

Лазерная автодинная регистрация наноперемещений при модуляции длины волны лазерного излучения

Д.А.Усанов, А.В.Скрипаль, Е.И.Астахов, С.Ю.Добдин

Исследованы особенности формирования автодинного интерференционного сигнала при токовой модуляции длины волны лазерного излучения. Впервые предложен метод определения стационарной фазы автодинного сигнала на основе анализа низкочастотного спектра лазерной автодинной системы. Приведены результаты измерений наноперемещений электромагнитного транслятора по отношению спектральных составляющих автодинного сигнала при гармонической токовой модуляции длины волны лазерного автодина.

Ключевые слова: лазерная интерферометрия, автодин, полупроводниковый лазер, модуляция излучения лазера, измерение расстояния, микровибрация, спектральный анализ сигнала.

1. Введение

Современные системы определения расстояний и измерения перемещений основаны на регистрации фазы отраженного лазерного излучения [1–4], на применении методов лазерной интерферометрии с изменением длины волны излучения лазерного диода [5–7], а также на использовании калибровочных зависимостей контролируемой физической величины от расстояния до зондируемой поверхности [8–11]. Однако эти системы измерения имеют ряд недостатков, обусловленных необходимостью знания калибровочных зависимостей измеряемой величины, недостаточной разрешающей способностью лазерных дальномеров и громоздкостью измерительной системы.

В связи с этим представляет интерес использовать для контроля расстояния полупроводниковые лазерные автодины, отличающиеся компактностью и малым весом [12, 13]. Под термином «автодины» понимаются открытые автоколебательные системы, способные реагировать на какие-либо внешние воздействия на них [14]. Однако в отечественной и зарубежной литературе приняты также термины «лазер с запаздывающей обратной связью» [15], self-mixing laser [16] и др.

Для измерения наносмещений с помощью таких автодинных интерференционных лазерных систем используют переменную составляющую зарегистрированного сигнала, которая появляется при возбуждении в отражателе вибраций с амплитудой, большей половины длины волны лазерного излучения [17]. Нами предлагается использовать для получения переменного зарегистрированного сигнала гармоническую токовую модуляцию длины волны лазерного излучения [18, 19]. В качестве примера рассматривается возможность применения такого автодин-

ного измерителя для контроля наноперемещений зонда сканирующего ближнепольного СВЧ микроскопа, определяющего точность измерений с помощью данного микроскопа.

2. Автодинное детектирование в полупроводниковых лазерах

В СССР теорию автодинов развил И.Л.Берштейн – известный ученый в области теории генераторов [20]. Он впервые поставил и весьма корректно решил задачу о воздействии на автоколебательную систему собственного сигнала, отраженного от движущейся цели [21]. Значительный вклад в теорию автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах внесли работы Н.Г.Басова с сотрудниками [22], Р.Ф.Казаринова, Р.А.Суриса, А.А.Тагера [23, 24], а также Е.М.Гершензона с сотрудниками [25, 26].

В работе [23] в систему уравнений для амплитуды электромагнитного поля и баланса инжектированных электронов в активном слое полупроводникового лазера вводится функция, описывающая внешнее возмущение, которое вносится вводимой в резонатор полупроводникового лазера электромагнитной волной. В работе [22] эта система уравнений совместно с уравнением для восприимчивости была использована для расчета амплитуды и частоты генерируемых колебаний при воздействии отраженной электромагнитной волны и для описания влияния фазового набега возвратившейся в резонатор волны на форму автодинного сигнала. Предложенная в работах [27, 28] модификация скоростных уравнений, в которой учитывается вклад спонтанного излучения в генерируемые моды, оказалась применимой для описания процессов вблизи порога генерации, что важно для автодинных систем, поскольку именно вблизи порога генерации коэффициент автодинного усиления имеет максимальное значение [12, 28].

Поскольку система скоростных уравнений не подходит для описания когерентного автодинного приема, требующего анализа фазовых соотношений прямой и отраженной волн, Р.Лэнгом и К.Кобаяши [29] была предложена система дифференциальных уравнений для амплитуды

Д.А.Усанов, А.В.Скрипаль, Е.И.Астахов, С.Ю.Добдин. Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского, Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83; e-mail: usanovda@info.sgu.ru

Поступила в редакцию 30 июня 2017 г., после доработки – 6 февраля 2018 г.

и фазы электромагнитного поля, а также для концентрации носителей заряда. При этом в уравнение для амплитуды поля включено слагаемое, учитывающее внешнюю оптическую обратную связь. Дальнейшие исследования режимов генерации диодного лазера с внешним зеркалом на основе уравнений Лэнга–Кобаяши проводились авторами работ [15, 30, 31]. Поскольку анализ динамики излучения лазеров выполнялся параллельно с анализом работы СВЧ автодинов, то одновременно с термином «автодин» стал использоваться термин «лазер с внешней обратной связью» [32–34].

При проведении интерференционных измерений важным параметром автодиной системы является уровень внешней оптической обратной связи. Для исключения перескоков мод и уменьшения сдвига частоты излучения лазерного диода, вызванного изменением концентрации носителей заряда в активной области, предложено уменьшать уровень обратной связи [34–36]. Очевидно, что этот уровень будет также влиять и на вид автодиного сигнала, формируемого при модуляции длины волны лазерного излучения. Однако влиянием внешней оптической обратной связи на форму и спектр автодиного сигнала при уровне обратной связи $C < 0.1$ можно пренебречь, поскольку автодиный сигнал $P(t)$ в этом случае будет совпадать по форме с интерференционным сигналом в системе с развязкой от источника излучения [37, 38].

3. Формирование автодиного сигнала при модуляции длины волны лазерного излучения

Выражение для интерференционного сигнала при модуляции длины волны лазерного излучения в автодиной системе будет отличаться от аналогичного выражения для систем с развязкой от источника излучения. В традиционных интерференционных схемах Майкельсона и Маха–Цендера имеется возможность выравнивания интенсивностей в двух каналах. Для полупроводникового лазера с внешней оптической обратной связью уравнение для мощности излучения лазерного автодина следует из модели составного резонатора Лэнга и Кобаяши [29] и может быть представлено в виде

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

где $P_1(j(t))$ – составляющая мощности, не зависящая от расстояния до внешнего отражателя; P_2 – амплитуда составляющей мощности, зависящей от фазового набега волны $\omega(j(t))\tau_0(t)$ в системе с внешним отражателем; τ_0 – время прохода лазерным излучением расстояния L до внешнего отражателя; $\omega(j(t))$ – частота излучения полупроводникового лазера, зависящая от плотности тока накачки $j(t)$ и уровня обратной связи.

При модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера его частота и амплитуда мощности определяются соотношениями

$$\omega(j(t)) = \omega_0 + \omega_A \sin(2\pi\nu t), \quad P_1(j(t)) = I_1 \sin(2\pi\nu t),$$

где ω_0 – собственная частота излучения полупроводникового лазерного диода; ω_A – девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода; ν – частота модуляции тока накачки лазерного диода; I_1 – амплитуда токовой модуляции составляющей $P_1(j(t))$.

Таким образом, выражение для мощности излучения частотно-модулированного полупроводникового лазера (1) запишется в виде

$$P(j(t)) = I_1 \sin(2\pi\nu t) + P_2 \cos[\omega_0\tau_0 + \omega_A\tau_0 \sin(2\pi\nu t)]. \quad (2)$$

Для описания низкочастотного спектра автодиного сигнала при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода мощность этого сигнала может быть представлена в соответствии с [19] в виде разложения в ряд по функциям Бесселя первого рода J_n :

$$\begin{aligned} P(t) &= I_1 \sin(\Omega t) + P_2 (\cos \theta) J_0(\sigma) \\ &+ 2P_2 (\cos \theta) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\sigma) \cos(2n\Omega t) \\ &- 2P_2 (\sin \theta) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\sigma) \sin[(2n-1)\Omega t], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\theta = \omega_0\tau_0$ – стационарная фаза автодиного сигнала; $\sigma = \omega_A\tau_0$; $\Omega = 2\pi\nu$ – круговая частота модуляции тока накачки лазерного диода.

Выражения для амплитуд S_n спектральных составляющих разложения в ряд по функциям Бесселя имеют вид

$$S_1 = I_1 - (\sin \theta) P_2 J_1(\sigma), \quad (4)$$

$$S_{2n} = 2(\cos \theta) P_2 J_{2n}(\sigma), \quad (5)$$

$$S_{2n+1} = 2(\sin \theta) P_2 J_{2n+1}(\sigma), \quad (6)$$

$$S_{2n+2} = 2(\cos \theta) P_2 J_{2n+2}(\sigma), \quad (7)$$

$$S_{2n+3} = 2(\sin \theta) P_2 J_{2n+3}(\sigma). \quad (8)$$

Соотношения (4)–(8) характеризуют связь спектральных составляющих частотно-модулированного автодиного сигнала с функциями Бесселя первого рода.

Для определения наноперемещений отражателя используем следующие соотношения:

$$S_{2n}/S_{2n+2} = J_{2n}(\sigma)/J_{2n+2}(\sigma), \quad (9)$$

$$S_{2n+1}/S_{2n+3} = J_{2n+1}(\sigma)/J_{2n+3}(\sigma). \quad (10)$$

Решение уравнений (9) и (10) относительно неизвестного параметра σ позволяет записать выражение для стационарной фазы автодиного сигнала в виде

$$\theta = \arctan \left[\frac{S_{2n+1} J_{2n}(\sigma)}{S_{2n} J_{2n+1}(\sigma)} \right]. \quad (11)$$

Принимая во внимание, что $\theta = \omega_0\tau$, а время прохода излучением длины смещения отражателя $\tau = \Delta L/c$, для наноперемещений отражателя ΔL получаем соотношение

$$\Delta L = \theta \frac{c}{\omega_0}. \quad (12)$$

Таким образом, для определения наноперемещений отражателя при токовой модуляции длины волны лазерного излучения по амплитудам фурье-спектра автодиного сигнала S_{2n} , S_{2n+2} , S_{2n+1} и S_{2n+3} нужно, используя уравнения (9) и (10), рассчитать значение параметра σ и по фор-

муле (11) найти стационарную фазу автодинного сигнала θ . Затем из выражения (12) с учетом периодичности функции $\arctan x$ мы определяем величину смещения отражателя.

4. Моделирование автодинного сигнала при наноперемещениях отражателя

Компьютерное моделирование автодинного сигнала при наноперемещениях отражателя проводилось при следующих параметрах: длина волны лазерного излучения $\lambda = 650$ нм, расстояние от лазера до отражающей поверхности $L = 10$ см, модуляция длины волны лазерного излучения осуществлялась на величину $\Delta\lambda = 0.002$ нм, частота модуляции тока накачки лазерного диода $\nu = 100$ Гц, шаг смещения отражателя $\delta L = 20$ нм.

На рис.1 и 2 представлены результаты компьютерного моделирования формы и спектра автодинных сигналов при токовой модуляции длины волны лазерного излучения и положениях отражателя, соответствующих $\Delta L = 0$ (рис.1) и 20 нм (рис.2). Видна зависимость формы и спектра сигнала от положения отражателя. При этом изменение спектра автодинного сигнала по сравнению с его формой выражено более отчетливо.

При решении обратной задачи по определению стационарной фазы автодинного сигнала с использованием соотношения (11) проводилось компьютерное моделирование амплитуд спектральных составляющих (9) и (10) при перемещении отражателя на 1200 нм. Зависимости четных и нечетных амплитуд фурье-спектра автодинного сигнала от перемещения отражателя (с шагом $\delta L = 20$ нм на расстояние 1200 нм) на примере второй, третьей и четвертой амплитуд приведены на рис.3. На нем наблюдает-

ся периодическое изменение амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала, обусловленное свойствами стоячей волны во внешнем резонаторе автодинной системы. При этом имеется область монотонности изменения амплитуды автодинного сигнала при перемещении отражателя в пределах $\Delta L = 0-160$ нм, соответствующих изменению длины волны лазерного излучения от нуля до $\lambda/4$.

5. Экспериментально наблюдаемые автодинные отклики полупроводниковой лазерной системы при движении отражателя

На рис.4 приведена блок-схема экспериментальной установки. Излучение частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина 1 (лазерный диод RLD-650(5) на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой) с длиной волны 650 нм, закрепленного на держателе 3 зонда ближнепольного СВЧ микроскопа, направлялось на поверхность отражателя 4, перемещение которого осуществлялось транслятором 5. Часть излучения от отражателя возвращалась в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось фотодетектором 6. Сигнал с фотодетектора поступал через усилитель 7 на АЦП 8. Цифровой сигнал с АЦП сохранялся в памяти ЭВМ 9 для последующей обработки. Накачка лазерного диода осуществлялась стабилизированным источником тока 2.

Модуляция длины волны излучения проводилась на частоте $\nu = 100$ Гц посредством управления током пита-

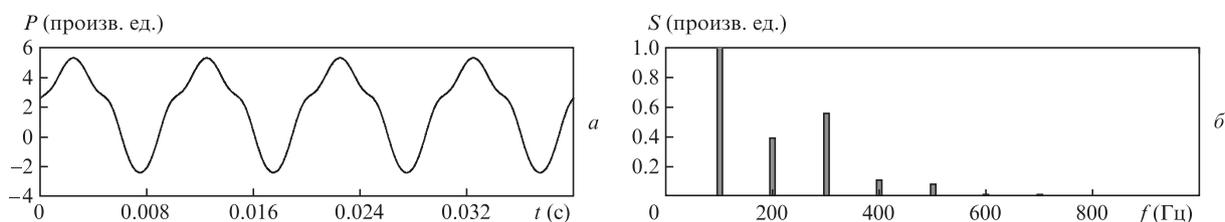


Рис.1. Автодинный сигнал (а) и его спектр (б) при начальном положении отражателя ($\Delta L = 0$).

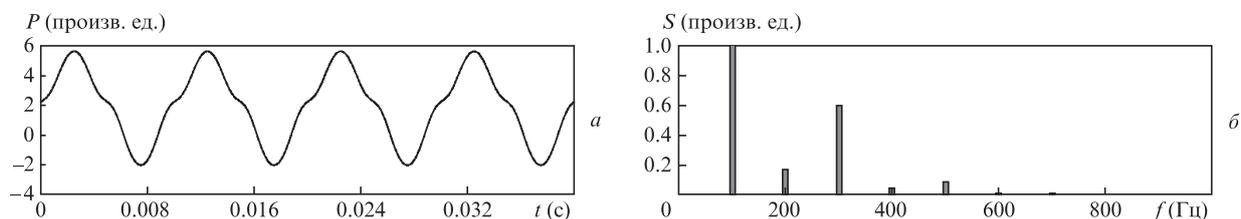


Рис.2. Автодинный сигнал (а) и его спектр (б) при смещении отражателя $\Delta L = 20$ нм относительно его начального положения.

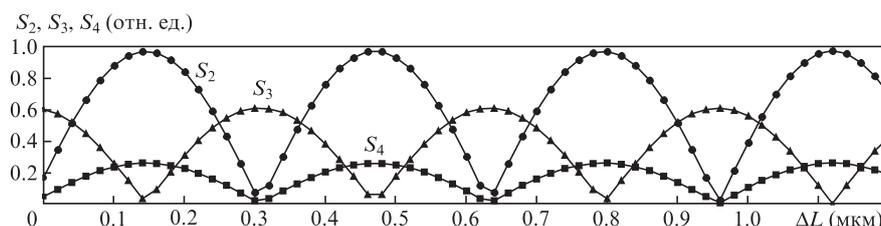


Рис.3. Изменения амплитуд второй (S_2), третьей (S_3) и четвертой (S_4) спектральных гармоник автодинного сигнала при перемещении отражателя с шагом $\delta L = 20$ нм на расстояние 1200 нм.

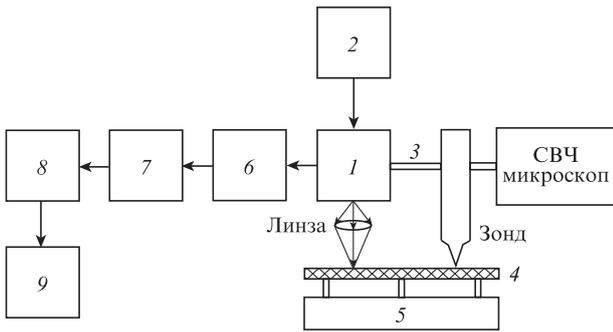


Рис.4. Блок-схема экспериментальной установки (см. текст).

ния лазера. Излучение лазерного диода фокусировалось линзой с числовой апертурой $NA = 0.25$. Отражатель располагался в плоскости фокусировки лазерного пучка.

Как известно, максимальный коэффициент автодиного усиления соответствует пороговым значениям тока питания полупроводникового лазера. В связи с этим ток питания лазерного автодина задавался равным ~ 1.2 от значения порогового тока ($I_{th} = 25$ мА). При этом мощность излучения лазерного диода уменьшалась до 2 мВт от номинальной мощности 5 мВт.

Для уменьшения уровня обратной связи использовалась регулируемая расфокусировка пучка лазера, описанная в работе [34]. С использованием наборов различных спектральных составляющих автодиного сигнала определялся уровень обратной связи C , который во время измерений не превышал 0.15. Влияние ширины пучка оценивалось с учетом незначительной его расфокусировки, которая достигала ~ 0.3 мм. Это приводило к небольшому поперечному набегу фазы. Однако, поскольку регистрируется только переменная составляющая автодиного сигнала, то этот набег не вносил погрешности в изме-

ряемую величину смещения отражателя. Измерения наноперемещений проводились с использованием электромагнитного транслятора фирмы Standa (модель 8MVT40-13), входящего в состав действующего макета ближнепольного сканирующего СВЧ микроскопа [39, 40]. Основные параметры транслятора таковы: разрешение 80 нм (полный шаг), максимальная дистанция перемещения 13 мм, максимальная скорость перемещения 0.416 мм/с.

Для уменьшения величины шумовой составляющей сигнала лазерного автодина использовалась его фильтрация на частотах, превышающих 10 кГц. На рис.5 представлены измеренный автодинный сигнал $P(t)$ после фильтрации и его спектр $S(f)$ при токовой модуляции длины волны лазерного излучения. Сигнал получен при отражении излучения от поверхности отражателя, находящегося на расстоянии 10 см от излучателя.

Результаты измерений амплитуд второй, третьей и четвертой спектральных составляющих автодиного сигнала полупроводниковой лазерной системы при движении отражателя с шагом 80 нм представлены на рис.6. Хорошо видна периодичность изменения амплитуд спектральных составляющих, обусловленная формированием стоячей волны во внешнем резонаторе лазерного автодина. При этом размер области монотонности изменения амплитуды автодиного сигнала при перемещении отражателя для лазерного автодина с длиной волны излучения 650 нм составляет ~ 160 нм. Очевидно, что использование лазерных диодов с длиной волны излучения 1550 нм позволит более чем в два раза увеличить размер области монотонности. Однако в этом случае уменьшится разрешающая способность системы и возникнет проблема визуализации области фокусировки лазерного излучения.

На рис.7 приведены результаты измерений по описанной выше методике наноперемещений отражателя ΔL при заданном шаге транслятора. При этом учитывалась пе-

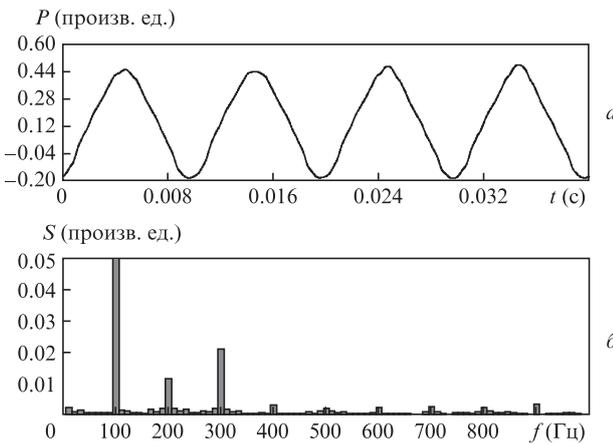


Рис.5. Автодинный сигнал (а) и его спектр (б).

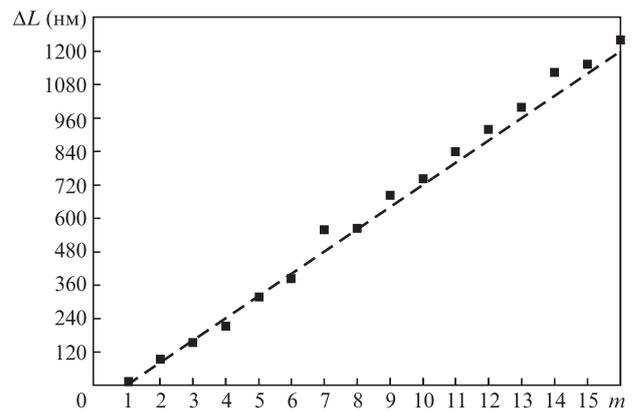


Рис.7. Зависимость наноперемещений отражателя при заданной величине шага $\delta L = 80$ нм транслятора (m – число шагов).

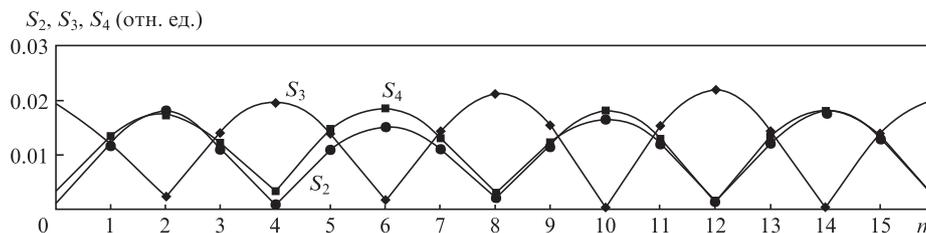


Рис.6. Амплитуды второй (S_2), третьей (S_3) и четвертой (S_4) спектральных составляющих автодиного сигнала полупроводниковой лазерной системы при перемещении транслятора с шагом $\delta L = 80$ нм (m – число шагов).

риодичность изменения стационарной фазы автодинного сигнала.

Для обработки информации был использован метод линейной регрессии. В нашем случае коэффициент детерминации $R^2 = 0.995$, или $\sim 99.5\%$. Среднеквадратичное отклонение составило 6.4% . Это приемлемый уровень погрешностей метода измерений, свидетельствующий об адекватности теоретической модели.

6. Заключение

В настоящей работе показана возможность применения полупроводникового лазерного автодина с токовой модуляцией длины волны излучения для контроля наноперемещений транслятора, входящего в состав ближнепольного СВЧ микроскопа. Проведен анализ формирования автодинного сигнала и его низкочастотного спектра при токовой модуляции длины волны по гармоническому закону. Установлено, что в спектре автодинного сигнала наблюдается периодическое изменение амплитуд его спектральных составляющих, обусловленное формированием стоячей волны во внешнем резонаторе автодинной системы. Определена область монотонности зависимости отношения амплитуд спектральных составляющих от смещения отражателя при токовой модуляции длины волны излучения лазерного диода. Экспериментально получен автодинный сигнал при токовой модуляции длины волны излучения и перемещении отражателя с шагом 80 нм. Измерены наносмещения транслятора ближнепольного СВЧ микроскопа.

Увеличение разрешающей способности метода возможно при использовании лазеров с меньшей длиной волны излучения. Однако основной задачей при повышении точности измерений является улучшение стабильности генерации лазерных автодинов, что может быть достигнуто за счет применения термостабилизированных лазерных диодов [5].

Таким образом, в настоящей работе впервые удалось использовать модуляцию длины волны излучения лазерного автодина для измерения наноперемещений без наложения на объект дополнительных механических вибраций, как это было сделано ранее в [17].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание №8.7628.2017/БЧ).

- Du S., Jinchun Hu J., Zhu Yu, Hu C. *Meas. Sci. Technol.*, **28** (5), 055201 (2017).
- Yan L., Chen B., Wang B. *Meas. Sci. Technol.*, **28** (4), 045001 (2017).
- Amin S., Zabit U., Hussain T., Bernal O.D. *Proc. Multi-Topic Conf. (INMIC)* (Islamabad, Pakistan, 2016, pp 1–5).
- Pedrini G., Martínez-García V., Weidmann P., Singh A., Osten W. *Proc. IEEE 14th Int. Conf. on Industrial Informatics (INDIN)* (Poitiers, France, 2016, pp 570–575).
- Amann M.C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M. *Opt. Eng.*, **40** (1), 10 (2001).
- Scalise L., Yu Y.G., Giuliani G., Plantier G., Bosch T. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **53** (1), 223 (2004).
- Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **4** (6), 283 (2002).
- Lai K., Kundhikanjana W., Kelly M.A., Shen Z.X. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 3 (2008).
- Farina M., Mencarelli D., Di Donato A., Venanzoni G., Morini A. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **59**, 2769 (2011).
- Huber H.P., Moertelmaier M., Wallis T.M. *Rev. Sci. Instrum.*, **81**, 9 (2010).
- Chisum J.D., Popovic Z. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **60**, 2605 (2012).
- Семенов А.Т. *Квантовая электроника*, №6, 107 (1971) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **1** (6), 652 (1971)].
- Усанов Д.А., Скрипаль А.В. *Квантовая электроника*, **41** (1), 86 (2011) [*Quantum Electron.*, **41** (1), 86 (2011)].
- Нусков В.Я., Смольский С.М. *Радиотехника*, **8**, 091 (2013).
- Напартович А.П., Сухарев А.Г. *Квантовая электроника*, **34** (7), 630 (2004) [*Quantum Electron.*, **34** (7), 630 (2004)].
- Norgia M., Donati S. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **52** (6), 1765 (2003).
- Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Камышанский А.С. *Письма в ЖТФ*, **30**, 77 (2004).
- Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Астахов Е.И. *Квантовая электроника*, **44** (2), 184 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (2), 184 (2014)].
- Астахов Е.И., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю. *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*, **15** (3), 12 (2015).
- Берштейн И.Л. *Радиотехника*, **1** (9), 63 (1946).
- Берштейн И.Л. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **16** (4), 526 (1973).
- Басов Н.Г., Морозов В.Н. *ЖТФ*, **57**, 617 (1969).
- Казаринов Р.Ф., Суриц Р.А. *ЖТФ*, **66** (3), 1067 (1974).
- Суриц Р.А., Тагер А.А. *Квантовая электроника*, **11** (1), 35 (1984) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **14** (1), 21 (1984)].
- Гершензон Е.М., Туманов Б.Н., Левит Б.И. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **23** (5), 535 (1980).
- Гершензон Е.М., Калыгина В.М., Левит Б.И., Туманов Б.Н. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **24** (8), 1028 (1981).
- Salathe R., Voumard C., Weber Y. *Opto-Electronics*, **6**, 451 (1974).
- Ривлин Л.А. *Динамика излучения полупроводниковых квантовых генераторов* (М.: Сов. радио, 1976).
- Lang R., Kobayashi K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16** (3), 347 (1980).
- Deborah M., Kane K., Shore A. *Unlocking Dynamical Diversity: Optical Feedback Effects on Semiconductor Lasers* (Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2005).
- Сухарев А.Г., Напартович А.П. *Квантовая электроника*, **37** (2), 149 (2007) [*Quantum Electron.*, **37** (2), 149 (2007)].
- Fleming M.W., Mooradian A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1), 44 (1981).
- Koelink M.H., Slot M., de Mul F.F., et al. *Appl. Opt.*, **31**, 3401 (1992).
- Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С. *Изв. вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика*, **17** (2), 54 (2009).
- Olesen H., Osmundsen J.H., Tromborg B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-22**, 762 (1986).
- Schunk N., Petermann K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (7), 1242 (1988).
- Scalise L., Yu Y., Giuliani G., Plantier G., Bosch T. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **53** (1), 223 (2004).
- Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **4**, 283 (2002).
- Никитов С.А., Скрипаль А.В., Горбатов С.С., Пономарев Д.В., Фролов А.П., Кваско В.Ю. *Электронная техника: СВЧ-техника*, **3**, 71 (2012).
- Усанов Д.А., Skripal' A.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Korotin B.N., Feklistov V.B., Ponomarev D.V., Frolov A.P. *Semiconductors*, **46** (13), 1622 (2012).