

УДК 621.373.876

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ ОБОЛОЧЕК

© 2009 Н. А. Сазонникова<sup>1</sup>, Д. Н. Гребнев<sup>2</sup>, О. В. Шулепова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>2</sup> Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»

Для обеспечения стабильности оптической оси дефектоскопической системы и исключения различий температурных характеристик источника и приемника излучения целесообразно совмещение функций источника и приемника излучения в одном элементе. Реализовать эту возможность позволяет эффект обратной связи, характерный для полупроводниковых лазеров. Работу полупроводникового лазера с внешней оптической обратной связью можно описать в рамках модели составного резонатора.

*Полупроводниковый лазер, обратная связь, составной резонатор*

Ограниченные возможности традиционных механических и оптических методов оценки поверхностных и внутренних повреждений крупногабаритных клееных оболочек обтекателя ракеты-носителя (невозможность проведения исследования в условиях эксплуатации без остановки оборудования и разборки изделий, низкая чувствительность измерений, сложность определения вида повреждения и др.), случайный характер расположения повреждений и их параметров (глубины, угла раскрытия и расположения плоскости симметрии трещины, одновременное наличие различных видов повреждений и др.) требуют создания новых лазерно-вибрационных способов и испытательного оборудования для обнаружения дефектов поверхности.

При выявлении дефектов внутренней структуры изделий используются различные методы – исследование тепловых потоков, возникающих при нагреве лазерным излучением, исследование акустической эмиссии дефектов на «просвет» и так далее. Но при выявлении дефектов больших конструкций все эти методы трудно реализуются. Некоторые приборы позволяют выявлять лишь отдельные виды дефектов. Приборы, принцип действия которых основан на измерении акустической эмиссии, имеют низкий уровень отношения сигнал/шум, а оптические интерференционные системы характеризуются дрейфом рабочих точек. Поэтому используют методы виброакустической диагностики, которая позволяет не только

обнаружить дефекты, но и распознавать их. В основе лазерной виброакустической диагностики лежит явление модуляции упругими волнами оптического сигнала.

Для исключения дрейфа рабочих характеристик измерительной системы и повышения её чувствительности целесообразно совмещение функций источника излучения и приемника в одном элементе. Реализовать эту возможность позволяет эффект обратной связи, характерный для полупроводниковых лазеров [1-3].

Работу полупроводникового лазера с внешней оптической обратной связью можно описать в рамках модели составного резонатора. В этой модели считается, что грань лазера, из которой выходит излучение, и внешний отражатель (внешнее зеркало), который возвращает свет в активную область, образуют (внешний) резонатор Фабри—Перо, который оптически связан с лазерным резонатором через его выходное зеркало и образует вместе с ним составной резонатор. Коэффициент отражения собственных зеркал полупроводникового лазера мал (порядка 0,3). Длина его резонатора гораздо меньше, чем в лазерах других типов (порядка нескольких сотен микрометров), и потому даже при слабом отражении от внешнего зеркала роль внешней оптической обратной связи становится заметной.

Заметим, что в данном случае на величину оптоэлектронного сигнала существенное влияние оказывают степень когерентности собственного излучения лазерного диода

и отраженного поверхностью излучения, поляризация и деполяризация отраженного от контролируемой поверхности излучения в зависимости от структуры поверхности, величины и формы микронеровностей, величины напряжений в поверхностном слое. Измерение оптоэлектронного сигнала также позволяет определять характеристики среды в составном резонаторе. Если влияние среды необходимо минимизировать, целесообразно применение схемы датчиков, использующих одномодовый волоконный световод для зондирования поверхности. В этом случае выходной торец волокна располагается вблизи контролируемой поверхности.

При выявлении внутренних дефектов (непроклей, нарушение сплошности, заживление) используются вибраторы колебаний, один находится с наружной стороны исследуемой поверхности в зоне расположения отражающего зеркала. Второй установлен с внутренней стороны оболочки. Он создает колебания всех участков оболочки головного обтекателя ракеты-носителя. Для материала оболочки (трехслойный композитный материал толщиной 25 мм с несущими слоями из углепластика на связующей эпоксидной основе с наполнителем в виде алюминиевых сотопанелей с величиной грани 2, 5 мм) имеется незначительное отличие экспериментальных значений смещения светового пятна от расчетных с погрешностью менее 5% при наличии дефекта.

При проведении дефектоскопии внутренней структуры многослойной сотовой оболочки величина оптоэлектронного сигнала будет зависеть от следующих параметров: отражательной способности контролируемой поверхности, расстояния от внешнего зеркала лазерного диода до контролируемой поверхности, оптических свойств среды в составном резонаторе (поглощение, рассеяние и др. процессы). Закономерности изменения отражательной способности поверхности в зависимости от ее состояния, структуры, наличия различного рода повреждений (трещин, царапин, забоин) были исследованы ранее [1].

Наличие взаимосвязи оптических и электрических характеристик позволяет осуществлять диагностику ватт-амперной характеристики и режимов генерации по

чисто электрическим измерениям. Так, например, форма ватт-амперной характеристики может быть восстановлена по одним только электрическим измерениям [2,4].

По сравнению с другими типами лазерных диодов лазеры с квантоворазмерными структурами имеют в 3 раза меньшее значение порогового тока и более высокое значение характеристической температуры (200К) и, следовательно, более слабую зависимость порогового тока и выходной мощности от температуры активной области и окружающей среды. Они также характеризуются отсутствием изгибов на ватт-амперной характеристике и более высокой дифференциальной эффективностью. В отличие от других лазеры с квантоворазмерными структурами сохраняют одномодовый режим и длину волны генерации при накачке импульсным током высокой частоты [3]. Однако они наименее чувствительны к обратной связи.

Исследование отклика на внешнюю оптическую обратную связь в полупроводниковых лазерах представляет большой интерес как с точки зрения понимания физики процессов, происходящих в полупроводниковой активной среде, так и с точки зрения применения в различных прикладных задачах. Введение внешней оптической обратной связи посредством введения оптически связанного с лазером внешнего зеркала (либо другой отражающей поверхности) кардинально меняет многие характеристики лазерного диода — пороговые, спектральные, электрические, шумовые. Введение внешнего зеркала меняет порог генерации в образованном составном резонаторе и, следовательно, приводит к изменению выходной мощности излучения при заданной накачке (оптический отклик). Изменение порога генерации влияет на напряжение на р-п-переходе (электрический отклик - оптоэлектронный сигнал). Оптоэлектронный сигнал связан с явлением насыщения напряжения на р-п-переходе после перехода через порог генерации. При этом дифференциальное сопротивление диода претерпевает на пороге скачок, а остаточное сопротивление определяется последовательным омическим сопротивлением толщи диода. При изменении порога из-за введения обратной связи

насыщение происходит при других значениях тока и напряжения на р-п-переходе. Эта разность между напряжениями насыщения при наличии и отсутствии обратной связи и является оптоэлектронным сигналом.

Оптический отклик на внешнюю обратную связь и ватт-амперные характеристики лазеров с внешним резонатором изучались, например, в [2-4]. Введение обратной связи приводит к образованию области неустойчивости, где происходит переключение мод, а выходная мощность периодически меняется с током накачки (эта зависимость накладывается на линейную зависимость мощности от тока и связана с интерференцией внутреннего поля с полем, возвращенным извне). Величина обратной связи модулировалась механическим прерывателем, который помещался на оптическом пути между лазером и внешним зеркалом. Было обнаружено, что оптоэлектронный отклик возникает на пороге генерации внешнего резонатора, растет почти линейно и достигает некоторого своего максимального значения на пороге собственной генерации или чуть выше. При дальнейшем увеличении тока накачки наблюдался некоторый разброс в поведении различных образцов. Электрический отклик либо стабилизировался, либо увеличивался, либо уменьшался плавно или немонотонно. Обнаружена корреляция между оптоэлектронным сигналом и изменением мощности генерации вследствие наличия обратной связи, а также связь электрического отклика и ватт-амперной характеристики с дифференциальным сопротивлением диода. Нелинейным ватт-амперным характеристикам соответствовали положительные скачки дифференциального сопротивления диода и немонотонное поведение оптоэлектронного сигнала. О возможности применения оптоэлектронного сигнала для считывания информации было указано в [5], где продемонстрировано оптоэлектронное считывание информации с помощью инжекционного лазера с носителя информации, которым служила фотопленка с нанесенными на ней поглощающими и отражающими (коэффициент отражения ~3%) полосами шириной 45 и 75 мкм соответственно.

Чувствительность напряжения на р-п-переходе к фазе внешней обратной связи в

составном резонаторе можно использовать в различных датчиках. Основное преимущество таких датчиков — сам источник излучения является и приемником, т.е. нет необходимости в дополнительных фотоприемниках. Эти обстоятельства особенно важны, если учесть, что всякие, даже малые паразитные отражения могут серьезно влиять на режимы работы датчика.

Теоретический анализ внешней оптической обратной связи в полупроводниковых лазерах приведен в работе [3] с учетом временного запаздывания между изменениями электрического поля и концентрации носителей.

Работу полупроводникового лазера с внешней оптической обратной связью можно описать в рамках модели составного резонатора, который изображен на рис. 1. В этой модели считается, что грань лазера, из которой выходит излучение, и внешний отражатель, который возвращает свет в активную область (в дальнейшем будем называть его внешним" зеркалом), образуют (внешний) резонатор Фабри—Перо, который оптически связан с лазерным резонатором через его выходное зеркало и образует вместе с ним составной резонатор.

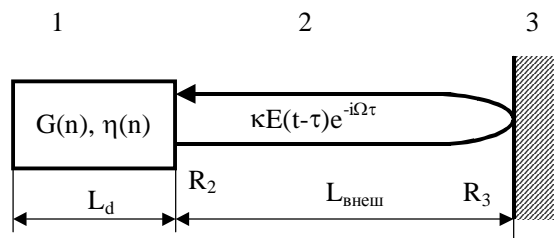


Рис.1. Составной резонатор. 1 – резонатор полупроводникового лазера, 2 – внешний резонатор, 3 – внешнее зеркало

Пусть электрическое поле внутри лазерного резонатора имеет вид  $E(t)exp\{i\Omega t\}$ , а концентрация носителей, создаваемая в активной области, равна  $n$ .

Будем считать, что коэффициент отражения внешнего зеркала достаточно мал и многократными отражениями во внешнем резонаторе можно пренебречь, тогда поведение лазера с таким составным резонатором можно описать следующими уравнениями:

$$\frac{d}{dt} E(t) = \left\{ i[\omega(n) - \Omega] + \frac{1}{2}[G(n) - \Gamma] \right\} E(t) +$$

$$+ \kappa E(t - \tau) e^{-i\Omega\tau} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} n = -\gamma n - G(n) |E(t)|^2 + P \quad (2)$$

Здесь  $\Omega$ —частота генерации, ( $\omega$ —одна из резонансных частот собственного резонатора лазерного диода,  $G$ —коэффициент усиления моды. Величина  $G$ , естественно, является функцией концентрации носителей  $n$ . Частота  $\omega$  также есть функция величины  $n$ , поскольку показатель преломления активной области зависит от концентрации носителей. Коэффициент  $\gamma$ —это обратное время жизни носителей, обусловленное спонтанной рекомбинацией ( $\approx 10^9 \text{ с}^{-1}$ ),  $\Gamma$ —потери в резонаторе ( $\approx 10^{11} \text{ с}^{-1}$ ), а  $P$ —число носителей, инжектируемых в единицу объема за единицу времени,—величина, пропорциональная току инжекции. Заметим, что выражение в фигурных скобках имеет тот же вид, что и для обычного лазера без внешнего резонатора.

Вклад от возврата части излучения описывает второй член в правой части уравнения (1). В нем  $\tau$ —время обхода внешнего резонатора,  $\kappa$ —параметр, характеризующий степень связи между внешним и лазерным резонаторами и определяющийся выражением

$$\kappa = (1 - R_2)(R_3 / R_2)^{1/2} c / (2\eta L_d), \quad (3)$$

где  $R_2$  и  $R_3$ —соответственно коэффициенты отражения от внешнего зеркала и обращенной к нему грани лазера, а  $L_d$  и  $\eta$ —соответственно длина и показатель преломления резонатора диодного лазера. Коэффициент отражения собственных зеркал полупроводникового лазера мал (порядка 0,3), к тому же длина его резонатора гораздо меньше, чем в лазерах других типов (порядка нескольких сотен микрометров), и потому даже при слабом отражении от внешнего зеркала значение  $\kappa$  велико, вследствие чего роль внешней оптической обратной связи становится заметной.

В случае линейной зависимости коэффициента усиления  $G$  и показателя преломления  $\eta$  от концентрации  $n$  из уравнений (1) и (2) можно вывести следующие соотношения для стационарной частоты  $\Omega$  и порогово-

го значения коэффициента усиления  $G_{\text{пор}}$  (или пороговой концентрации носителей):

$$\omega_0 = \Omega + \kappa \sin(\Omega\tau) + \kappa\alpha(1 - \cos \Omega\tau), \quad (4)$$

$$G_{\text{пор}} = G(n_{\text{пор}}) = \Gamma - 2 \cos(\Omega\tau) \quad (5)$$

Здесь  $\omega_0$ —собственная частота резонатора полупроводникового лазера, а величина  $\alpha$ —отношение изменения показателя преломления к изменению коэффициента усиления на длине  $\lambda/4\pi$ , обусловленных вариацией концентрации носителей:

$$\alpha = (2\omega / \eta) \frac{\partial \eta}{\partial n} / \frac{\partial G}{\partial n} \quad (6)$$

В газовых и других типах лазеров величина  $\alpha$  обычно настолько мала, что ею можно пренебречь по сравнению с единицей, однако в полупроводниковых лазерах на основе GaAs и InGaAsP величина, а по экспериментальным оценкам лежит в пределах от  $-1$  до  $-7$ . Это связано с тем, что вблизи спектрального максимума усиления кривая дисперсии показателя преломления имеет характерную асимметрию. Таким образом, большое абсолютное значение параметра  $\alpha$  является дополнительной причиной сильного влияния внешней оптической обратной связи в полупроводниковых лазерах.

Осциллирующие члены, входящие в выражения (4) и (5), описывают интерференцию волн, отраженных собственным зеркалом (сколотой гранью кристалла) и внешним отражателем.

Блок-схема экспериментальной установки для измерения оптоэлектронного сигнала показана на рис. 2. Излучение от источника света 1 с помощью микрообъектива 2 фокусировалось на исследуемую поверхность 4 таким образом, чтобы отраженный свет попадал обратно в активную область лазерного диода.

Микроперемещением объектива и лазера друг относительно друга достигалось такое взаимное расположение диода, микрообъектива и зеркала, когда величина внешней обратной связи была максимальной. Оптоэлектронный сигнал определялся как амплитуда импульсов напряжения, возникающих на диоде. Сигнал усиливался усилителем 7 и наблюдался на осциллографе 8. Критерием настройки на максимум величины внешней обратной связи служило дости-

жение максимального значения оптоэлектронного сигнала при юстировке системы.

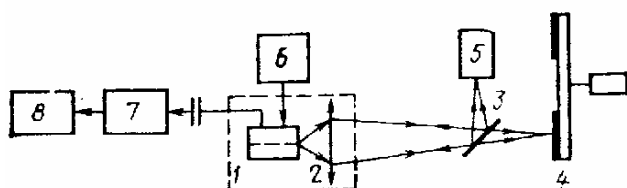
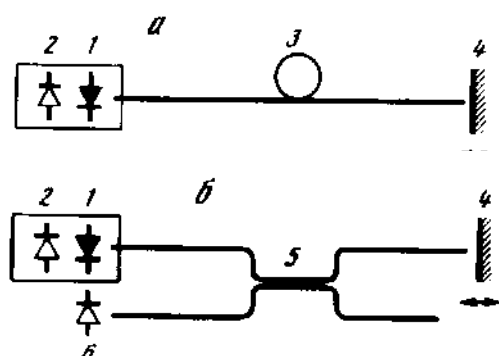


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования электрического, оптического откликов полупроводникового лазера на внешнюю оптическую обратную связь:

1 — лазерный диод; 2 — микрообъектив; 3 — полупрозрачная пластина; 4 — исследуемая поверхность; 5 — фотодиод; 6 - блок питания постоянного тока; 7 — широкополосный усилитель; 8 - осциллограф.

Построение измерительных схем с использованием оптического волокна возможно как по схеме прямого зондирования (рис. 3,а), так и с использованием одномодового волоконного направленного ответвителя (рис. 3,б), величина коэффициента деления определяется длиной связи.

Рис. 3. Различные схемы регистрации сигнала:



а — схема прямого зондирования; б — схема с волоконным ответвителем 1 - лазерный диод; 2 — контрольный фотодиод; 3 - световодный тракт; 4 - зондируемая поверхность (зеркало); 5 — волоконный направленный ответвитель; 6 — внешний фотодиод

В первом случае оптический отклик на смещение внешнего зеркала регистрировался контрольным фотодиодом, а во втором — внешним дополнительным фотодиодом. Сигнал можно зарегистрировать также измерением напряжения на диоде. В этом случае выходной торец волокна и зеркало образуют дополнительный резонатор Фабри—Перо с собственной чувствительностью к смещениям; следовательно, можно регистрировать смещения (вибрации) внешнего зеркала с помощью дополнительного фотоприемника

лишь по отраженному свету (рис. 3,б), без привлечения эффекта обратной связи.

При построении системы с обратной связью источником шумов и помех может быть сама оптическая схема, в которой осуществляется механическое перемещение исследуемой поверхности. Так, лазерный режим чувствителен к длине внешней оптической цепи обратной связи, т. е. к расстоянию от торца диода до отражающей поверхности (рис.4). Эта чувствительность может быть использована для наблюдений неровностей поверхности, вызванных изменением поверхностной структуры или ее повреждением. В рассмотренной схеме вибрации внешнего зеркала могут стать источником помех. Поэтому целесообразно использовать лазеры с длиной когерентности, меньшей длины внешней связи.

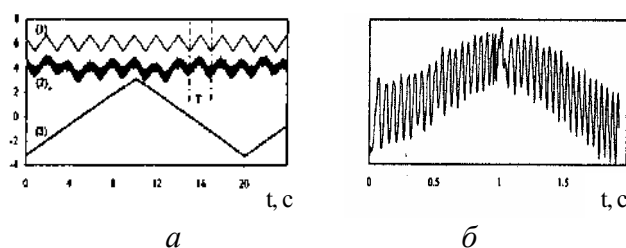


Рис.4. Зависимости относительной интенсивности сигнала: а - модулированный сигнал тока накачки (1), соответствующие вариации мощности, возникающие в результате обратной связи (2), влияние величины смещений, регулируемых с помощью пьезоэлектрического элемента; б - увеличенный участок зависимости (2) в течение периода  $T$ .

Таким образом, при проведении дефектоскопии поверхности в соответствии с уравнениями (1) –(6) величина оптоэлектронного сигнала будет складываться из следующих составляющих: отражательной способности внешнего зеркала  $R_3$  (в данном случае – от отражательной способности контролируемой поверхности),  $L_d$  – расстояние от внешнего зеркала лазерного диода до контролируемой поверхности, параметр с характеризует оптические свойства среды в составном резонаторе (поглощение, рассеяние и др. процессы). Закономерности изменения отражательной способности поверхности в зависимости от ее состояния, структуры, наличия различного рода повреждений были исследованы ранее.

Заметим, что на величину оптоэлектронного сигнала существенное влияние оказывает степень когерентности собственного излучения лазерного диода и отраженного поверхностью излучения, поляризация и деполяризация отраженного от контролируемой поверхности излучения в зависимости от структуры поверхности, величины и формы микронеровностей, величины напряжений в поверхностном слое. Измерение оптоэлектронного сигнала также позволяет определять характеристики среды в составном резонаторе. Если влияние среды необходимо минимизировать, целесообразно применение схемы датчиков, использующих одномодовый волоконный световод для зондирования поверхности. В этом случае выходной торец волокна располагается вблизи контролируемой поверхности.

#### Библиографический список

1. Сазонникова, Н.А. Оптический способ оценки поверхностных повреждений / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов, А.А. Шуваев // Компьютерная оптика, МЦНТИ, - 2000. Вып. 20. - С.106 – 110.
2. Ву, Ван Лык. Оптический и электрический отклики в InGaAsP/InP-лазерах и усилителях на внешнюю обратную связь и их применения / В.Л. Ву [и др.] // Инжекционные лазеры и их применение.- М.: Наука, 1992. Тр.ФИАН, Т.216, - С.144-172.
3. Физика полупроводниковых лазеров: Пер. с японск. / под ред. Х. Такумы. - М.: Мир, 1989. - 310 с.
4. Елисеев, П.Г. Исследование планарных полосковых гетеролазеров на основе

AlGaAs-GaAs / П.Г. Елисеев [и др.]. // Инжекционные лазеры (Тр. ФИАН; Т.141). - М.: Наука, 1983. - С.89-117.

5. Gharbi, T. Backscatter-modulated laser diode for low-frequency small-amplitude vibration measurement / T. Gharbi, A. Courteville, A. Chebbour. // Applied Optics, 1 November 1997, Vol. 36, No.31. - p.8233-8236.

#### References

1. Sazonnikova, N.A. The optical method of surface damages estimation defects/ N.A. Sazonnikova, V.I. Mordasov, A.A. Shuvaev // Computer optics. – М.: MCSTI, 2002. -V.20. - p.106-110.
2. Vu Van Lik, Eliseev P.G., Manko M.A., Tsotsoria M.V. Optical and electrical answer in the InGaAsP/InP-lasers and reinforces to external and its employments/Injection lasers and its employment.- Moscow: Science, 1992, Works of Physical Institute of Science Academy works; V.216, p.144-172.
3. Physics of semiconductor lasers: Translation from Japan./Under H. Takhuma redaction. - Moscow: Mir, 1989.- 310 p.
4. Eliseev, P.G. Investigation of planar stripe geterolasers on the AlGaAs-GaAs base / P.G. Eliseev // Injection lasers (Тр. ФИАН; Т.141). - Moscow: Science, 1983, Works of Physical Institute of Science Academy works; V.164, p.89-117.
5. Gharbi, T. Backscatter-modulated laser diode for low-frequency small-amplitude vibration measurement / T. Gharbi, A. Courteville, A. Chebbour. // Applied Optics, 1 November 1997, Vol. 36, No.31. - p.8233-8236.

## THE SEMICONDUCTOR LASER FEEDBACK EFFECT IMPLEMENTATION TO CONSTRUCTING OF DEFECTOSCOPING SYSTEM FOR LARGE-SIZED SHELLS

© 2009 N. A.Sazonnikova<sup>1</sup>, D. N. Grebnev<sup>2</sup>, O. V. Shulepova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara State aerospace university

<sup>2</sup> Samara space centre “TsKB-Progress”

For support stable optical axes of diagnostic system and exception of temperature source and receiver dependence is advantageous to both functions coincidence in one elements. This possibility is enable due to semiconductor lasers feedback effect. The semiconductor laser performance with external feedback is described by complex resonator.

### **Информация об авторах**

**Сазонникова Надежда Александровна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры Автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 267-46-65. E-mail: [nasazonnikova@yandex.ru](mailto:nasazonnikova@yandex.ru). Область научных интересов: лазерные информационно-измерительные системы.

**Гребнев Дмитрий Николаевич**, Заместитель начальника отделения Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: создание конструкции головного обтекателя ракеты-носителя и методов его дефектоскопии.

**Шулепова Ольга Викторовна**, аспирант кафедры Автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов: лазерно-вибрационные методы диагностики оболочек.

**Sazonnikova Nadezhda Alexandrovna**, candidate of technical sciences, the older science worker of Samara state aerospace university. Phone. (846) 267-46-65. E-mail: [nasazonnikova@yandex.ru](mailto:nasazonnikova@yandex.ru). Area of research: laser information and measurement systems.

**Grebnev Dmitriy Nikolaevich**, the deputy head of department of Samara space centre “TsKB-Progress”. Area of research: rocket fairing construction and defectoscopy.

**Shulepova Olga Victorovna**, the postgraduate of Samara state aerospace university. Area of research: laser vibrating diagnostics systems.