

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

«АВТОДИННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ
МИКРОСМЕЩЕНИЙ
ПРИ ДВИЖЕНИИ ОТРАЖАТЕЛЯ С
УСКОРЕНИЕМ»

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2251 группы
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
Института физики

Иван 17.06.24

Киселева Ивана Алексеевича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н.
должность, уч. степень, уч. звание

А.С.

подпись, дата

17.06.24

Ан.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.
должность, уч. степень, уч. звание

А.С.

подпись, дата

Ан.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Саратов 2024

Введение

Лазерное доплеровское измерение скорости (LDV) и лазерная доплеровская виброметрия – это хорошо известные методы измерения, широко используемые для точных дистанционных измерений скорости жидкостей, а также для точного измерения перемещения, скорости и ускорения твердых тел. Такими типами приборов можно измерить скорость и смещение поверхности, просто используя луч света. Востребованные функции, такие как высокая чувствительность, высокая точность и бесконтактная работа, привели к большому распространению этих инструментов. Они успешно применяются в области классической механики, модального анализа, анализа вибраций и в медицине, с очевидными преимуществами по сравнению с другими «классическими» датчиками, такими как акселерометры. Помимо явных преимуществ предлагаемых систем LDV некоторые недостатки практически ограничили область их применения. Основные недостатки:

- большие габариты оптической головки;
- вес;
- необходимость точного оптического выравнивания;
- высокая стоимость.

Высокая стоимость вызвана за счет использования большого количества оптических компонентов (линзы, зеркала, светоделители и даже акустооптические модуляторы).

По вышеуказанным причинам были проведены исследования для того, чтобы увеличить распространение лазерных методов за счет снижения сложности и стоимости систем.

Большое влияние в этой области оказала разработка метода интерферометрии с лазерным автодином, который способен обеспечить высокие характеристики с чрезвычайно простой и недорогой экспериментальной установкой.

Лазерная автодинная интерферометрия- это хорошо зарекомендовавший себя метод, широко используемый в промышленных и лабораторных условиях для измерения смещения, скорости (как твердых , так и жидкостей), вибрации и расстояния.

Лазерные автодинные системы, основанные на регистрации изменения мощности излучения лазерного диода при возвращении части излучения в его резонатор, обладают способностью к измерению микро- и наносмещений отражателя, используя для формирования интерференционного сигнала в качестве опорного канала свой собственный резонатор – активную область лазерного диода [1-3]. Вследствие этого, значительное упрощение схемы измерительной системы позволяет активно применять лазерный автодин для решения многочисленных задач по определению расстояния до объекта [4-6], угла поворота [7,8], амплитуды вибраций [9-11], величины деформаций при микро- и наносмещениях [12], скорости и ускорения движения отражателя [13-15].

Преимущества лазерного автодина перед лазерным интерферометром заключаются в его компактных размерах и высокой чувствительности. Благодаря этому можно точно настроить его на нужную длину волны и работать только с теми фотонами, которые необходимы для исследования.

Автодинный сигнал не всегда точно отражает параметры исследуемого процесса, поскольку результаты вычислений во многом зависят от значений внешней обратной связи. Это требует сложных расчётов, выбора подходящей модели и учёта вероятности получения неточных данных о параметрах.

Частичное отражение света от оптических элементов, следующих за лазером, может серьёзно ухудшить характеристики самого лазера. Даже небольшая доля излучения, отражённого от внешних элементов оптической схемы, способна вызвать хаотическую генерацию, характеризующуюся увеличением шумов оптической мощности (паразитной амплитудной модуляции) и резким расширением линии генерации, известным как «коллапс когерентности». Чтобы предотвратить это, в оптические схемы добавляют

оптические изоляторы, уменьшающие уровень возвращаемой в лазер оптической мощности, а также используют более качественное двухслойное просветление оптики [16].

Внешняя оптическая обратная связь значительно влияет на автодинный сигнал, изменяя его форму [17]. Автодинные системы широко используются для измерения нановибраций и перемещений биологических объектов [18]. Однако эти измерения могут быть затруднены из-за постоянно меняющейся величины внешней обратной связи. Важно отметить, что все эти измерения проводятся с использованием полупроводниковых лазеров.

В методе интерферометрии с обратной связью или интерферометрии с индуцированной модуляцией, лазерный источник выполняет роль чувствительного детектора. Он измеряет расстояние, которое свет проходит до цели и обратно, равное $2ks$ (где k — это 2π , делённое на длину волны света, а s — расстояние до цели). Этот метод основан на так называемой технологии «инъекции – обнаружение» [19].

Первые демонстрации этого принципа проводились с использованием газовых лазеров для обнаружения доплеровского сдвига, который возникает, когда удалённый отражатель движется.

Чтобы определить расстояние до отражателя или его скорость движения, используются различные методы анализа автодинного сигнала. Этот сигнал представляет собой изменение мощности излучения лазерного диода, которое регистрируется фотодиодом, встроенным в систему обратной связи по току питания лазера.

Среди таких методов можно выделить:

- прямой подсчёт количества интерференционных максимумов на автодинном сигнале [20];
- метод наименьших квадратов [21];
- спектральные методы анализа формы автодинного сигнала [22].

Благодаря успехам в спектральном анализе формы автодинного сигнала, теперь можно определять скорость движения объекта, его ускорение, амплитуду вибраций, а также величину нано- и микросмещений. Кроме того, этот метод позволяет измерять расстояние при модуляции тока питания лазерного диода [23].

Целью данной выпускной работы было практическое применение одного из методов измерения ускорения с помощью лазерного автодина. В процессе исследования нужно было выявить зависимость ускорения от амплитуды и изучить, как внешняя оптическая связь влияет на результаты измерений.

Чтобы достичь поставленной цели, были определены следующие задачи:

1. Собрать автодинную установку для получения сигнала.
2. Сформировать сигнал нужной формы.
3. Откалибровать излучение лазерного автодина.
4. Математически смоделировать автодинный сигнал с внешней оптической обратной связью.
5. Определить по спектру автодинного сигнала ускорение при высоком и низком уровнях обратной связи.
6. Обработать полученные сигналы для получения автодинного спектра.
7. Выяснить, как изменяется сигнал при увеличении уровня обратной связи.
8. Вычислить ускорение по полученным спектрам.
9. Построить экспериментальную и теоретическую зависимости и сравнить их.
10. Экспериментально выявить влияние уровня обратной связи на измерение ускорения объекта с помощью полупроводникового лазерного автодина.

Работа занимает 55 страниц и включает в себя 36 рисунков, список использованных источников, состоящий из 36 наименований.

Основное содержание работы

Во введении рассматривается актуальность работы, определяются цель и задачи исследования. Описываются преимущества лазерных методов измерения.

Первая глава посвящена рассмотрению полупроводниковых лазерных автодинов. Выясняются преимущества лазерных автодинов и их особенности. Описывается модель составного резонатора.

Автодинные системы нашли широкое применение в контроле перемещений. Они обладают высокой чувствительностью к микро- и нановибрациям, а также смещениям [24,25]. В частности, автодинные системы позволяют измерять сверхмалые скорости теплового расширения твёрдых тел в ограниченном временном интервале на основе анализа низкочастотного спектра автодинного сигнала [26].

Область применения автодинных измерителей значительно расширяется при проведении измерений с высокой степенью локальности. Например, можно определить параметры вибраций биологических объектов, измерение которых затруднено из-за их труднодоступности [18,27-29]. Однако при увеличении локальности отражения от объекта исследований может возрасти уровень внешней оптической обратной связи, которая влияет на форму автодинного сигнала полупроводникового лазерного излучателя и, следовательно, на точность определения параметров движения отражателя в автодинных системах [30].

Одним из преимуществ автодинной системы на основе полупроводникового лазера является возможность создания систем измерения вибраций и перемещений методом, основанным на сравнении с эталоном, которым выступает длина волны излучения полупроводникового лазера. Например, таким образом можно измерить величину смещения или расстояние до отражателя. Если величина смещения значительно меньше длины волны лазерного излучения, то можно использовать метод, основанный на возбуждении дополнительных колебаний с известными характеристиками

[24,31].

Чувствительность автодинной системы к отражённому излучению очень высока, поэтому на основе этого эффекта были созданы методы контроля динамических характеристик отражателя. Из-за этого исследование механизма взаимодействия полупроводникового лазера с отражённым светом является важной задачей.

Полупроводниковый лазер с внешней оптической обратной связью можно описать в рамках модели составного резонатора Лэнга и Кобаяши [34]. Эта теоретическая модель отражает основные эффекты, которые наблюдаются в экспериментах. На рисунке 1 изображена модель составного резонатора этого лазера, которая используется для теоретического анализа влияния обратной связи на искажение интерференционного сигнала.

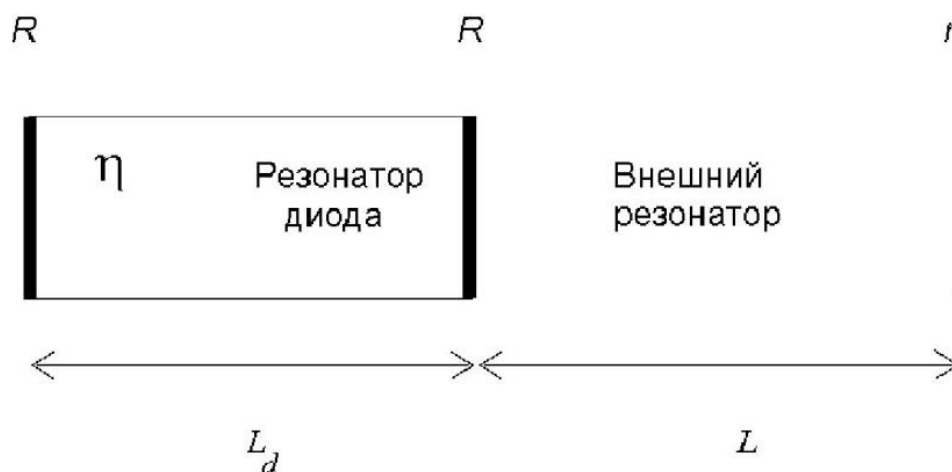


Рисунок 1. Модель составного резонатора полупроводникового лазера.

Во второй главе рассмотрены методы измерения ускорения. Описаны преимущества и недостатки каждого из методов. Рассмотрены методы определения ускорения и скорости.

В одном из первых способов измерения ускорения, применялась методика, с использованием инерционной массы в виде шара и датчиков перемещения (см. патент RU №2017159, МПК G01P 15/08).

Также известен способ, реализующий принцип измерения ускорения при помощи электронно-оптического преобразователя, согласующего устройства, инерционной массы, оптико-электронного преобразователя и компьютера (см. патент RU №2010235, МПК G01P 15/08).

Известен способ, заключающийся в освещении объекта оптическим излучением, преобразовании отраженного сигнала в автодинный сигнал и регистрации его мощности (см. RU2420746, МПК G01P15/093).

В одном из методов использовался лазерный автодин с системой датчиков ультра-небольшого-угла, характеризующийся высоким разрешением детектирования и широким диапазоном измерений [8]. В нем используется технология измерения малого-угла, в результате чего могло быть определено ускоренное движение объекта, совершающего микро- и наноперемещения.

Ранее при определении ускорения применялся метод оптимизации (метод наименьших квадратов) [9,35].

Способ определения скорости движения объекта включает облучение лазерным излучением объекта, преобразование отраженного от него излучения в электрический сигнал, разложение сигнала в спектральный ряд и измерение частоты выбранных гармоник. При этом отраженный сигнал преобразуют в автодинный сигнал, обеспечивая обратную оптическую связь путем направления отраженного пучка в резонатор лазерного диода, в спектральном ряде выбирают максимальную гармонику, скорость движения определяют из приведенного математического соотношения. Система, состоящая из полупроводникового лазера и внешнего отражателя, сочетает функции генератора и детектора фазы электромагнитной волны в одном устройстве. Возвращенная в диодный резонатор внешним отражателем волна приводит к изменению концентрации носителей заряда в активной среде, а также связанному с концентрацией показателя преломления активной области. Изменение показателя преломления, в свою очередь, вызывает изменение оптической частоты генерации. В силу вышесказанного форма автодинного

сигнала будет отличаться от формы интерференционного сигнала, формируемого таким же движением отражателя в интерференционной системе с развязкой от источника излучения [35,36].

В третьей главе рассматриваются различные уровни внешней оптической связи и её воздействие на спектр автодина.

Обратная связь, вызванная частичным отражением света от следующих за лазером оптических элементов, может значительно ухудшить характеристики самого лазера. Возвращение в активную область лазера даже малой части излучения, отразившегося от внешних элементов оптической схемы, может привести к развитию хаотической генерации, которая проявляется в увеличении шумов оптической мощности (паразитной амплитудной модуляции).

Параметр обратной связи C имеет большое значение, поскольку он различает разные режимы обратной связи:

- Для $C \ll 1$ мы имеем очень слабый режим обратной связи.
- При $0,1 < C < 1$ имеем режим слабой обратной связи.
- При $1 < C < 4,6$ имеем умеренный режим обратной связи.
- При $C > 4,6$ имеем режим сильной обратной связи.

Из анализа спектров следует, что с увеличением уровня обратной связи происходит обогащение спектра и изменение величин всех гармоник по сравнению с гармониками спектра автодинного сигнала для $C \ll 1$.

В четвертой главе представлено математическое моделирование автодинного сигнала при различных значениях внешней оптической обратной связи.

Задавалось ускорение, по которому находилась частота для случая, когда обратная связь отсутствовала. После чего параметр обратной связи менялся от значения 0.1 до 0.9 с шагом 0.1. Можно наблюдать, что с каждым увеличением параметра обратной связи наблюдается изменение спектра и самого автодинного сигнала (появляется наклон и спектр автодинного сигнала обогащается). При большом значении параметра обратной связи (около 1) сам автодинный спектр искажается, что приводит к изменению частоты на середине

спада, соответственно, и ускорение также будет изменяться. С увеличением уровня обратной связи растёт и отклонение в частоте от эталонной. Чем больше уровень внешней оптической обратной связи, тем больше погрешность в измерениях частоты, а следовательно, и ускорения.

В пятой главе описывается практическая реализация одного из новейших методов измерения ускорения с помощью полупроводникового лазерного автодина, а также приведена экспериментальная оценка влияния внешней оптической связи на результаты измерения.

Измерения проводились на установке, в состав которой входили: полупроводниковый автодин на лазерном диоде с длиной волны 654 нм, отражатель, пьезокерамика, генератор сигналов, встроенный в лабораторную станцию виртуальных приборов NIELVIS, блок управления током питания, фотоприемник, усилитель сигнала, фильтр переменного сигнала, АЦП, компьютер. Изменение ускорения задавалось скоростью изменения напряжения, прикладываемого к пьезокерамике.

В качестве формы сигнала была выбрана составная функция, которая состояла из трёх временных отрезков.

Измерения автодинного сигнала проводились в диапазоне напряжений от 1 до 6 В, за время 0,5 сек (всего 50000 точек). В результате эксперимента были получены автодинные сигналы при каждом из шести напряжений.

После этого происходила обработка данных. С помощью инструментов приближения и трассировки выбиралась область автодинного сигнала, и по ней строился автодинный спектр с различными гармониками.

По увеличенному в масштабе участку сигнала были определены начальная и конечная точки, на которых наблюдалось ускорение. Также с помощью программы были построены автодинные спектры для всех 6 случаев.

В эксперименте ускорение высчитывалось по формулам:

$$v = \frac{f \cdot \lambda_0}{2}, \quad (1)$$

где f - частота, λ_0 - длина волны лазерного автодина (const), v - скорость.

После определения скорости, можно посчитать ускорение по формуле:

$$a = \frac{v}{T}, \quad (2)$$

Где T -период, a - ускорение, которое в результате эксперимента и искалось.

После завершения обработки данных были получены ускорения для всех 6 случаев.

По этим данным строилась зависимость ускорения от амплитуды (напряжения).

Из данной зависимости было получено, что ускорение с увеличением напряжения линейно возрастает.

На экспериментальном графике заметны небольшие отклонения, из-за которых линия зависимости не является идеально прямой. Они могли возникнуть из-за внешней оптической обратной связи.

Моделирование показывает, что даже при небольшом значении обратной связи она может незначительно повлиять на измерения.

При увеличении угла наклона на автодинном сигнале возрастает погрешность измерения. Чем меньше угол наклона, тем меньше и погрешность в измерении. Из этого следует, что чем больше уровень обратной связи, тем больше погрешность, так как угол наклона зависит от внешней оптической обратной связи.

Также в результате эксперимента было исследовано, что при уровне обратной связи больше единицы автодинный сигнал сильно искажается и по нему нельзя корректно определять различные параметры.

Заключение

Используемый в эксперименте метод измерения ускорения по спектру автодинного сигнала использует хорошо зарекомендовавший себя машинный метод Фурье-анализа, который широко используется для обработки сигналов сложной формы.

Цель работы была достигнута через пошаговую реализацию поставленных задач.

В процессе моделирования были получены автодинные сигналы и их спектры с разными уровнями обратной связи. Можно сказать, что при низком уровне обратной связи автодинный сигнал и спектр не сильно искажаются (происходит обогащение спектра), однако при увеличении параметра обратной связи увеличивается наклон автодинного сигнала, и спектр сильно изменяется. Также в ходе моделирования была построена зависимость частоты на середине спада спектра от уровня обратной связи, и было получено, что чем больше уровень обратной связи, тем больше погрешность измерения.

В результате анализа и обработки данных были получены автодинные спектры, по которым были вычислены ускорения для разных случаев. В ходе практической части была построена экспериментальная зависимость ускорения от амплитуды. Анализ этой зависимости показал, что экспериментальные данные согласуются с теоретическими. Также были получены автодинные сигналы и их спектры при различных уровнях внешней оптической обратной связи.

В ходе эксперимента была получена экспериментальная зависимость погрешности измерения ускорения от разницы тангенсов углов (наклона автодинного сигнала). Чем больше наклон автодинного сигнала, тем больше уровень обратной связи и, следовательно, больше погрешность измерения ускорения, что сходится и с результатом моделирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing applications. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2002, vol. 4, iss. 6, pp. 283–294.
2. Norgia M., Donati S. A displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2003, vol. 52, iss. 6, pp. 1765–1770.
3. Wang Y., Xie F., Ma S., Dong L. Review of surface profile measurement techniques based on optical interferometry. *Opt. Lasers Eng.*, 2017, vol. 93, pp. 164–170.
4. Gouaux F., Servagent N., Bosch T. Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer. *Appl. Opt.*, 1998, vol. 37, iss. 28, pp. 6684–6689. DOI: 10.1364/AO.37.006684
5. Guo D., Wang M. Self-mixing interferometry based on a double modulation technique for absolute distance measurement. *Appl. Opt.*, 2007, vol. 46, iss. 9, pp. 1486–1491.
6. Reza S. A., Khwaja T. S., Mazhar M. A., Niazi H. K., Nawab R. Improved laser-based triangulation sensor with enhanced range and resolution through adaptive optics-based active beam control. *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, iss. 21, pp. 5996–6006.
7. Zhong J., Zhang X., Ju Z. Absolute small-angle measurement based on optical feedback interferometry. *Opt. Lett.*, 2008, vol. 6, pp. 830–832.
8. Yang B., Wang D., Zhou L., Wu S., Xiang R., Zhana W., Gui H., Liu J., Wang H., Benli Y. An ultra-smallangle self-mixing sensor system with high detection resolution and wide measurement range. *Optics & Laser Technology*, 2017, vol. 91, pp. 92–97. DOI: 10.1016/j. optlastec.2016.11.024
9. Donati S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements. *Laser Photonics Rev.*, 2012, vol. 6, iss. 3, pp. 393–417. DOI: 10.1002/ lpor.201100002

10. Zhu W., Chen Q., Wang Y., Luo H., Wu H., Ma B. Improvement on vibration measurement performance of laser self-mixing interference by using a prefeedback mirror. *Opt. Lasers Eng.*, 2018, vol. 105, pp. 150–158.
11. Sels S., Ribbens B., Bogaerts B., Peeters J. 3D model assisted fully automated scanning laser Doppler vibrometer measurements. *Opt. Lasers Eng.*, 2017, vol. 99, pp. 22–30.
12. Xu J., Huang L., Yin S., Bingkun G., Chen P. All-fiber self-mixing interferometer for displacement measurement based on the quadrature demodulation technique. *Opt. Rev.*, 2018, vol. 25, iss. 1, pp. 40–45.
13. Lin H., Chen J., Xia W., Hao H., Guo D., Wang M. Enhanced self-mixing Doppler velocimetry by fiber Bragg grating. *Opt. Eng.*, 2018, vol. 57, iss. 5, 051504. DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051504
14. Zabit U., Bernal O. D., Bosch T. Design and Analysis of an Embedded Accelerometer Coupled Self-Mixing Laser Displacement Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 2013, vol. 13, iss. 6, pp. 2200–2207. DOI: 10.1109/jsen.2013.2251626
15. Yang Y., Li X., Kou K., Zhang L. Optical accelerometer design based on laser self-mixing interference. *Proc. of SPIE*, 2015, vol. 9369, 93690R. DOI: 10.1117/12.2076463.
16. Ю.Юрчук // Журнал Фотоника, 2016, 5, с: 34-41.
17. Кашавцев Е.О., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю.. Метод определения ускорения при микро- и наносмещениях объекта по сигналу лазерного автодина с учетом влияния внешней оптической обратной связи // Тезисы докладов VII Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». - Саратов: Изд-во. Сарат. ун.-та. 2012. С. 71-72.
18. Усанов Д. А., Мареев О. В., Скрипаль А. В., Камышанский А. С. Измерение амплитуды колебаний барабанной перепонки по спектру автодинного 130 Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль. Полупроводниковые лазерные автодины сигнала полупроводникового лазера на

- квантоворазмерных структурах // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2004. № 8–9. С. 94–97.
19. Donati S 2000 Photodetectors, Devices, Circuits and Applications (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall) ch 8.
20. Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.О. Кащавцев, С.Ю. Добдин. ЖТФ, 83 (7), 156 (2013).
21. О.И. Чанилов, Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.С. Камышанский. Письма в ЖТФ, 31 (21), 9 (2005).
22. Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль. Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях (Изд-во Саратовского унта, Саратов, 2014)
23. Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, К.С. Авдеев. Определение расстояния до объекта с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ, 2007, том 33, вып. 21. С. 72–77.
24. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Вагарин В. А. Определение амплитуды колебаний оптическим гомодинным методом по высшим гармоникам // ПТЭ. 1994. № 6. С. 162–165.
25. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение нанометровых вибраций полупроводниковым лазером на квантоворазмерных структурах, работающим в автодинном режиме // Письма в ЖТФ. 2003. № 9. С. 51–57.
26. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Камышанский А. С. Измерение скорости движения объекта по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах // Микросистемная техника. 2004. № 2. С. 19–23.
27. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Вагарин А. Ю., Скрипаль Ан. В., Потапов В. В., Шмакова Т. Т., Мосияш С. С. Лазерная автодинная интерферометрия динамических параметров биообъектов // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, вып. 5. С. 39–43.
28. Skripal A. V., Usanov D. A. Semiconductor laser interferometry of eye movements // Proc. SPIE. 2000. Vol. 3908. P. 7–12.

29. Усанов Д. А., Мареев О. В., Скрипаль А. В., Мареев Г. О. Лазерные автодинные измерения параметров движений барабанной перепонки // Рос. журн. биомеханики. 2012. Т. 16, № 1. С. 8–21.
30. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев К. С. Изменение спектра сигнала лазерного полупроводникового автодина при фокусировке излучения // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 2. С. 54–65.
31. Пат. 2208769 Российская Федерация. МПК G01H9/00. Способ определения амплитуд вибраций / Усанов Д. А., Скрипаль А. В. – № 2002111302/28; заявл. 25.04.2002; опубл. 20.07.2003; Бюл. № 20.
32. Добдин С. Ю., Джафаров А. В., Щедринов М. П., Инкин М. Г., Скрипаль Ан. В. Измерения наносмещений частотномодулированным лазерным автодином // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 157–164. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-2-157-164>
33. Скрипаль Ан. В., Добдин С. Ю., Джафаров А. В., Садчикова К. А., Феклистов В. Б. Измерение расстояния при гармонической модуляции длины волны лазерного автодина с учётом внешней оптической обратной связи // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 84–91. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-84-91>
34. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties// IEEE J. Quantum Electron. 1980. Vol. QE-16. P. 347-355.
35. Usanov DA, Skripal AV. Measurement of micro-and nanovibrations and displacements using semiconductor laser autodynes. Quantum Electronics 2011; 41(1):86–94.
36. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Калинин М. Ю. Формирование автодинного сигнала в полупроводниковом лазере при движении внешнего отражателя// Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т.6, №1. С.3–9.