

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

—  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

*А. В. Филимонов* *А. Н. Андронов* *А. Б. Устинов*

# СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИИ

*Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненным группам специальностей и направлений подготовки 16.00.00 «Физико-технические науки и технологии» в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки бакалавров 16.03.01 «Техническая физика»*



**ПОЛИТЕХ-ПРЕСС**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Санкт-Петербург  
2019

УДК 621.3.049.77(075.8)  
ББК 32.844.1:32.844.2я73  
Ф53

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, заведующий Лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук *С. Б. Вахрушев*  
Доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физической электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого *А. Э. Фотиади*

*Филимонов А. В. Специальные вопросы микро- и нанотехнологии : учеб. пособие / А. В. Филимонов, А. Н. Андронов, А. Б. Устинов. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 236 с.*

Соответствует содержанию рабочей программы дисциплины «Специальные вопросы микро- и нанотехнологии» направления бакалаврской подготовки 16.03.01 «Техническая физика».

Приведены физические принципы, лежащие в основе технологии производства полупроводниковых электронных приборов. Представлен обзор современных проблем микро- и наноэлектроники, изложены основные физические подходы к дальнейшей миниатюризации электронных устройств.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Техническая физика». Может быть использовано обучающимися по направлению «Электроника и микроэлектроника», а также аспирантами и специалистами, работающими в экспериментальной технической физике. Пособие может быть полезно в системах повышения квалификации и учреждениях дополнительного профессионального образования.

Табл. 4. Ил. 109. Библиогр.: 36 назв.

Печатается по решению

Совета по издательской деятельности Ученого совета

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ISBN 978-5-7422-6569-6  
doi:10.18720/SPBPU/2/id19-111

© Филимонов А. В., Устинов А. Б., 2019  
© Андронов А. Н. (наследники), 2019  
© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	8
Введение .....	12
1. История развития электроники и вычислительной техники .....	16
1.1. Доэлектронная эра .....	16
1.2. Изобретение электронной лампы .....	27
1.3. Электронные ЭВМ на лампах .....	28
1.4. Изобретение транзистора .....	29
1.5. Отечественные компьютеры на транзисторах .....	34
1.6. Изобретение интегральной микросхемы .....	35
1.7. Создание компании Intel, изобретение микропроцессора и персонального компьютера .....	39
1.7.1. Первые микропроцессоры Intel .....	40
1.7.2. Создание и разработки фирмы Apple .....	42
1.7.3. Разработка IBM PC, MS DOS Microsoft, Macintosh .....	45
1.8. Закон Мура .....	49
2. Основы планарной технологии .....	53
2.1. Изобретение планарной технологии .....	53
2.2. Структура и топология интегральной схемы в КМОП-технологии ..	55
2.3. Технологическая схема кремниевой планарной технологии .....	58
2.3.1. Подготовка кремниевых подложек .....	58
2.3.2. Основные технологические циклы при формировании слоев .....	70
2.3.3. Завершающие операции при производстве интегральных схем .....	80
2.3.4. Технологический маршрут изготовления КМОП-инвертора .....	83
3. Масштабирование полевых транзисторов в интегральных схемах .....	86
3.1. Основные принципы масштабирования (закон Деннарда) .....	89
3.2. Фундаментальные ограничения на масштабирование МОП-транзисторов .....	95

3.3. Проблемы, связанные со свойствами материалов и структурой приборов .....	104
3.4. Эффекты короткого канала в МОП-транзисторе .....	108
3.4.1. Механизмы паразитных утечек в МОП-транзисторе .....	110
3.4.2. Эффекты короткого канала и их проявления.....	114
3.4.3. Способы борьбы с эффектами короткого канала.....	118
4. Утечки через подзатворный окисел .....	123
4.1. Проблемы, связанные с уменьшением толщины подзатворного окисла .....	123
4.2. Использование окислов с высокой диэлектрической проницаемостью .....	128
5. Технология «кремний-на-изоляторе» и ее разновидности .....	137
5.1. Основные преимущества технологии «кремний-на-изоляторе» .....	137
5.2. Технология создания структур кремния-на-изоляторе .....	140
5.2.1. Кремний-на-сапфире (КНС) .....	140
5.2.2. Создание скрытого окисла ионной имплантацией .....	148
5.2.3. Твердофазное сращивание пластин .....	157
5.2.4. Технология управляемого скола .....	164
5.2.5. Окисление пористого кремния .....	178
5.2.6. Кремний-на-пустоте.....	181
5.3. Способы повышения подвижности носителей .....	187
6. Трехмерные МОП-транзисторы.....	190
6.1. 2D- и 3D-структуры FinFET-транзисторов .....	190
6.2. Основные преимущества многозатворных транзисторов .....	193
7. Развитие технологии межэлементных соединений и упаковки СБИС .....	195
7.1. Технология межэлементных соединений .....	195
7.1.1. Структура многослойного стека с межсоединениями.....	197
7.1.2. Достоинства и недостатки алюминиевых межсоединений .....	200
7.1.3. Особенности медных соединений .....	202
7.1.4. Двойная «дамасская» технология для медных проводников .....	203
7.1.5. Требования к изоляции медных проводников .....	205
7.2. Технология упаковки интегральных схем .....	207
8. Фотолитография.....	212
8.1. Основные типы фоторезистов.....	212
8.2. Фотолитография в ультрафиолетовом диапазоне .....	214
8.3. Иммерсионная фотолитография .....	217

8.4. Многократная литографическая печать .....	218
8.5. Электронно-лучевая литография .....	219
9. Углеродная наноэлектроника .....	223
9.1. Углеродные нанотрубки .....	223
9.2. Классификация углеродных нанотрубок.....	226
9.3. Спиральные нанотрубки .....	228
9.3. Возможные области применения углеродных нанотрубок.....	230
Заключение.....	232
Библиографический список .....	234