

Ф. Ф. Комаров  
С. В. Константинов

# ИОННАЯ И ФОТОННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

*Допущено  
Министерством образования Республики Беларусь  
в качестве учебного пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по специальностям  
«Физическая электроника», «Радиофизика»*



Минск  
«Вышэйшая школа»  
2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ</b> . . . . .	3
1.1. Оборудование для ионного внедрения . . . . .	8
1.2. Системы автоматизированного управления установками ионной имплантации . . . . .	15
<b>ГЛАВА 2. ЛАГРАНЖИАН ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ЧАСТИЦ</b> . . . . .	19
2.1. Приведенная масса . . . . .	20
<b>ГЛАВА 3. КЛАССИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ИОНА В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛЕ</b> . . . . .	22
<b>ГЛАВА 4. ПОТЕНЦИАЛЫ ИОННО-АТОМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ</b> . . . . .	26
<b>ГЛАВА 5. СЕЧЕНИЯ РАССЕЯНИЯ</b> . . . . .	32
5.1. Сечение упругого торможения . . . . .	34
<b>ГЛАВА 6. СЕЧЕНИЕ НЕУПРУГОГО ТОРМОЖЕНИЯ</b> . . . . .	37
<b>ГЛАВА 7. ПРОБЕГИ ИОНОВ. ПРОФИЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ И ВЫДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ</b> . . . . .	41
<b>ГЛАВА 8. МЕТОД МОМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ</b> . . . . .	45
8.1. Высокоэнергетическая ионная имплантация . . . . .	54
8.1.1. Пространственное распределение внедренных атомов и первичных радиационных дефектов при МэВ-й имплантации . . . . .	57
8.1.2. Пространственное распределение внедренных атомов и радиационного повреждения при $E \geq 1$ МэВ/а.е.м. . . . .	60
8.1.3. Особенности дефектообразования в кремнии при высокоэнергетической ионной имплантации. . . . .	64
8.1.4. Формирование однородно-легированных толстых слоев . . . . .	70
8.1.5. Создание скрытых изолирующих и проводящих слоев на глубине кристалла. . . . .	74
8.1.5.1. Создание вертикальной изоляции в кремнии и скрытых проводящих слоев . . . . .	75
8.1.5.2. Создание горизонтальной изоляции на $A^3B^5$ -полупроводниках . . . . .	89

8.1.5.3. «Smart-cut»-процесс формирования КНИ-структур. . . . .	92
8.1.5.4. Ионная имплантация для создания наночастиц и квантовых точек . . . . .	98
8.1.5.5. Процессы трекообразования при облучении твердых тел ионами высоких энергий. Применение трековой технологии . . . . .	104
<b>ГЛАВА 9. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБЕГОВ ИОНОВ В ДВУХСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ . . . . .</b>	<b>120</b>
<b>ГЛАВА 10. ИМПЛАНТАЦИЯ АТОМАМИ ОТДАЧИ . . . . .</b>	<b>124</b>
<b>ГЛАВА 11. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ И РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ЧЕРЕЗ ОКНА В МАСКЕ . . . . .</b>	<b>127</b>
<b>ГЛАВА 12. ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА КАНАЛИРОВАНИЯ НА ПРОБЕГИ ИОНОВ. . . . .</b>	<b>133</b>
<b>ГЛАВА 13. ПРОФИЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ПРИМЕСЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ ФЛЮЕНСАХ ОБЛУЧЕНИЯ . . . . .</b>	<b>141</b>
13.1. Формулы для расчета коэффициента распыления. . . . .	145
13.2. Диффузионное перераспределение примеси. . . . .	148
<b>ГЛАВА 14. КАСКАДЫ АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ . . . . .</b>	<b>153</b>
<b>ГЛАВА 15. СООТНОШЕНИЕ КАСКАДНОЙ ТЕОРИИ И ЭКСПЕРИМЕНТА . . . . .</b>	<b>157</b>
<b>ГЛАВА 16. ТИПЫ ИОННО-РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ . . . . .</b>	<b>160</b>
<b>ГЛАВА 17. НАКОПЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ И АМОРФИЗАЦИЯ . . . . .</b>	<b>163</b>
<b>ГЛАВА 18. РАВНОВЕСНЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ. ТВЕРДОФАЗНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ АМОРФНЫХ СЛОЕВ . . . . .</b>	<b>168</b>
<b>ГЛАВА 19. БЫСТРАЯ ТЕРМООБРАБОТКА ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ. . . . .</b>	<b>175</b>
<b>ГЛАВА 20. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ . . . . .</b>	<b>178</b>
<b>ГЛАВА 21. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕДРЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ ПРИ БТО С РАСПЛАВЛЕНИЕМ СЛОЯ И БЕЗ НЕГО . . . . .</b>	<b>183</b>

<b>ГЛАВА 22. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ.</b> . . . . .	187
22.1. Выбор метода постимплантационных измерений . . . . .	187
22.2. Травление <i>p-n</i> -переходов . . . . .	193
22.3. Определение типа проводимости . . . . .	195
22.4. Методы, основанные на измерении поверхностного сопротивления . . . . .	197
22.5. Определение времени жизни неосновных носителей заряда . . . . .	214
22.6. Анализ имплантационных слоев с помощью легких высокоэнергетических ионов . . . . .	215
22.6.1. Обратное резерфордовское рассеяние . . . . .	217
22.6.2. Каналирование и местоположение атомов в кристаллической решетке . . . . .	220
22.6.3. Характеристическое рентгеновское излучение . . . . .	225
22.6.4. Метод ядерных реакций . . . . .	229
22.7. Масс-спектроскопия вторичных ионов . . . . .	233
22.8. Рентгеноструктурный и фазовый анализ . . . . .	235
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> . . . . .	241
<b>РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.</b> . . . . .	243