

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ФАЗУ
И СПЕКТР АВТОДИННОГО СИГНАЛА**

студента 2 курса магистратуры

Автореферат выпускной квалификационной работы магистра
по направлению 11.04.04 «Диагностика нано - и биомедицинских систем»

факультета нано - и биомедицинских технологий

Мулдашева Джанибека Бекмухамбетовича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч.

звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч.

звание

подпись, дата

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

Саратов, 2018

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуально изучение физических явлений в полупроводниках, которые используются для создания электромагнитных колебаний, находящихся в оптическом диапазоне. Примером использования таких полупроводниковых элементов являются диоды, основанные на гетероструктурах и квантовых ямах.

Отличительными характеристиками полупроводниковых элементов, а именно источников питания, являются низкая требуемая мощность для питания, малые размеры и вес. Полупроводниковые лазеры, которым присуще явление автодинной регистрации сигналов, открывают возможность создания приборов, объединяющих нескольких функций, по приему и созданию электромагнитных колебаний.

Для описания таких процессов, как автодинное детектирование и создания электромагнитных колебаний, происходящих в одно и тоже время, математически, требуется решение системы нескольких дифференциальных уравнений. Существует математическая модель, которая описывает полупроводниковый лазерный диод, системой нелинейных дифференциальных уравнений для концентрации носителей заряда, фазы и амплитуды поля. Данное описание было продемонстрировано Р. Лэнгом и К. Кобаяши, в которой также для амплитуды электромагнитного поля была внесена внешняя оптическая обратная связь.

Уравнения, предложенные Р. Лэнгом и К. Кобаяши были использованы в последующем для изучения спектра мощности шума одномодового полупроводникового лазера [1], также для нахождения состояний, при которых можно было бы уменьшить ширину излучения благодаря воздействию внешней оптической обратной связи [2]. Эмпирические данные, которые подтверждают эту возможность, приведены в [3]. Авторами работ [1,2] было выявлено, что когда величина внешней оптической обратной связи незначительна, происходит основное уменьшение ширины линии излучения и можно заметить частотную устойчивость. В

первое время ширина линии излучения достигает точки насыщения, потом можно заметить увеличение величины внешней обратной связи, после этого она переходит в другое состояние, при котором ширина довольно высокая. При наблюдении можно заметить, в зависимости от оптической обратной связи, моды резонатора могут перейти в состояния возбуждения.

На основе эффекта автодинов, создают различные датчики, в большинстве случаев измерительного характера, которые высокочувствительны к радиосигналам. Автодинная установка – прибор, который состоит внешнего отражателя и лазерного диода, лазер которого совмещает в себе две функции, это прием и создание электромагнитных колебаний. Возвращенная волна от внешнего отражателя попадает в диодный резонатор и происходит изменение концентрации носителей заряда в активной среде, а также концентрации показателя преломления активной области. Когда изменяется величина преломления, тогда это изменение влияет на частоту колебаний генератора. После этого можно заметить, что вид автодинного сигнала начинает отличаться от вида интерференционного сигнала[4, 5].

В таком физическом явлении, как автодинное детектирование, существует режим, когда автодинный сигнал сходен с интерференционным. Все это позволило создать измерительные приборы, сходные с интерференционными, но обладающие множеством преимуществ, которые были описаны выше.

Автодинные установки применяются для исследования и вычисления перемещений различных объектов. Также показана их восприимчивость к микро- и нановибрациям и смещениям [6-9].

Автодинный сигнал не всегда точно может описывать параметры изучаемого процесса, так как результаты вычислений сильно зависят от значений внешней обратной связи. Все это требует много сложных расчетов, выбора правильной модели и также учета возможности получения неопределенности в искомым параметрах.

Автодинные приборы позволяют проводить вычисления с высокой степенью локальностью, поэтому они применяются во многих областях, таких, например, биологии и медицине для вычисления параметров вибраций различных объектов, органического происхождения, для которых измерения другими датчиками затруднено. [10-13].

Величина внешней обратной связи сильно воздействует на форму автодинного сигнала, следовательно, растет погрешность вычислений. Такой случай особенно можно заметить, когда при измерении начинают увеличивать локальность отражения от предмета излучения.

Автодинное детектирование на полупроводниковом лазере удобен тем, что сигнал который нам необходимо вычислить, сравнивается известной эталонной величиной. За эталон принято брать длину волны излучения диода. Данным методом вычисляется смещение и расстояние до отражателя. Существуют такие условия, при которых приходится использовать способ создания дополнительных колебаний с известными величинами. К нему прибегают, если смещения объекта будет меньше длины волны лазерного излучения полупроводника [14,15]. Однако создать колебательное движение объекта, расстояние до которого необходимо вычислить, не всегда возможно.

Для того чтобы вычислить по набегу фазы вибрацию отражателя с известными характеристиками постоянным изменением длины излучения, для вычисления расстояния до объекта, возникает интерес возможности замены всего этого, токовой модуляции лазера [16].

Величина внешней оптической обратной связи сильно воздействует на автодинный сигнал, меняя его форму. Автодинные установки применяют для вычисления нановибраций и перемещений биологических объектов. Их измерения проводить сложно, так как постоянно меняется величина внешней обратной связи, но даже из этой ситуации исследователи нашли выход, накладывая дополнительные вибрации изучаемый образец [17,18,19]. Важно подчеркнуть, что все эти измерения проводятся на полупроводниковых лазерах.

Целью данной работы является составить аналитический обзор влияния внешней оптической обратной связи на фазу и спектр автодинного сигнала.

Задачи:

Численное математическое моделирование автодинного сигнала с внешней оптической обратной связью при токовой модуляции.

Выявить влияние уровня внешней оптической обратной связи на погрешность измерения параметров.

Выяснить, как изменяется автодинный сигнал при увеличении уровня обратной связи.

1 Влияние внешней оптической обратной связи на фазу и спектр автодинного сигнала

Когда проводят различные вычисления с помощью автодинных лазерных систем, всегда учитывают важный показатель, такой как величина внешней оптической обратной связи. При условии, где уровень внешней оптической обратной связи становится фиксированным, автодинный сигнал идентичен интерференционному сигналу. Когда уровень внешней обратной связи повышается, автодинный сигнал искажается в отличие от интерференционного, так как автодинная система сочетает в себе источник излучения и детектор колебаний в одном приборе, а у интерференционных систем функцию источника и приемника выполняют разные устройства. Было выявлено, что уровень внешней оптической обратной связи сильно изменяет форму автодинного сигнала полупроводникового лазера и, следовательно, влияет на погрешность вычислений, авторами работ [64, 65]. А в таких работах [64,66] считают, что достигаются условия, при которых уровень обратной связи незначителен. Конечно же достичь на практике таких условий не всегда удастся. А в трудах [66] рассматривают ряд режимов с внешней оптической обратной связью:

1 – режим очень низкого уровня внешней обратной оптической связи, автодинный сигнал идентичен по форме интерференционному сигналу.

2 – режим низкого уровня обратной связи, автодинный сигнал немного искажается, и появляются отклонения от симметричной формы;

3 – режим умеренного уровня обратной оптической связи, у функции автодинного сигнала появляются три решения в каждый момент времени, система становится бистабильной, с двумя устойчивыми решениями и одним нестабильным;

4 – режим большого уровня обратной оптической связи, у функции автодинного сигнала появляются пять решений в каждый момент времени.

Для расчётов параметров движения объектов, обязательно знать величину внешней оптической обратной связи, чтобы провести вычисления с минимальными погрешностями. Авторы работы [62] представили такой метод вычисления уровня внешней оптической обратной связи, при котором требуется измерения двух автодинных сигналов со сдвигом фазы на π , но этого достичь довольно таки технически сложно. В работах S. Dqerati [64, 63] рассматривается вероятность оценки уровня внешней оптической обратной связи по тому, как при этом ведет себя форма автодинного сигнала. Существует также метод, представленной в работе [67], который предназначен для вычисления амплитуды нановибраций лазерного автодина, где учитывается воздействие уровня внешней оптической обратной связи. Метод основан вычислении амплитуды первой гармоники спектра, настроенный на ее пиковое значение, которое измерено при возбуждении дополнительных механических вибраций объекта. Весь процесс наложения дополнительных вибраций делает установку сложной и приводит к повышению шумов в полученном сигнале.

Следовательно, внешней оптическая обратная связь будет влиять и вид самого автодинного сигнала, который получается при изменении длины волны излучения. Если уровень оптической обратной связи $C < 0.1$, воздействием его на спектр можно пренебречь, так как автодинный сигнал будет идентичен интерференционному сигналу и будет симметричной формы [66].

2 Влияние уровня обратной связи на результаты решения обратной задачи определения амплитуды колебаний внешнего отражателя по спектру автодинного сигнала

При низком уровне внешней оптической обратной связи, как было представлено выше, при $0.1 < C < 1$, можно наблюдать небольшие искажения формы автодинного сигнала, а увеличение спектра можно объяснить как увеличение амплитуды колебаний. Поэтому возникает интерес изучения погрешности измерений, при постоянной частоте лазерного диода для режима при $C \ll 1$ и для режима автодинного сигнала с низкой внешней оптической обратной связью при $0.1 < C < 1$.

Для того чтобы проанализировать спектр автодинного сигнала при низкой внешней оптической обратной связи ($0.1 < C < 1$) использовался метод по четырем соседним гармоникам „ $J_1 \dots J_4$ “ (4.6) и по трем соседним гармоникам „ J_1 / J_3 “ (4.7), при которых не требуется знание стационарного набега фазы.

Рассчитанные величины амплитуды колебания объекта ξ с использованием этих двух методов были сведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1- Результаты определения амплитуды колебаний внешнего отражателя по спектру автодинного сигнала

Задаваемое значение ξ , нм	Уровень обратной связи	Значение ξ , найденное по методу „ $J_1 \dots J_4$ “, нм	Значение ξ , найденное по методу „ J_1 / J_3 “, нм	Погрешность найденного значения ξ по методу „ $J_1 \dots J_4$ “, %	Погрешность найденного значения ξ по методу „ J_1 / J_3 “, %
300	$C \ll 1$	300	300	0	0
	$C = 0.2$	294	298	1,8	0,8

	$C = 0.6$	255	293	14,7	2,5
	$C = 1$	238	288	20,5	3,9
600	$C \ll 1$	600	600	0	0
	$C = 0.2$	613	598	2,1	0,3
	$C = 0.6$	595	595	0,8	0,8
	$C = 1$	718	586	19,6	2,3

Из таблицы 4.1 видно, что разброс значений амплитуды колебаний ξ , найденных по четырем соседним гармоникам, носит хаотический характер, особенно это видно при $\xi = 600 \text{ нм}$. В методе по вычислению амплитуды по трем гармоникам с повышением величины внешней оптической обратной связи погрешность определения амплитуды вибрации увеличивается. Но при амплитудах колебаний внешнего отражателя, которые почти равны длине волны лазерного излучения, возрастание внешней оптической связи вплоть до величин C равным единице к ошибке вычисления амплитуды вибрации внешнего отражателя, не превышающей пяти процентов. Следовательно, по результатам моделирования можно сказать, что расчет амплитуды колебаний ξ по методу „ J_1 / J_3 “ более точное, чем по методу „ $J_1 \dots J_4$ “. Поэтому при дальнейшем исследовании и обработке данных использовался метод вычисления амплитуды по трем соседним гармоникам.

На рисунке 13 показаны результаты вычисления амплитуды колебаний внешнего отражателя по трем соседним гармоникам спектра автодинного сигнала $(n, n + 1, n + 2, n + 3)$ с выражением (4.7) в зависимости от n для разных величин внешней оптической обратной связи.

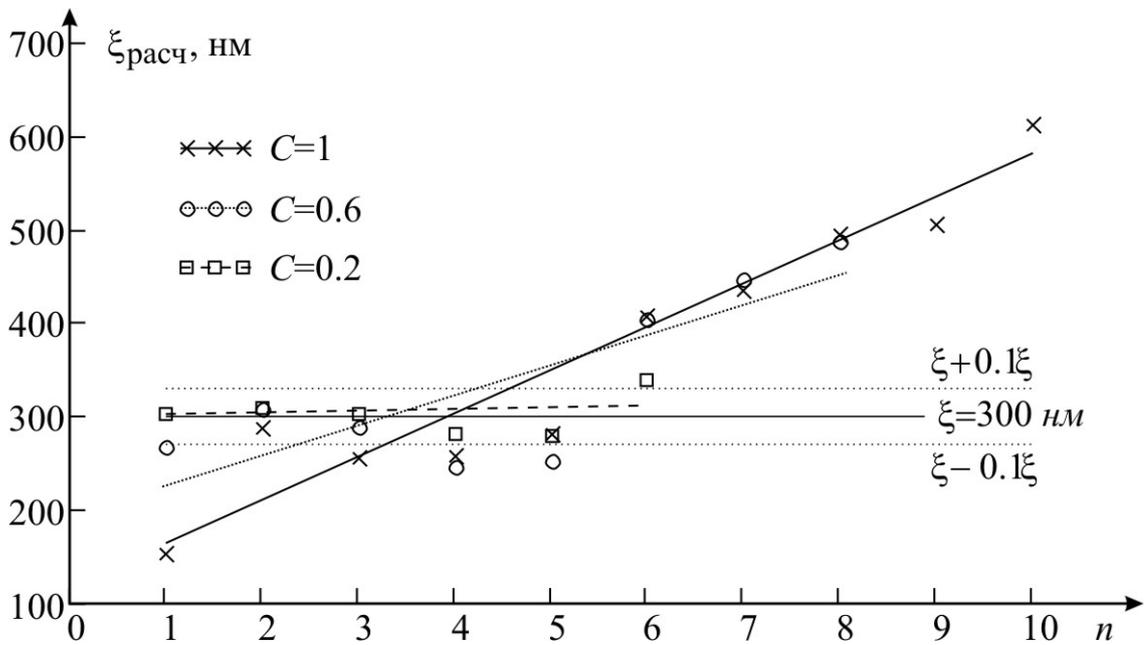


Рисунок 13 - Результаты вычислений амплитуды колебаний внешнего отражателя по набору трем соседним гармоникам спектра автодинного сигнала с использованием соотношения (4.6) в зависимости от n для разных величин внешней оптической обратной связи ($C=0,2; 0,6; 1$). Сплошная горизонтальная линия – истинное значение амплитуды колебаний отражателя $\xi = 300$ нм ; пунктирные горизонтальные линии – уровни погрешности определения амплитуды, составляющие 10% от истинного значения.

Идентичные расчеты были проделаны для других значений амплитуд колебаний внешнего отражателя. На рисунке 14 приведены результаты определения амплитуды вибрации внешнего отражателя по спектру автодинного сигнала, по методу „ $J_1 \dots J_4$ “ для амплитуды колебаний ξ , составляющей 150 нм, а на рисунке 4.3, 600 нм.

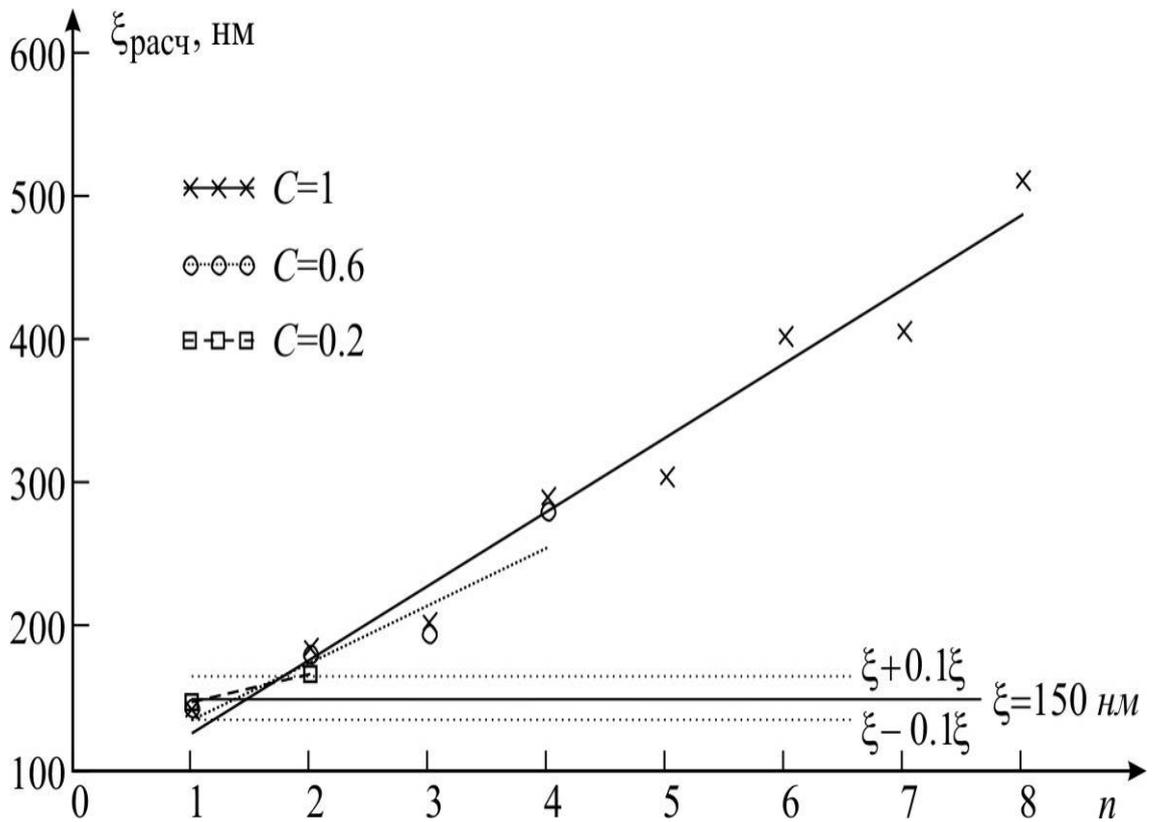


Рисунок 14 - Результаты расчета амплитуды колебаний внешнего отражателя по набору $(n, n + 1, n + 2, n + 3)$

Сплошная горизонтальная линия – истинное значение амплитуды колебаний отражателя $\xi = 150 \text{ нм}$; пунктирные горизонтальные линии – уровни ошибки при вычислении амплитуды, которые составляют 10% от истинной величины.

Анализируя вычисления видно, что при построении прямой результаты вычисления амплитуды колебаний отражателя по набору $(n, n + 1, n + 2, n + 3)$ гармоник спектра автодинного сигнала в зависимости от n , то тангенс угла наклона этой прямой прямо пропорционален уровню внешней оптической обратной связи. Эту характеристику применяют для оценки ошибки условия малости обратной связи $C \ll 1$.

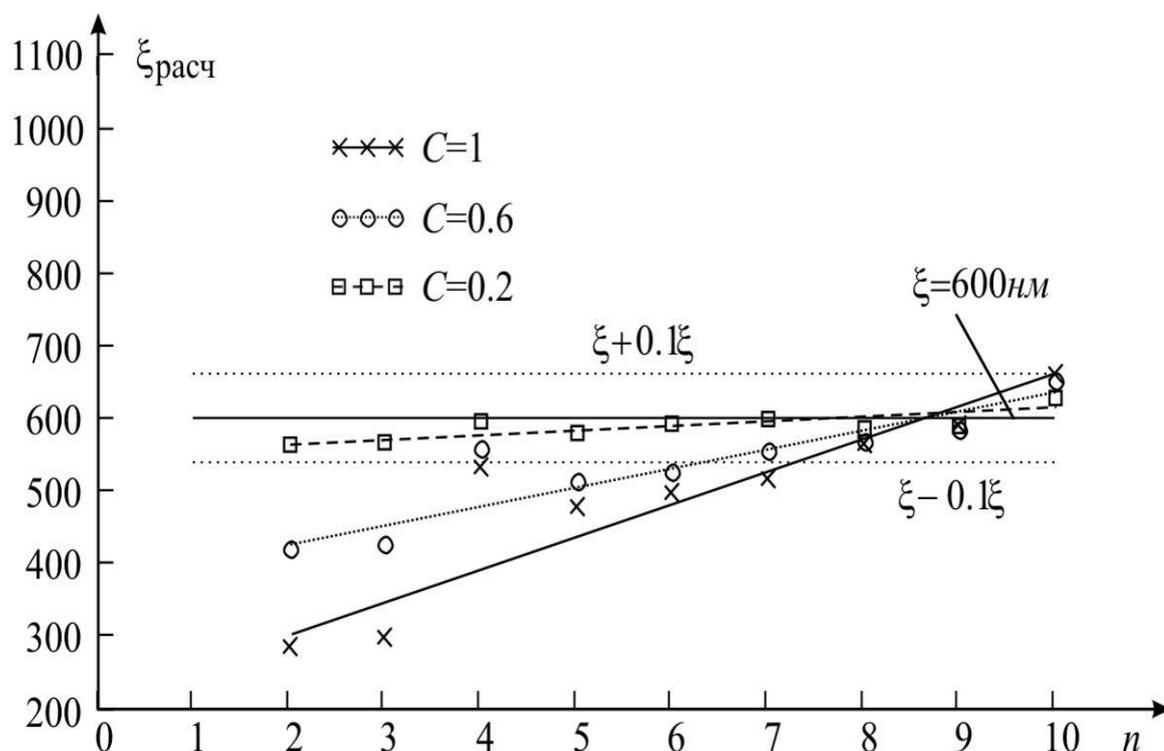


Рисунок 15 - Результаты расчета амплитуды колебаний внешнего отражателя; 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автодинная лазерная интерферометрия является одним из методов вычисления перемещений объектов, в котором обязательным является учет внешней оптической обратной связи.

Лазерный автодинный сигнал детектируется при наличии высокой постоянной составляющей, которая обуславливается таким большим значением как «опорная волна». Следовательно, в измерительной установке, для того чтобы повысить амплитуду автодинного сигнала, используют фильтр высоких частот. Поэтому отличительное превосходство автодинных лазерных систем, объясняется при детектировании микро и наносмещений вибрирующих объектов. Возможность фиксировать микро и наносмещения вибрирующих объектов достигается токовой модуляцией и наложением дополнительных колебаний на изучаемый объект. Так как автодинная установка усложняется, все это приводит к увеличению ее функций. Например, определять перемещения объекта при его нагреве и проводить измерения профиля поверхности объекта. Автодинный интерферометр очень

чувствителен к отраженному сигналу, все это связано большим коэффициентом усиления. Так как установки автодиннов являются бюджетными, по сравнению с другими приборами, их применяют для решения разного рода задач, таких как измерение скорости, амплитуды, восстановление сложного движения отражателя и так далее.

При расчетах показателей объекта обязательно стоит учитывать величину внешней оптической обратной связи, так как она оказывает сильное влияние на автодинный сигнал. Существует много разработок, показывающие воздействие внешней оптической обратной связи на спектр и форму автодинного сигнала объекта, который находится в состоянии вибрации. Вычисление амплитуд колебаний внешнего отражателя, рассчитанных разными способами, то есть по трем и четырем соседним гармоникам, позволять вычислить отклонения амплитуды колебаний и внешнюю оптическую обратную связь. А благодаря правильной подобранной фокусировке излучения полупроводникового лазера, возможно, уменьшить внешнюю оптическую обратную связь и подобрать необходимое значение для измерений автодинного сигнала.

При увеличении уровня внешней оптической обратной связи происходит искажение автодинного сигнала. Автодинный сигнал искажается тем больше, чем больше уровень обратной связи. Также при увеличении внешней обратной оптической связи наблюдается сдвиг фаз. Из анализа векторов происходит его обогащение, изменяются все величины гармоник.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Goldberg L., Taylor H. F., Dandridge A., Weller J. F., and Miles R. O. Spectral characteristics of semiconductor lasers with optical feedback// IEEE J. Quantum Electronics. 1982. Vol. QE-18, №4. P. 555–564.

2 Spano P., Piazzolla S., Tamburrini M. Theory of noise in semiconductor laser in the presence of optical feedback// IEEE J. Quantum Electron. 1984. Vol. QE-20, №4. P. 350–357.

3 Tromborg B., Osmundsen J. H., Olesen H. Stability analysis for a semiconductor laser in an external cavity// IEEE J. Quantum Electron. 1984. Vol.QE-20. P. 1023–1032.

4 Сурис Р. А., Тагер А. А. Когерентность и спектральные свойства излучения полупроводникового лазера с внешним отражателем// Квантовая электроника. 1984. Т.11, №4. С. 35–43.

5 Деминтиенко В. В., Годик Э. Э., Гуляев Ю. В., Синис В. Н., Сурис Р. А. Когерентная регистрация излучения инжекционным лазером// Письма в ЖТФ. 1979. Т.5, вып.22.С. 1349–1357.

6 Ohtsuka Y. Dynamic measurements of small displacements by laser interferometry// Trans. Inst. Measure. Control. 1982. Vol.4. P. 115–124.

7 Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Определение характеристик вибраций микрообъектов с помощью лазерного излучения // Микросистемная техника. 2003. №7. С.34-42.

8 Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Сергеев А.А., Абрамов А.Н., Скрипаль Ал.В., Абрамов Ф.А. Контроль качества пьезопреобразования в акустических линиях задержки СВЧ-диапазона с помощью лазерного полупроводникового автодина // Материалы научно-технической конференции «Перспективные направления развития электронного приборостроения». Саратов, 18–19 февраля 2003 г. С. 153–157.