

М. А. Королёв, Т. Ю. Крупкина,  
М. А. Ревелева

---

# Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем

Под общей редакцией  
члена-корр. РАН профессора Ю. А. Чаплыгина

Часть 1

Технологические процессы изготовления  
кремниевых интегральных схем  
и их моделирование

4-е издание, электронное

Рекомендовано

Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию  
в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности 210104 (200100)  
«Микроэлектроника и твердотельная электроника»



Москва  
Лаборатория знаний  
2020

УДК 621.382.049.77.002(07)

ББК 32.852

К68

**К68** **Технология**, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : в 2 ч. Ч. 1 : Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М. А. Королёв, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева ; под общ. ред. чл.-корр. РАН проф. Ю. А. Чаплыгина. — 4-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020 — 400 с. — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10".— Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-814-8 (Ч. 1)

ISBN 978-5-00101-813-1

Дано представление об основных маршрутах изготовления и конструкциях изделий микроэлектроники на основе кремния. Рассмотрены основные процессы создания интегральных схем: химическая и плазмохимическая обработка материала; введение примесей в кремний; выращивание окисла кремния и его охлаждение; литография; создание металлических соединений и контактов. Приведены методы моделирования процессов распределения примесей в полупроводниковых структурах.

Для студентов и аспирантов, специализирующихся в области микроэлектроники и полупроводниковых приборов, а также специалистов.

УДК 621.382.049.77.002(07)

ББК 32.852

**Деривативное издание на основе печатного аналога:** Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : в 2 ч. Ч. 1 : Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М. А. Королёв, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева ; под общ. ред. чл.-корр. РАН проф. Ю. А. Чаплыгина. — 3-е изд. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — 397 с. : ил. — ISBN 978-5-9963-0135-5 (Ч. 1); ISBN 978-5-9963-0134-8.

*Работа выполнена в рамках реализации Приоритетного национального проекта «Образование» и направлена на разработку Инновационной образовательной программы «Современное профессиональное образование для Российской инновационной системы в области электроники»*

**В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации**

ISBN 978-5-00101-814-8 (Ч. 1)

ISBN 978-5-00101-813-1

© МИЭТ, 2007

© Лаборатория знаний, 2015

# Оглавление

<b>Предисловие редактора</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>Введение</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>Раздел 1. Основные технологические процессы изготовления кремниевых ИС</b> . . . . .	<b>21</b>
<b>1. Поверхностная обработка полупроводниковых материалов</b> . . . . .	<b>23</b>
1.1. Кремний — основной материал для полупроводниковых интегральных микросхем . . . . .	23
1.2. Механическая обработка кремниевых пластин . . . . .	26
Очистка поверхности пластин по- сле механической обработки . . . . .	28
Методы контроля чистоты поверхности пластин. . . . .	29
1.3. Химическое травление кремния . . . . .	31
Кинетика травления кремния . . . . .	31
Две теории саморастворения кремния . . . . .	34
Зависимость скорости травления от свойств используемых материалов . . . . .	35
Влияние примесей . . . . .	36
Дефекты структуры полупроводника . . . . .	36
Ориентация поверхности полупроводника. . . . .	37
Концентрация компонентов травителя . . . . .	37
Температура раствора. . . . .	38
Химико-динамическая полировка. . . . .	39
Анизотропное травление . . . . .	40
Травление окисла и нитрида кремния . . . . .	42
Промывка пластин в воде . . . . .	43
Очистка пластин в растворах на основе перекиси водорода . . . . .	44

1.4. Плазмохимическое травление кремния . . . . .	45
Классификация процессов ионно-плазменного травления . . . . .	46
Кинетика изотропного травления кремния . . . . .	47
<i>Образование радикалов в газоразрядной плазме. . . . .</i>	48
<i>Взаимодействие радикалов с атомами материалов. . . . .</i>	49
Травление двуокиси и нитрида кремния . . . . .	50
Факторы, влияющие на скорость ПХТ материалов . . . . .	51
Анизотропия и селективность травления . . . . .	54
<b>2. Диэлектрические пленки на кремнии . . . . .</b>	<b>58</b>
2.1. Термическое окисление кремния . . . . .	58
Окисление кремния при комнатной температуре . . . . .	58
Физический механизм роста окисла при высокой температуре . . . . .	60
Структура окисла кремния . . . . .	61
Модель Дила–Гроува . . . . .	63
Кинетика роста окисла кремния . . . . .	66
<i>Влияние температуры окисления. . . . .</i>	66
<i>Влияние парциального давления окислителя. . . . .</i>	68
<i>Влияние ориентации подложки. . . . .</i>	69
<i>Влияние типа и концентрации примеси в подложке. . . . .</i>	70
Оборудование для окисления кремния . . . . .	72
2.2. Методы контроля параметров диэлектрических слоев . . . . .	73
Контроль толщины слоя диэлектрика . . . . .	73
Контроль дефектности пленок . . . . .	75
<i>Метод электролиза воды . . . . .</i>	76
<i>Электрографический метод. . . . .</i>	76
<i>Метод электронной микроскопии. . . . .</i>	77
<i>Метод короткого замыкания. . . . .</i>	77
2.3. Контроль заряда структуры полупроводник — диэлектрик . . . . .	78
2.4. Осаждение диэлектрических пленок . . . . .	82
Осаждение пленок диоксида кремния . . . . .	83
Осаждение нитрида кремния . . . . .	87
Перспективы развития методов осаждения диэлектрических пленок . . . . .	89
<b>3. Введение примесей в кремний или легирование     полупроводниковых материалов . . . . .</b>	<b>91</b>
3.1. Диффузия примесей в полупроводник . . . . .	91
Механизмы диффузии примесей . . . . .	92

Диффузия по вакансиям. Коэффициент диффузии . . .	94
Распределение примесей при диффузии. . . . .	97
Диффузия из бесконечного источника. . . . .	98
Диффузия из ограниченного источника. . . . .	100
Первый этап диффузии. . . . .	103
Источники примесей. . . . .	105
<i>Источники донорной примеси. . . . .</i>	<i>106</i>
<i>Источники акцепторной примеси. . . . .</i>	<i>109</i>
<i>Поверхностный источник примеси. . . . .</i>	<i>111</i>
Второй этап диффузии. . . . .	111
<i>Перераспределение примеси при диффузии</i> <i>в окисляющей среде. . . . .</i>	<i>112</i>
Контроль параметров диффузионных слоев. . . . .	114
3.2. Эпитаксия. . . . .	116
Рост эпитаксиальных пленок. . . . .	116
Методы получения эпитаксиальных слоев	
кремния. . . . .	118
<i>Хлоридный метод. . . . .</i>	<i>119</i>
<i>Пиролиз моносилана. . . . .</i>	<i>122</i>
Гетероэпитаксия кремния на диэлектрических	
подложках. . . . .	123
Перераспределение примесей при эпитаксии. . . . .	126
3.3. Ионное легирование полупроводников. . . . .	127
Характеристики процесса имплантации. . . . .	128
Пробег ионов. . . . .	129
Дефекты структуры в полупроводниках при	
ионном легировании. . . . .	135
<i>Основные типы дефектов, образующихся при ионном</i> <i>легировании полупроводника. . . . .</i>	<i>136</i>
Распределение внедренных ионов. . . . .	140
Распределение примеси в интегральных	
структурах. . . . .	143
<i>Распределение примеси в двухслойной мишени. . . . .</i>	<i>143</i>
<i>Влияние распыления полупроводника. . . . .</i>	<i>145</i>
Отжиг легированных структур и радиационно-	
ускоренная диффузия. . . . .	146
<i>Распределение примеси при термическом отжиге. . . . .</i>	<i>147</i>
<i>Низкотемпературный отжиг. . . . .</i>	<i>149</i>
Оборудование для ионного легирования. . . . .	150
Ионные источники. . . . .	152
4. Технология литографических процессов. . . . .	155
4.1. Классификация процессов литографии. . . . .	155
4.2. Схема фотолитографического процесса. . . . .	156

4.3. Фоторезисты . . . . .	158
Позитивные фоторезисты . . . . .	158
Негативные фоторезисты . . . . .	159
Основные свойства фоторезистов . . . . .	161
4.4. Фотошаблоны . . . . .	163
4.5. Технологические операции фотолитографии . . . . .	164
Контактная фотолитография . . . . .	165
Искажение рисунка при контактной фотолитографии . . . . .	167
Литография в глубокой ультрафиолетовой области . . . . .	168
Проекционная фотолитография . . . . .	169
Электронолитография . . . . .	170
Рентгенолитография . . . . .	174
Электронорезисты . . . . .	177
<b>5. Металлизация . . . . .</b>	<b>179</b>
5.1. Свойства пленок алюминия . . . . .	180
Электродиффузия в пленках алюминия . . . . .	182
Методы получения металлических пленок . . . . .	184
5.2. Создание омических контактов к ИС . . . . .	187
5.3. Использование силицидов металлов . . . . .	193
5.4. Многослойная разводка . . . . .	195
<b>Раздел 2. Математическое моделирование технологических процессов . . . . .</b>	<b>197</b>
<b>1. Моделирование процесса ионной имплантации . . . . .</b>	<b>199</b>
1.1. Теория торможения ионов . . . . .	199
1.2. Вычисление пробега иона и его проекции . . . . .	210
1.3. Профили распределения внедренных ионов . . . . .	213
Нормальное распределение . . . . .	213
Асимметричное распределение Гаусса . . . . .	215
Распределение Пирсона–IV . . . . .	216
Диффузионное приближение . . . . .	218
Расчет распределения примеси с использованием уравнения Больцмана . . . . .	220
Метод Монте-Карло . . . . .	221
Эффект каналирования . . . . .	222
Аппроксимации распределения ионов, учитывающие эффект каналирования . . . . .	224

1.4. Распределение примеси в интегральных структурах . . . . .	225
Системы координат при моделировании ионной имплантации . . . . .	225
Учет распыления мишени . . . . .	228
Боковое уширение профиля легирования . . . . .	230
1.5. Радиационные дефекты . . . . .	232
Природа дефектов. Аморфизация . . . . .	232
Распределение дефектов по глубине . . . . .	236
1.6. Быстрый термический отжиг . . . . .	238
Низкотемпературный отжиг . . . . .	242
Заключение . . . . .	243
<b>2. Моделирование процесса термического окисления кремния . . . . .</b>	<b>244</b>
2.1. Особенности окисления в реальном технологическом процессе . . . . .	246
2.2. Начальный этап окисления. Тонкие пленки . . . . .	248
Упругие напряжения и переходный слой . . . . .	249
Структурные модели . . . . .	254
Модели на основе учета упругих напряжений . . . . .	255
Кинетические модели . . . . .	260
Электрохимические модели . . . . .	261
Окисление в присутствии хлора или влаги . . . . .	263
2.3. Окисление поликремния . . . . .	265
2.4. Двумерные модели окисления . . . . .	269
Основные этапы численного моделирования процесса окисления . . . . .	269
Аналитические модели двумерного окисления . . . . .	272
Численное моделирование двумерного окисления . . . . .	276
Заключение . . . . .	280
<b>3. Моделирование процесса диффузии . . . . .</b>	<b>282</b>
3.1. Особенности диффузионного процесса в кремнии . . . . .	282
3.2. Уравнения диффузии . . . . .	285
Коэффициент самодиффузии кремния . . . . .	289
Коэффициент диффузии примесей по вакансиям . . . . .	295
Вакансионно-междоузельный механизм диффузии . . . . .	298
Обобщенная модель связанной диффузии . . . . .	301
3.3. Примесная диффузия в условиях квазиравновесия . . . . .	302

Кластеризация и преципитация примеси . . . . .	311
3.4. Неравновесная диффузия (диффузия фосфора) . . . . .	316
Феноменологические вакансионные модели . . . . .	318
Аналитическая модель . . . . .	320
Модель просачивания . . . . .	323
3.5. Совместная диффузия двух примесей . . . . .	326
3.6. Диффузия в поликристаллическом кремнии . . . . .	331
3.7. Численное моделирование диффузии . . . . .	335
Заключение . . . . .	337
<b>4. Диффузия примеси в окисляющей среде . . . . .</b>	<b>339</b>
4.1. Ускорение и замедление диффузии при окислении . . . . .	339
Дефекты упаковки . . . . .	339
Генерация дефектов упаковки . . . . .	341
Обобщенная диффузионная модель . . . . .	346
4.2. Сегрегация примесей на границе кремний–окисел . . . . .	350
4.3. Численное моделирование диффузии и окисления . . . . .	352
Основные уравнения процесса . . . . .	352
Стационарные условия . . . . .	354
Движущаяся граница раздела Si–SiO <sub>2</sub> . . . . .	356
Заключение . . . . .	357
<b>5. Моделирование травления и осаждения слоев . . . . .</b>	<b>359</b>
5.1. Особенности технологических операций . . . . .	359
5.2. Алгоритм струны в моделировании травления и осаждения . . . . .	361
5.3. Модификации алгоритма струны . . . . .	364
5.4. Моделирование процесса осаждения . . . . .	370
5.5. Параметры численных моделей для расчета травления и осаждения . . . . .	374
<b>6. Моделирование процесса фотолитографии . . . . .</b>	<b>380</b>
6.1. Основные этапы численного моделирования фотолитографии . . . . .	380
6.2. Расчет изображения на поверхности фоторезиста . . . . .	383
6.3. Расчет интенсивности освещения в пленке фоторезиста . . . . .	386
6.4. Моделирование процесса проявления . . . . .	389
6.5. Анализ чувствительности критических размеров . . . . .	392
<b>Литература . . . . .</b>	<b>397</b>