

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

А.П. Королев, С.Н. Баршутин

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Лабораторные работы по курсу
«Физико-химические основы технологии электронных средств»
для студентов очной формы обучения
по направлению 211000



Тамбов
• Издательство ГОУ ВПО ТГТУ •
2011

УДК 621.382 (076)
ББК 3852я73-5
К682

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета

Рецензент

Доктор технических наук, профессор ГОУ ВПО ТГТУ
Т.И. Чернышова

Королев, А.П.

К682 Технология изготовления полупроводниковых электронных схем : лабораторные работы / А.П. Королев, С.Н. Баршутин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 16 с. – 100 экз.

Приведены лабораторные работы по основным темам в изучении технологических процессов изготовления полупроводниковых электронных схем.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению 211000 – «Конструирование и технология электронных средств», очной формы обучения.

УДК 621.382 (076)
ББК 3852я73-5

© Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ГОУ ВПО ТГТУ), 2011

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФфуЗИИ

Цель работы: изучить зависимость коэффициента диффузии примеси в кремнии от температуры.

Теоретические сведения

Твердофазная диффузия – это физический процесс массопереноса внутри кристалла, возникающий под влиянием градиента химического потенциала.

В общем случае процесс диффузии характеризуется коэффициентом диффузии, который можно определить как макроскопически, так и микроскопически.

Макроскопически коэффициент диффузии D связывает поток J диффундирующей примеси с градиентом концентрации $\text{grad } C$:

$$J = -D \text{ grad } C.$$

С макроскопической точки зрения коэффициент диффузии равен потоку примеси при градиенте концентрации, равном единице.

Это определение предоставляет теоретическую основу для экспериментального определения коэффициента диффузии с помощью различных методик детектирования диффундирующей примеси [2, 13].

Микроскопическое определение позволяет проанализировать коэффициент диффузии на атомистическом уровне и вычислить его из первых принципов (параметры кристаллической решётки, концентрация дефектов, частотные свойства атомов в кристаллической решётке).

Для определения коэффициента диффузии можно воспользоваться кинетической теорией газов [1, 2, 9].

Согласно Эйнштейну, для любых процессов диффузии средний квадрат смещения частицы $\overline{l^2}$ пропорционален времени t :

$$\overline{l^2} = Dt.$$

В кристаллах за среднее время перехода из одного равновесного положения в другое, равное времени нахождения атома примеси в равновесном состоянии τ :

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right),$$

где τ_0 – постоянная, соизмеримая с периодом собственных колебаний атомов в узлах кристаллической решётки (10^{-13} с); k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Атом смещается на расстояние, равное или кратное периоду кристаллической решётки a :

$$\overline{l^2} = k_0 a^2,$$

поэтому
$$D = \frac{k_0 a^2}{\tau_0} e^{-\frac{\Delta E}{kT}} = D_0 e^{-\frac{\Delta E}{kT}},$$

где $D_0 = \frac{k_0 a^2}{\tau_0}$ называют частотным фактором.

Таким образом, с микроскопической точки зрения коэффициент диффузии есть средний квадрат смещения атома примеси в единицу времени.

Рассмотрим процесс диффузии на микроскопическом уровне для твёрдого раствора внедрения (междоузельный механизм).

Примесный атом берёт тепловую энергию для преодоления барьера $E = 1 - 3$ эВ за счёт флуктуации средней энергии в кристалле ($E_{\text{ср}} = 0,025$ эВ).

Коэффициент диффузии определяется частотой прыжков, которая зависит от свободной энергии ΔG . Эйнштейн и Смолуховский предложили модель для частоты f прыжков:

$$f = z\nu \exp\left(-\frac{\Delta H - T\Delta S}{kT}\right),$$

где ΔH – изменение энтальпии (теплосодержания); ΔS – изменение энтропии; z – координационное число; ν – дебаевская частота (предельная частота колебаний кристаллической решётки).

Если взять вакансионный механизм, то изменение свободной энергии состоит из энергии образования вакансии $\Delta G_{\text{в}} = \Delta H_{\text{в}} - T\Delta S_{\text{в}}$ и энергии перемещения $\Delta G_{\text{пер}} = \Delta H_{\text{пер}} - T\Delta S_{\text{пер}}$:

$$f = z\nu \exp\left(-\frac{\Delta H_{\text{в}} + \Delta H_{\text{пер}}}{kT}\right) \exp\left(\frac{\Delta S_{\text{в}} + \Delta S_{\text{пер}}}{k}\right).$$

Учитывая, что в первой координационной сфере кремния находятся 4 атома и проективное расстояние между ними $a/4$, а также обозначив $\Delta H \equiv \Delta E$, имеем

$$D = v \exp\left(\frac{\Delta S}{k}\right) \frac{a^2}{8} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right),$$

или в форме закона Аррениуса:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right),$$

где $D_0 = v \exp\left(\frac{\Delta S}{k}\right) \frac{a^2}{8}$.

Порядок выполнения работы

1. На основании экспериментальных данных были определены значения коэффициентов диффузии цинка в монокристаллах чистой меди:

T, K	1322	1253	1176	1007	878
$D, m^2/c$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$4,0 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$4,0 \cdot 10^{-15}$	$1,6 \cdot 10^{-16}$

По этим данным рассчитать энергию активации ΔE и частотный фактор D_0 . Построить график в координатах $\ln D - 1000/T$.

Примечание: экспериментальные данные по температурной зависимости коэффициента диффузии в координатах $\ln D - 1/T$ аппроксимируются линейной функцией $y = ax + b$, параметры которой могут быть определены по методу наименьших квадратов [3, 12], где $a = -\Delta E/k$, $b = \ln D_0$.

2. Рассчитать и построить графики температурной зависимости коэффициента диффузии в интервале температур от 300 К до точки плавления:

а) быстродиффундирующих примесей:

– в кремнии: водорода, лития, железа, меди, галлия, золота, серы, серебра, кислорода;

– в германии: лития, меди, серебра, золота, железа, кобальта, висмута, мышьяка;

– в арсениде галлия: меди, серебра, железа, кобальта, марганца.

б) медленнодиффундирующих примесей:

– в кремнии: фосфора, мышьяка, олова, бора, алюминия, индия, галлия;

– в германии: фосфора, мышьяка, олова, бора, алюминия, индия, галлия;

– в арсениде галлия: кадмия, германия, мышьяка, серы, селена, галлия.

Примечание: соответствующие энергии активации и частотные факторы приведены в [14].

Содержание отчёта

1. Расчёт энергии активации ΔE и частотного фактора D_0 . График в координатах $\ln D - 1000/T$.

2. График температурной зависимости коэффициента диффузии в интервале температур от 300 К до точки плавления.

Контрольные вопросы

1. Что такое химический потенциал?
2. Каков физический смысл постоянной Больцмана?
3. Назовите основные механизмы диффузии примесей в твёрдом теле.
4. Почему энергия активации примесей при диффузии по вакансионному механизму больше, чем в случае междоузельного механизма?
5. Возможна ли самодиффузия по эстафетному механизму?
6. Дайте макроскопическое определение коэффициента диффузии.
7. Каков физический смысл коэффициента диффузии с микроскопической точки зрения?
8. От каких параметров зависит частотный фактор в законе Аррениуса?

Лабораторная работа 2

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Цель работы: изучить процесс формирования примесного профиля при ионном легировании.

Теоретические сведения

Процесс ионного легирования заключается в ионизации и ускорении до больших скоростей атомов примеси. Эффективная масса иона в $10^3 - 10^5$ больше массы электрона, поэтому при заданной энергии ион имеет импульс, в $10^2 - 10^4$ раз превышающий импульс электрона.

Ускоренные атомы примеси внедряются в кристаллическую решётку полупроводника под воздействием приобретённого импульса. Проникающая в кристаллическую решётку, ионизированный атом примеси постепенно теряет кинетическую энергию за счёт взаимодействия с электронами и упругих столкновений с атомами полупроводника и примеси, т.е. в результате электронного и ядерного торможения.

Траектория атома примеси до полной остановки представляет собой ломаную линию, характеризует его пробег R , а проекция этого пути на направление падения первичного ионного пучка – проекцию пробега R_p .

В предположении, что полупроводник ориентирован относительно направления ионного пучка, значительно отличающегося от направлений главных кристаллографических осей, результирующие профили легирования примесей близки к распределению Гаусса. При этом для изотропной или аморфной полубесконечной мишени в упрощённой классической модели ЛШШШ (Линхарда–Шарфа–Шиотта) концентрация легирующей примеси зависит от расстояния от поверхности полупроводника:

$$C(x) = C_{\max} \exp\left[-(x - R_p)^2 / \Delta R_p^2\right], \quad (2.1)$$

где $C_{\max} = C_D / (2\pi)^{1/2} \Delta R_p^2$; C_D – число имплантированных атомов на единицу площади, см^{-2} .

Ионы сохраняют большинство свойств исходных атомов. После внедрения в кристаллическую решётку они могут нейтрализоваться или сохранить заряд. При небольших дозах ионы занимают места в кристаллической решётке, становясь примесями замещения, обладающими электрической активностью. При больших дозах большинство ионов останавливается в междоузлиях и становится электрически нейтральными. В частности, при ионном легировании бора имеется большой процент междоузельных ионов, не обладающих электрической активностью.

Селективное легирование выполняют с помощью маскирования, которое достигается использованием экрана соответствующей толщины. Для проведения локального ионного внедрения служат маскирующие экраны из материалов, в которых пробеги ионов существенно меньше, чем в кремнии. К материалам масок относятся диэлектрики (SiO_2 , Si_3N_4 , AlO_3) и металлы (Al и др.). Пробег иона зависит от энергии, следовательно, от энергии ионов зависит и необходимая толщина маски. Окисел SiO_2 обладает хорошими маскирующими

свойствами, у нитрида кремния и алюминия маскирующие характеристики лучше, чем у SiO_2 .

Наиболее старым и испытанным описанием профиля внедрённой примеси, согласно классической теории ЛШШ, является симметричная гауссиана (2.1). Однако уже ранние экспериментальные исследования показали, что данное описание существенно не адекватно экспериментально снятым профилям для большинства ионов как в кремнии, так и в других полупроводниках. Было найдено, что профили большинства внедрённых ионов асимметричны в аморфных и кристаллических мишенях, причем асимметрию можно отразить введением третьего центрального момента распределения σ_2 к двум прежним σ_1 , R_p (рис. 2.1, а, б). Большинство экспериментальных данных по распределениям ионов фосфора, мышьяка, сурьмы хорошо аппроксимируется теоретическими расчётами с использованием третьего центрального момента в распределении типа «сдвоенная гауссиана» – гауссианы с различными дисперсиями на левом и правом плечах распределения (рис. 2.1, б).

Таким образом, в рассматриваемом методе моделирования профиль внедрённой примеси задаётся аналитически с помощью формулы

$$C(x) = \frac{Qf(x)}{\int_0^{\infty} f(x)dx}. \quad (2.2)$$

Здесь Q – доза имплантированной примеси, функция распределения $f(x)$ для фосфора, мышьяка, сурьмы имеет вид сдвоенной полугауссианы (рис. 2.1):

$$f(x) = \begin{cases} \exp\left[-(x - R_p)^2 / 2\sigma_1^2\right], & x \leq R_p; \\ \exp\left[-(x - R_p)^2 / 2\sigma_2^2\right], & x > R_p, \end{cases}$$

а коэффициенты R_p , σ_1 , σ_2 приведены в табл. 1.

Таблица 1

E , кэВ		20	40	60	80	100	200	400	600	800	1000
R_p , нм	P	21,8	44,34	68,94	94,95	122,0	263,6	545,7	810,0	1060,0	1295,0
	As	19,00	31,60	44,32	35,25	72,8	134,7	253,2	344,7	484,6	609,2
	Sb	12,36	20,67	27,84	35,25	41,45	174,1	140,5	210,7	284,3	360,3
σ_1 , нм	P	7,343	15,66	24,7	34,0	43,35	87,54	161,0	220,0	270,0	316,5
	As	9,11	14,44	19,864	25,484	31,50	55,08	86,96	96,56	133,5	157,3
	Sb	2,07	4,21	5,622	25,484	8,53	15,55	29,83	45,33	61,43	77,53
σ_2 , нм	P	15,6	25,8	34,35	41,63	47,8	68,97	81,39	50,0	13,5	15,6
	As	7,957	13,04	17,17	20,17	22,55	39,16	81,36	136,7	161,3	192,6
	Sb	5,925	9,543	12,78	20,17	18,65	31,83	55,85	77,25	96,84	115,0

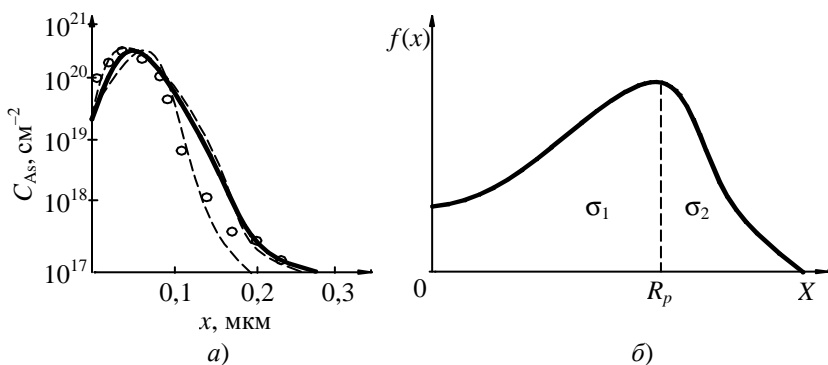


Рис. 2.1. Сравнение моделей ионного легирования мышьяка с энергией 150 кэВ, дозой $3 \dots 10^{15} \text{ см}^{-2}$ через маску SiO_2 толщиной 50 нм (а); распределение типа «двойная гауссиана» (б):

○ – эксперимент; — – распределение Пирсона; ---- – распределение Гаусса

Порядок выполнения работы

1. Для различных (по заданию преподавателя) доз имплантированной примеси рассчитать профили распределения различной примеси (фосфора, мышьяка, сурьмы).
2. Построить зависимость $C = f(x)$ на миллиметровой бумаге или в математическом редакторе.

Содержание отчёта

Графическое изображение профилей легирования полупроводника различными примесями.

Контрольные вопросы

1. Цель ионного легирования.
2. Преимущества ионного легирования над термической диффузией.
3. Какими параметрами процесса легирования можно управлять и как изменение этих параметров может влиять на свойства легированных слоёв?
4. Какие внедренные ионы являются электрически активными, а какие нет?
5. Какие дефекты кристаллической структуры могут появляться при ионном легировании и методы их устранения?

ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

Цель работы: ознакомиться с методами химического травления полупроводниковых и плёночных структур, научиться подбирать растворители для различных материалов и определить время травления.

Теоретические сведения

Механизм растворения определяется химической природой твёрдого тела и растворителя. Растворители имеют неорганическую (кислоты, щёлочи, соли) или органическую (углеводороды, спирты и др.) природу. Они отличаются по химическому составу и концентрации. В зависимости от этих факторов и температуры определяется скорость растворения обрабатываемой поверхности.

Существует три класса растворов: электролиты, неэлектролиты и металлические расплавы. Электролиты – водные растворы солей, кислот, щёлочей и расплавы солей. Неэлектролиты – большинство углеводородов и их производные.

В теории растворов неэлектролитов получены несколько фундаментальных соотношений, определяющих закон растворения в жидкостях (закон Генри, Рауля, Клапейрона–Клаузиуса и др.).

По закону Генри парциальное давление насыщенного пара компонента раствора p_1 пропорционально его мольной доле C_1 в растворе:

$$p_1 = k C_1, \quad (3.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности (константа Генри).

При равновесии раствора с кристаллами растворителя $p_1 = p_{1\text{тг}}^0$ получаем соотношение, называемое уравнение Шредер–Ле Шателье:

$$\ln C_1 = -\frac{\Delta Q_{\text{пл}}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{пл}}} \right), \quad (3.2)$$

где $\Delta Q_{\text{пл}}$ – теплота плавления; R – универсальная газовая постоянная; T – температура перехода из одной фазы в другую; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления.

Для бесконечно разбавленных двух компонентных растворов можно записать

$$C_2 = \frac{(\Delta Q_{\text{пл}} \Delta T_3)}{RT_{\text{пл}}^2}, \quad (3.3)$$

где ΔT_3 – понижение температуры затвердевания раствора. Поскольку $\Delta Q_{\text{пл}}$, R и $T_{\text{пл}}$ – константы то $\Delta T_3 = kC_1$, т.е. понижение температуры затвердевания пропорциональна концентрации растворённого вещества.

Кинетика растворения твёрдых тел.

Для определения максимальной производительности растворения важно знать его кинетические характеристики и их зависимости от различных факторов.

Растворение твёрдого тела происходит в несколько стадий: подвод частиц растворителя к поверхности, контактирование и физико-химическое взаимодействие этих частиц с поверхностью, отвод продуктов реакции от поверхности.

Эффективное время полного растворения вещества определяется из соотношения

$$\tau_{\text{эф}i} = \frac{m}{j_i}, \quad (3.4)$$

где m – количество вещества в данном направлении с единицы поверхности для рассматриваемой стадии; j_i – скорости растворения.

При многостадийной реакции эффективное время определяется той стадией, которая имеет минимальное значение j_{min} . Такую стадию называют лимитирующей:

$$\tau_{\text{эф}\Sigma} = \frac{m}{j_{\text{min}}}, \quad (3.5)$$

Диффузионная кинетика растворения определяется скоростями подвода реагента к поверхности взаимодействия и удаления продуктов реакции. Скорость растворения описывается уравнением

$$j_D = \frac{D}{\delta}(C_S - C_B) = \beta_m(C_S - C_V), \quad (3.6)$$

где D – коэффициент диффузии растворяемого вещества; δ – толщина диффузионного слоя; C_S – концентрация насыщенного раствора у поверхности твёрдого тела; C_V – концентрация растворяемого вещества в объеме раствора; β_m – коэффициент массопереноса реагента.

Существуют два механизма переноса: молекулярная диффузия и конвекция. Решение уравнения (3.6) имеется только для частных случаев. Скорость растворения для вращающегося диска

$$j_{\text{д}} = 0,62 D^{\frac{2}{3}} \nu_{\text{в}}^{-\frac{1}{6}} n^{\frac{1}{2}} C_S, \quad (3.7)$$

где $\nu_{\text{в}}$ – кинематическая вязкость раствора; n – число оборотов диска в 1 с.

Для растворяемой пластины, расположенной вертикально, скорость растворения

$$j_{\text{п}} = 0,7D \left(\frac{\nu_{\text{в}}}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{g}{4\nu_{\text{в}}^2 h} \right)^{\frac{1}{4}} C_S, \quad (3.8)$$

где g – ускорение силы тяжести; h – высота пластины.

Скорость растворения твёрдых тел с учётом двух основных стадий (поверхностной реакции и диффузии)

$$\frac{1}{j_{\text{эф}}} = \frac{1}{j_R} + \frac{1}{j_D} = \frac{1}{K_R C_x \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} + \frac{1}{\beta_m (C_S - C_V)}, \quad (3.9)$$

Поскольку в начале концентрация растворённого вещества $C_V = 0$, то скорость будет максимальной. Со временем C_V увеличивается и скорость растворения падает.

Толщина диффузионного слоя δ характеризует условие растворения у поверхности. Для вертикально стоящей пластины

$$\delta_{\text{п}} = \frac{1}{0,7} \left(\frac{\nu_{\text{в}}}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{g}{4\nu_{\text{в}}^2 h} \right)^{\frac{1}{4}} \left(1 - \frac{C_V}{C_S} \right). \quad (3.10)$$

Оптимальное условие растворения, когда $j_R = j_D$. Температура, при которой $j_R = j_D$, называется критической $T_{\text{кр}}$. При этом критическая энергия активации

$$E_{a \text{ кр}} = -2,3RT \cdot \lg \left(\frac{0,7D^{\frac{3}{4}} g^{\frac{1}{4}} C_S}{h^{\frac{1}{4}} \nu_{\text{в}}^{\frac{1}{4}} C_x f} \right), \quad (3.11)$$

$$C_x = \left(\frac{N_A \rho}{M} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3.12)$$

$$f = \frac{k \Theta_D}{h}, \quad (3.13)$$

где N_A – число Авогадро; ρ – плотность металла; M – молярная масса; k – постоянная Больцмана; Θ_D – характеристическая дебаевская температура; h – постоянная Планка.

В технологии производства ЭС обработка поверхности твёрдых тел растворами используются для вытравливания заданного профиля или конфигурации.

Травление делится на полирующее и селективное. Полирующее используется для полировки поверхности и вытравливания различных рисунков. Селективное – для вытравливания заданной конфигурации в слоях твёрдого тела. При полирующем травлении скорость травления не зависит от энергии активации, при селективном зависит. За счёт различия в энергиях активации удаётся растворить отдельные материалы, не затрагивая других. Скорость травления определяется из соотношения

$$j_{\text{эф}} = \frac{\beta_m K_R C_S C_x \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right]}{\beta_m C_S + \beta_m K_R C_S C_x \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right]}, \quad (3.14)$$

при $\beta_m C_S \gg \beta_m K_R C_S C_x \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right]$ скорость зависит от энергии активации – травление будет селективным.

При $\beta_m C_S \ll \beta_m K_R C_S C_x \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right]$ – скорость не зависит от энергии активации (полирующее травление).

Порядок выполнения

1. По заданию приготовить реактивы и материалы для травления. Получить стеклянную подложку с нанесённой на неё медной пленкой. Приготовить раствор соляной кислоты с концентрацией $C = 1$ моль/л.

2. Острым металлическим предметом очистить небольшой участок (1×5 мм) от плёнки. Поместить подложку на предметный столик интерферометра МИИ-4, в окуляр найти границу между участком очищенным от пленки и с плёнкой. Сориентировать границу перпендикулярно интерференционным линиям и измерить сдвиг интерференционной линии a и расстояние между соседними линиями b . Затем по формуле

$$h = 0,26 \frac{a}{b}$$

рассчитать толщину пленки h .

3. Измерить температуру растворителя (реактива).
4. Погрузить вертикально пластину в раствор и засечь время травления.
5. Из полученных результатов по соотношению (3.14) определить $E_{a\text{кр}}$ и тип травления (полирующее или селективное).

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать интерференционный рисунок с указанием величины сдвига интерференционных линий, расчёт толщины пленки и скорости химического травления.

Контрольные вопросы

1. Какую природу могут иметь растворители.
2. Какие классы растворов вы знаете.
3. Уравнение Шредер–Ле Шателье
4. Этапы растворения твёрдого тела.
5. Диффузионная скорость растворения (общая, для вертикальной пластины, для вращающегося диска).
6. От чего зависит тип травления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтакс, Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках / Б.И. Болтакс. – Л. : Наука, 1972. – 384 с.
2. Болтакс, Б.И. Диффузия в полупроводниках / Б.И. Болтакс. – М. : Физматгиз, 1961. – 462 с.
3. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука, 1986. – 320 с.
4. Бубенников, А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и интегральных схем / А.Н. Бубенников. – М. : Высшая школа, 1989. – 320 с.
5. Бубенников, А.Н. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС / А.Н. Бубенников, А.Д. Садовников. – М. : Радио и связь, 1991. – 288 с.
6. Кремниевые планарные транзисторы / под ред. Я.А. Федотова. – М. : Сов. радио, 1973. – 336 с.
7. Курносков, А.И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных схем / А.И. Курносков, Б.Б. Юдин. – М. : Высшая школа, 1986. – 388 с.

8. Моделирование полупроводниковых приборов и технологических процессов. Последние достижения. – М. : Радио и связь, 1989. – 289 с.

9. МОП – СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов. – М. : Радио и связь, 1988. – 496 с.

10. Паометс, Б.Т. Расчёт профиля распределения бора при многоэтапной диффузии в окислительных средах – Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы / Б.Т. Паометс. – 1978. – Вып. 3 (121) – С. 41 – 48.

11. Пичугин, И.Г. Технология полупроводниковых приборов / И.Г. Пичугин, Ю.Н. Таиров. – М. : Высшая школа, 1984. – 288 с.

12. Плис, А.И. Лабораторный практикум по высшей математике / А.И. Плис, Н.А. Сливина. – М. : Высшая школа, 1994. – 416 с.

13. Технология СБИС : в 2-х кн. / под ред. Зи С. – М. : Мир, 1986. – Т. 1. – 404 с. ; Т. 2. – 453 с.

14. Черняев, В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров / В.Н. Черняев. – М. : Радио и связь, 1987. – 464 с.

15. Королев, А.П. Автоматизация технологического проектирования РЭС / А.П. Королев, С.Н. Баршутин. – Тамбов : ТГТУ, 2004. – 144 с.

Учебное издание

КОРОЛЕВ Андрей Павлович,
БАРШУТИН Сергей Николаевич

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Лабораторные работы

Редактор З.Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию И.В. Евсеева

Подписано в печать 10.05.2011
Формат 60×84/16. 0,93 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 190

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14