}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} & = \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{I}_{011}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{011}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{I}_{011}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] - \\
 & - [1 + \varepsilon_{I,I} g_{I,I}(\chi, \eta, \phi, T)] \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{I}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) - [1 + \varepsilon_{I,V} g_{I,V}(\chi, \eta, \phi, T)] \times \\
 & \quad \times \tilde{I}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta), \\
 \frac{\partial \tilde{V}_{011}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \vartheta} & = \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}_{011}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{011}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}_{011}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi^2} \right] - \\
 & - [1 + \varepsilon_{V,V} g_{V,V}(\chi, \eta, \phi, T)] \tilde{V}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) - [1 + \varepsilon_{I,V} g_{I,V}(\chi, \eta, \phi, t)] \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \tilde{I}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) \tilde{V}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta); \\ & \left. \frac{\partial \tilde{\rho}_{ijk}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right|_{\chi=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \tilde{\rho}_{ijk}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \chi} \right|_{\chi=1} = 0, \quad \left. \frac{\partial \tilde{\rho}_{ijk}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right|_{\eta=0} = 0, \\ & \left. \frac{\partial \tilde{\rho}_{ijk}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \eta} \right|_{\eta=1} = 0, \quad \left. \frac{\partial \tilde{\rho}_{ijk}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right|_{\phi=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \tilde{\rho}_{ijk}(\chi, \eta, \phi, \vartheta)}{\partial \phi} \right|_{\phi=1} = 0 \\ & (i \geq 0, j \geq 0, k \geq 0); \end{aligned}$$

$$\tilde{\rho}_{000}(\chi, \eta, \phi, 0) = f_\rho(\chi, \eta, \phi) / \rho^*, \quad \tilde{\rho}_{ijk}(\chi, \eta, \phi, 0) = 0 \quad (i \geq 1, j \geq 1, k \geq 1).$$

Решения данных уравнений с учетом соответствующих граничных и начальных условий представимы в следующей форме

$$\tilde{\rho}_{000}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) = \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} F_{n\rho} c(\chi) c(\eta) c(\phi) e_{n\rho}(\vartheta),$$

где $F_{n\rho} = \frac{1}{\rho^*} \int_0^1 \cos(\pi n u) \int_0^1 \cos(\pi n v) \int_0^1 \cos(\pi n w) f_{n\rho}(u, v, w) d w d v d u$, $c_n(\chi) = \cos(\pi n \chi)$,

$$e_{nI}(\vartheta) = \exp(-\pi^2 n^2 \vartheta \sqrt{D_{0V}/D_{0I}}), \quad e_{nV}(\vartheta) = \exp(-\pi^2 n^2 \vartheta \sqrt{D_{0I}/D_{0V}});$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{i00}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) = & -2\pi \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c(\eta) c(\phi) e_{nI}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{nI}(-\tau) \int_0^1 s_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) \times \\ & \times g_I(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{I}_{i-100}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - 2\pi \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c(\eta) c(\phi) e_{nI}(\vartheta) \times \\ & \times \int_0^{\vartheta} e_{nI}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 s_n(v) \int_0^1 c_n(w) g_I(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{I}_{i-100}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau - \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \times \\ & \times 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c(\eta) c(\phi) e_{nI}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{nI}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 g_I(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{I}_{i-100}(u, v, w, \tau)}{\partial w} \times \\ & \times s_n(w) d w d v d u d \tau, \quad i \geq 1, \end{aligned}$$

$$\tilde{V}_{i00}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) = -2\pi \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c(\eta) c(\phi) e_{nV}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{nV}(-\tau) \int_0^1 s_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) \times$$

$$\begin{aligned} & \times g_v(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{V}_{i-100}(u, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c(\eta) c(\phi) e_{nV}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{nI}(-\tau) \times \\ & \times 2\pi \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 s_n(v) \int_0^1 c_n(w) g_v(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{V}_{i-100}(u, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau - 2\pi \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) \times \\ & \times c(\eta) c(\phi) e_{nV}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{nI}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 s_n(w) g_v(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{V}_{i-100}(u, \tau)}{\partial w} d w d v d u d \tau, i \geq 1, \end{aligned}$$

где $s_n(\chi) = \sin(\pi n \chi)$;

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_{010}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) &= -2 \sum_{n=1}^{\infty} e_{n\rho}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{n\rho}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) [1 + \varepsilon_{I,V} g_{I,V}(u, v, w, T)] \times \\ & \times \tilde{I}_{000}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{000}(u, v, w, \tau) d w d v d u d \tau c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_{020}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) &= -2 \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \sum_{n=1}^{\infty} e_{n\rho}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{n\rho}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) [1 + \varepsilon_{I,V} g_{I,V}(u, v, w, T)] \times \\ & \times [\tilde{I}_{010}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{000}(u, v, w, \tau) + \tilde{I}_{000}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{010}(u, v, w, \tau)] d w d v d u d \tau c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_{001}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) &= -2 \sum_{n=1}^{\infty} e_{n\rho}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{n\rho}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) [1 + \varepsilon_{\rho,\rho} g_{\rho,\rho}(u, v, w, T)] \times \\ & \times \tilde{\rho}_{000}^2(u, v, w, \tau) d w d v d u d \tau c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_{002}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) &= -2 \sum_{n=1}^{\infty} e_{n\rho}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{n\rho}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) [1 + \varepsilon_{\rho,\rho} g_{\rho,\rho}(u, v, w, T)] \times \\ & \times \tilde{\rho}_{001}(u, v, w, \tau) \tilde{\rho}_{000}(u, v, w, \tau) d w d v d u d \tau c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{110}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) &= -2\pi \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nI}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{nI}(-\tau) \int_0^1 s_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(u) \times \\ & \times g_I(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{I}_{i-100}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - 2\pi \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nI}(\vartheta) \times \\ & \times \int_0^{\vartheta} e_{nI}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 s_n(v) \int_0^1 c_n(u) g_I(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{I}_{i-100}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau - 2\pi \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nl}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{nl}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 g_I(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{I}_{i-100}(u, v, w, \tau)}{\partial w} \times \\
 & \times s_n(u) d w d v d u d \tau - 2 \sum_{n=1}^{\infty} c_n(\chi) e_{nl}(\vartheta) c_n(\eta) c_n(\phi) \int_0^{\vartheta} e_{nl}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(v) [1 + \varepsilon_{I, V} \times \\
 & \times g_{I, V}(u, v, w, T)] [\tilde{I}_{100}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{000}(u, v, w, \tau) + \tilde{I}_{000}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{100}(u, v, w, \tau)] d w d v d u d \tau, \\
 & \tilde{V}_{110}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) = -2\pi \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nV}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{nV}(-\tau) \int_0^1 s_n(u) \int_0^1 g_V(u, v, w, T) \times \\
 & \times \frac{\partial \tilde{V}_{i-100}(u, v, w, \tau)}{\partial u} c_n(u) d w c_n(v) d v d u d \tau - 2\pi \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c_n(\eta) e_{nV}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{nV}(-\tau) \times \\
 & \times \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 s_n(v) \int_0^1 c_n(u) g_V(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{V}_{i-100}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau c_n(\phi) - 2\pi \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \sum_{n=1}^{\infty} c_n(\chi) \times \\
 & \times n c_n(\eta) c_n(\phi) \int_0^{\vartheta} e_{nV}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 s_n(u) g_V(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{V}_{i-100}(u, v, w, \tau)}{\partial w} d w d v d u d \tau \times \\
 & \times n c_n(\eta) c_n(\phi) \int_0^{\vartheta} e_{nV}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 s_n(u) g_V(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{V}_{i-100}(u, v, w, \tau)}{\partial w} d w d v d u d \tau \times \\
 & \times e_{nV}(\vartheta) - 2 \sum_{n=1}^{\infty} c_n(\chi) e_{nl}(\vartheta) c_n(\eta) c_n(\phi) \int_0^{\vartheta} e_{nV}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 [1 + \varepsilon_{I, V} g_{I, V}(u, v, w, T)] \times \\
 & \times c_n(v) [\tilde{I}_{100}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{000}(u, v, w, \tau) + \tilde{I}_{000}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{100}(u, v, w, \tau)] d w d v d u d \tau; \\
 & \tilde{I}_{101}(\chi, \eta, \phi, \vartheta) = -2\pi \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nl}(\vartheta) \int_0^{\vartheta} e_{nl}(-\tau) \int_0^1 s_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) \times \\
 & \times g_I(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{I}_{001}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - 2\pi \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nl}(\vartheta) \times \\
 & \times \int_0^{\vartheta} e_{nl}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 s_n(v) \int_0^1 c_n(w) g_I(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{I}_{001}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau - 2\pi \sqrt{\frac{D_{0I}}{D_{0V}}} \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nl}(\mathcal{G}) \int_0^{\mathcal{G}} e_{nl}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 g_l(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{I}_{001}(u, v, w, \tau)}{\partial w} \times \\
 & \times s_n(w) d w d v d u d \tau - 2 \sum_{n=1}^{\infty} c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nl}(\mathcal{G}) \int_0^{\mathcal{G}} e_{nl}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) \times \\
 & \times [1 + \varepsilon_{l,v} g_{l,v}(u, v, w, T)] \tilde{I}_{100}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{000}(u, v, w, \tau) d w d v d u d \tau, \\
 \tilde{V}_{101}(\chi, \eta, \phi, \mathcal{G}) = & -2\pi \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nV}(\mathcal{G}) \int_0^{\mathcal{G}} e_{nV}(-\tau) \int_0^1 s_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) \times \\
 & \times g_V(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{V}_{001}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - 2\pi \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nV}(\mathcal{G}) \times \\
 & \times \int_0^{\mathcal{G}} e_{nV}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 s_n(v) \int_0^1 c_n(w) g_V(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{V}_{001}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau - 2\pi \sqrt{\frac{D_{0V}}{D_{0I}}} \times \\
 & \times \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nV}(\mathcal{G}) \int_0^{\mathcal{G}} e_{nV}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 g_V(u, v, w, T) \frac{\partial \tilde{V}_{001}(u, v, w, \tau)}{\partial w} \times \\
 & \times s_n(w) d w d v d u d \tau - 2 \sum_{n=1}^{\infty} c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nV}(\mathcal{G}) \int_0^{\mathcal{G}} e_{nV}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) \times \\
 & \times [1 + \varepsilon_{l,v} g_{l,v}(u, v, w, T)] \tilde{I}_{000}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{100}(u, v, w, \tau) d w d v d u d \tau; \\
 \tilde{I}_{011}(\chi, \eta, \phi, \mathcal{G}) = & -2 \sum_{n=1}^{\infty} c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nl}(\mathcal{G}) \int_0^{\mathcal{G}} e_{nl}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) \times \\
 & \times \left\{ [1 + \varepsilon_{l,l} g_{l,l}(u, v, w, T)] \tilde{I}_{000}(u, v, w, \tau) \tilde{I}_{010}(u, v, w, \tau) + [1 + \varepsilon_{l,v} g_{l,v}(u, v, w, T)] \times \right. \\
 & \left. \times \tilde{I}_{001}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{000}(u, v, w, \tau) \right\} d w d v d u d \tau, \\
 \tilde{V}_{011}(\chi, \eta, \phi, \mathcal{G}) = & -2 \sum_{n=1}^{\infty} c_n(\chi) c_n(\eta) c_n(\phi) e_{nV}(\mathcal{G}) \int_0^{\mathcal{G}} e_{nV}(-\tau) \int_0^1 c_n(u) \int_0^1 c_n(v) \int_0^1 c_n(w) \times \\
 & \times \left\{ [1 + \varepsilon_{v,v} g_{v,v}(u, v, w, T)] \tilde{V}_{000}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{010}(u, v, w, \tau) + [1 + \varepsilon_{l,v} g_{l,v}(u, v, w, T)] \times \right. \\
 & \left. \times \tilde{I}_{000}(u, v, w, \tau) \tilde{V}_{001}(u, v, w, \tau) \right\} d w d v d u d \tau.
 \end{aligned}$$

Уравнения для исходных приближений распределений концентраций

комплексов радиационных дефектов $\Phi_{\rho 0}(x, y, z, t)$ и поправочных функций к ним $\Phi_{\rho i}(x, y, z, t)$, $i \geq 1$, а также граничные и начальные условия к ним имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{I_0}(x, y, z, t)}{\partial t} &= D_{0\Phi I} \left[\frac{\partial^2 \Phi_{I_0}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{I_0}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{I_0}(x, y, z, t)}{\partial z^2} \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), \\ \frac{\partial \Phi_{V_0}(x, y, z, t)}{\partial t} &= D_{0\Phi V} \left[\frac{\partial^2 \Phi_{V_0}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{V_0}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{V_0}(x, y, z, t)}{\partial z^2} \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); \\ \frac{\partial \Phi_{I_i}(x, y, z, t)}{\partial t} &= D_{0\Phi I} \left[\frac{\partial^2 \Phi_{I_i}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{I_i}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{I_i}(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \\ &+ D_{0\Phi I} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[g_{\Phi I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{I_{i-1}}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[g_{\Phi I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{I_{i-1}}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \right. \\ &\left. + \frac{\partial}{\partial z} \left[g_{\Phi I}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{I_{i-1}}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] \right\}, \quad i \geq 1, \\ \frac{\partial \Phi_{V_i}(x, y, z, t)}{\partial t} &= D_{0\Phi V} \left[\frac{\partial^2 \Phi_{V_i}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{V_i}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{V_i}(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \\ &+ D_{0\Phi V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[g_{\Phi V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{V_{i-1}}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[g_{\Phi V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{V_{i-1}}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \right. \\ &\left. + \frac{\partial}{\partial z} \left[g_{\Phi V}(x, y, z, T) \frac{\partial \Phi_{V_{i-1}}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] \right\}, \quad i \geq 1; \\ \frac{\partial \Phi_{\rho i}(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0, \quad \frac{\partial \Phi_{\rho i}(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = 0, \quad \frac{\partial \Phi_{\rho i}(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \\ \frac{\partial \Phi_{\rho i}(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=L_y} &= 0, \quad \frac{\partial \Phi_{\rho i}(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial \Phi_{\rho i}(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = 0, \quad i \geq 0; \end{aligned}$$

$$\Phi_{\rho 0}(x, y, z, 0) = f_{\Phi \rho}(x, y, z), \quad \Phi_{\rho i}(x, y, z, 0) = 0, \quad i \geq 1.$$

Решения данных уравнений представимо в виде

$$\begin{aligned} \Phi_{\rho 0}(x, y, z, t) = & \frac{1}{L_x L_y L_z} + \frac{2}{L_x L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} F_{n\Phi \rho} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{n\Phi \rho}(t) + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(x) c_n(y) \times \\ & \times c_n(z) e_{\Phi \rho n}(t) \int_0^t e_{\Phi \rho n}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) [k_{I, I}(u, v, w, T) I^2(u, v, w, \tau) - \\ & - k_I(u, v, w, T) I(u, v, w, \tau)] d w d v d u d \tau, \end{aligned}$$

$$\text{где } F_{n\Phi \rho} = \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) f_{\Phi \rho}(u, v, w) d w d v d u, \quad e_{n\Phi \rho}(t) = \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 D_{0\Phi \rho} t}{L^2}\right), \quad c_n(x)$$

$$= \cos(\pi n x / L_x), \quad L^2 = L_x^2 + L_y^2 + L_z^2;$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\rho i}(x, y, z, t) = & -\frac{2\pi}{L_x^2 L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{\Phi \rho n}(t) \int_0^t e_{\Phi \rho n}(-\tau) \int_0^{L_x} s_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) \times \\ & \times g_{\Phi \rho}(u, v, w, T) \frac{\partial \Phi_{I_{\rho i-1}}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{\Phi \rho n}(t) \times \\ & \times \int_0^t e_{\Phi \rho n}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} s_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) g_{\Phi \rho}(u, v, w, T) \frac{\partial \Phi_{I_{\rho i-1}}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y} \times \\ & \times \frac{1}{L_z^2} \sum_{n=1}^{\infty} n c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{\Phi \rho n}(t) \int_0^t e_{\Phi \rho n}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} s_n(w) \frac{\partial \Phi_{I_{\rho i-1}}(u, v, w, \tau)}{\partial w} \times \\ & \times g_{\Phi \rho}(u, v, w, T) d w d v d u d \tau, \quad i \geq 1, \end{aligned}$$

$$\text{где } s_n(x) = \sin(\pi n x / L_x).$$

Уравнения для исходного приближения концентрации примеси $C_{00}(x, y, z, t)$, поправочных функций к ним $C_{ij}(x, y, z, t)$ ($i \geq 1, j \geq 1$), граничные и начальные условия к ним имеют следующий вид

$$\frac{\partial C_{00}(x, y, z, t)}{\partial t} = D_{0L} \frac{\partial^2 C_{00}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_{0L} \frac{\partial^2 C_{00}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_{0L} \frac{\partial^2 C_{00}(x, y, z, t)}{\partial z^2},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{i0}(x, y, z, t)}{\partial t} &= D_{0L} \frac{\partial^2 C_{i0}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_{0L} \frac{\partial^2 C_{i0}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_{0L} \frac{\partial^2 C_{i0}(x, y, z, t)}{\partial z^2} + \\ &+ D_{0L} \frac{\partial}{\partial x} \left[g_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_{i-10}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + D_{0L} \frac{\partial}{\partial y} \left[g_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_{i-10}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ &+ D_{0L} \frac{\partial}{\partial z} \left[g_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_{i-10}(x, y, z, t)}{\partial z} \right], \quad i \geq 1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{01}(x, y, z, t)}{\partial t} &= D_{0L} \frac{\partial^2 C_{01}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_{0L} \frac{\partial^2 C_{01}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_{0L} \frac{\partial^2 C_{01}(x, y, z, t)}{\partial z^2} + \\ &+ D_{0L} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{C_{00}^\gamma(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \frac{\partial C_{00}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + D_{0L} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{C_{00}^\gamma(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \frac{\partial C_{00}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ &+ D_{0L} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{C_{00}^\gamma(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \frac{\partial C_{00}(x, y, z, t)}{\partial z} \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{02}(x, y, z, t)}{\partial t} &= D_{0L} \frac{\partial^2 C_{02}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_{0L} \frac{\partial^2 C_{02}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_{0L} \frac{\partial^2 C_{02}(x, y, z, t)}{\partial z^2} + \\ &+ D_{0L} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[C_{01}(x, y, z, t) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \frac{\partial C_{00}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[C_{01}(x, y, z, t) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \times \right. \right. \\ &\times \left. \frac{\partial C_{00}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[C_{01}(x, y, z, t) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \frac{\partial C_{00}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{C_{00}^\gamma(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \times \right. \\ &\times \left. \frac{\partial C_{01}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{C_{00}^\gamma(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \frac{\partial C_{01}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{C_{00}^\gamma(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \frac{\partial C_{01}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] \left. \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{11}(x, y, z, t)}{\partial t} &= D_{0L} \frac{\partial^2 C_{11}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_{0L} \frac{\partial^2 C_{11}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_{0L} \frac{\partial^2 C_{11}(x, y, z, t)}{\partial z^2} + \\ &+ D_{0L} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[C_{10}(x, y, z, t) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \frac{\partial C_{00}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[C_{10}(x, y, z, t) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \times \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \frac{\partial C_{00}(x, y, z, t)}{\partial y} \Big] + \frac{\partial}{\partial z} \left[C_{10}(x, y, z, t) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \frac{\partial C_{00}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{C_{00}^\gamma(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \times \right. \\ & \times \frac{\partial C_{10}(x, y, z, t)}{\partial x} \Big] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{C_{00}^\gamma(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \frac{\partial C_{10}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{C_{00}^\gamma(x, y, z, t)}{P^\gamma(x, y, z, T)} \frac{\partial C_{10}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[g_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_{01}(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[g_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_{01}(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left[g_L(x, y, z, T) \frac{\partial C_{01}(x, y, z, t)}{\partial z} \right] \right\}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial C_{ij}(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial C_{ij}(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = 0, \quad \frac{\partial C_{ij}(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0,$$

$$\frac{\partial C_{ij}(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = 0, \quad \frac{\partial C_{ij}(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial C_{ij}(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = 0, \quad i \geq 0, j \geq 0;$$

$$C_{00}(x, y, z, 0) = f_C(x, y, z), \quad C_{ij}(x, y, z, 0) = 0, \quad i \geq 1, j \geq 1.$$

Решения данных уравнений с учетом соответствующих граничных и начальных условий представимы в следующей форме

$$C_{00}(x, y, z, t) = \frac{1}{L_x L_y L_z} + \frac{2}{L_x L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t),$$

где $e_{nC}(t) = \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 D_{0c} t}{L^2}\right)$, $F_{nC} = \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) f_C(u, v, w) dw dv du$;

$$\begin{aligned} C_{i0}(x, y, z, t) = & -\frac{2\pi}{L_x^2 L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} s_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} c_n(v) \times \\ & \times g_L(u, v, w, T) \frac{\partial C_{i-10}(u, v, w, \tau)}{\partial u} dw dv du d\tau - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \times \\ & \times \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} s_n(v) \int_0^{L_z} c_n(v) g_L(u, v, w, T) \frac{\partial C_{i-10}(u, v, w, \tau)}{\partial v} dw dv du d\tau - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \times \end{aligned}$$

$$\times F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} g_L(u, v, w, T) \frac{\partial C_{i-10}(u, v, w, \tau)}{\partial w} \times \\ \times s_n(w) d w d v d u d \tau, i \geq 1;$$

$$C_{01}(x, y, z, t) = -\frac{2\pi}{L_x^2 L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} s_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) \times \\ \times \frac{C_{00}^\gamma(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y^2 L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \times \\ \times \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} s_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) \frac{C_{00}^\gamma(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} s_n(w) \frac{C_{00}^\gamma(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial w} d w d v d u d \tau \times \\ \times c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t);$$

$$C_{02}(x, y, z, t) = -\frac{2\pi}{L_x^2 L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} s_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) \times \\ \times C_{01}(u, v, w, \tau) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y^2 L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) \times \\ \times c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y L_z} C_{01}(u, v, w, \tau) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial v} \times \\ \times s_n(v) c_n(w) d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \times \\ \times \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} s_n(w) C_{01}(u, v, w, \tau) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial w} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x^2 L_y L_z} \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t \int_0^{L_x} s_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) C_{01}(u, v, w, \tau) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \times \\ \times e_{nC}(-\tau) \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y^2 L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \times$$

$$\begin{aligned}
 & \times \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} s_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) C_{01}(u, v, w, \tau) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau - \\
 & - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} s_n(w) C_{01}(u, v, w, \tau) \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial w} \times \\
 & \times \frac{C_{00}^{\gamma-1}(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} d w d v d u d \tau c_n(z) e_{nC}(t) - \frac{2\pi}{L_x^2 L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \times \\
 & \times \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} s_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) \frac{C_{00}^\gamma(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{01}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \times \\
 & \times \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} s_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) \frac{C_{00}^\gamma(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{01}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau \times \\
 & \times c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \times \\
 & \times \int_0^{L_z} s_n(w) \frac{C_{00}^\gamma(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{01}(u, v, w, \tau)}{\partial w} d w d v d u d \tau; \\
 C_{11}(x, y, z, t) = & - \frac{2\pi}{L_x^2 L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} s_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) \times \\
 & \times g_L(u, v, w, T) \frac{\partial C_{01}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \times \\
 & \times \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} s_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) g_L(u, v, w, T) \frac{\partial C_{01}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \times \\
 & \times \sum_{n=1}^{\infty} n e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} s_n(w) g_L(u, v, w, T) \frac{\partial C_{01}(u, v, w, \tau)}{\partial w} d w d v d u d \tau \times \\
 & \times F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) - \frac{2\pi}{L_x^2 L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} s_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \times \\
 & \times \int_0^{L_z} c_n(w) \frac{C_{00}^\gamma(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{10}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) \times \\
 & \times c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} s_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) \frac{C_{00}^\gamma(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{10}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} s_n(w) \frac{\partial C_{10}(u, v, w, \tau)}{\partial w} \times \\
 & \times \frac{C_{00}^\gamma(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x^2 L_y L_z} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} s_n(u) \times \\
 & \times \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) C_{10}(u, v, w, \tau) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial u} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y^2 L_z} \times \\
 & \times \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \int_0^{L_y} s_n(v) \int_0^{L_z} c_n(w) C_{10}(u, v, w, \tau) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \times \\
 & \times \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial v} d w d v d u d \tau - \frac{2\pi}{L_x L_y L_z^2} \sum_{n=1}^{\infty} n F_{nC} c_n(x) c_n(y) c_n(z) e_{nC}(t) \int_0^t e_{nC}(-\tau) \int_0^{L_x} c_n(u) \times \\
 & \times \int_0^{L_y} c_n(v) \int_0^{L_z} s_n(w) C_{10}(u, v, w, \tau) \frac{C_{00}^{\gamma-1}(u, v, w, \tau)}{P^\gamma(u, v, w, T)} \frac{\partial C_{00}(u, v, w, \tau)}{\partial w} d w d v d u d \tau.
 \end{aligned}$$

Для цитирования:

Е. Л. Панкратов. О способе увеличения степени интеграции элементов в схеме двухкаскадного усилителя с компенсацией Миллера Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug19/9/text.pdf>
 DOI 10.30898/1684-1719.2019.8.9