

# Оптимизация технологических режимов изготовления биполярных гетеротранзисторов

Е.Л. Панкратов

Нижегородский архитектурно-строительный университет, elp2004@mail.ru

**Аннотация** — В данной работе рассматривается возможность уменьшения глубины залегания сформированных диффузией в полупроводниковой гетероструктуре  $p-n$ -переходов, входящих в состав биполярного транзистора. Показано, что для формирования  $p-n$ -переходов с требуемой глубиной необходимо введение примесей в оптимальные моменты времени.

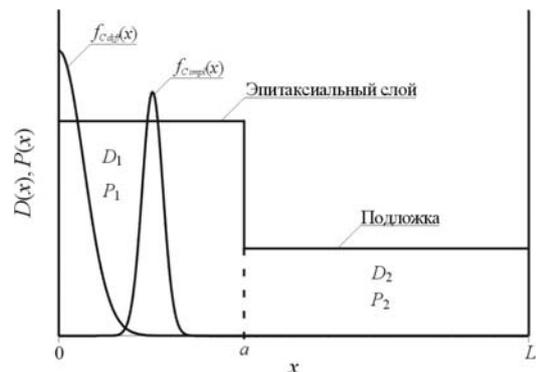
**Ключевые слова** — уменьшение глубины залегания  $p-n$ -переходов; увеличение равномерности распределения примеси в  $p-n$ -переходе; оптимизация формирования  $p-n$ -переходов с помощью диффузии.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит интенсивное уменьшение размеров элементов интегральных схем (ИС) и увеличение частоты переключения таких их элементов, как  $p-n$ -переходы (одиночные и входящие в состав биполярных транзисторов и тиристоры). Для увеличения частоты переключения осуществляется поиск новых материалов с более высокими подвижностями носителей, разработка новых и оптимизация существующих технологических процессов. Для уменьшения размеров элементов ИС также проводится разработка новых и оптимизация существующих технологических процессов. Основной задачей данной работы является определение оптимальных значений параметров технологических процессов (путём использования аналитических методов моделирования технологических процессов.) Однако, стандартные аналитические методы позволяют проводить моделирование только в отдельных частных случаях [1]. Поэтому представляет интерес формирование как можно более общих аналитических методов моделирования технологических процессов.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для уменьшения глубины залегания  $p-n$ -переходов отработанным методом является приповерхностный (лазерный или микроволновый) отжиг примеси в однородном образце. В работах [2]-[4] рассмотрен альтернативный метод увеличения резкости  $p-n$ -переходов. В данных работах показано, что при формировании  $p-n$ -переходов с помощью диффузии и импланта-



**Рис. 1.** ДГ, состоящая из ЭС и П. На данном рисунке приведены начальные (до отжига) распределения введенных соответственно диффузионно и имплантированной примесей.  $D$  и  $P$  соответственно коэффициент диффузии и растворимость примеси в ДГ

ции в двухслойной гетероструктуре (ДГ) (см. рис. 1), состоящей из подложки (П) и эпитаксиального слоя (ЭС), после подбора соответствующим образом материалов ДГ и оптимизации длительности отжига ширина обогащенной примесью области увеличивается, а область с малой концентрацией примеси уменьшается. При этом количество примеси остается постоянным. Таким образом, глубина залегания  $p-n$ -переходов уменьшается. Применение приповерхностного отжига позволяет дополнительно увеличить резкость  $p-n$ -переходов [5],[6]. Из рисунков 2 и 3 следует, что диффузию примеси целесообразно останавливать около границы раздела между слоями ДГ. В этом случае достигается наибольший баланс между увеличением равномерности (уменьшается градиент концентрации в обогащенной примесью области) распределения примеси и уменьшением глубины залегания  $p-n$ -перехода. Соответствующая этому балансу оптимальная длительность отжига, согласно [2]-[6], определяется путем минимизации среднеквадратической ошибки между реальным распределением примеси  $C(x,t)$  и ее прямоугольной аппроксимацией  $\psi(x) = C_0[1(x-R)-1(x-R-l)]$ , где  $C_0$  — значение концентрации в максимуме распределения,  $l$  — ширина распределения примеси,  $R$  — координата максимума распределения ( $R=0$  для сформированного диффузией  $p-n$ -перехода). Величи-

ны  $C_0$  и  $l$  связаны условием нормировки.

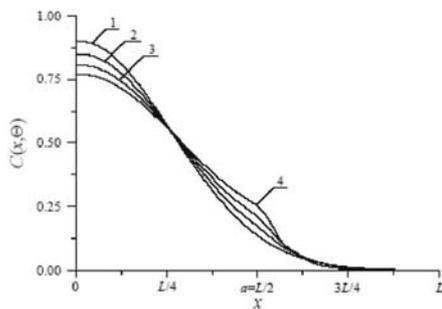


Рис. 2. Распределения примеси в сформированном диффузией  $p-n$ -переходе при фиксированной длительности отжига. Кривая 1 соответствует однородному материалу. Кривые 2-4 соответствуют ДГ при условии, что коэффициент диффузии примеси в ЭС превышает коэффициент диффузии примеси в П. Увеличение номера кривой соответствует увеличению разницы между коэффициентами диффузии примеси в слоях ДГ

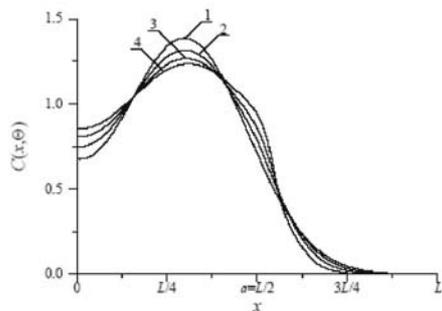


Рис. 3. Распределения примеси в сформированном имплантацией  $p-n$ -переходе при фиксированной длительности отжига. Кривая 1 соответствует однородному материалу. Кривые 2-4 соответствуют ДГ при условии, что коэффициент диффузии примеси в ЭС превышает коэффициент диффузии примеси в П. Увеличение номера кривой соответствует увеличению разницы между коэффициентами диффузии примеси в слоях ДГ. В случае сформированных имплантацией  $p-n$ -переходов толщина ЭС должна быть такой, чтобы за время отжига радиационных дефектов примесь достигла бы границы раздела между слоями ДГ. В противном случае представляет интерес дополнительный отжиг примеси

Целями данного доклада являются: (i) поиск возможностей формирования диффузией или имплантацией более резких  $p-n$ -переходов в гетероструктурах с более равномерным распределением примесей в легированных областях, входящих в состав биполярных транзисторов; (ii) дальнейшее развитие уже сформированной методики моделирования массо- и теплопереноса в процессе формирования более резких  $p-n$ -переходов, входящих в состав биполярных транзисторов, в нелинейных материалах с изменяющимися в пространстве и времени параметрами с целью оптимизации технологических процессов.

### III. МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Для решения поставленных целей рассмотрим две трехслойные гетероструктуры ТГ<sub>1</sub> и ТГ<sub>2</sub> (см. рис. 4 и 5). ТГ<sub>1</sub> состоит из подложки с известным типом проводимости ( $n$  или  $p$ ) и двух ЭС (обозначенных как ЭС<sub>1</sub> и ЭС<sub>2</sub>). В ТГ<sub>1</sub> с помощью диффузии вводится примесь, формирующая в ЭС<sub>1</sub> второй тип проводимости ( $p$  или  $n$ ). На следующем этапе в ЭС<sub>2</sub> вводится вторая примесь, формирующая в нем тип проводимости, совпадающий с типом проводимости подложки ( $n$  или  $p$ ). Далее проводится оптимизация длительности отжига для достижения наибольшего компромисса между увеличением равномерности распределения примеси в обогащенной ею области и увеличением резкости  $p-n$ -перехода. Структура ТГ<sub>2</sub> состоит из подложки с заданным типом проводимости и одного ЭС. В данный ЭС вводится примесь, формирующая в нем второй тип проводимости. Далее ЭС зарастивается покровным слоем (ПС). На заключительном этапе проводится оптимизация длительности отжига для достижения такой же цели, как и в ТГ<sub>1</sub>. В течении отжига часть примеси диффундирует в ПС, что приводит к увеличению равномерности распределения

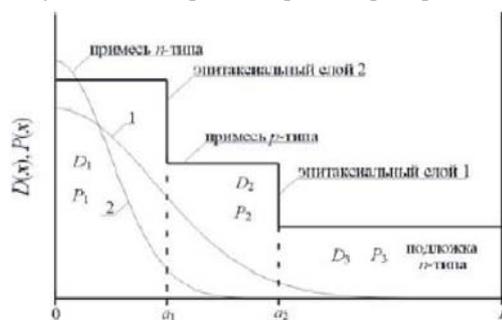


Рис. 4. ТГ, состоящая из двух ЭС и П. Тип проводимости П считается заданным. Кривые 1 и 2 соответствуют начальным (до отжига) распределениям введенной диффузионно примесей  $n$ - и  $p$ -типов.  $D$  и  $P$  соответственно коэффициент диффузии и растворимость примеси в ТГ

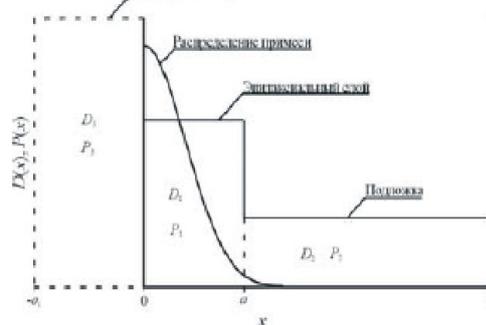


Рис. 5. ТГ, состоящая из ЭС, ПС и П. Тип проводимости П считается заданным. Кривые 1 и 2 соответствуют начальным (до отжига) распределениям введенной диффузионно примесей  $n$ - и  $p$ -типов.  $D$  и  $P$  соответственно коэффициент диффузии и растворимость примеси в ТГ

примеси в обогащенной ею области.

Проведем оценку оптимальных значений длительности отжига примесей, соответствующих наибольшему балансу между уменьшением глубины залегания  $p$ - $n$ -перехода и увеличением равномерности распределения примесей в обогащенных ими областях. Для этого необходимо определить пространственно-временные распределения примесей в гетероструктурах. Искомые распределения примесей найдем путем решения второго закона Фика [1]

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_i \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} \right] \quad (1)$$

с граничными и начальными условиями

$$\left. \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad C_i(x,0) = f_i(x). \quad (2)$$

В уравнении (1) и граничных условиях (2) введены следующие обозначения:  $C_i(x,t)$  – пространственно-временное распределение  $i$ -ой примеси;  $D_i$  – коэффициент диффузии  $i$ -ой примеси, величина которого зависит от свойств примеси в материалах слоев гетероструктуры, скорости прогрева и охлаждения гетероструктуры, а также от пространственно-временного распределения концентрации вводимой примеси. Зависимость коэффициента диффузии примеси от ее концентрации может быть аппроксимирована следующей функцией [1]

$$D_i = D_{Li}(x,T) \prod_{j=1}^3 \left[ 1 + \xi_j \frac{C_j^{\gamma_j}(x,t)}{P_j^{\gamma_j}(x,T)} \right], \quad (3)$$

где  $D_{Li}(x,T)$  – коэффициент диффузии  $i$ -ой примеси без учета сильного легирования;  $P_j(x,T)$  – предел растворимости примеси; определяемый свойствами материала параметр  $\gamma_j$  может принимать целые значения в интервале  $\gamma_j \in [1,3]$  [3]. Далее приведем уравнение (1) к интегро-дифференциальной следующей форме

$$C_i(x,t) = C_i(x,0) + \int_0^t D_{Li}(x,\tau) \prod_{j=1}^3 \left[ 1 + \xi_j \frac{C_j^{\gamma_j}(x,\tau)}{P_j^{\gamma_j}(x,\tau)} \right] d\tau - \int_L^x C_i(v,t) dv + \int_L^x f_i(v) dv \Bigg| \frac{1}{L}. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) определялось во втором приближении метода осреднения функциональных поправок [7]. Для уменьшения количества итерационных шагов данного метода в качестве исходных приближений концентраций примеси выберем решения уравнения (1) с усредненным значением  $D_{0Li}$  коэффициентом диффузии  $D_{Li}(x,T)$  [8]. Полученные аналитические соотношения позволили провести наглядный анализ перераспределения примеси в процессе ее

отжига. Использование численных методов позволяет уточнить полученные результаты. По этой причине, в дополнение к аналитическим, использовались также и численные методы решения уравнения (1).

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

В результате анализа пространственно-временного распределения примесей в ТС1 было показано, что остановка диффузии примесей в окрестности соответствующих границ раздела между слоями гетероструктуры позволяет увеличить резкость  $p$ - $n$ -переходов по сравнению с  $p$ - $n$ -переходами в однородном образце. Одновременно увеличивается равномерность распределения примесей в обогащенных ими областях (см., например, рис. 6). Следует заметить, что оптимальная длительность отжига первой примеси перед началом отжига второй примеси должно определяться с помощью следующего соотношения:  $\Theta = \Theta_1 - \Theta_2$ , где  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  – оптимальные значения длительности отжига в одиночных  $p$ - $n$ -переходах. Далее рассмотрим распределение примеси в ТС2. Несколько примеров распределений примеси приведены на рис. 7. Из данного рисунка следует, что наличие ПС позволяет увеличить равномерность распределения примеси в обогащенной ею области.

Далее воспользуемся введенным в [2]-[6] критерием и определим оптимальное значение длительности отжига, соответствующее наибольшему компромиссу между уменьшением глубины залегания  $p$ - $n$ -перехода и увеличением равномерности распределения примеси в обогащенной ею области. На рис. 8 приведены зависимости безразмерной оптимальной длительности отжига для каждой из примесей в соответствующих одиночных  $p$ - $n$ -переходах от безразмерной толщины эпитаксиального слоя и отношения коэффици-

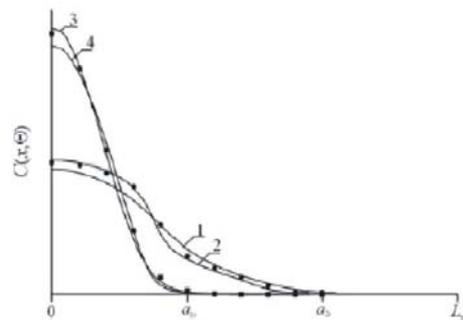


Рис. 6. Расчетные пространственные распределения первого (кривые 1 и 2) и второго (кривые 3 и 4) типов примеси в ТГ1, после отжига длительностью  $\Theta = 0,0055 D_0 / L_2$  при  $a_{1x} = L_x / 4$  и  $a_{2x} = 3L_x / 4$  для различных значений отношений  $D_1 / D_j : D_1 / D_2 = D_2 / D_3 = 1,5$  (кривые 1 и 3) и  $D_1 / D_2 = D_2 / D_3 = 2,5$  (кривые 2 и 4),  $D_0$  – среднее значение коэффициента диффузии. Квадраты и круги соответствуют экспериментальным данным соответственно из [9] и [10] после соответствующей нормировки

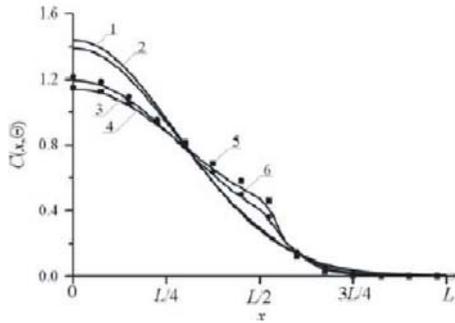


Рис. 7. Распределение примеси в ДГ без покровного слоя после отжига длительностью  $\Theta=0,05L^2/D_0$ . Кривая 1 соответствует однородному материалу. Кривые 2-4 соответствуют ПГ при  $DL_1/DL_2=1.2$ ,  $DL_1/DL_2=4.25$  и  $DL_1/DL_2=11.5$ . Кривые 5 (круги) и 6 (квадраты) соответствуют экспериментальным данным из [9] и [10] после соответствующей нормировки

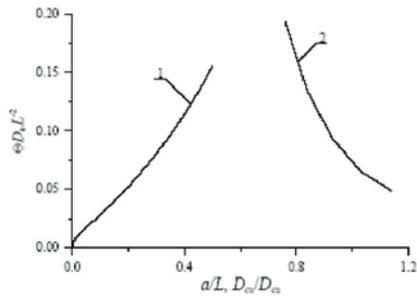


Рис. 8. Зависимость безразмерной оптимальной длительности отжига примеси для одиночного  $p-n$ -перехода от безразмерной толщины эпитаксиального слоя (кривая 1), а также отношения коэффициента диффузии примеси легируемого слоя и коэффициента диффузии примеси того слоя, на котором легируемый слой был сформирован (кривая 2)

ента диффузии примеси легируемого слоя и коэффициента диффузии примеси того слоя, на котором легируемый слой был сформирован.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены способы увеличения равномерности распределения примесей в сформированных диффузией  $p-n$ -переходах, входящих в состав биполярного транзистора, а также увеличения их резкости. Выполненный анализ показал, что обе цели могут быть одновременно достигнуты путем формирования  $p-n$ -переходов в гетероструктурах и оптимизацией длительности отжига примеси. На основе введенного ранее критерия проведена количественная оценка оптимальной длительности отжига, при котором достигается компромисс между увеличением равномерности распределения концентрации примеси в требуемой области структуры и увеличением резкости  $p-n$ -перехода.

Данная работа поддержана внутривузовским грантом на научные исследования и инновационную деятельность Нижегородского архитектурно-строительного государственного университета в 2009 г. (приказ № 241) и грантом президента России (МК-548.2010.2).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. - М.: Радио и связь. 1991. 528 с.
- [2] Pankratov E.L. Influence of spatial, temporal and concentration dependence of diffusion coefficient on dopant dynamics: Optimization of annealing time // Phys. Rev. B. - 2005. - V. 72. - № 7. - P. 075201-075208.
- [3] Pankratov E.L., Spagnolo B. Optimization of impurity profile for p-n-junction in heterostructures // The Eur. Phys. J. B. - 2005. - V. 46. - №1. - P. 15-19.
- [4] Pankratov E.L. Redistribution of dopant, implanted in a multilayer structure for production of a p-n-junction, during annealing radiative defects // Physics Letters A. - 2008. - V. 372. - №11. - P. 1897-1903.
- [5] Pankratov E.L. Redistribution of dopant during microwave annealing of a multiplayer structure for production p-n-junction // J. Appl. Phys. - 2008. - V. 103. - №3. - P. 064320-064330.
- [6] Pankratov E.L. Redistribution of dopant during annealing of radiation defects in a multilayer structure by laser scans for production an implanted-junction rectifiers // Int. J. Nanoscience. - 2008. - V. 7. - № 4-5. - P. 187-197.
- [7] Соколов Ю.Д. Об определении динамических усилий в шахтных подъемных канатах // Прикладная Механика. - 1955. Т. 1. - №1, С. 23-35.
- [8] Pankratov E.L. Dynamics of delta-dopant redistribution during heterostructure growth. // The Eur. Phys. J. B. - 2007. - V. 57. - №3. - P. 251-256.
- [9] Masse G., Djessas K. p-n-junctions in (In,Se)/Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> photovoltaic systems // J. Appl. Phys. - 2003. - V. 94. - № 10. - P. 6985-6987.
- [10] Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Кижаяев С.С. и др. Выращивание и легирование магнием слоев InAs методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений // Физика и техника полупроводников. 2004. - Т. 38. - № 5. - С. 556-562.