

ОГЛАВЛЕНИЕ

Благодарности	15
---------------------	----

Глава 1

ВВЕДЕНИЕ В МЕТРОЛОГИЮ ДЛЯ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ	17
1.1. Что представляет собой инженерная нанометрология?	19
1.2. Содержание этой книги	20
1.3. Список использованных источников	21

Глава 2

ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ	23
2.1. Введение	23
2.2. Единицы измерений и система СИ	25
2.3. Длина	26
2.4. Масса	30
2.5. Сила	32
2.6. Угол	33
2.7. Прослеживаемость измерения	34
2.8. Точность, прецизионность, разрешение, погрешность и неопределенность измерения	37
2.8.1. Точность и прецизионность измерения	37
2.8.2. Разрешение и погрешность измерения	38
2.8.3. Неопределенность измерения	39
2.8.3.1. Перенос распределений вероятности	40
2.8.3.2. Руководство по выражению неопределенности в измерениях (GUM)	42
2.8.3.3. Метод Монте-Карло	44



2.9. Лазеры	46
2.9.1. Принцип действия гелий-неонового лазера	46
2.9.2. Способы стабилизации длины волны одномодового лазера	49
2.9.3. Стабилизация частоты лазера с использованием метода насыщенного поглощения	50
2.9.3.1. Стабилизация лазера с двухмодовым режимом работы	52
2.9.4. Лазеры, стабилизированные посредством использования эффекта Зеемана, излучающие на длине волны 633 нм	53
2.9.5. Калибровка частоты (стабилизированного) лазера, излучающего на длине волны 633 нм	56
2.9.6. Существующие и перспективные лазерные стандарты частоты	57
2.10. Список использованных источников	58

Глава 3

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Геометрия	61
3.2. Кинематика	62
3.2.1. Сочленение Кельвина	64
3.2.2. Реализация единственной степени свободы	65
3.3. Динамика	66
3.4. Принцип Аббе	67
3.5. Упругое сжатие	69
3.6. Структурные схемы	71
3.6.1. Каркасный контур	71
3.6.2. Тепловой контур	71
3.6.3. Метрологический контур	72
3.7. Материалы	72
3.7.1. Минимизация теплового воздействия	73
3.7.2. Минимизация механического воздействия	74
3.8. Симметрия	75
3.9. Виброизоляция	76
3.9.1. Источники вибрации	77
3.9.2. Пассивная виброизоляция	78



3.9.3. Подавление колебаний	80
3.9.4. Внутренний резонанс	81
3.9.5. Активная виброизоляция	81
3.9.6. Акустический шум	81
3.10. Список использованных источников	82

Глава 4

ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ ДЛИНЫ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ	85
4.1. Обеспечение прослеживаемости длины	85
4.2. Концевые меры как средство обеспечения прослеживаемости	86
4.3. Введение в интерферометрию	89
4.3.1. Свет как волна	89
4.3.2. Измерение биения в случае, когда $\omega_1 \neq \omega_2$	92
4.3.3. Видность и контраст	92
4.3.4. Интерференция белого света и длина когерентности	93
4.4. Схемы интерферометров	96
4.4.1. Интерферометры Майкельсона и Тваймана—Грина	96
4.4.1.1. Модификация Тваймана—Грина	97
4.4.2. Интерферометр Физо	98
4.4.3. Интерферометры Жамена и Маха—Цендера	101
4.4.4. Интерферометр Фабри—Перо	103
4.5. Интерферометрия концевых мер	105
4.5.1. Измерение длины при помощи интерферометрии	105
4.5.2. Работа интерферометра для измерения длины концевых мер	108
4.5.2.1. Измерение сдвига интерференционной картины — сдвиг фаз	108
4.5.2.2. Анализ мультиволновой интерференции	109
4.5.2.3. Длина волны в вакууме	111
4.5.2.4. Тепловые эффекты	111
4.5.2.5. Измерение показателя преломления	112
4.5.2.6. Апертурная коррекция	113
4.5.2.7. Эффекты поверхности и изменения фазы	114
4.5.3. Источники погрешности	115



4.5.3.1. Неопределенность относительного сдвига интерференционных полос	115
4.5.3.2. Неопределенность мультиволновой интерферометрии	116
4.5.3.3. Неопределенность длины волны в вакууме	116
4.5.3.4. Неопределенность вследствие тепловых эффектов	116
4.5.3.5. Неопределенность показателя преломления	117
4.5.3.6. Неопределенность апертурной коррекции	117
4.5.3.7. Неопределенность изменения фазы	117
4.5.3.8. Косинусная погрешность	118
4.6. Список использованных источников	118

Глава 5

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	120
5.1. Введение	120
5.2. Интерферометрия перемещений	121
5.2.1. Основы интерферометрии перемещений	121
5.2.2. Гомодинная интерферометрия	122
5.2.3. Гетеродинная интерферометрия	123
5.2.4. Счет и деление интерференционных полос	125
5.2.5. Двухпроходная интерферометрия	126
5.2.6. Дифференциальная интерферометрия	127
5.2.7. Интерферометрия со свипированием частоты	128
5.2.8. Источники погрешности	129
5.2.8.1. Тепловое расширение	130
5.2.8.2. Длина мертвого хода	130
5.2.8.3. Косинусная погрешность	131
5.2.8.4. Нелинейность	132
5.2.8.5. Коррекция Хейдеманна	133
5.2.8.6. Источники случайной погрешности	135
5.2.8.7. Прочие источники погрешности	136
5.2.9. Угловые интерферометры	136
5.3. Емкостные датчики	138
5.4. Индуктивные датчики	139
5.5. Оптические датчики	142
5.6. Оптоволоконные датчики	144
5.7. Калибровка датчиков перемещения	146



5.7.1. Калибровка с использованием оптической интерферометрии	147
5.7.1.1. Калибровка с использованием интерферометра Фабри—Перо	147
5.7.1.2. Калибровка с использованием измерительного лазера	148
5.7.2. Калибровка с использованием рентгеновской интерферометрии	149
5.8. Список использованных источников	152

Глава 6

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ

РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ	157
6.1. Введение	157
6.2. Понятие пространственной частоты	159
6.3. Исторический обзор	160
6.4. Измерение параметров профиля поверхности	163
6.5. Измерение параметров трехмерной текстуры поверхности	164
6.6. Средства измерений	166
6.6.1. Стилусные профилометры	167
6.7. Оптические профилометры	171
6.7.1. Ограничения оптических средств измерений	172
6.7.2. Оптические сканирующие методы	178
6.7.2.1. Триангуляционные профилометры	178
6.7.2.2. Конфокальные микроскопы	181
6.7.2.2.1. Конфокальные хроматические зонды	185
6.7.2.3. Профилометрия точечной автофокусировки	186
6.7.3. Оптические методы исследования поверхности	188
6.7.3.1. Микроскопия с переменным фокусом	188
6.7.3.2. Фазосдвигающая интерферометрия	191
6.7.3.3. Цифровая голографическая микроскопия	195
6.7.3.4. Когерентная сканирующая интерферометрия	197
6.7.4. Методы рассеяния	200
6.8. Емкостные средства измерений	204
6.9. Пневматические средства измерений	205
6.10. Калибровка средств измерений параметров рельефа поверхности	205



6.10.1. Прослеживаемость измерений параметров рельефа поверхности	206
6.10.2. Калибровка средств измерений параметров профиля поверхности	207
6.10.3. Калибровка средств измерений параметров трехмерной текстуры поверхности	209
6.11. Неопределенность измерений параметров рельефа поверхности	214
6.12. Сравнение средств измерений параметров рельефа поверхности	216
6.13. Стандарты на программное обеспечение	218
6.14. Список использованных источников	219

Глава 7

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ, ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ МИКРОСКОПИЯ	229
7.1. Сканирующая зондовая микроскопия	230
7.2. Сканирующая туннельная микроскопия	232
7.3. Атомно-силовая микроскопия	234
7.3.1. Источники шума в атомно-силовой микроскопии	235
7.3.1.1. Определение уровня статического шума	236
7.3.1.2. Определение уровня динамического шума	237
7.3.1.3. Определение уровня шума ху-сканера	237
7.3.2. Некоторые типичные артефакты АСМ-изображений	238
7.3.2.1. Размер и форма иглы	238
7.3.2.2. Загрязнение зонда	239
7.3.2.3. Прочие артефакты	239
7.3.3. Определение системы координат атомно-силового микроскопа	240
7.3.4. Прослеживаемость в атомно-силовой микроскопии	241
7.3.4.1. Калибровка АСМ	242
7.3.5. Измерение силы при помощи АСМ	244
7.3.6. Определение жесткости кантилевера АСМ	246
7.3.7. Измерение меж- и внутримолекулярных сил при помощи АСМ	248
7.3.7.1. Придание зонду функциональных свойств	251



7.3.8.	Измерение расстояния между зондом и образцом	253
7.3.9.	Артефакты, возникающие при измерении сил посредством АСМ	254
7.4.	Исследование наночастиц при помощи сканирующей зондовой микроскопии	256
7.5.	Электронная микроскопия	256
7.5.1.	Растровая электронная микроскопия	256
7.5.1.1.	Выбор калибровочного образца для растровой электронной микроскопии	258
7.5.2.	Просвечивающая электронная микроскопия	259
7.5.3.	Прослеживаемость и калибровка просвечивающих электронных микроскопов	260
7.5.3.1.	Выбор калибровочного образца	261
7.5.3.2.	Линейная калибровка	262
7.5.3.3.	Локальная калибровка	262
7.5.3.4.	Эталонная сетка	262
7.5.4.	Исследование наночастиц при помощи электронной микроскопии	263
7.6.	Ионная микроскопия	265
7.7.	Список использованных источников	266

Глава 8

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ	270
8.1. Введение	270
8.2. Характеризация профиля поверхности	271
8.2.1. Длина оценки	272
8.2.2. Общее перемещение	273
8.2.3. Фильтрация профиля	273
8.2.3.1. Первичный профиль	275
8.2.3.2. Профиль шероховатости	276
8.2.3.3. Профиль волнистости	276
8.2.4. Стандартные значения при характеризации профиля	276
8.2.5. Основные параметры характеризации профиля	277
8.2.5.1. Обозначения параметров профиля	278
8.2.5.2. Неоднозначность параметров профиля	279
8.2.6. Параметры амплитуды профиля (от пиков до впадин)	279



8.2.6.1. Максимальная высота пика профиля R_p	279
8.2.6.2. Максимальная глубина долины профиля R_v	279
8.2.6.3. Максимальная высота профиля R_z	280
8.2.6.4. Средняя высота элементов профиля R_c	281
8.2.6.5. Общая высота поверхности R_t	281
8.2.7. Средние значения параметров профиля	282
8.2.7.1. Среднее арифметическое отклонение профиля R_a	282
8.2.7.2. Среднеквадратичное отклонение профиля R_q	283
8.2.7.3. Асимметрия профиля R_{sk}	284
8.2.7.4. Эксцесс профиля R_{ku}	285
8.2.8. Параметры ширины элементов профиля	286
8.2.8.1. Средняя ширина элементов профиля R_{Sm}	286
8.2.9. Параметры кривых профиля	287
8.2.9.1. Относительная опорная длина профиля	287
8.2.9.2. Кривая относительной опорной длины профиля	288
8.2.9.3. Разница высот уровней сечения R_{dc}	288
8.2.9.4. Удельная опорная длина профиля R_{mr}	289
8.2.9.5. Кривая амплитуды высот профиля	289
8.2.10. Стандарты характеристики профиля	291
8.3. Характеризация трехмерной текстуры поверхности	293
8.3.1. Фильтрация изображения поверхности	293
8.3.2. Фильтрация трехмерной текстуры поверхности	294
8.3.3. Стандарты характеристики трехмерной текстуры поверхности	298
8.3.4. Единая система координат для характеристики текстуры и формы поверхности	300
8.3.5. Параметры характеристики трехмерной текстуры поверхности	301
8.3.6. Параметры целого изображения	301
8.3.6.1. Параметры высоты трехмерной текстуры поверхности	301
8.3.6.1.1. Среднеквадратичная высота поверхности S_q	301
8.3.6.1.2. Среднее арифметическое значение абсолютной высоты поверхности S_a	302
8.3.6.1.3. Асимметрия распределения высот S_{sk}	302
8.3.6.1.4. Эксцесс распределения высот S_{ku}	302
8.3.6.1.5. Максимальная высота пиков поверхности S_p	302



8.3.6.1.6. Максимальная глубина долин поверхности S_v	303
8.3.6.1.7. Максимальная высота поверхности S_z	303
8.3.6.2. Пространственные параметры характеристики трехмерной текстуры поверхности	303
8.3.6.2.1. Длина автокорреляции S_{al}	303
8.3.6.2.2. Аспектное отношение текстуры поверхности S_{tr}	304
8.3.6.3. Смешанные параметры трехмерной текстуры поверхности	304
8.3.6.3.1. Среднеквадратичный градиент отфильтрованной поверхности S_{dq}	305
8.3.6.3.2. Показатель развитости межфазных границ S_{dr}	305
8.3.6.4. Функциональные параметры	306
8.3.6.4.1. Относительная опорная площадь отфильтрованной поверхности $S_{mc}(c)$	306
8.3.6.4.2. Кривая относительной опорной площади отфильтрованной поверхности	306
8.3.6.4.3. Обратная относительная опорная площадь отфильтрованной поверхности $S_{dc}(mr)$	307
8.3.6.4.4. Параметры характеристики стратифицированной функциональной отфильтрованной поверхности	307
8.3.6.4.5. Объем пустот $V_v(mr)$	307
8.3.6.4.6. Объем материала $V_m(mr)$	308
8.3.6.4.7. Высота пиков S_{xp}	308
8.3.6.4.8. Функция плотности градиента	309
8.3.6.5. Вспомогательный параметр	309
8.3.6.5.1. Направление текстуры отфильтрованной поверхности S_{td}	309
8.3.7. Характеризация элементов поверхности	310
8.3.7.1. Шаг 1. Выбор элементов поверхности	310
8.3.7.2. Шаг 2. Сегментация	310
8.3.7.2.1. Дерево изменений	313
8.3.7.3. Шаг 3. Определение значимых элементов	315
8.3.7.4. Шаг 4. Выбор признаков элементов	316
8.3.7.5. Шаг 5. Определение количественных характеристик признаков элементов	316
8.3.7.6. Параметры элементов	317
8.3.7.6.1. Плотность пиков S_{pd}	317
8.3.7.6.2. Средняя арифметическая кривизна пиков S_{pc}	318



8.3.7.6.3. Высота поверхности по десяти точкам $S10z$	318
8.3.7.6.4. Высота пиков по пяти точкам $S5p$	318
8.3.7.6.5. Глубина впадин по пяти точкам $S5v$	318
8.3.7.6.6. Площадь замкнутых долов $Sda(c)$	318
8.3.7.6.7. Площадь замкнутых холмов $Sha(c)$	318
8.3.7.6.8. Объем замкнутых долов $Sdc(c)$	319
8.3.7.6.9. Объем замкнутых холмов $Shv(c)$	319
8.4. Фрактальные методы	319
8.4.1. Линейные фрактальные методы	321
8.4.2. Фрактальный анализ трехмерной текстуры поверхности	323
8.4.2.1. Анализ зависимости объем—масштаб	324
8.4.2.2. Анализ зависимости площадь—масштаб	324
8.5. Сравнение характеристик профиля и трехмерной текстуры поверхности	327
8.6. Список использованных источников	328
Глава 9	
КООРДИНАТНАЯ МЕТРОЛОГИЯ	333
9.1. Координатно-измерительные машины (КИМ)	333
9.1.1. Зондовые системы КИМ	336
9.1.2. Программное обеспечение КИМ	337
9.1.3. Позиционирование	337
9.1.4. КИМ и САПР	338
9.1.5. Объекты геометрической и свободной формы	338
9.1.6. Прочие типы КИМ	339
9.2. Источники погрешности КИМ	339
9.3. Прослеживаемость, калибровка и поверка КИМ	340
9.3.1. Прослеживаемость КИМ	341
9.4. КИМ малого диапазона	343
9.4.1. Автономные КИМ малого диапазона	344
9.4.1.1. КИМ малого диапазона со штриховой измерительной шкалой	345
9.4.1.2. КИМ малого диапазона с лазерным интерферометром	346
9.5. Зонды КИМ малого диапазона	348
9.6. Калибровка КИМ малого диапазона	355



9.6.1. Калибровка КИМ малого диапазона с лазерным интерферометром	357
9.6.2. Калибровка КИМ малого диапазона со штриховой измерительной шкалой	358
9.7. Список использованных источников	360

Глава 10

ИЗМЕРЕНИЯ СИЛ И МАСС	365
10.1. Прослеживаемость традиционных измерений масс	365
10.1.1. Изготовление Международного прототипа килограмма и его первичных копий	366
10.1.2. Текстура поверхности эталонов массы	367
10.1.3. Распространение эталона килограмма	368
10.1.4. Стабильность эталонов килограмма после очистки	368
10.1.5. Ограничения текущего определения килограмма	369
10.1.6. Исследования в области альтернативных способов определения килограмма	370
10.1.6.1. Использование ватт-весов	372
10.1.6.2. Использование метода Авогадро	372
10.1.6.3. Использование аккумуляции ионов	373
10.1.6.4. Использование левитирующего сверхпроводника	373
10.1.7. Компараторы массы	373
10.1.7.1. Современные механические весы с двумя чашами	374
10.1.7.2. Электронные весы	374
10.2. Измерения малых масс	375
10.2.1. Определение массы путем деления	376
10.3. Измерения малых сил	376
10.3.1. Сравнительные величины малых сил	376
10.3.2. Прослеживаемость измерений малых сил	378
10.3.3. Весы для измерения малых сил	379
10.3.4. Эталоны сравнения для измерения малых сил	380
10.3.4.1. Использование силоизмерительных машин	381
10.3.4.2. Использование упругих элементов	381
10.3.4.3. Использование малых электростатических весов	385



10.3.4.4. Использование резонансных методов	386
10.3.4.5. Заключение	387
10.4. Список использованных источников	390
 Приложение А	
БАЗОВЫЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ СИСТЕМЫ СИ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В NPL	394
 Приложение Б	
ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ СИСТЕМЫ СИ	397
Примеры производных единиц системы СИ, выраженных через базовые единицы	397
Производные единицы системы СИ с собственными названиями и обозначениями	398