

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.8.2>

УДК: 681.787:681.785

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВЫХ И АМПЛИТУДНЫХ ШУМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ. КАЛИБРОВКА. РЕЗУЛЬТАТЫ

А.С. Лучинин, И.В. Малыгин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия,

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2023 г.

Аннотация. Экспериментально продемонстрировано применение метода частотного детектора для измерения спектра фазового шума полупроводниковых лазеров. Частотный детектор реализован на основе разбалансированного интерферометра Маха Цендера и фотодетектора. Получены аналитические соотношения, позволяющие выбирать параметры интерферометра Маха Цендера и выполнять экспериментальным путем калибровку измерительной системы. Предложена методика измерения спектральных составляющих фазового шума лазеров при наличии медленного дрейфа задержки в оптоволоконных линиях и частоты исследуемого лазера. Приведены результаты измерения фазового шума малошумящего лазерного модуля DX-1 и сильно шумящих лазерных диодов LSDLD155 (DFB) и LSFLD155 (FP). Обнаружена большая корреляция уровней амплитудного и фазового шума названных лазеров. Показано определяющее влияние шумов лазеров LSDLD155 и LSFLD155 на уровень фазового шума оптоэлектронных (ОЭ) СВЧ генераторов, построенных с их применением. Выдвинуто предположение, что малошумящий лазерный модуль DX-1, имеющий уровень фазового шума на 20–60 дБ ниже (на разных участках спектра), не является определяющим в уровне фазового и

амплитудного шума оптоэлектронного СВЧ генератора. Исследуемый ОЭ генератор построен при выполнении исследований в настоящей работе. Генератор обладает низким уровнем фазового шума: -120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц. Частота колебаний $6,8$ ГГц; длина оптоволоконной линии задержки 200 м.

Ключевые слова: лазер; интерферометр Маха Цендера; оптоэлектронный СВЧ генератор; фазовый шум; амплитудный шум; методика измерения; калибровка.

Автор для переписки: Малыгин Иван Владимирович, i.v.malygin@urfu.ru

Введение

Лазеры, создающие монохроматическое оптическое излучение, как и любые электронные устройства, обладают не идеальностью, состоящей в сопровождении основного излучения излучениями случайного характера. Случайное излучение принято называть шумом [1,2]. Применительно к лазеру более точным будут термины случайная амплитудная и фазовая модуляции.

Лазер с радиотехнической точки зрения можно представить генератором квазигармонических колебаний, обладающим флуктуациями амплитуды, частоты и фазы:

$$u(t) = U_0 [1 + \alpha(t)] \cos [\omega_0 t + \phi_0 + \phi(t)], \quad (1)$$

где U_0 и ω_0 – средние амплитуда и частота колебания; $\alpha(t)$ и $\phi(t)$ – случайные функции, характеризующие флуктуации (случайную модуляцию) амплитуды и фазы.

Производная случайной фазы по времени описывает флуктуации частоты. Шумовые свойства лазера можно описать с помощью спектральных характеристик флуктуаций амплитуды и флуктуаций фазы. В качестве количественных параметров используются односторонние спектральные плотности мощности (СПМ) случайных функций $\alpha(t)$ и $\phi(t)$, входящих в (1), соответственно $S_\alpha(\Omega)$ и $S_\phi(\Omega)$ [3,4].

Те и другие флуктуации возникают в результате действия многих механизмов случайного характера, сопровождающих работу лазеров, как на

физическом уровне, так и на электромеханическом уровне. Последнее – это влияние электрических источников питания, механические вибрации, влияние внешних электромагнитных и климатических факторов.

В научных публикациях в области оптических исследований широко используется параметр RIN – относительный шум интенсивности (Relative Intensity Noise) [1,2,5] по смыслу являющийся эквивалентом флуктуаций амплитуды.

Шумовые характеристики (шумовая модуляция) оказывают отрицательное влияние на многие применения лазеров. В качестве примеров можно перечислить [2,5]:

- высокочувствительная лазерная спектроскопия и интерферометрия;
- приложения, основанные на передаче лазерного излучения по оптическому волокну, такие как когерентная связь с высокой пропускной способностью, квантовая криптография, распространение эталонных сигналов атомных часов;
- шумовые свойства малошумящих СВЧ оптоэлектронных генераторов [6].

В настоящее время существует понимание, каким образом можно достичь низкого уровня шумов лазеров. Но конкретные результаты уменьшения шумов оцениваются экспериментальным путем.

Опубликовано большое количество научных работ, в которых описываются методы измерений и результаты, полученные с помощью измерений. В каждой следующей публикации освещаются новые стороны этой непростой задачи. Чаще всего речь идет о повышении чувствительности и точности измерений шумовых характеристик лазеров с очень низким уровнем шума [7-12].

В настоящей работе необходимость в измерении шумов лазеров возникла в связи с разработкой и исследованием шумовых свойств оптоэлектронных (ОЭ) СВЧ генераторов. Выяснилось, что важно понять роль шумов лазеров в шумовых свойствах ОЭ СВЧ генератора и сформулировать требование к шумовым

свойствам лазеров, используемых при построении ОЭ СВЧ генератора с заданным уровнем амплитудных и фазовых шумов [13,14].

В установках для измерения шумовых характеристик лазеров используется разнородные компоненты: оптические линии задержки, оптические разветвители, фотодетекторы, электронные усилители, измерительные приборы. Все компоненты дают вклад за счет своих не идеальностей в результат измерения шумовых характеристик лазеров. Это требует решения сложных задач учета их влияния и калибровки измерительной установки [8,10].

Дополнительная сложность в организации таких измерений состоит в трудной доступности и дороговизне некоторых компонентов. Поэтому, несмотря на достаточную разработанность принципиальных методов измерения шумовых характеристик лазеров, возникает необходимость построения измерений в конкретных условиях.

В задаче построения малошумящих ОЭ СВЧ генераторов, как показали эксперименты, не требуется использования лазеров с очень низким уровнем шума, но и слишком шумящие лазеры тоже не подходят. Для измерения уровня фазовых шумов лазеров с некоторым средним уровнем шума не требуется очень сложных установок, но параметры измерительной системы должны быть надежно контролируемы.

В такой постановке была разработана методика измерений и создана измерительная система на основе интерферометра Маха Цендера и фотодетектора, на которой проведен большой объем измерений, выявивших ряд интересных результатов и особенностей. Ниже приводятся результаты этих исследований.

Разработка методики измерения и основные результаты получены на лазерном модуле DX-1, построенном на основе лазерного диода производства фирмы Eblana Photonics, (Narrow Linewidth (NLW) laser diodes EP1550-NLW-B-100), обладающем низким уровнем шума и узкой спектральной линией. Для расширения представления о шумовых характеристиках лазеров приводятся результаты измерения фазовых и амплитудных шумов FP лазера LSFLD155 и

DFB лазера LSDLD155 производства фирмы Beijing Lightsensing Technologies Ltd, обладающих значительно худшими шумовыми характеристиками.

1. Измерение спектров фазового шума лазеров

Измерение характеристик фазовых шумов лазеров описано в большом числе научных публикаций, в частности в [8-12]. Методика измерения основана на применении разбалансированного интерферометра Маха Цендера и фотодетектора, реализующих метод частотного детектора. Структурная схема построения измерителей показаны на рис. 1.

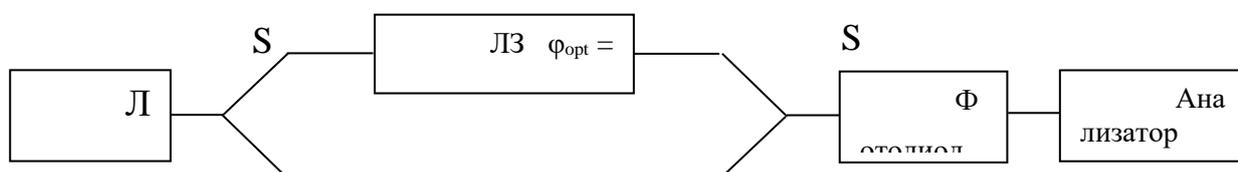


Рис. 1. Структурная схема установки для измерения характеристик фазовых флуктуаций лазера

Оптический сигнал лазера разветвляется на два канала с помощью оптического разветвителя P1 (50/50). В один канал включается линия задержки (ЛЗ), выполненная на отрезке оптоволокна. ЛЗ создает задержку оптического сигнала на время $\tau_{ЛЗ}$ и создает фазовый сдвиг относительно второго канала на частоте оптического сигнала ω_{opt} равный $\varphi_{opt} = \omega_{opt} \cdot \tau_{ЛЗ}$.

Для упрощения математических записей будем считать, что во втором канале задержка отсутствует.

В разветвителе P2 происходит суммирование двух оптических сигналов. Амплитуда (мощность) суммарного колебания будет зависеть от разности фаз между каналами, создаваемой линией задержки.

Изменение разности фаз, обусловленное нестабильностью частоты лазера:

$$\varphi_{opt} + \Delta\varphi(t) = \omega_{opt} \cdot \tau_{ЛЗ} + \Delta\omega(t) \cdot \tau_{ЛЗ}$$

приведет к изменению амплитуды суммарного оптического сигнала.

Фотодетектор выполняет детектирование изменяющейся мощности оптического сигнала. Измерение спектра выходного сигнала детектора позволит определить характеристики изменения частоты и фазы оптического сигнала лазера.

2. Аналитическое описание процесса формирования сигнала, пропорционального флуктуациям частоты и фазы сигнала лазера

Чтобы определить коэффициент преобразования спектральных составляющих паразитной фазовой модуляции оптического сигнала лазера, рассмотрим преобразование отдельной спектральной составляющей с частотой Ω : $\Delta\varphi(t) = \Delta\varphi_m \cdot \cos\Omega t$.

Решим задачу для случая не очень больших значений девиации фазовой модуляции $\Delta\varphi_m$, при которых $\Delta\varphi_m \cdot \Omega \cdot \tau_{ЛЗ} \ll 1$.

Представим оптический сигнал лазера в виде квазигармонического колебания с центральным значением оптической частоты $\omega_{opt} = \omega_0$ и амплитудой S_0 , имеющей смысл корня квадратного из мощности колебания лазера:

$$S_{LD}(t) = S_0 \cos(\omega_0 t + \Delta\varphi_m \cdot \cos\Omega t) \quad (2)$$

На входе фотодетектора сформируется оптический сигнал, имеющий вид:

$$S_{OUT}(t) = S_0 \cos[\omega_0 t + \Delta\varphi_m \cdot \cos\Omega t] + S_0 \cos[\omega_0(t - \tau_{ЛЗ}) + \Delta\varphi_m \cdot \cos\Omega(t - \tau_{ЛЗ})] \quad (3)$$

Выражение (3) записано в предположении отсутствия ослабления сигнала в линии задержки.

Используя тригонометрические формулы [15], преобразуем сумму косинусов:

$$S_{OUT}(t) = 2S_0 \left\{ \begin{array}{l} \cos\left[\omega_0 t - \frac{\omega_0 \tau_{ЛЗ}}{2} + 0,5 \cdot \Delta\varphi_m \cdot [\cos\Omega t + \cos\Omega(t - \tau_{ЛЗ})]\right] \times \\ \times \cos\left[\frac{\omega_0 \tau_{ЛЗ}}{2} + 0,5 \cdot \Delta\varphi_m \cdot [\cos\Omega t - \cos\Omega(t - \tau_{ЛЗ})]\right] \end{array} \right\} \quad (4)$$

Фотодетектор формирует отклик (ток) пропорциональный мощности оптического сигнала, которая пропорциональна квадрату мгновенных значений оптического колебания:

$$I_{\text{ФД}}(t) = 4K_{\text{ФД}}S_0^2 \left\{ \begin{array}{l} \cos^2 \left[\omega_0 t - \frac{\omega_0 \tau_{\text{ЛЗ}}}{2} + 0,5 \cdot \Delta \varphi_m \cdot [\cos \Omega t + \cos \Omega(t - \tau_{\text{ЛЗ}})] \right] \times \\ \times \cos^2 \left[\frac{\omega_0 \tau_{\text{ЛЗ}}}{2} + 0,5 \cdot \Delta \varphi_m \cdot [\cos \Omega t - \cos \Omega(t - \tau_{\text{ЛЗ}})] \right] \end{array} \right\} \quad (5)$$

Вычислив квадраты косинусов, и опустив высокочастотные слагаемые, отфильтровываемые за счет инерционности фотодетектора, получим выражение, описывающее ток в нагрузке фотодетектора:

$$I_{\text{ФД_НЧ}}(t) = 4K_{\text{ФД}}S_0^2 \left\{ \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \cos[\omega_0 \tau_{\text{ЛЗ}} + \Delta \varphi_m \cdot [\cos \Omega t - \cos \Omega(t - \tau_{\text{ЛЗ}})]] \right\} \quad (6)$$

Выходной ток состоит из постоянной составляющей, пропорциональной средней мощности оптического сигнала, и изменяющейся по закону фазовой модуляции оптического излучения составляющей. Здесь предполагается, что амплитудная модуляция оптического сигнала отсутствует (S_0 – является постоянной величиной).

Чтобы обеспечить максимальную крутизну детектирования фазовой модуляции, следует задержку оптоволоконной линии задержки $\tau_{\text{ЛЗ}}$ выбрать равной:

$$\omega_0 \cdot \tau_{\text{ЛЗ}} = n \pi \pm \pi/2, \quad (7)$$

или, для упрощения дальнейших выражений:

$$\omega_0 \cdot \tau_{\text{ЛЗ}} = n 2\pi - \pi/2. \quad (8)$$

Тогда выражение (6) можно записать в виде:

$$I_{\text{ФД_НЧ}}(t) = K_{\text{ФД}}S_0^2 \sin\{\Delta \varphi_m \cdot [\cos \Omega t - \cos \Omega(t - \tau_{\text{ЛЗ}})]\} \quad (9)$$

Еще раз воспользуемся формулой из тригонометрии [15], преобразуем разность косинусов:

$$I_{\text{ФД_НЧ}}(t) = K_{\text{ФД}}S_0^2 \sin \left\{ 2 \cdot \Delta \varphi_m \cdot \sin \frac{2\Omega t - \Omega \tau_{\text{ЛЗ}}}{2} \cdot \sin \frac{-\Omega \tau_{\text{ЛЗ}}}{2} \right\} \quad (10)$$

Для большей наглядности, выражение (10) перепишем в виде:

$$I_{\text{ФД_НЧ}}(t) = K_{\text{ФД}}S_0^2 \sin \left\{ \Delta \varphi_m \cdot \Omega \cdot \tau_{\text{ЛЗ}} \cdot \sin \left(\Omega t - \frac{\Omega \tau_{\text{ЛЗ}}}{2} \right) \cdot \frac{\sin \frac{-\Omega \tau_{\text{ЛЗ}}}{2}}{\frac{\Omega \cdot \tau_{\text{ЛЗ}}}{2}} \right\} \quad (11)$$

Для небольших величин произведения $\Delta\varphi_m \cdot \Omega \cdot \tau_{ЛЗ} \ll 1$, действующее значение тока фотодетектора, пропорциональное девиации фазовой модуляции, описывается соотношением:

$$I_{\text{ФД}} \approx K_{\text{ФД}} S_0^2 \cdot \Delta\varphi_m \cdot \Omega \cdot \tau_{ЛЗ} \cdot \left| \frac{\sin \frac{\Omega \tau_{ЛЗ}}{2}}{\frac{\Omega \cdot \tau_{ЛЗ}}{2}} \right| \quad (12)$$

Произведение девиации фазы на частоту модуляции, как известно [16], равно девиации частоты $\Delta\Omega_m = \Omega \cdot \Delta\varphi_m$. Поэтому выражение (12) можно представить в виде:

$$I_{\text{ФД}} \approx K_{\text{ФД}} S_0^2 \cdot \Delta\Omega_m \cdot \tau_{ЛЗ} \cdot \left| \frac{\sin \frac{\Omega \tau_{ЛЗ}}{2}}{\frac{\Omega \cdot \tau_{ЛЗ}}{2}} \right| \quad (13)$$

Ток фотодетектора создает падение напряжения на входном сопротивлении измерительного прибора, например, анализатора спектра:

$$U_{\text{вхАС}} = R_{\text{вх}} \cdot I_{\text{ФД}} \approx R_{\text{вх}} \cdot K_{\text{ФД}} S_0^2 \cdot \Delta\Omega_m \cdot \tau_{ЛЗ} \cdot \left| \frac{\sin \frac{\Omega \tau_{ЛЗ}}{2}}{\frac{\Omega \cdot \tau_{ЛЗ}}{2}} \right| \quad (14)$$

Произведение $R_{\text{вх}} \cdot K_{\text{ФД}} \cdot S_0^2 \cdot \tau_{ЛЗ}$, входящее в (14), представляет крутизну частотного детектора:

$$S_{\text{ЧД}} = R_{\text{вх}} \cdot K_{\text{ФД}} \cdot S_0^2 \cdot \tau_{ЛЗ} \quad (15)$$

Крутизна частотного детектора имеет размерность [В/(рад/с)].

Схема, изображенная на рис. 1, представляет собой частотный детектор.

Таким образом, реализуется измерение характеристик частотных (фазовых) флуктуаций выходного оптического сигнала лазера с помощью частотного детектора.

Поскольку флуктуации фазы и частоты однозначно связаны, интерпретировать результат измерения можно равноценно как измерение флуктуаций фазы, так и измерение флуктуаций частоты.

Коэффициент преобразования частотной модуляции в выходное напряжение зависит от частоты модуляции Ω , как показано соотношением (14), и зависит от величины задержки $\tau_{ЛЗ}$.

На частотах, где $\Omega \cdot \tau_{ЛЗ} \ll 1$, происходит преобразование спектра частотной модуляции в спектр выходного напряжения практически без искажения.

3. Калибровка установки для измерения фазовых шумов лазеров

Чтобы выполнить измерения характеристик флуктуаций фазы и частоты, необходимо определить параметры частотного детектора. Сделать это можно только экспериментально, так как они определяются параметрами многих элементов, входящих в состав схемы, рис. 1, параметры которых точно не известны.

Параметр, который необходимо определить – это крутизна частотного детектора (15):

$$S_{чд} = R_{вх} \cdot K_{ФД} \cdot S_0^2 \cdot \tau_{ЛЗ}.$$

Крутизна частотного детектора не зависит от частоты Ω (частоты спектральных составляющих, которые необходимо измерить). Это дает возможность провести измерение крутизны частотного детектора на любой удобной для измерения частоте.

Время задержки $\tau_{ЛЗ}$ рассчитывается, если известна длина оптоволоконной линии задержки.

Произведение $R_{вх} \cdot K_{ФД} \cdot S_0^2$, входящее в состав (15), имеет размерность [В/рад], представляет собой крутизну фазового детектора, формирующего согласно схеме, рис. 1, выходное напряжение пропорциональное сдвигу фаз между гармоническими колебаниями суммирующимися в разветвителе P2.

Методику измерения крутизны фазового детектора можно построить на основании соотношения (3) с учетом реальных коэффициентов передачи в двух каналах схемы, рис. 1, различающихся из-за разницы коэффициентов передачи реальных компонентов:

$$S_{OUT}(t) = K1 \cdot S_0 \cos[\omega_0 t + \Delta\varphi(t)] + K2 \cdot S_0 \cos[\omega_0(t - \tau_{ЛЗ}) + \Delta\varphi(t - \tau_{ЛЗ})]. \quad (16)$$

В процессе установления рабочего режима лазера после включения питания происходит изменение частоты лазера в некоторых пределах. Это изменение частоты можно трактовать как изменение начальной разности фаз φ_{opt} в пределах большого числа π радиан.

В соответствии с (16) мгновенное значение суммы и, соответственно, выходного напряжения фотодетектора будет изменяться по квазипериодическому закону, принимая минимальное и максимальное значения следующих величин:

$$\begin{aligned} U_{вхАСmax} &= R_{ВХ} \cdot K_{ФД} \cdot [(K1 \cdot S_0)^2 + (K2 \cdot S_0)^2], \\ U_{вхАСmin} &= R_{ВХ} \cdot K_{ФД} \cdot [(K1 \cdot S_0)^2 - (K2 \cdot S_0)^2]. \end{aligned} \quad (17)$$

Минимум и максимум мгновенных значений получается при синфазности и противофазности двух косинусоидальных функций в (16). Переход от синфазности к противофазности происходит при изменении разности начальных фаз в слагаемых на π рад.

Используя векторное представление суммирования двух косинусоидальных функций (16), на основании теоремы косинусов и с учетом квадратичности фотодетектора, не сложно показать, что максимальное значение крутизны фазового детектора при разности фаз $\omega_0 \cdot \tau_{ЛЗ} = n \cdot \pi \pm \pi/2$, описывается выражением:

$$S_{ФД} = \frac{U_{вхАСmax} - U_{вхАСmin}}{2} = R_{ВХ} \cdot K_{ФД} \cdot (K1 \cdot K2 \cdot S_0^2). \quad (18)$$

На экспериментальной установке процедура калибровки фазового детектора выглядит следующим образом, рис. 2.

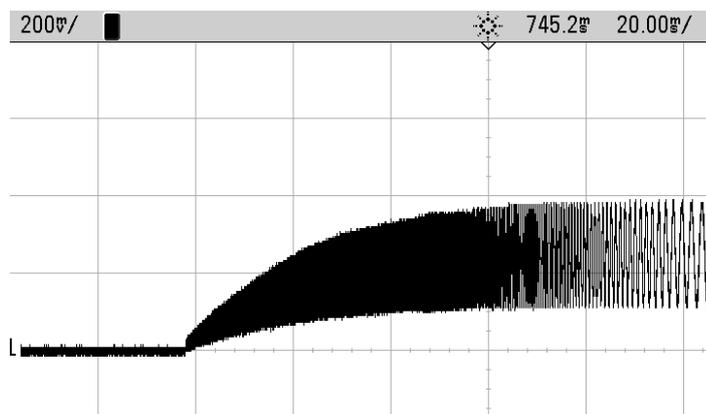


Рис. 2. Осциллограмма выходного напряжения частотного детектора при установлении частоты лазера после включения питания

Значение крутизны фазового детектора на основании показанной осциллограммы равно: $S_{ФД} = 140$ мВ/рад.

4. Особенности процедуры измерения фазовых шумов лазеров, обусловленные дрейфами центральной частоты оптического сигнала и величины задержки ЛЗ

Соотношения (12)–(18) описывающие характеристики измерителя фазовых флуктуаций лазера, получены при двух предположениях: $\varphi_{орт} = \omega_0 \cdot \tau = n \cdot \pi \pm \pi/2$ и $\Delta\varphi_m \cdot \Omega \cdot \tau_{ЛЗ} \ll 1$. Оба условия обеспечивают высокую точность измерения. Отклонение центральной частоты оптического сигнала от ω_0 или величины $\tau_{ЛЗ}$ от заданного значения, будет приводить к отклонению разности фаз от необходимого значения $n \cdot \pi \pm \pi/2$. Это приведет к уменьшению крутизны фазового детектора и, следовательно, к ошибкам измерения параметров фазового шума.

Наблюдение за выходным напряжением частотного детектора при измерении фазового шума лазера типа DX-1 показывает, что постоянная составляющая напряжения медленно меняется в пределах от максимального до минимального значения. Это изменение иллюстрируется рис. 3, 4.

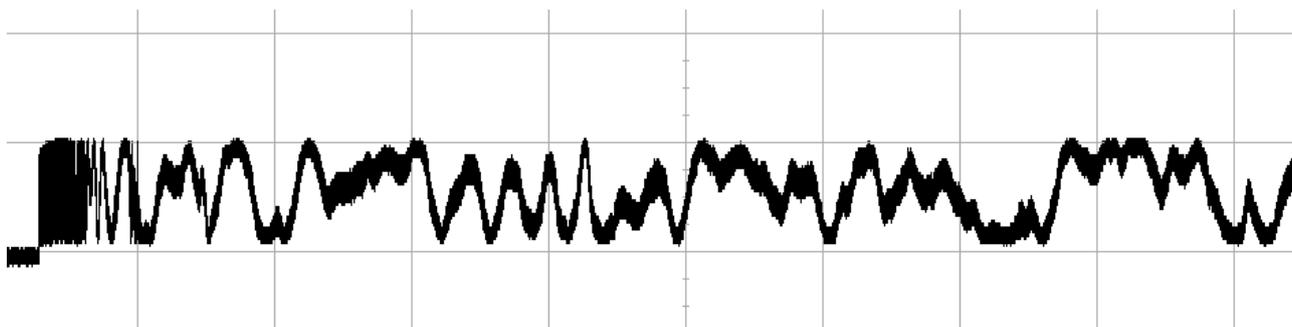


Рис. 3. Длина линии задержки 65 см (масштаб по горизонтали 1:50 сек, по вертикали 1:0,5 В.)

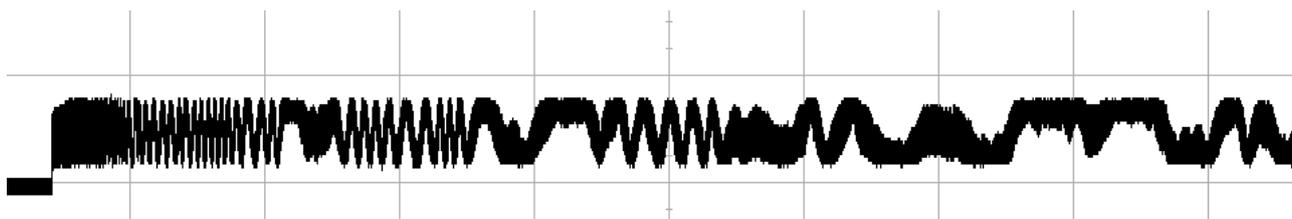


Рис. 4. Длина линии задержки 3 м (масштаб по горизонтали 1:50 сек, по вертикали 1:0,5 В.)

На обоих рисунках масштаб по горизонтали 1:50 сек, по вертикали 1:0,5 В.

Дрейф (медленное изменение) постоянной составляющей выходного напряжения может вызываться одинаково либо дрейфом центральной частоты лазера, либо дрейфом задержки оптической ЛЗ. Влияние на результат измерения характеристик относительно быстрых флуктуаций фазы колебаний лазера того и другого дрейфа одинаково.

Наличие дрейфа оказывает сильное мешающее действие на получение результата измерения и снижает точность измерения. Для преодоления этого явления необходимо разработать специальный метод измерения.

5. Выбор параметров измерительной системы с учетом необходимости обеспечения достаточной чувствительности и точности

Возможность измерения характеристик фазовых флуктуаций лазера ограничивается пороговой чувствительностью измерительной аппаратуры. Обеспечение необходимой чувствительности измерений требует правильного выбора задержки $\tau_{ЛЗ}$ оптической линии задержки. Приходится выбор длины ЛЗ

проводить с учетом противоречивых условий: удлинение ЛЗ повышает чувствительность измерений, но снижает точность из-за дрейфов центральной частоты лазера и задержки ЛЗ. На рис. 3 и 4 показано изменение выходного напряжения фотодетектора из-за дрейфа. Размах изменения при использовании разных линий задержки получается различным из-за того, что линии задержки имеют разные затухания оптического сигнала (обусловленного, в первую очередь, качеством соединителей или несогласованностью поляризаций при суммировании).

Описанное поведение выходного напряжения фотодетектора показывает, что условия, необходимые для выполнения измерения уровня фазового шума, не выполняются ни при какой из выбранных длин линий задержки. Чтобы удержать начальный фазовый сдвиг вблизи требуемого значения $\omega_0 \cdot \tau_{ЛЗ} = n \cdot \pi \pm \pi/2$, длину линии задержки нужно уменьшить на порядок или более. Но при такой длине ЛЗ сложно реализовать необходимую чувствительность для измерения уровня фазового шума сигнала лазера из-за влияния собственных шумов фотодетектора, амплитудных шумов лазера и шумов измерительного прибора (например, анализатора спектра).

6. Реализация измерения уровня фазового шума лазеров с учетом описанных противоречий и сложностей

В работе выполнено измерение спектров фазового шума трех лазеров: модуля DX-1, построенного на основе лазерного диода EP1550-NLW-B-100 производства фирмы Eblana Photonics, LSFLD155 (FP), и LSDLD155 (DFB) фирмы Beijing Lightsensing Technologies Ltd.

Для измерения применен анализатор спектра FSUP 8 (Rohde&Schwarz). Прибор позволяет выполнять измерения в широком диапазоне частот от десятков Гц до 8 ГГц.

При выполнении измерений подобраны длины оптоволоконной линии задержки с учетом двух описанных противоречивых требований.

Измерение удалось выполнить при длине ЛЗ 0,65 метра и 3 метра для лазера DX-1. Измерение фазового шума лазеров LSFLD155 и LSDLD155 удалось провести при длине ЛЗ примерно 4 мм.

Если длины ЛЗ выбираются слишком большие, изменение постоянной составляющей на выходе фотодетектора становится очень быстрым. Анализатор спектра усредняет эти изменения и его показания становятся практически равными нулю (уровню собственного шума анализатора спектра).

Выбор длины ЛЗ должен быть таким, чтобы частота колебаний выходного напряжения фотодетектора, обусловленных дрейфами, была существенно ниже, чем средняя частота флуктуаций выходного напряжения фотодетектора, обусловленная исследуемыми шумами лазера.

Эксперименты показывают, что такой выбор удается сделать. При указанных длинах: 0,65 м ... 3 м, для лазера DX-1, и 4 мм для лазеров LSFLD155 и LSDLD155 обеспечивается достаточная чувствительность и медленность дрейфа выходного напряжения фотодетектора.

При этих условиях сделано предположение, что максимальное показание анализатора спектра соответствует истинному значению спектральной плотности шума лазера, полученному в интервалы времени, когда разность фаз $\varphi_{\text{opt}} = \omega_0(t) \cdot \tau_{\text{ЛЗ}}(t) \approx n \cdot \pi \pm \pi/2$. Дрейф разности фаз происходит медленно, анализатор спектра успевает сделать отсчет спектральной плотности. При уходе с точки максимальной крутизны фазового детектора, показания анализатора спектра уменьшаются, в пределе до уровня собственных шумов анализатора спектра.

Анализатор спектра FSUP 8 имеет функцию запоминания максимальных значений, режим "MaxHold". В этом режиме при длительном наблюдении за показаниями устанавливается истинный вид спектра фазового шума лазера. Отсчеты, получаемые при уменьшении крутизны, игнорируются.

Процесс измерений иллюстрируется рис. 5 и 6. На рисунках изображены спектры выходного напряжения фотодетектора при измерении фазового шума лазера DX-1 в диапазоне частот от 10 Гц до 100 кГц.

На рис. 5 показан закон изменения спектральной плотности фазового шума, с учетом дрейфа (одна реализация развертки анализатора спектра). На рис. 6 показан спектр в конце процесса накопления, примерно через 3 минуты после начала измерения.

Частотная зависимость спектральной плотности (рис. 6) обусловлена законом изменения спектральной плотности фазового шума лазера, а также частной характеристикой измерительной установки, включая частную характеристику анализатора спектра FSUP 8. Частотная характеристика измерительной установки измеряется отдельно при калибровке и затем учитывается при расчете спектра фазового шума по результатам измерения.

На рис. 7 показаны спектры фазового шума трех лазеров, измеренные по описанной методике.

Результаты измерения с использованием ЛЗ длиной 3 м и 0,65 м получаются одинаковым для спектральных составляющих на частотах выше 10 кГц. Измерение составляющих в низкочастотной области, от 100 Гц до 10 кГц, выполнено с применением ЛЗ длиной 3 м.

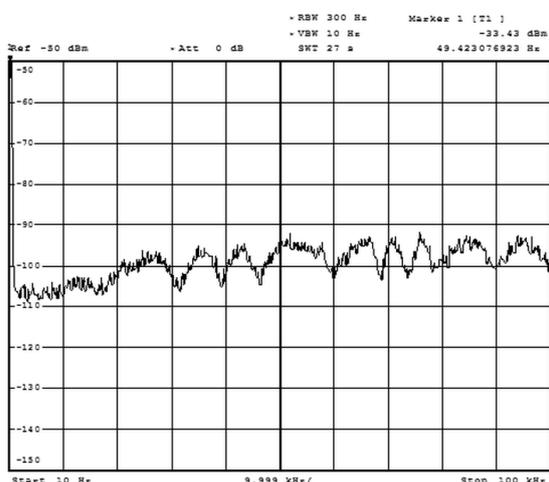


Рис. 5. Вид спектра в начале измерения (одна реализация развертки)

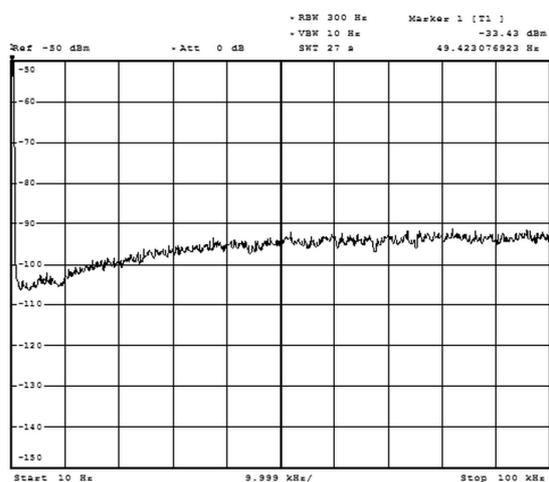


Рис. 6. Вид спектра с учетом накопления в течение 3 мин

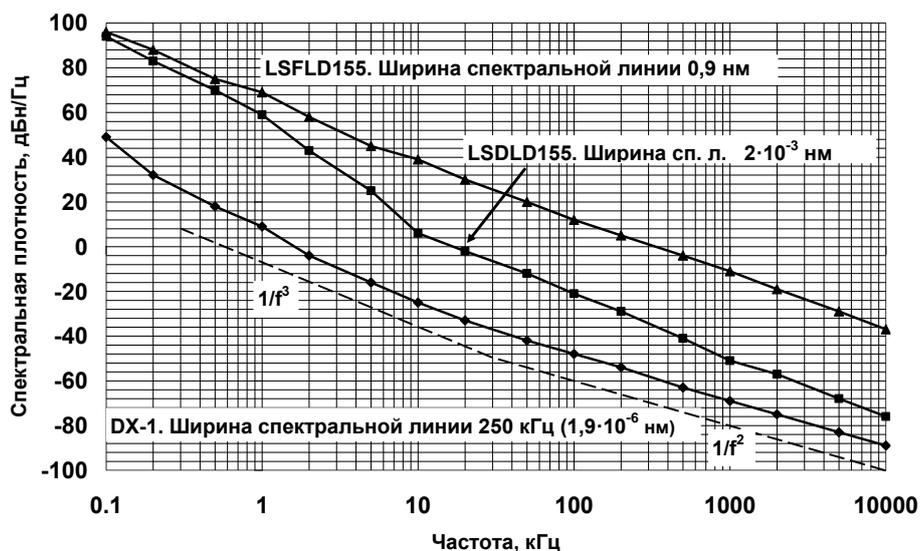


Рис. 7. Спектры фазового шума лазеров DX-1, LSDLD155, LSFLD155

Спектры фазового шума лазеров по виду не отличаются от спектров фазового шума электронных автогенераторов [4]. На рис. 7 пунктиром изображены законы изменения спектральной плотности. Видно, что спектральная плотность шума лазера DX-1 при отстройках от несущей более 30 кГц убывает по закону $1/f^2$. В этой области частот флуктуации фазы создаются источниками белого шума (возможно, теплового и дробового) элементов в петле обратной связи лазера [3,4].

В диапазоне отстроек от несущей от 0,3 до 30 кГц спектральная плотность изменяется по закону близкому к $1/f^3$. В этой области частот преобладают источники типа фликкер-шума [4].

На частотах отстройки меньше 0,3 кГц закон возрастания спектральной плотности фазового шума с понижением частоты становится более быстрым. Здесь возможно преобладание внешних факторов – изменение температуры, вибрации и других.

Спектральные плотности шума лазеров LSDLD155 и LSFLD155 имеют более высокие значения. Спектральная плотность фазового шума лазера LSFLD155 примерно на 60 дБ выше, чем лазера DX-1 на всех отстройках от несущей частоты.

Спектр фазового шума лазера LSDLD155 имеет существенно отличающийся вид. На малых частотах отстройки от 0,1 кГц до 1 кГц спектральная плотность имеет почти такое же значение как у лазера LSFLD155 (примерно на 60 дБ выше, чем лазера DX-1). На высоких частотах отстройки, около 10 МГц, спектральная плотность фазового шума превышает уровень шума лазера DX-1 только на 12...18 дБ.

Достоверность полученных результатов измерения подтверждается сравнением спектров, показанных на рис. 7, с результатами, приведенными в статьях [23,24], где также приведены результаты измерения фазового шума лазеров. Спектральная плотность фазового шума лазерного модуля DX-1 на частоте 10 кГц на 2 дБ выше, чем показано в статье [23] для DFB лазера, тип которого не указан. В статье [24] приведены результаты измерения фазового шума DFB лазера типа EM253-050-YYY. Спектральная плотность фазового шума лазерного модуля DX-1 на 5 дБ ниже уровня шума этого лазера.

С целью дополнительного подтверждения правильности результатов измерения и, следовательно, методики измерения, описанной в данной работе, ниже приведен расчет ширины спектральных линий для трех лазеров: DX-1, LSDLD155 и LSFLD155.

7. Оценка ширины спектральной линии лазеров

По измеренному спектру фазового шума можно оценить ширину спектральной линии лазера, обусловленную только относительно быстрыми шумовыми процессами. При оценке ширины спектральной линии используются разные подходы, описанные в научных публикациях [17-21].

Согласно работам [18-21] ширина спектральной линии определяется из уравнения:

$$\int_{\frac{\Delta\nu}{2}}^{+\infty} S_{\varphi}(f)df = \frac{2}{\pi}, \quad (19)$$

где $S_{\varphi}(f)$ – односторонняя спектральная плотность мощности фазового шума генератора (лазера); $\Delta\nu$ – ширина спектральной линии.

Спектр фазового шума лазера DX-1 на частотах анализа выше 30 кГц (рис. 7) можно описать функцией $S_{\varphi}(f) = A_2/f^2$, где $A_2 = 3,6 \cdot 10^4 \text{ рад}^2 \cdot \text{Гц}$.

Если предположить, что весь спектр фазового шума лазера описывается этим законом, то формируется Лоренцева форма спектральной линии [21]. Из решения уравнения (19) ширина спектральной линии равна: $\Delta\nu = 113 \text{ кГц}$.

Спектр фазового шума лазера DX-1 на частотах анализа от 0,3 кГц до 30 кГц описывается функцией $S_{\varphi}(f) = A_3 \cdot 1/f^3$, где $A_3 = 1,1 \cdot 10^9 \text{ рад}^2 \cdot \text{Гц}^2$.

Если предположить, что весь спектр фазового шума лазера описывается этим законом, то формируется форма спектральной линии Гаусса [21], и в соответствии с уравнением (19) ширина спектральной линии равна: $\Delta\nu = 58 \text{ кГц}$.

Если предположить, что спектр состоит из двух областей с разными законами изменения спектральной плотности: выше 30 кГц – $S_{\varphi}(f) = A_2 \cdot 1/f^2$, ниже 30 кГц – $S_{\varphi}(f) = A_3 \cdot 1/f^3$, то формируется форма спектральной линии Фойгта [21], и в соответствии с уравнением (19) ширина спектральной линии равна: $\Delta\nu = 243 \text{ кГц}$.

Согласно данным, приведенным на сайте [22] лазерный модуль DX-1, построенный на основе лазерного диода EP1550-NLW-B-100 имеет ширину спектральной линии от 100 кГц.

Экспериментальный результат получился близким, поэтому можно считать, что измерения выполнены с удовлетворительной точностью.

Спектр фазового шума лазера LSFLD155 имеет вид $S_{\varphi}(f) = A_2 \cdot 1/f^2$ на всех частотах отстройки от несущей от 0,1 кГц до 10 МГц. Коэффициент аппроксимации $A_2 \approx 3,6 \cdot 10^{10} \text{ рад}^2 \cdot \text{Гц}$.

Ширина спектральной линии этого лазера составляет $1,13 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$.

В технических описаниях оптических приборов принято указывать не частоты, а длины волн. Поэтому в терминах длины волны ширина спектральной линии лазера LSFLD155 составляет 0,88 нм. В DataSheet лазера LSFLD155 указывается ширина спектральной линии 2...4 нм. Экспериментальный результат также близок к данным значениям.

Ширина спектральной линии лазера LSDLD155 составляет $2 \cdot 10^{-3}$ нм (256 МГц). Она значительно меньше, так как лазер LSDLD155 имеет DFB структуру в отличие от LSFLD155, – FP лазера.

8. Результаты измерения амплитудного шума лазеров

Методика измерения фазового шума лазеров, как показано в данной статье, является достаточно сложной. Но характеристики фазового шума лазеров все же удалось получить. Для полного представления о шумовых характеристиках лазеров необходимо иметь параметры шумовой амплитудной модуляции.

Спектр амплитудных шумов лазеров удается измерить относительно просто. Для этого требуется подобрать фотодиод с возможно низким уровнем собственных шумов и малошумящий усилитель низкой частоты. Спектр амплитудного шума измеряется с помощью анализатора спектра, подключенного к выходу фотодетектора с усилителем.

Спектральная плотность относительных флуктуаций амплитуды рассчитывается путем нормирования измеренного спектра шумового тока фотодиода к постоянной составляющей тока (подобно измерению и расчету спектра RIN [1,2,5]).

В настоящей работе использовался фотодиод типа Aris 10 GHz, обладающий хорошими шумовыми характеристиками.

Результат измерения спектров амплитудных шумов трех лазеров показан на рис. 8.

Три лазера: DX-1, LSDLD155 и LSFLD155, обладают в значительной степени различающимися уровнями амплитудных шумов, как и фазовых, показанных на рис. 7.

Самым низким уровнем амплитудного шума обладает лазерный модуль DX-1. В спектре шума выделяется две области. На частотах от 100 Гц до 30 кГц закон изменения спектральной плотности соответствует преобладанию фликкер-шума. Кривая спектра близка к $1/f$. Выше 30 кГц наблюдается область с постоянной спектральной плотностью. Значение спектральной плотности близко

к спектральной плотности дробового шума фотодиода. Измерение сделано при постоянной составляющей тока 5 мА. Относительное значение спектральной плотности дробового шума (нормированного к постоянной составляющей) равно -162 дБ.

Измерение, к сожалению, проведено на одном экземпляре лазера одним экземпляром фотодиода. Поэтому нет возможности определить принадлежность шума лазеру или фотодиоду.

Спектральные плотности шума у двух других лазеров значительно выше. Спектральная плотность амплитудного шума лазера LSDLD155 изменяется по сложному закону, в котором можно усмотреть средний наклон вида $1/f$. Спектральная плотность амплитудного шума лазера LSFLD155 практически постоянна во всей частотной области от 100 Гц до 1 МГц.

Из сопоставления спектров амплитудного и фазового шума трех лазеров видна корреляция между спектрами, указывающая на то, что фазовая и амплитудная модуляции излучений лазеров создаются одними и теми же источниками, существенно различающимися по мощности в разных типах лазеров.

9. Оценка влияния амплитудного и фазового шума лазеров на фазовый шум оптоэлектронного СВЧ генератора

Экспериментальное исследование, представленное в настоящей работе, организовалось в связи с желанием установить источники шумов, оказывающие преимущественное влияние на уровень фазового и амплитудного шумов оптоэлектронных СВЧ генераторов. В работах [13,14] показана возможность уменьшения уровня фазовых шумов ОЭГ за счет применения малошумящих электронных компонентов. Но, вопрос о достижимом уровне шума ОЭГ остался открытым.

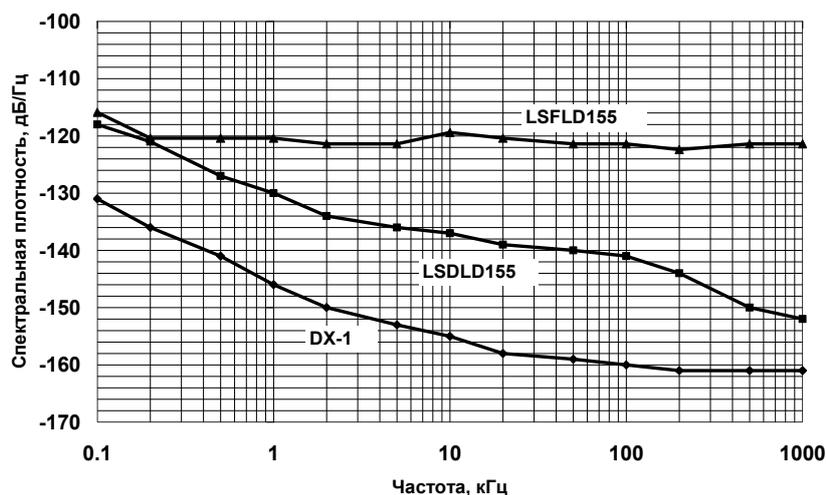


Рис. 8. Спектры шумового напряжения на выходе фотодетектора типа Apic 10 GHz, при подаче на него излучения трех лазеров: DX-1, LSDLD155 и LSFLD155

Имеются публикации, в которых обсуждаются вопросы влияния шумов оптических элементов и механизмов их преобразования в шумы ОЭГ, например, [6,23], но остаются неясными количественные характеристики влияния в конкретных условиях.

Результаты измерения спектров фазового и амплитудного шума трех лазеров, показавшие большую разницу в уровнях шума, могут сделать подсказку в понимании механизмов преобразования фазового и амплитудного шумов лазеров в фазовый шум ОЭ СВЧ генератора.

На рис. 9, 10 показаны измеренные спектры фазового и амплитудного шума оптоэлектронных СВЧ генераторов построенных с применением трех лазеров.

На рис. 9а и 9б показаны спектры фазового шума ОЭГ, на основе лазера DX-1, реализованного на российских микросхемах М421373-2 и на микросхемах НМС311SC70 производства фирмы Analog Devices с нормированным уровнем низкочастотного шума. На частоте отстройки 10 кГц спектральная плотность фазового шума снижена почти на 20 дБ [13,14]. Эксперимент показал преимущественное влияние шумов электронного усилителя.

Спектры, рис. 9с и 9д, показывают, что использование лазеров с высоким уровнем фазового и амплитудного шума (по сравнению с лазером DX-1) приводит к повышению уровня и фазового, и амплитудного шума ОЭГ.

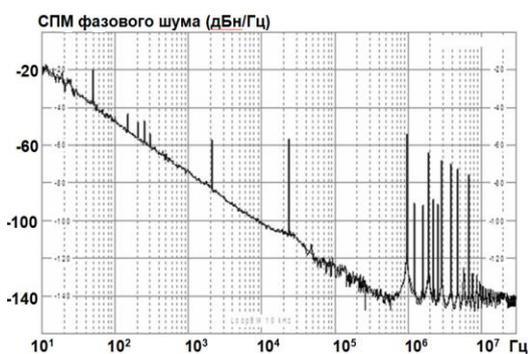
Особенностью спектров фазового шума ОЭГ на основе лазеров LSDLD155 и LSFLD155 является не постоянство спектральной плотности. На рис. 9с, и 9д показаны спектры, полученные в интервалы времени, когда уровни шума были близки к минимальным. В других измерениях спектральные плотности возрастают на 15 - 20 дБ.

Спектральные плотности фазового шума ОЭГ на основе лазера DX-1 такой нестабильностью не обладают.

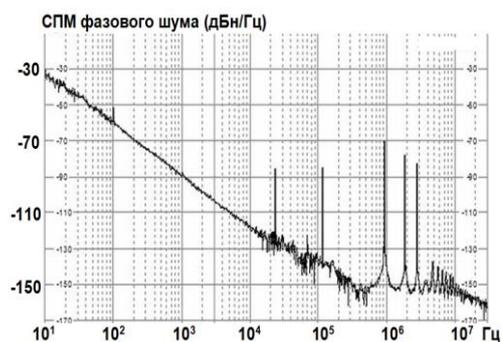
Если сравнить спектральные плотности (например, на частоте отстройки 10 кГц) фазового шума ОЭГ на основе трех лазеров, рис. 9б, 9с, 9д и спектральные плотности фазового шума соответствующих лазеров, можно сделать следующие выводы.

Уровни фазового шума ОЭГ, рис. 9с и 9д, различаются на 30 дБ. Уровни фазового шума лазеров LSDLD155 и LSFLD155 различаются тоже на 30 дБ. Можно предположить, что в этих ОЭГ уровни фазового шума определяются фазовым шумом лазеров.

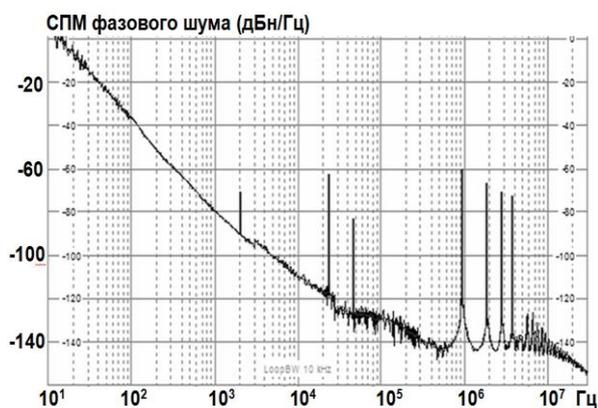
Сравнение видов спектров фазового шума ОЭГ (законов изменения спектральной плотности от частоты) с видом спектра фазового шума лазеров LSDLD155 и LSFLD155 также указывает на определяющее действие фазовых шумов лазеров.



а) Лазер DX-1, усилитель М421373-2.
ЛЗ 200 м. Частота 6,87ГГц

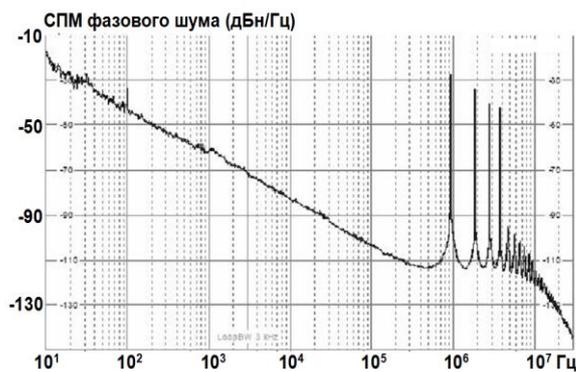


б) Лазер DX-1, усилитель HMC311SC70.
ЛЗ 200 м. Частота 6,87ГГц



с) Лазер LSDLD 155, усилитель HMC311SC70.

ЛЗ 200. Частота 6,86 ГГц



д) Лазер LSFLD 155, усилитель

HMC311SC70.

ЛЗ 200 м. Частота 6,86 ГГц

Рис. 9. Спектры фазового шума оптоэлектронных СВЧ генераторов, построенных с применением разных лазеров

Спектральная плотность фазового шума ОЭГ на основе лазера DX-1 ниже, чем у ОЭГ на основе лазера LSFLD155, на 40 дБ и на 10 дБ меньше, чем ОЭГ на лазере LSDLD155. Разница спектральных плотностей фазового шума лазера DX-1 и LSFLD155 более 60 дБ. Разница с лазером LSDLD155 составляет примерно 30 дБ.

Это сравнение указывает на то, что уровень фазового шума ОЭГ на основе лазера DX-1 определяется не фазовым шумом лазера, а, вероятно, шумом электронных компонентов.

На рис. 10 показаны спектры амплитудного шума ОЭГ, построенных на основе трех разных лазеров. Для сравнения здесь же изображены спектры амплитудного шума лазеров.

Уровни амплитудного шума ОЭГ, построенных на лазерах LSDLD155 и LSFLD155 также оказались более высокими, по сравнению с ОЭГ на основе лазера DX-1. Во всех ОЭГ спектральная плотность АМ шума генераторов существенно превышает спектральную плотность АМ шума соответствующих лазеров. Самое большое различие наблюдается в ОЭГ построенном на основе лазера DX-1. При этом уровни АМ шумов ОЭГ на лазерах DX-1 и LSDLD155 имеют примерно одинаковый уровень на частотах анализа выше 1 кГц.

Такое соотношение может говорить о том, что уровень АМ шума ОЭГ определяется не шумом лазеров, а другими источниками, прежде всего шумами электронного усилителя в петле обратной связи автогенератора.

Превышение уровня АМ шума ОЭГ на лазере LSDLD155 на частотах ниже 1 кГц и уровня АМ шума ОЭГ на лазере LSFLD155 значения, наблюдаемого при использовании лазера DX-1, указывает на преобладающее действие шумов лазеров. Но, поскольку уровень АМ шума ОЭГ выше, чем АМ шум лазеров, то его интенсивность, вероятно, тоже определяется фазовым шумом лазеров. Поскольку девиация фазовых (частотных) шумов лазеров LSDLD155 и LSFLD155 велика, возможно преобразование фазовых шумов в амплитудные на неравномерности частотных характеристик оптических компонентов, входящих в состав ОЭГ.

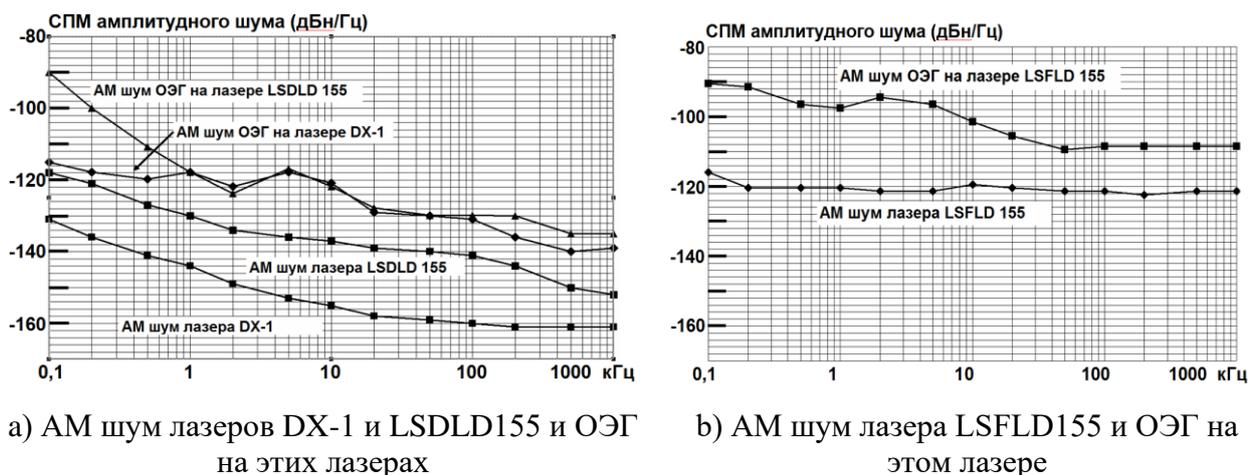


Рис. 10. Сравнение спектров амплитудного шума лазеров и амплитудного шума ОЭГ, построенных с применением лазеров разных типов

Для более надежного объяснения механизмов преобразования шумов лазеров в амплитудные и фазовые шумы оптоэлектронного СВЧ генератора необходимо получить статистику экспериментальных результатов на большом количестве лазеров и других компонентов. У авторов статьи такой возможности не было. Но приведенные результаты являются результатом нескольких тысяч измерений, проведенных в течение примерно 2 лет.

Заключение

Экспериментально показано применение метода частотного детектора, реализованного на основе разбалансированного интерферометра Маха Цендера и фотодетектора, для измерения спектра фазового шума полупроводниковых лазеров. При его реализации потребовалось решить две задачи: выполнить калибровку измерительной установки; преодолеть мешающее действие нестабильности задержки оптоволоконных линий задержки и нестабильности частоты исследуемых лазеров.

1. Получены аналитические соотношения, позволяющие выбирать разность длин плеч интерферометра Маха Цендера и выполнять экспериментальным путем калибровку измерительной системы.

2. Показана возможность измерения высокочастотных спектральных составляющих фазового шума при наличии медленных изменений задержки в оптоволоконных линиях и частоты исследуемого лазера.

3. Выполнены измерения спектров фазового и амплитудного шума малошумящего лазерного модуля DX-1 и сильно шумящих лазеров LSDLD155 (DFB) и LSFLD155 (FP). Показана существенная корреляция уровней амплитудного и фазового шума названных лазеров.

4. Установлено определяющее влияние шумов лазеров LSDLD155 и LSFLD155 на уровень фазового шума оптоэлектронных (ОЭ) СВЧ генераторов, построенных с их применением.

5. Малошумящий лазерный модуль DX-1, имеющий уровень фазового шума на 20–60 дБ ниже на разных участках спектра, не является определяющим в уровне фазового и амплитудного шумов ОЭ СВЧ генератора, построенного при выполнении исследований в настоящей работе. Названный ОЭ СВЧ генератор обладает низким уровнем фазового шума: -120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц. Частота колебаний 6,8 ГГц; длина оптоволоконной линии задержки 200 м.

Литература

1. Paschotta R. Noise in Laser Technology. Part 1: Intensity and Phase Noise. *Optik & Photonik*. 2009. №2. P.48-50. <https://doi.org/10.1002/opph.201190028>
2. Llopis O., Bailly G., Bougaud A., Fernandez A. Experimental Investigations on Lasers FM and AM Noise. *2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF)*. 2020. Hal-02975526. <https://doi.org/10.1109/IFCS-ISAF41089.2020.9234819>
3. Жалуд В., Кулешов В.Н. *Шумы в полупроводниковых устройствах*. Москва, Советское радио. 1977. 416 с.
4. Leeson D.A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum. *IEEE Proceedings*. 1966. V.54. №2. P.329-332. <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.4682>
5. Abdallah Z. Microwave Sources Based on High Quality Factor Resonators: Modeling, Optimization and Metrology. Université Paul Sabatier. Дата обращения: 20.04.2023. <https://theses.hal.science/tel-01445614v2/document>
6. Борцов А.А. Лазерный оптоэлектронный автогенератор с малым уровнем спектральной плотности мощности фазового шума. *Нелинейный мир*. 2011. Т.9. №6. С.359-368.
7. Фомиряков Э.А., Харасов Д.Р., Никитин С.П., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Влияние фазовых шумов лазера на чувствительность когерентных рефлектометров Рэлея с усреднением сигнала. *Фотон-экспресс*. 2021. №6. С.252-253. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-252-253>
8. Llopis O., Merrer P.H., Brahim H., Saleh K., Lacroix P. Phase Noise Measurement of a Narrow Linewidth CW Laser Using Delay Lines Approaches. *Optics Letters*. 2011. №36(14). P.2713-2715. <https://doi.org/10.1364/OL.36.002713>
9. Zhou Q., Qin J., Xie W., Liu Z., Tong Y., Dong Y., Hu W. Dynamic Frequency-Noise Spectrum Measurement for a Frequency Swept DFB Laser with Short-Delayed Self-Heterodyne Method. *Optics Express*. 2015. V.23. №22. P.29245-29257. <https://doi.org/10.1364/OE.23.029245>

10. Пнев А.Б., Борисова А.В., Денисова Я.А., Степанов К.В., Жирнов А.А., Чернуцкий А.О. Минимизация погрешности измерения фазовых шумов узкополосного лазера с помощью интерферометра Маха–Цендера на основе волокна с сохранением поляризации. *Измерительная техника*. 2018. №5. С.37-42.
11. Скворцов М.И., Фомиряков Э.А., Трешиков В.Н., Никитин С.П., Вольф А.А., Власов А.А., Достовалов А.В. Сравнительный анализ методов измерения спектральных ширин волоконных лазеров с распределенной обратной связью. *Прикладная фотоника*. 2020. Т.7. №2. С.102-112.
12. Кирсеенков А.Ю. *Волоконно-оптические интерферометрические методы для построения измерительных систем на основе поверхностно-излучающего лазера*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. Санкт-Петербург. 2017. 155с.
http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=52&page_d=1&page_d2=145788
13. Лучинин А.С., Малыгин И.В., Журавлев А.А., Струк В.К. Источники шума в оптоэлектронных СВЧ автогенераторах. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. 2021. №3. С.427-428.
14. Лучинин А.С., Малыгин И.В. Исследование источников шумов в оптоэлектронном СВЧ генераторе на основе оптической линии задержки. *Фотон-экспресс*. 2021. №6(174). С.188-189. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-188-189>
15. Двайт Г.Б. *Таблицы интегралов и другие математические формулы*. Москва, Наука. 1973. 228 с.
16. Баскаков С.И. *Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов для студентов радиотехнических специальностей*. Москва. Высшая школа. 1988. 448 с.
17. Малахов А.Н. *Флуктуации в автоколебательных системах*. Москва. Наука. 1968. 660 с.

18. Walls F.L., Demarchi A. RF Spectrum of a Signal after Frequency Multiplication; Measurement and Comparison with a Simple Calculation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1975. V.24. №3. P.210-217. <https://doi.org/10.1109/TIM.1975.4314411>
19. Sullivan D.B., Allan D.W., Howland D.A., Wallsin F.L. Characterization of Clocks and Oscillators. NIST Technical Note 1337. National Institute of standards and Technology. U.S. Department of Commerce. Дата обращения: 20.04.2023. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/TN/nbstechnicalnote1337.pdf>
20. Tran M.A., Huang D., Bowers J.E. Tutorial on Narrow Linewidth Tunable Semiconductor Lasers Using Si/III-V Heterogeneous Integration. *APL Photonics*. 2019. V.4. №11. P.1-19. <https://doi.org/10.1063/1.5124254>
21. Chen Y., Blauvelt H. Laser Linewidth, Frequency Noise and Measurement. EMCORE Corporation. Дата обращения: 20.04.2023. <https://emcore.com/wp-content/uploads/2021/04/EMCORE-Laser-Linewidth-Frequency-Noise-and-Measurement.pdf>
22. 1550 nm NLW LASER EP1550-NLW-B-100. Eblana Photonics Ltd. Дата обращения: 20.04.2023. https://eblana_photonics.com/wp-content/uploads/2020/11/EP1550-NLW-B-100.pdf
23. Cahill J.P., Zhou W., Menyuk C.R. Additive Phase Noise of Fiber-Optic Links Used in Photonic Microwave-Generation Systems. *Applied Optics*. 2017. V.56. №3. P.B18-B25. <https://doi.org/10.1364/AO.56.000B18>
24. Volyanskiy K., Chembo Y.K., Larger L., Rubiola E. Contribution of Laser Frequency and Power Fluctuations to the Microwave Phase Noise of Optoelectronic Oscillators. *Journal of Lightwave Technology*. 2010. V.28. №18. P.2730-2735. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2064230>

Для цитирования:

Лучинин А.С., Малыгин И.В. Измерение фазовых и амплитудных шумов полупроводниковых лазеров. Методика измерений. Калибровка. Результаты. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2022. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.8.2>