

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

**Измерение расстояния по спектру автодинного сигнала при пилообразной
токовой модуляции длины волны полупроводникового лазера**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 411 группы

направления (специальности) 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Баласанян Дианы Баласановны

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

Ан. В. Скрипаль

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

А. В. Скрипаль

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов 2020

Благодаря применению полупроводниковых лазеров в качестве перестраиваемых источников когерентного излучения открываются возможности разработки систем измерения малых габаритов. Полупроводниковые лазерные автодинные интерферометры, имеющие оптическую обратную связь, являются одним из вариантов такого рода измерителей. Данные устройства дают возможность определения характеристик нановибраций и микроперемещений, скоростных и ускорительных величин.

Проблема данного дипломного исследования заключается в том, что необходимо повысить точность автодинной интерферометрии расстояния с применением пилообразной токовой модуляции длины волны полупроводникового лазера.

Значения точности, из которых начинались измерения абсолютных расстояний по частоте модуляции фазы автодинного сигнала за счет частотной модуляции тока питания лазерного диода (FMCW), являлись очень низкими (несколько миллиметров) и на сегодняшний день достигли показателей в несколько сотен и даже десятков микрон. Точность измерений при этом зависит от диапазона девиации длины лазерной волны.

Целью дипломной работы является изучение того, как диапазон девиации влияет на точность измерения абсолютного расстояния при пилообразной модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера.

Задачи дипломного исследования заключаются в:

1. Изучении основных методов определения абсолютного расстояния.
2. Исследовании формы автодинного сигнала при пилообразной токовой модуляции.
3. Осуществлении расчета зависимости между интерференционным сигналом и спектром при пилообразной токовой модуляции и величиной девиации длины лазерной волны.

Реализация определения абсолютного расстояния посредством полупроводникового лазера в настоящее время осуществляется через задержку лазерного импульса, при использовании методов триангулометрии и интерферометрии.

Метод автодинной интерферометрии расстояния.

Физическое явление, благодаря которому применение полупроводникового лазера делает возможным детектирование колебаний - шумы, обусловленные обратным светом. Рассмотрим рисунок 1.

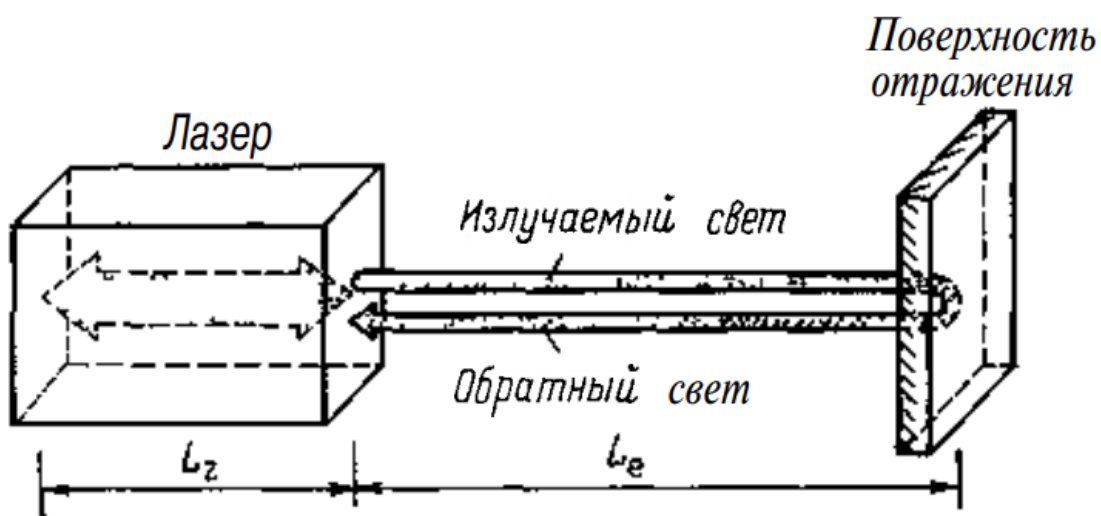


Рисунок 1. Возникновение шумов от обратного света.

При отражении света, излучаемого полупроводниковым лазером, от различных препятствий (внешнее зеркало, торец оптического волокна и др.) с последующим его возвращением в лазер с произвольной фазой, такой отраженный свет корректирует условия генерации лазерного устройства и оказывает существенное влияние на рост модуляционных шумов интенсивности и шумов частотной модуляции. В связи с природой этих вносимых шумов они получили название шумов от обратного света. Данное явление в определенной степени является характерным для всех типов лазеров, однако показатель отражения торцевой поверхности резонатора в полупроводниковых лазерах примерно на треть меньше относительно других типов лазеров, чем обуслов-

лена большая легкость проникновения обратного света внутрь резонатора и его более заметное влияние.

Диаграммы, приведенные на рисунке 2, показывают зависимость колебаний мощности излучаемого света от интенсивности обратного света. Данное воздействие обратного света является заметным при интенсивности его 0,003 % относительно излучаемого света, а при 5 % обратный свет уже ведет к импульсной генерации.

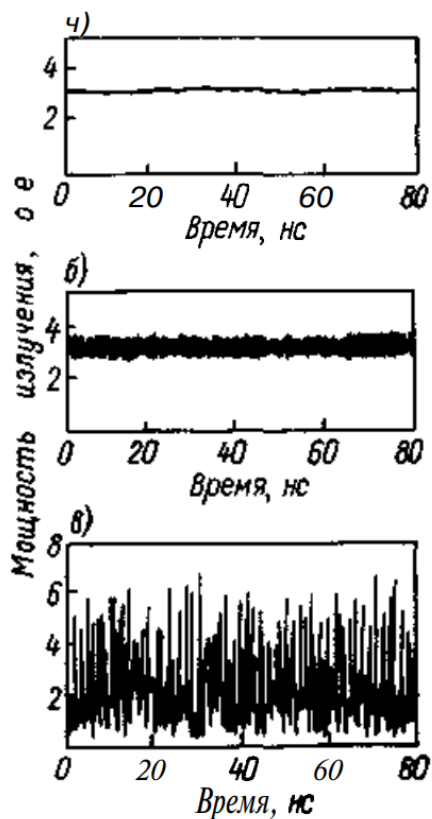


Рисунок 2. Временные колебания мощности лазерного луча из-за обратного света при $L_e=5$ см и соотношении мощности обратного и излучаемого света, равном нулю (а), 0,003% (б) и 5% (в).

Автодинная интерферометрия при пилообразной модуляции длины волны лазерного излучения

Благодаря применению данных шумов появляется определенная возможность измерения колебаний на микро- и наноуровнях.

В отличие от интерференции волн по схеме Майкельсона в автодине происходит интерференция падающей и отраженной волн. В результате для лазерного излучения мы имеем новый резонатор, в котором возникает стоячая волна, а в зависимости от длины этого резонатора наблюдается усиление или ослабление собственного излучения лазерного диода. При модуляции длины волны лазерного излучения на внешнем фотоприемнике будет наблюдаться модуляция интенсивности излучения лазерного диода.

Поскольку при модуляции тока питания лазерного диода происходит изменение его мощности излучения, моделирование будем проводить при учете вклада в автодинный сигнал амплитудных составляющих мощности P_1 и P_2 :

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2 \cdot \cos(\omega(j(t))\tau_0(t)), \quad (1)$$

где $P_1(j(t))$ – составляющая мощности, зависящая от тока питания лазерного диода, P_2 – составляющая мощности, зависящая от величины отраженной волны через коэффициент отражения рассеивающей поверхности и зависящая от фокусирующих свойств оптической системы лазерного автодина.

Моделирование автодинного сигнала проводилось при параметрах: $\lambda = 650$ нм, девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода $\lambda = 0.02 \cdot 10^{-9}$ м, расстояние до объекта $L = 0.105625$ м.

Для параметров $P_1=10$, $P_2=1$, частоте модуляции тока питания лазера 100 Гц на рис.3 приведен смоделированный автодинный сигнал, а на рис. 4 его спектр.

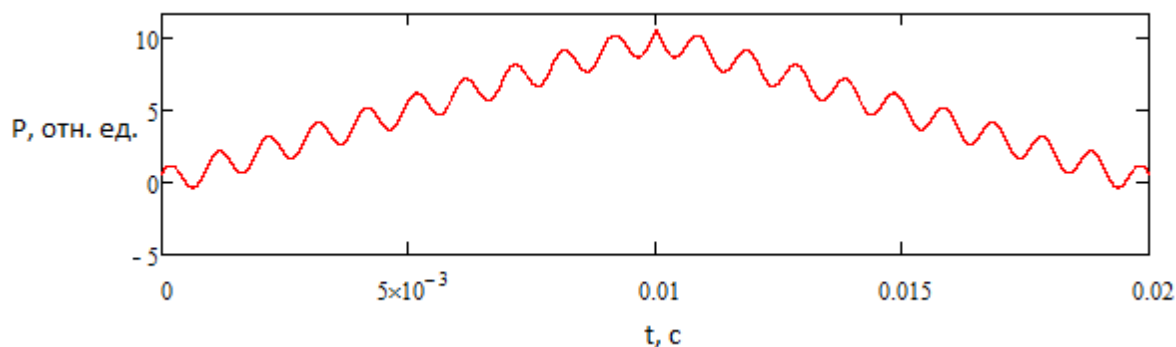


Рисунок 3. Смоделированный автодинный сигнал при параметрах: $\lambda = 650$ нм, $\lambda = 0.02 \cdot 10^{-9}$ м, $n=20$, $L= 0.105625$ м

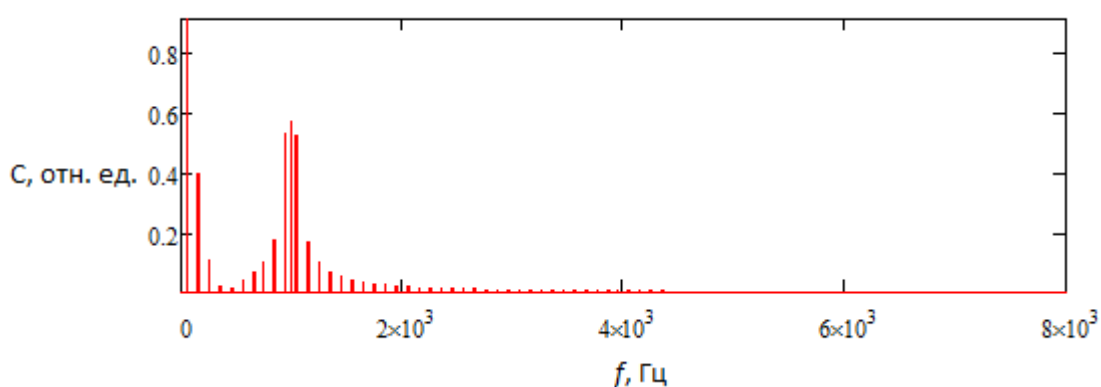


Рисунок 4. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис.9

На рис. 4 в спектре автодинного сигнала появились три гармоники с наибольшей амплитудой. Из них для определения погрешности выбираем среднюю гармонику. Частота средней гармоники $f=1000$ Гц. Погрешность определения расстояния по этой гармонике составляет величину 0.6 мкм, а относительная погрешность 0.000568%

Увеличивая девиацию длины волны излучения лазера и количество максимумов, для того, чтобы расстояние оставалось неизменным, рассчитываем абсолютную и относительную погрешности.

При увеличении девиации до $0,1$ нм на том же расстоянии до объекта $L=0.105625$ м, количество интерференционных максимумов достигнет $n=1000$. На рис. 27 приведён смоделированный автодинный сигнал при параметрах: $\lambda=650$ нм, $\Delta\lambda= 0.1$ нм, $n=1000$, $L_{1000} = 0.105625$ м.

Таким образом, при увеличении девиации длины волны излучения лазера до 0,1 нм точность измерений расстояния увеличивается до половины равнофазного расстояния, а именно составляет 52.812 мкм на расстоянии 105,625 мм.

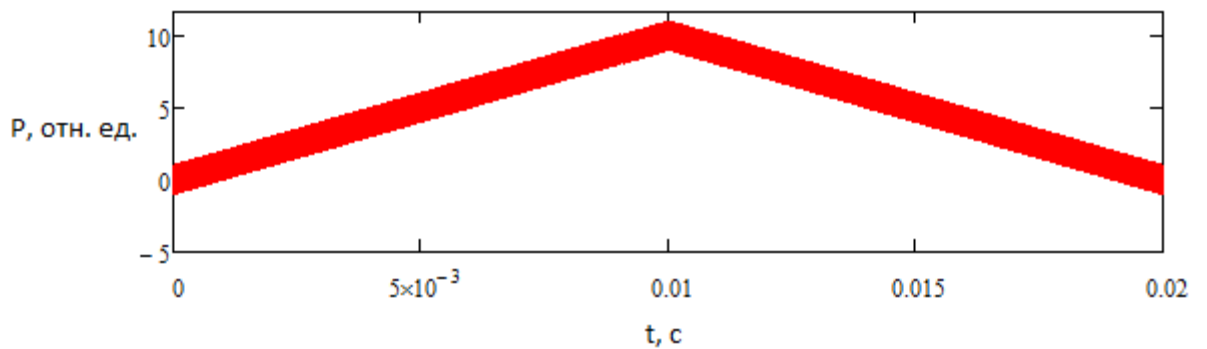


Рисунок 5. Смоделированный автодинный сигнал при параметрах: $\lambda=650$ нм, $\Delta\lambda=0.1$ нм, $n=1000$, $L=0.105625$ м

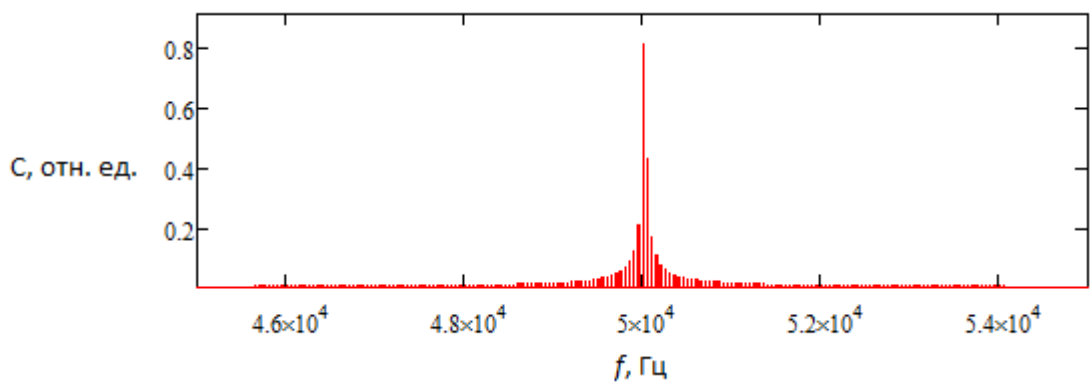


Рисунок 6. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 5

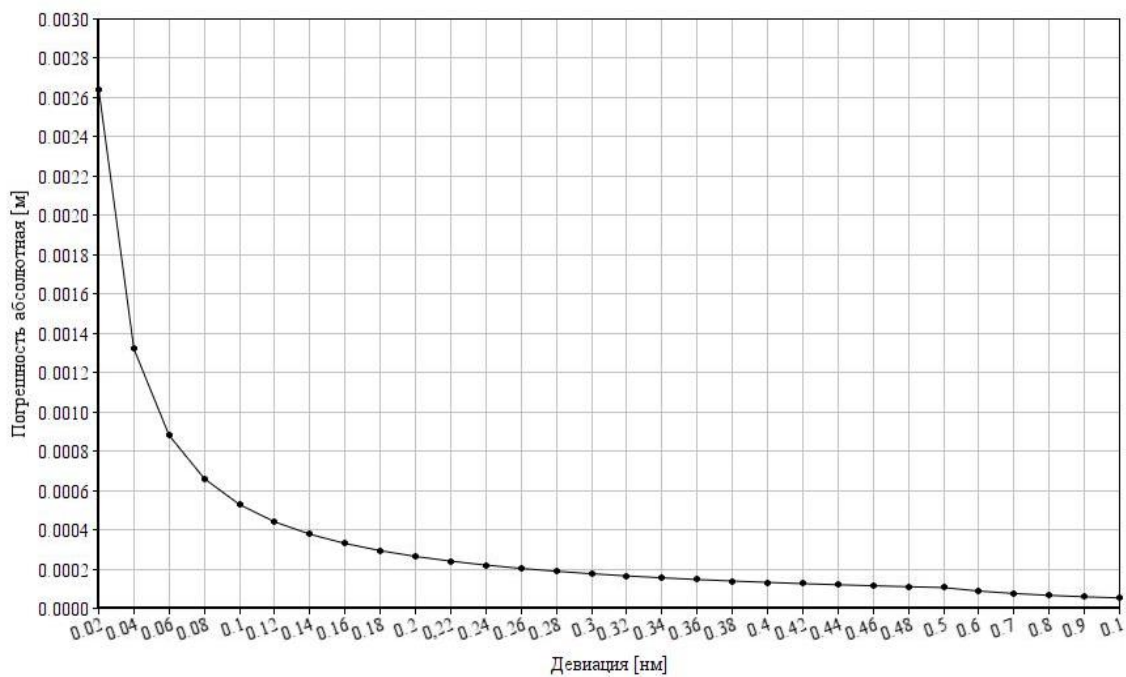


Рисунок 7. График зависимости абсолютной погрешности от величины девиации длины волны излучения лазера

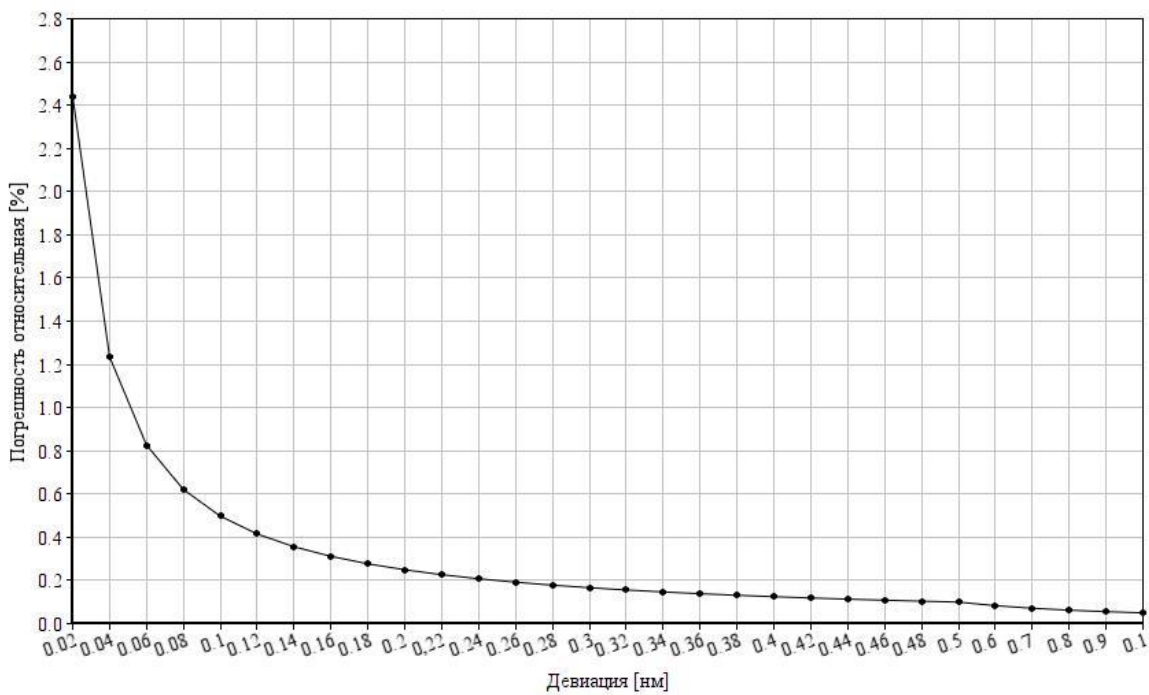


Рисунок 8. График зависимости относительной погрешности от величины девиации длины волны излучения лазера

Заключение

В ходе выполнения квалификационной работы были изучены методы определения абсолютного расстояния и их практическое применение.

Проведено компьютерное моделирование автодинного сигнала при пилообразной токовой модуляции с изменением величины девиации длины волны излучения лазера. Построены спектры автодинного сигнала при различных значениях девиации.

Результаты компьютерного моделирования показали, что при увеличении девиации длины волны излучения лазера до 0,1 нм точность измерений расстояния увеличивается до половины равнофазного расстояния, а именно составляет 52.812 мкм на расстоянии 105,625 мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bosch, T. Optical distance measurement methods can technically be put into three categories: interferometry, time-of-flight and triangulation methods / T. Bosch, M. Lescure // Selected Papers on Laser Distance Measurement. SPIE Milestone Series. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press. – 1995. – Vol. 115. – P. 738.
2. Kilpelä, A. Precise pulsed time-of-flight laser range finder for industrial distance measurements / A. Kilpelä, R. Pennala, J. Kostamovaara // Review of Scientific Instruments. – 2001. – Vol. 72, Issue 4. – P. 2197-2202. – DOI: 10.1063/1.1355268.
3. Lee, J. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses / J. Lee, Y.-J. Kim, K. Lee, S. Lee, S.-W. Kim // Nature Photonics. – 2010. – Vol.4. – P. 716-720.
4. Hintikka, M. Experimental investigation into laser ranging with sub-ns laser pulses / M. Hintikka, J. Kostamovaara // IEEE Sensors Journal. – 2018. – Vol. 18, Issue 3. – P. 1047- 1053.
5. Ji, Z. Design of optical triangulation devices / Z. Ji, M.C. Leu // Optics & Laser Technology. – 1989. – Vol. 21, Issue 5. – P. 339-341.
6. Clarke, T.A. Laser-based triangulation techniques in optical inspection of industrial structures / T.A. Clarke, K.T.V. Grattan, N.E. Lindsey // Proceedings of SPIE. – 1991. – Vol. 1332. – P. 474-487. – DOI: 10.1117/12.51096.
7. Syed, A.R. Improved laser-based triangulation sensor with enhanced range and resolution through adaptive opticsbased active beam control / S.A. Reza, T.S. Khwaja, M.A. Mazhar, H.K. Niazi, R. Nawab. // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56, Issue 21. – P. 5996-6006.
8. Daendliker, R. High-accuracy distance measurements with multiple-wavelength interferometry / R. Daendliker, K. Hug, J. Politch, E. Zimmermann // Optical Engineering. – 1995. – Vol. 34, Issue 58. – P. 2407-2413. – DOI: 10.1117/12.205665.
9. Berkovic, G. Optical methods for distance and displacement measurements / G. Berkovic, E. Shafir // Advances in Optics and Photonics. – 2012. – Vol. 4, Issue 4. – P. 441- 471. – DOI: 10.1364/AOP.4.000441.
10. Усанов Д.А. Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 1. – С. 86-94.

11. Giuliani G. Laser diode self-mixing technique for sensing applications / G. Giuliani, M. Norgia, S. Donati, T. Bosch // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2002. – Vol. 4, No 6. – P. S283-S294.
12. Усанов, Д.А. Измерение микро- и нано-вибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль // *Квантовая электроника*. – 2011. – Т. 41, № 1. – С. 86-94.
13. Li, D. Equivalent wavelength self-mixing interference vibration measurements based on envelope extraction Fourier transform algorithm / D. Li, Z. Huang, W. Mo, Y. Ling, Z. Zhang, Z. Huang // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56, Issue 31. – P. 8584-8591 – DOI: 10.1364/AO.56.008584.
14. Zhu, W. Improvement on vibration measurement performance of laser self-mixing interference by using a pre-feedback mirror / W. Zhu, Q. Chen, Y. Wang, H. Luo, H. Wu, B. Ma // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 105. – P. 150-158.
15. Norgia, M. A displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry / M. Norgia, S. Donati // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2003. – Vol. 52, Issue 6. – P. 1765-1770.
16. Xu, J. All-fiber self-mixing interferometer for displacement measurement based on the quadrature demodulation technique / J. Xu, L. Huang, S. Yin, B. Gao, P. Chen // *Optical Review*. – 2018. – Vol. 25, Issue 1. – P. 40-45.
17. Guo, D. Micro-displacement reconstruction using a laser self-mixing grating interferometer with multiple diffraction / D. Guo, L. Shi, Y. Yu, W. Xia, M. Wang // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 25. – P. 31394-31406. – DOI: 10.1364/OE.25.031394.
18. Koelink, M.H. Laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser: theory / M.H. Koelink, M. Slot, F.F. de Mul // *Applied Optics*. – 1992. – Vol. 31, Issue 18. – P. 3401-3408.
19. Scalise, L. Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement / L. Scalise, Y.G. Yu, G. Giuliani, G. Plantier, T. Bosch // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2004. – Vol. 53, Issue 1. – P. 223-232.
20. Lin, H. Enhanced self-mixing Doppler velocimetry by fiber Bragg grating / H. Lin, J. Chen, W. Xia, H. Hao, D. Guo, M. Wang // *Optical Engineering*. – 2018. – Vol. 57, Issue 5. – DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051504.

21. Guo, D. Laser self-mixing grating interferometer for MEMS accelerometer testing / D. Guo, H. Jiang, L. Shi, M. Wang // IEEE Photonics Journal. – 2018. – Vol. 10, Issue 1. – P. 1-9.
22. Усанов, Д.А. Определение ускорения при микро- и наносмещениях по автодинному сигналу полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, С.Ю. Добдин // Письма в ЖТФ. – 2010. – № 21. – С. 78-84.
23. Усанов, Д.А. Определение ускорения при неравномерно ускоренных микро- и наносмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, С.Ю. Добдин // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 10. – С. 51-54.
24. Усанов, Д.А. Автодинная интерферометрия расстояния с помощью полупроводникового лазера при токовой модуляции длины волны излучения / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.И. Астахов, И.С. Костюченко, С.Ю. Добдин // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 54-59. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-54-59.
25. Norgia, M. High resolution self-mixing laser rangefinder / M. Norgia, A. Magnani, A. Pesatori // Review of Scientific Instruments. – 2012. – Vol. 83, Issue 4. – 045113. – DOI: 10.1063/1.3703311.
26. Kou, K. Injected current reshaping in distance measurement by laser self-mixing interferometry / K. Kou, X. Li, L. Li, H. Xiang // Applied Optics. – 2014. – Vol. 53, Issue 27. – P. 6280-6286. – DOI: 10.1364/AO.53.006280.
27. http://machinopedia.org/index.php/Лазерный_диод [Электронный ресурс]
28. Donati S., Giuliani G., Merlo S. Laser diode feedback interferometer for measurements of displacements without ambiguity// IEEE J. Quantum Electron. 1995. Vol. 31, №1. P. 113-119.
29. Donati S., Fazolini L., Merlo S. A PC-Interfaced, compact laserdiode feedback interferometer for displacement measurement // IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement. 1996. Vol. 45. №6.. P 942-947.
30. 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.

31. Plantier G., Servagent N., Bosch T., Sourice A. Real-Time Tracking of Time-Varying Velocity Using a Self-Mixing Laser Diode // IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement. 2004. Vol. 53, №1. P. 109-115. 103
32. Bosch T., Servagent N. Optical feedback interferometry for sensing application // Opt. Eng. 2001. Vol. 40. №1. P. 20-27.
33. Giuliani G., Bozzi-Pietra S., Donati S. Self-mixing laser diode vibrometer // Meas.Sci.Technol. 2003. Vol. 14. P. 24-32.
34. Norgia M., Donati S. A Displacement-Measuring Instrument Utilizing Self-Mixing Interferometry // IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement. 2003. Vol. 52. №6. P. 1765-1770.
35. Donati S., Merlo S., Micolano F. Feedback interferometry with semiconductor laser for high resolution displacement sensing // SPIE Vol. 2783. 1996. P. 203-210.
36. Scalise L., Yu Y., Giuliani G., Plantier G., Bosch T. Self-Mixing Laser Diode Velocimetry: Application to Vibration and Velocity Measurement // IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement. 2004. Vol. 53. №1. P. 223- 232.
37. Giuliani G., Norgia M., Donati S. Self-Mixing Laser Diode Vibrometer for the Measurement of Differential Displacements // Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, edited by Enrico Primo Tomasini. Proc. of SPIE Vol. 7098. P. 1-5.
38. Giuliani G., Norgia M., Donati S. and Bosch T. Laser diode selfmixing technique for sensing application // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2002. Vol. 4. P. 283-294.
39. Amann, M.C. Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement / M.C. Amann, T. Bosch, M. Lescure, R. Myllyla, M. Rioux // Optical Engineering. – 2001. – Vol. 40, Issue 1. – P. 10-19.
40. Giuliani, G. Laser diode self-mixing technique for sensing applications / G. Giuliani, M. Norgia, S. Donati, T. Bosch // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2002. – Vol. 4, Issue 6. – P. S283-S294.
41. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Астахов Е.И., Добдин С.Ю. Автодинная интерферометрия для определения расстояния при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера//Письма в ЖТФ/ том 42, вып. 17 / 2017 С. 796-799.