

535.14

A - 447

1516.346

О.А. Акципетров
И.М. Баранова
К.Н. Евтюхов

НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА КРЕМНИЯ И КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР



2012.11
А. 444

**О.А. Акципетров
И.М. Баранова
К.Н. Евтюхов**

**НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА
КРЕМНИЯ И КРЕМНИЕВЫХ
НАНОСТРУКТУР**



**МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2012**

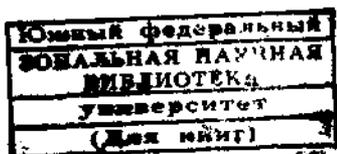
8 3008.11 + Г 800.2-24

УДК 535; 538.91
ББК 22.343; 22.379
А 44 ✓

Акципетров О.А., Баранова И.М., Евтюхов К.Н. **Нелинейная оптика кремния и кремниевых наноструктур.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 544 с. — ISBN 978-5-9221-1402-8.

Книга сочетает в себе черты монографии и учебного пособия. Описаны физические свойства кремния, представляющие интерес с точки зрения нелинейной оптики. Изложены основы феноменологического и микроскопического подходов, используемых в теории генерации оптических гармоник в кремнии. Предложена комплексная модель генерации второй гармоники на кремниевых межфазных границах, учитывающая интерференцию различных вкладов в нелинейно-оптический отклик, анизотропию среды, фотогенерацию неравновесных носителей и многое другое. Дан подробный аналитический обзор экспериментальных работ, демонстрирующий как историю развития нелинейной оптики кремния и кремниевых наноструктур, так и ее современное состояние.

Для научных сотрудников, инженеров, аспирантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области нелинейной оптики и спектроскопии поверхности, микро- и нанотехнологии кремния.



ISBN 978-5-9221-1402-8

© ФИЗМАТЛИТ, 2012

© О.А. Акципетров, И.М. Баранова,
К.Н. Евтюхов, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	7
Введение	9
Литература к введению.	19
Глава 1. Некоторые физические свойства кремния	27
1.1. Кристаллическая структура: объем и поверхность	28
1.1.1. Кристаллическая структура объема кремния (28). 1.1.2. Симметрия кристалла кремния (31). 1.1.3. Симметрия основных поверхностей кристалла кремния (38). 1.1.4. Реконструкция и релаксация поверхности (42). 1.1.5. Вицинальные поверхности (52).	
1.2. Зонная структура кремния	54
1.2.1. Зоны Бриллюэна кремния (54). 1.2.2. Энергетические зоны объема кремния (60). 1.2.3. Эффективные массы (70). 1.2.4. Поверхностные зоны Бриллюэна и электронная структура поверхности (76).	
1.3. Линейная оптика кремния.	80
1.3.1. Распространение электромагнитных волн в полупроводнике: линейное приближение (80). 1.3.2. Спектр линейного поглощения в кремнии. Критические точки (85).	
1.4. Влияние механических напряжений на зонную структуру и оптический спектр кремния	94
1.4.1. Некоторые понятия теории упругости (94). 1.4.2. Классификация и природа механических напряжений в кремниевых структурах (98). 1.4.3. Энергетические зоны и оптический спектр деформированного кремния. Деформационные потенциалы (105).	
Литература к главе 1	117
Глава 2. Генерация отраженной второй гармоники: основные теоретические представления	121
2.1. Нелинейная поляризация среды: феноменологический подход	122
2.1.1. Линейные и нелинейные восприимчивости в дипольном приближении: общие свойства (124). 2.1.2. Нелинейная квадратичная поляризация центросимметричной среды (129). 2.1.3. Нелинейная поляризация поверхности (135).	

2.2. Нелинейная поляризация: микроскопический подход	141
2.2.1. Классические модели оптической нелинейности (142).	
2.2.2. Оптическая дипольная нелинейность в квантованной среде (148).	
2.2.3. Метод поляризующихся связей (152).	
2.2.4. Компьютерное моделирование атомарной и электронной структуры полупроводников: теоретические основы (165).	
2.2.5. Моделирование нелинейно-оптического отклика поверхности кремния (178).	
2.3. Методы расчета поля отраженной ВГ. Формализм функций Грина	189
2.3.1. Функции Грина для <i>s</i> - и <i>p</i> -поляризованных волн ВГ в бесконечной среде (190).	
2.3.2. Расчет полей для <i>s</i> - и <i>p</i> -поляризованных волн ВГ при наличии межфазных границ (196).	
2.3.3. Компоненты функции Грина для двухфазной системы (201).	
2.4. Метод нелинейного электроотражения	204
2.4.1. Модель НЭО для полупроводника в электрохимической ячейке (205).	
2.4.2. Упрощение модели НЭО: отсутствие вырождения носителей, малый поверхностный потенциал (211).	
2.4.3. Модель НЭО с учетом распределения полей в кремнии (216).	
Литература к главе 2	219
Глава 3. Феноменологическая теория генерации второй гармоники, отраженной от поверхности кремния	225
3.1. Амплитуда отраженной второй гармоники на поверхности centrosymmetrichных полупроводников	228
3.1.1. Амплитуда <i>s</i> -поляризованной волны отраженной второй гармоники (231).	
3.1.2. Влияние поверхностной нелинейной поляризации на <i>s</i> -поляризованную волну отраженной второй гармоники (234).	
3.1.3. Амплитуда <i>p</i> -поляризованной волны отраженной второй гармоники (239).	
3.2. Расчет нелинейной поляризации в кристаллах	242
3.2.1. Методика расчета нелинейной поляризации с учетом точечной симметрии отражающих граней кристаллов класса <i>m3m</i> (243).	
3.2.2. Поверхностная нелинейная поляризация кристаллов класса <i>m3m</i> (248).	
3.2.3. Объемная квадрупольная нелинейная поляризация кристаллов класса <i>m3m</i> (253).	
3.2.4. Дипольная индуцированная нелинейная поляризация кристаллов класса <i>m3m</i> (254).	
3.2.5. Нелинейная поляризация кристаллов класса <i>m3m</i> при вращении плоскости поляризации накачки (256).	
3.3. Применение теории генерации отраженной второй гармоники в исследованиях НЭО и АОВГ на поверхности кремния	258
3.3.1. Приближения слабого поглощения накачки и малых углов преломления в теории генерации отраженной второй гармоники (259).	
3.3.2. Интерференционная модель НЭО: случай изотропной среды (263).	
3.3.3. Интерференционная модель НЭО: случай тонкой ОПЗ (266).	
3.3.4. Анизотропия отраженной второй гармоники. Разделение вкладов поверхности и объема (270).	
Литература к главе 3	276

Глава 4. Экспериментальные результаты исследования отраженных гармоник в кремнии	277
4.1. Генерация анизотропной отраженной второй гармоники	278
4.1.1. Связь анизотропии интенсивности отраженной второй гармоники с кристаллической структурой поверхности (278). 4.1.2. Влияние морфологии поверхности на анизотропию отраженной второй гармоники (281). 4.1.3. Генерация АОВГ на гетерофазной границе Si-SiO ₂ . Роль оптической интерференции в оксидном слое (286). 4.1.4. Влияние оптической казимировской нелокальности на генерацию второй гармоники в структуре Si-SiO ₂ (296).	
4.2. Спектроскопия отраженной второй гармоники.	301
4.2.1. Спектроскопия интенсивности отраженной второй гармоники (302). 4.2.2. Интерферометрическая спектроскопия амплитуды и фазы отраженной второй гармоники (320).	
4.3. Электроиндуцированная вторая гармоника и НЭО.	337
4.3.1. НЭО в кремнии и кремниевых структурах (337). 4.3.2. Временные зависимости сигнала отраженной второй гармоники, обусловленные переносом и накоплением заряда в тонкослойных кремниевых структурах (352). 4.3.3. Спектроскопия электроиндуцированной второй гармоники (359).	
4.4. Генерация токоиндуцированной отраженной второй гармоники . . .	368
4.5. Генерация отраженной второй гармоники, индуцированной механическими напряжениями.	373
4.5.1. Генерация отраженной второй гармоники при наличии неоднородных макроскопических напряжений (373). 4.5.2. Исследование напряженного состояния кремния методом спектроскопии отраженной второй гармоники (382).	
4.6. Генерация высших гармоник и оптическое выпрямление в кремнии	387
Литература к главе 4	399
Глава 5. Генерация второй гармоники в кремниевых наноструктурах	410
5.1. Фемтосекундная спектроскопия ВГ и размерные эффекты в кремниевых квантовых точках	411
5.2. Спектроскопия второй гармоники аморфных периодических квантовых ям Si-SiO ₂	419
Литература к главе 5	426
Глава 6. Фотондуцированные электронные процессы в кремнии и их влияние на генерацию отраженной второй гармоники	429
6.1. Качественный анализ и физико-математическая модель фотондуцированных электронных процессов	431

6.2. Нестационарный поперечный эффект Дембера. Электронные процессы в кремнии при воздействии излучения лазера на гранате с неодимом	436
6.2.1. Модель нестационарного поперечного эффекта Дембера. Влияние рекомбинации (436). 6.2.2. Поперечный эффект Дембера при воздействии лазерного импульса (438). 6.2.3. Релаксация фотоиндуцированного поля во время паузы. Воздействие бесконечной последовательности импульсов (443). 6.2.4. Сужение приповерхностной ОПЗ (448).	
6.3. Стационарный двухмерный эффект Дембера. Электронные процессы в кремнии при воздействии излучения титан-сапфирового лазера	451
6.3.1. Динамика изменения концентрации неравновесных носителей (451). 6.3.2. Концентрация неравновесной электронно-дырочной плазмы (457). 6.3.3. Фотостимулированное стационарное поле в области эффекта Дембера (460). 6.3.4. Приповерхностная неравновесная ОПЗ (468).	
Литература к главе 6	474
Приложение 1. Параметры лазерных источников накачки	476
Приложение 2. Свойства кремния	479
Приложение 3. Основы теории групп	483
Приложение 4. Распространение света в поглощающей среде — полупроводнике	491
Приложение 5. Линейные оптические параметры кремния и параметры скорости фотогенерации носителей в кремнии	498
Приложение 6. Единицы измерения нелинейно-оптических восприимчивостей и их перевод из системы СГС в систему СИ	504
Приложение 7. Доказательство формулы (2.26)	508
Приложение 8. Учет электрически-магнитного вклада в квадратичную нелинейную поляризацию	509
Приложение 9. Бра- и кет-векторы. Матрица плотности	512
Приложение 10. Обоснование экспоненциальной модели пространственного распределения электроиндуцированной нелинейной поляризации.	519
Приложение 11. Влияние поверхностной нелинейной поляризации на p -поляризованную волну ОВГ	522
Приложение 12. Нелинейные поляризации: малые углы преломления, слабое поглощение накачки	527
Приложение 13. Эффект Казимира	533
Приложение 14. Модель объемной рекомбинации в Si.	535
Приложение 15. Концентрационные зависимости подвижностей и коэффициентов диффузии носителей тока в кремнии	540