

УДК 621.373.8  
ББК 32.86-5  
У74

Усанов, Д. А.

У74 Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. – 136 с. : ил. ISBN 978-5-292-04232-7

Обобщены оригинальные результаты теоретических и экспериментальных исследований работы полупроводникового лазера в автодинном режиме. Описаны особенности формирования автодинного сигнала в условиях сильной и слабой обратной оптической связи, влияние токовой модуляции на форму и спектр автодинного сигнала, особенности восстановления параметров движения при микро- и наносмещениях.

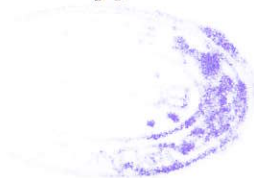
Для специалистов и научных работников в области твердотельной электроники, наноэлектроники, радиофизики и лазерной физики, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

Ил. 71, Табл. 9. Библиогр.: 109 назв.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор Л. А. Мельников  
доктор физико-математических наук, профессор С. С. Горбатов

*Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
по проекту № 14-02-07002, не подлежит продаже*



УДК 621.373.8  
ББК 32.86-5

ISBN 978-5-292-04232-7

© Усанов Д. А., Скрипаль А. В., 2014  
© Саратовский государственный университет, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. АВТОДИННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ .....	7
1.1. Анализ современного состояния исследований эффекта автодинного детектирования в лазерных системах .....	7
1.2. Модель составного резонатора .....	9
1.3. Автодинный сигнал в режиме стационарной генерации излучения полупроводникового лазера .....	11
2. ФОРМИРОВАНИЕ АВТОДИННОГО СИГНАЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ ВНЕШНЕГО ОТРАЖАТЕЛЯ .....	14
2.1. Формирование автодинного сигнала при гармонических колебаниях отражателя .....	14
2.2. Формирование спектра автодинного сигнала при гармонических колебаниях отражателя .....	16
3. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОВИБРАЦИЙ ПО СПЕКТРУ АВТОДИННОГО СИГНАЛА .....	20
3.1. Гомодинные методы определения параметров движения объектов .....	20
3.2. Аппроксимирующее выражение для определения амплитуды колебаний объекта по номеру гармоники с максимальной амплитудой .....	23
3.3. Определение амплитуды колебаний внешнего отражателя по набору гармоник спектра автодинного сигнала .....	25
4. АВТОДИННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ АМПЛИТУД НАНОВИБРАЦИЙ .....	29
4.1. Метод определения амплитуд нановибраций при наложении для нормировки дополнительных механических колебаний .....	29
4.2. Метод определения амплитуды нановибраций по двум первым гармоникам спектра автодинного сигнала .....	30
4.3. Техника измерений лазерной автодинной системой .....	35
5. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПО СПЕКТРУ АВТОДИННОГО СИГНАЛА .....	38
5.1. Определение постоянной скорости движения объекта .....	38
5.2. Измерение скорости при наносмещениях по спектру автодинного сигнала .....	40
5.2.1. Формирование автодинного сигнала при поступательном движении объекта .....	41
5.2.2. Спектральная обработка автодинного сигнала при поступательном движении объекта .....	43
5.2.3. Результаты измерений линейного расширения нагреваемого образца .....	44

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ПРИ МИКРО- И НАНОСМЕЩЕНИЯХ ОБЪЕКТА ПО АВТОДИННОМУ СИГНАЛУ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА .....	48
6.1. Определение ускорения равноускоренно движущегося объекта при микро- и наносмещениях .....	48
6.2. Определение ускорения при неравномерно ускоренных микро- и наносмещениях объекта .....	53
7. АВТОДИННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА .....	59
7.1. Спектр автодиной лазерной системы при токовой модуляции полупроводникового лазера .....	60
7.2. Применение полупроводникового лазерного автодина с модуляцией длины волны излучения для определения профиля поверхности объекта .....	63
8. АВТОДИННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ СЛОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА .....	72
8.1. Метод восстановления характеристик движения объекта по производной от функции, описывающей интерференционный сигнал .....	74
8.2. Метод восстановления характеристик движения объекта по двум сигналам с фазовой задержкой .....	78
8.3. Восстановление функции, описывающей движение объекта в интерференционной системе, с помощью вейвлет-преобразований .....	81
8.4. Повышение точности решения обратной задачи по восстановлению функции, описывающей движение объекта .....	93
8.4.1. Влияние присутствия шума в интерференционном сигнале на восстановление параметров, описывающих движение отражателя .....	94
8.4.2. Алгоритм определения амплитуд механических колебаний сложного периодического движения в лазерной гомодинной системе с использованием метода наименьших квадратов .....	96
9. ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ВНЕШНЕГО ОТРАЖАТЕЛЯ .....	103
9.1. Влияние уровня обратной связи на форму и спектр автодиного сигнала вибраций .....	103
9.2. Влияние уровня обратной связи на результаты решения обратной задачи определения амплитуды колебаний внешнего отражателя по спектру автодиного сигнала .....	107
9.3. Измерение параметров нановибраций лазерным полупроводниковым автодином при различной степени фокусировки излучения .....	112
9.4. Восстановление функции, описывающей интерференционный сигнал, по сигналу автодиного детектирования полупроводникового лазера .....	118
9.4.1. Методика восстановления формы интерференционного сигнала по сигналам автодиного детектирования .....	119
9.4.2. Примеры восстановления функций, описывающих интерференционные сигналы .....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	126
Список литературы .....	128

## ВВЕДЕНИЕ

Для измерения параметров движения объектов при микро- и наносмещениях широкое распространение получили методы, основанные на использовании эффекта автодиного детектирования в полупроводниковых лазерах [1–7]. Автодинные измерительные системы, созданные на основе такого эффекта, по сравнению с интерференционными системами обладают уменьшенными габаритами, весом, низким энергопотреблением [8–15].

Система, состоящая из полупроводникового лазера и внешнего отражателя, сочетает функции генератора и детектора фазы электромагнитной волны в одном устройстве. Возвращенная внешним отражателем в резонатор лазера волна приводит к изменению концентрации носителей заряда в активной среде, а также к связанному с концентрацией показателю преломления активной области. Изменение показателя преломления, в свою очередь, вызывает изменение оптической частоты генерации. В силу вышесказанного форма автодиного сигнала начинает отличаться от формы интерференционного сигнала, формируемого таким же движением отражателя в интерференционной системе с развязкой от источника излучения [16–19].

Важным параметром при проведении измерений характеристик движений объекта с использованием лазерной автодиной системы является уровень внешней оптической обратной связи. В автодиной системе режим, при котором автодинный сигнал аналогичен интерференционному, возможен при низком уровне обратной связи. При увеличении уровня обратной связи происходит искажение автодиного сигнала, в отличие от случая, когда интерференция про-