

УДК 621.375.826

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДВУХВОЛНОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ И КОНЦЕПЦИИ «БЕЗАПРИОРНОСТИ»

Козлов В.Л., Кугейко М.М.

Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

*Приводятся примеры построения высокоэффективных измерительных систем на основе двухволновых полупроводниковых лазеров и концепции «безаприорности», обеспечивающих преимущества перед аналогичными одноволновыми лазерными измерителями.
(E-mail: KozlovVL@bsu.by)*

Ключевые слова: двухволновой полупроводниковый лазер, концепция «безаприорности», лазерные измерительные системы.

Введение

Разработка и создание конкурентоспособных информационно-измерительных и диагностических систем требует придания им новых свойств, позволяющих улучшить точностные, эксплуатационные, габаритные и стоимостные характеристики. Для решения этой задачи необходимо использование новых подходов, методик и функциональных элементов. Одним из путей улучшения параметров лазерных систем является использование в качестве источников зондирующего излучения двухволновых полупроводниковых инжекционных лазеров на основе асимметричной квантоворазмерной гетероструктуры [1, 2]. До настоящего времени в литературных источниках имелись данные лишь о теоретических разработках структур таких двухволновых лазеров, поэтому они не применялись в качестве источников излучения при разработке лазерных измерительных систем. Этот тип двухволновых лазеров имеет ряд существенных преимуществ перед дискретным набором лазерных источников, заключающихся в более высокой стабильности разности длин волн генерации, одинаковых флуктуациях параметров излучения генерируемых сигналов, отсутствии проблем согласования оптических путей зондирующих сигналов, что обеспечивается генерацией сигналов на разных длинах волн в одном оптическом резонаторе и синхронизацией электронно-оптических процессов в активной области лазера. Эти преимущества

обеспечивают более высокую эффективность работы измерительных систем на основе двухволновых лазеров как перед аналогичными одноволновыми лазерными измерителями и перед многочастотными измерительными системами, в которых используются несколько различных лазерных источников зондирующего сигнала.

Улучшить параметры лазерных систем можно применяя концепцию «безаприорности» [3, 4], заключающуюся в максимальном исключении методических погрешностей, обусловленных нестабильностью аппаратурных констант, приемо-передающего тракта, окружающей среды и исследуемых физических процессов. Данный подход снижает проблему априорной неопределенности, облегчает калибровочные измерения и используется для построения систем измерения оптических характеристик неоднородных рассеивающих сред. К недостатку указанной методики следует отнести то, что в ней не учитывается влияние флуктуаций параметров зондирующих сигналов, изменения фазовой структуры и задержки излучения, девиации разностной длины волны излучений на аппаратурные константы и, следовательно, на точность определения оптических характеристик. В прецизионных измерительных системах на двухволновых лазерах необходим учет влияния флуктуаций упомянутых параметров на аппаратурные константы, поэтому для использования концепции «безаприорности» при разработке таких систем необходима ее

соответствующая доработка и развитие, что и являлось целью данной работы. Ниже приводятся примеры использования концепции «безаприорности» для прецизионных измерителей на основе двухволновых полупроводниковых лазеров.

Сущность концепции «безаприорности»

В оптических задачах одновременное измерение нескольких разноименных величин (совместные измерения) практически сложно осуществимо [4]. Использование совокупных измерений в оптических исследованиях предполагает регистрацию нескольких одноименных сигналов.

Рассмотрим задачу использования совокупных измерений для устранения ряда методических погрешностей оптико-электронных систем в самом общем виде. Пусть уравнение, описывающее процесс измерений, имеет вид:

$$F(A, B, C, \dots, x, y, z, \dots) = k_i l_i, \quad (1)$$

где x, y, z, l – известные коэффициенты и непосредственно измеряемая величина; A, B, C – искомые неизвестные; k_i – константа преобразования i -го измерителя.

При абсолютных измерениях, когда отсчеты измеряемой величины устанавливаются одноименными калиброванными приборами, эта константа одинакова для всех приборов. Запишем систему уравнений (1), характеризующую совокупные измерения:

$$\left\{ \begin{aligned} F_1(A, B, C, \dots, x, y, z, \dots) &= k_1 l_1 + \Delta l_1, \\ &\dots \\ F_i(A, B, C, \dots, x, y, z, \dots) &= k_i l_i + \Delta l_i, \\ F_{i+1}(A, B, C, \dots, x, y, z, \dots) &= k_{i+1} l_{i+1} + \Delta l_{i+1}, \\ &\dots \\ F_m(A, B, C, \dots, x, y, z, \dots) &= k_m l_m + \Delta l_m. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где Δl – погрешность измерения измеряемой величины.

За счет использования определенной геометрии измерений либо использования одной измерительной системы в различных ситуаци-

ях, отражаемых этими уравнениями, можно добиться равенства констант преобразования k_i . При этом система (2) легко преобразуется к виду (при $k_i = k_{i+1}$)

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_1 A, B, C, \dots, x, y, z, \dots &= l'_1, \\ &\dots \\ \Phi_i A, B, C, \dots, x, y, z, \dots &= l'_i, \\ &\dots \\ \Phi_m A, B, C, \dots, x, y, z, \dots &= l'_m, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где

$$l'_1 = \frac{l_1 + \Delta l_1}{l_2 + \Delta l_2}, \dots, l'_i = \frac{l_i + \Delta l_i}{l_{i+1} + \Delta l_{i+1}}, \dots$$

$$l'_m = \frac{l_{m-1} + \Delta l_{m-1}}{l_m + \Delta l_m}; \Phi_1 = \frac{F_1}{F_2}, \Phi_m = \frac{F_{m-1}}{F_m},$$

Может быть и любая другая комбинация уравнений, при которых k_i равны. Как видно из системы (3), при совокупных измерениях с использованием определенной геометрии можно получить систему уравнений, число которых превышает или равно числу искоемых неизвестных. Совместное решение полученных уравнений позволяет найти искомые величины. Уменьшение числа аппаратных констант достигается за счет использования комбинаций одних и тех же приемно-излучающих и измерительных систем и различного их местоположения [4]. Если уравнения системы являются линейными, то при числе уравнений m , равном числу неизвестных, решение системы будет однозначным. Так как уравнения системы (3) не содержат коэффициентов k , наличие которых требует проведения градуировочных измерений (установления их величины), то и получаемое решение также не включает их.

Однако, делая вывод о равенстве констант преобразования k_i в уравнениях (3) за счет выбора определенной геометрии измерений, в системе не учитывается влияние погрешности совмещения оптических путей зондирующих сигналов при использовании нескольких дискретных лазерных источников, флуктуации разности амплитуд зондирующих сигналов, девиации разностной длины волны излучений, дисперсии среды распространения излучения на коэффициенты k_i . Если флуктуации этих параметров меньше инструментальной погрешности измерений, то это, в общем, не оказывает

существенного влияния на погрешность определения оптических характеристик неоднородных рассеивающих сред при измерениях сигналов в аналоговой форме. Этот фактор в значительной степени обеспечивает равенство констант преобразования k_i в уравнениях (2).

В прецизионных лазерных системах для обеспечения высокой точности измерений необходимо учитывать зависимость констант преобразования k_i от флуктуации параметров зондирующих сигналов и среды распространения излучения. Использование в совокупных измерениях многоволновых лазеров, как будет видно из дальнейшего изложения, предполагает проведение измерений одной измерительной системой в различных ситуациях. Для прецизионных измерителей на основе многоволновых лазеров система уравнений, характеризующих процесс измерений, приобретает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 A, B, C, \dots, x, y, z, \dots = (k_1 / k_2) l'_1, \\ \dots \\ \Phi_i A, B, C, \dots, x, y, z, \dots = (k_i / k_{i+1}) l'_i, \\ \dots \\ \Phi_{m-1} A, B, C, \dots, x, y, z, \dots = (k_{m-1} / k_m) l'_{m-1}, \\ \Psi(x, y, z, \dots) = k_i / k_{i+1} \end{array} \right. \quad (4)$$

где Ψ – функция зависимости коэффициентов преобразования от параметров зондирующего сигнала; x, y, z – известные коэффициенты (параметры зондирующего сигнала).

Для конкретного типа измерительной системы, в зависимости от решаемых ею задач, функция зависимости коэффициентов преобразования Ψ имеет различный вид. В аналоговых системах оптико-физической диагностики неоднородных рассеивающих сред функция Ψ равняется единице [4].

Ниже показывается, что использование концепции «безаприорности» при разработке различных типов измерителей на основе двухволновых полупроводниковых лазеров, а также учет зависимости коэффициентов преобразования от параметров зондирующего сигнала для конкретного типа измерительной системы, позволяет исключить зависимость результата от аппаратных констант, среды распространения и для прецизионных систем, использующих частотные, фазовые, временные измерения. Ис-

пользование данного подхода является основой для разработки нового поколения измерительных систем, наиболее полно удовлетворяющих задаче метрологической аттестации и автоматизации процесса измерений.

Измерительные системы на основе двухволновых полупроводниковых лазеров и концепции «безаприорности»

Газоаналитические системы

В газоаналитических системах, построенных на основе принципов концепции «безаприорности», за счет использования комбинации приемно-излучающих блоков и различного их местоположения достигается максимальное исключение методических погрешностей, обусловленных нестабильностью аппаратных констант, приемно-передающего тракта, окружающей среды [3]. Однако для обеспечения более высокой точности измерений в таких системах необходимо учитывать зависимости коэффициентов преобразования от флуктуаций амплитуды и длины волны зондирующего сигнала, от собственного излучения контролируемого газа, также следует учесть формы контуров линий поглощения и перекрытие линий поглощения контролируемых газов.

В прецизионных измерителях оптических характеристик и концентрации газовых компонент рассеивающих сред с использованием двухволнового лазера на основе базисного и нефелометрического методов [5] достигается устойчивость системы к изменениям аппаратных констант, влиянию окружающей среды, загрязнению оптики. Решение системы уравнений (4) для прямого и обратного прохода излучения через контролируемую среду позволяет определить коэффициент ослабления участка среды из выражения:

$$\varepsilon(R_1, R_2) = \frac{1}{2L} \left[\ln \frac{S_{\lambda_2}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_2)}{S_{\lambda_2}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_1)} \right], \quad (5)$$

где L – длина контролируемой трассы; R_0, R_3 – точки расположения источника и отражателя; $S_{\lambda_2}(R_0, R_1), S_{\lambda_2}(R_3, R_1), S_{\lambda_2}(R_0, R_2), S_{\lambda_2}(R_3, R_2)$ – интенсивности рассеянного излучения в граничных точках (R_1, R_2) на длине волны λ_2 (вне полосы поглощения газа) при прямом и обратном походе, а искомую концентрацию газа получить из выражения:

$$C_x = -\frac{1}{2\Delta KL} \left[\ln \frac{S_{\lambda_1}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_2) \cdot S_{\lambda_2}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_1)}{S_{\lambda_1}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_1) \cdot S_{\lambda_2}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_2)} \right], \quad (6)$$

где ΔK – дифференциальный коэффициент поглощения на длинах волн λ_1 и λ_2 ; $S_{\lambda_1}(R_0, R_1)$, $S_{\lambda_1}(R_3, R_1)$, $S_{\lambda_1}(R_0, R_2)$, $S_{\lambda_1}(R_3, R_2)$ – интенсивности рассеянного излучения на первой длине волны λ_1 (в центре полосы поглощения контролируемого газа) при прямом и обратном проходе, соответственно. Как следует из приведенных выражений, отсутствует необходимость калибровки измерительной системы и установки аппаратных констант ввиду их отсутствия в алгоритмах, которые получены без использования каких-либо допущений или пренебрежений этими константами. В измерителе автоматически учитывается изменение длины контролируемой трассы, что расширяет его функциональные возможности.

В газоанализаторе [6], построенном на основе двухволнового полупроводникового лазера, не происходит прямого измерения амплитуды дистанционного импульса, а изменение амплитуды импульса преобразуется в изменение частоты рециркуляции на данной длине волны при динамическом пороге регистрации сигнала. В результате решения системы уравнений (4) для различных длин волн и порогов регистрации сигнала определяется концентрация контролируемого газа в соответствии с выражением:

$$C_x = \frac{(1-q)N_1}{N} \frac{1}{2\Delta KL}, \quad (7)$$

где q – отношение порогов компараторов; N , N_1 – число периодов рециркуляции при различных порогах компаратора. Как видно из расчетной формулы, в нее не входят амплитуды дистанционных импульсов, величина порога, длительность фронта импульса. Поэтому изменение амплитуды дистанционных импульсов, обусловленное параметрами окружающей среды, задымленностью, изменением параметров приемно-передающего тракта и др. не будет влиять на точность измерений, что повышает надежность работы системы и улучшает точность измерений.

В пирометрическом газоанализаторе продуктов сгорания [7] определена зависимость коэффициентов преобразования от температуры контролируемого газа. В системе для опре-

деления концентрации газа C_x методом спектрального отношения измеряется температура в различных спектральных областях: в отсутствие поглощения газов T (на длине волны λ_2), и в области поглощения контролируемого газа T_k (на длине волны λ_k). Затем по значениям измеренных температур рассчитывается искомая концентрация газа из выражения:

$$C_x = \frac{C_2 \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T} \right) \left(\frac{1}{\lambda_k} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}{\Delta K L}, \quad (8)$$

где C_2 – коэффициент из формулы Планка. Выражение для расчета концентрации газа (8) не учитывает тот факт, что при повышенных температурах изменяется отношение вероятности спонтанного излучения к вероятности поглощения контролируемого газа. Для спектральных областей поглощения CO, CO₂, NO в области высоких температур контролируемые газы будут не только поглощать, но и излучать электромагнитную энергию на той же длине волны. Следовательно, для повышения точности измерений необходимо учитывать зависимость коэффициентов преобразования от температуры [8], обусловленную повышением вероятности спонтанного излучения газа. Это позволяет установить связь истинной концентрации контролируемого газа C'_x , с концентрацией C_x , вычисленной из (8) с помощью выражения:

$$\exp(-C'_x \Delta KL) = \frac{\exp(-C_x \Delta KL) \left(\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda_k}\right) - 1 \right) - 1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda_k}\right) - 2}, \quad (9)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света, k – постоянная Больцмана. Очевидно, что при низких температурах $C_x \approx C'_x$. При температурах до 400 °С погрешность измерения концентрации не превышает 0,5 %, при более высоких температурах погрешность растет и достигает 15–20 % при температурах более 1500 °С.

При анализе химических компонент, чьи спектры поглощения перекрываются, известные методики измерений на основе дифференциального поглощения могут давать значительную погрешность измерений. В этом случае для повышения точности необходимо определить форму контура линии поглощения газа

и учесть ее вид при расчете коэффициентов преобразования для определения концентрации газовых компонент [9]. Форму нормированного контура линии поглощения газов, входящих в состав атмосферы, достаточно точно можно аппроксимировать лоренцевским контуром уширения [10], который определяется выражением

$$A_i = \frac{v_L^2}{(v_i - v)^2 + v_L^2}, \quad (10)$$

где v_L – полуширина лоренцевского контура уширения для данного газа; v_i – частота излучения, соответствующая центру полосы поглощения; v – частота излучения, на которой определяется поглощения газа. Концентрации контролируемых газов C_1 и C_2 с учетом перекрытия спектров поглощения можно определить из выражений

$$\begin{aligned} C_1 &= C_{x1} - C_{x2} \frac{\Delta K_2}{\Delta K_1} A_2 + C_{x1} A_1 A_2, \\ C_2 &= C_{x2} - C_{x1} \frac{\Delta K_1}{\Delta K_2} A_1 + C_{x2} A_1 A_2, \end{aligned} \quad (11)$$

где C_{x1} и C_{x2} – концентрации контролируемых газов, полученные без учета перекрытия их полос поглощения; A_1 – нормированный коэффициент, характеризующий поглощение первого газа на длине волны центра полосы поглощения второго газа; A_2 – нормированный коэффициент, характеризующий поглощение второго газа на длине волны центра полосы поглощения первого газа.

Прецизионные дальномерные системы.

Для применения принципов концепции «безаприорности» в прецизионных измерителях дальности необходимо введение в систему, характеризующую процесс измерений, функциональных зависимостей коэффициентов преобразования от дисперсии атмосферы, длины волны и разности длин волн зондирующих сигналов. Как показано в работе [11], если заданы две длины волны излучения λ_1 и λ_2 , то обратная относительная дисперсия воздуха, равная отношению $(n_1 - 1)/(n_2 - n_1)$, оказывается постоянной независимо от условий окружающей среды. Для рециркуляционного дальномера на основе двухволнового инжекционного лазера, в результате решения системы уравнений для

различных длин волн, при динамическом пороге регистрации сигналов с учетом зависимости коэффициентов преобразования от дисперсии воздуха дальность рассчитывается в соответствии с выражением [11]:

$$L = \frac{c}{2} \left[t_{opt} - \frac{t_o}{(1 - q)N_1} - \frac{t_o}{N\Delta n_o} n_o - 1 \right], \quad (12)$$

где n_o – показатель преломления воздуха на длине волны λ_1 ; Δn_o – разность показателей преломления на длинах волн λ_1 и λ_2 при стандартных условиях окружающей среды; ($t = 0^\circ\text{C}$ и $p = 760$ мм рт. ст.), N – число периодов рециркуляции, за которое разность задержек на длинах волн λ_1 и λ_2 станет равной t_o ; N_1 – число периодов рециркуляции при измененном пороге регистрации в q раз ($q = 0,2; \dots, 0,9$); t_{opt} – время оптической задержки на дистанции на длине волны λ_1 ; c – скорость света в вакууме. В формуле вычисления дальности (12) второй член в квадратных скобках учитывает влияние на результат измерений порога регистрации дистанционного импульса, а третий член – влияние дисперсии коэффициента преломления излучения на дистанции. Как видно из (12), в нее не входят амплитуда дистанционных импульсов, величина порога компаратора, длительность фронта импульса, что обеспечивает независимость результата измерений от параметров приемно-передающего тракта и окружающей среды,

Принцип измерения с помощью двухволнового импульсно-фазового дальномера [12] заключается в установлении такой частоты следования зондирующих импульсов, при которой на дистанции будет укладываться целое число периодов. В дальномере реализован режим автоматической подстройки частоты зондирующих импульсов таким образом, что при частоте следования импульсов $f_{\lambda 1}$ на дистанции будет укладываться целое число N периодов на длине волны λ_1 , а при частоте $f_{\lambda 2}$ – целое число N периодов на длине волны λ_2 . Выражение для расчета дальности имеет вид

$$L = \frac{cN}{2} \left[\frac{1}{f_{\lambda 2}} - \frac{n_o - 1}{\Delta n_o} \left(\frac{1}{f_{\lambda 2}} - \frac{1}{f_{\lambda 1}} \right) \right]. \quad (13)$$

Сравнение результатов измерения дальности одноволновым фазовым дальномером

($\lambda = 837$ нм) и двухволновыми импульсно-фазовым и рециркуляционным дальномерами ($\lambda_1 = 837$ нм, $\lambda_2 = 787$ нм) показывает, что при изменении температуры от -20 °С до $+30$ °С одноволновой дальномер на дистанциях до 5 км дает погрешность измерений до 15 см по сравнению с двухволновыми дальномерами [11].

Измеритель хроматической дисперсии оптического волокна

Для построения различных типов систем измерения хроматической дисперсии необходимо использование дискретного набора лазеров или перестраиваемого лазерного источника и прецизионных измерителей временных интервалов с пикосекундным разрешением. Указанные факторы ограничивают точность измерения дисперсии и значительно усложняют конструкцию системы. Применение принципов концепции «безаприорности» и двухволнового лазера в таких системах обеспечивает упрощение конструкции и повышение точности измерения дисперсии. Метод [13] основан на оптоэлектронной рециркуляции одновременно на двух оптических длинах волн. В системе не происходит прямого измерения коротких временных интервалов. Длина тестируемого световода L и величина хроматической дисперсии D определяются по частоте и разности частот рециркуляции на первой и второй длинах волн из выражений:

$$D = \frac{t_o n_1}{N(\frac{1}{f_1} - t_e)c\Delta\lambda}; L = \frac{(\frac{1}{f_1} - t_e)c}{n_1}, \quad (14)$$

где $\Delta\lambda$ – разность длин волн генерации лазера; L – длина световода; N – число периодов рециркуляции, за которое разность задержек станет равной t_o ; n_1 – коэффициент преломления в световоде на длине волны λ_1 ; t_e – время задержки в электронных блоках. Погрешность измерения дисперсии составляет величину 10^{-2} пс/км·нм. Система [13] может использоваться также для решения задачи измерения и управления длиной волны излучения двухволновых лазеров, при этом в качестве чувствительного элемента применяется волоконно-оптический световод с известной хроматической дисперсией.

Доплеровские измерительные системы.

Использование совокупных измерений и двухволнового лазера в качестве источника из-

лучения дает эффект повышения точности и для других типов лазерных измерителей, таких как доплеровские измерители скорости [14], волоконно-оптический гироскоп [15], доплеровские измерители профиля поверхности [16].

Доплеровские измерители с одноволновым лазером позволяют определить только проекцию скорости объекта на линию наблюдения, а не точное значение скорости и угла направления движения. Использование двухволнового лазера позволяет одновременно определять точное значение скорости и угла направления движения [14]. В системе зондирующие лучи на длинах волн λ_1, λ_2 направляются к объекту под разными углами φ_1, φ_2 , соответственно, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$. В результате фотогетеродинамирования выделяются сигналы доплеровских частот f_{d1} и f_{d2} на длинах волн λ_1 и λ_2 , соответственно, из которых определяется угол α направления движения объекта и точное значение скорости v движения:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}} \left[\frac{f_{d2} \lambda_2 \sin \frac{\varphi_1}{2}}{f_{d1} \lambda_1 \sin \frac{\varphi_2}{2}} - \cos \frac{\Delta\varphi}{2} \right], \quad (15)$$

$$v = \frac{1}{4} \sqrt{(f_{d1} \lambda_1)^2 + \frac{1}{\sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}} \left[\frac{f_{d2} \lambda_2 \sin \frac{\varphi_1}{2}}{\sin \frac{\varphi_2}{2}} - f_{d1} \lambda_1 \cos \frac{\Delta\varphi}{2} \right]^2}.$$

Результаты математического моделирования работы системы показали, что погрешность измерения для величины угла составляет 10^{-2} , а для скорости 10^{-3} – 10^{-4} в зависимости от флуктуаций разности длин волн λ_1, λ_2 .

Применение одноволнового лазера в волоконно-оптическом гироскопе, работающем на эффекте Саньяка, накладывает определенные ограничения на точность измерений, заключающиеся в неоднозначности определения направления поворота контура в некоторых точках фазовой характеристики и малом динамическом диапазоне измерений. Использование двухволнового лазера в гироскопе [15] позволяет устранить эти недостатки. В измерительной системе по величине фазы Саньяка $\varphi_{c1}, \varphi_{c2}$ на длинах волн λ_1 или λ_2 , соответственно, определяется угловая скорость вращения контура Ω :

$$\Omega = \frac{c \cdot \lambda_1}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot r \cdot n_1} \varphi_{c1}, \quad \Omega = \frac{c \cdot \lambda_2}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot r \cdot n_2} \varphi_{c2} \quad (16)$$

где $L = 2\pi rN$ – длина оптического волокна; N – число витков в катушке; r – радиус катушки; n_1, n_2 – коэффициенты преломления в световоде для λ_1, λ_2 , соответственно. Для повышения чувствительности измерителя и увеличения значения фазы Саньяка, как следует из (14), целесообразно увеличивать число витков N оптического волокна. Однако при этом даже при небольших угловых скоростях фаза Саньяка может превысить величину π , что приведет к неоднозначности измерения угловой скорости вращения. Если фаза Саньяка превышает величину π , т.е. $\varphi_{c1} = \varphi_{c01} + m\pi$, то m определяется из выражения

$$m = \frac{n_1 \lambda_2 \varphi_{c02} - n_2 \lambda_1 \varphi_{c01}}{\pi(n_2 \lambda_1 - n_1 \lambda_2)}, \quad (17)$$

где $\varphi_{c01}, \varphi_{c02}$ – фазы Саньяка в пределах угла π , которые выделяются на выходах фотоприемников.

В доплеровском профилометре земной поверхности на одноволновом лазере в точках, где поверхность Земли параллельна направлению лазерного луча (ямы, обрывы, скалы), система дает значительную погрешность измерений. Использование совокупных измерений и двухволнового зондирующего сигнала [16] позволяет повысить точности измерений в таких точках. Из алгоритма работы профилометра [16] следует, что в расчетные соотношения не входит высота полета летательного аппарата, т.е. погрешность измерений не зависит от стабильности поддержания высоты полета, а определяется лишь разрешением по частоте блока измерения доплеровского сигнала. Кроме того, в системе обеспечивается возможность определения высоты полета летательного средства в процессе проведения измерений.

Заключение

Предложены и обоснованы методики использования концепции «безаприорности» и двухволновых полупроводниковых инжекционных лазеров в качестве источника зондирующего излучения для повышения точностных и эксплуатационных характеристик лазерных из-

мерительных и диагностических систем. Благодаря использованию этих факторов достигается повышение точности измерений расстояний в лазерных дальномерах за счет учета дисперсионных свойств атмосферы; повышение точности газоаналитических систем при трассовых измерениях малых концентраций газа, перекрытии спектров поглощения, повышенных температурах; повышение точности измерения хроматической дисперсии волоконно-оптических световодов. В доплеровских измерителях скорости, лазерных профилометрах, волоконно-оптическом гироскопах за счет выбора соответствующей геометрии достигается исключение погрешностей, обусловленных нестабильностью приемно-передающего тракта, окружающей среды, а за счет того, что генерация обеих зондирующих длин волн излучения происходит в одной и той же активной области лазера, обеспечивается повышение стабильности разности длин волн генерации, одинаковые флуктуации амплитуды и фазы зондирующих сигналов, упрощение калибровки и синхронизации работы системы.

Приведенная методика использования двухволновых полупроводниковых лазеров и концепции «безаприорности» в измерительных и диагностических системах позволяют прогнозировать создание нового поколения оптико-электронных приборов с повышенными точностными характеристиками, оптимизированными эксплуатационными параметрами и устойчивостью к дестабилизирующим факторам.

Список использованных источников

1. Ikeda, S. Evidence of the wavelength switching caused by a blocked carrier transport in an asymmetric dual quantum well laser / S. Ikeda, A. Shimizu // Appl. Phys. Lett. 1991. – V. 59. – P. 504–506.
2. Афоненко, А.А. Полупроводниковый лазер / А.А. Афоненко, В.К. Кононенко, И.С. Манак // Патент Республики Беларусь №1385. 1996.
3. Кугейко, М. М. Теория и методы оптико-физической диагностики неоднородных рассеивающих сред. / М. М. Кугейко, Д. М. Оношко – Минск: БГУ, 2003. – 185 с.
4. Кугейко, М.М. Лазерные системы (в условиях априорной неопределенности). / М.М. Кугейко. – Минск: БГУ, 1999. 196 с.
5. Козлов, В.Л. Прозрачномеры-газоанализаторы на двухволновом полупроводниковом лазере /

- В.Л. Козлов, М. М. Кугейко // Приборы и методы измерений. – 2011.– №2(3). – С. 5–12.
6. Козлов, В.Л. Лазерный газоанализатор / В.Л. Козлов // Патент Республики Беларусь № 7676. 2005.
 7. Козлов, В.Л. Пирометрический способ газового анализа продуктов сгорания / В.Л. Козлов // Патент Республики Беларусь № 9796. 2007.
 8. Лазерный контроль атмосферы. Под ред. Э.Д. Хинкли. Пер. с англ. – М.: Мир, 1979, с. 124-127, 313-316.
 9. Козлов, В.Л. Способ определения концентрации газов / В.Л. Козлов, М.М. Кугейко // Патент Республики Беларусь № 12455. 2009.
 10. Зуев, В. Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы / В. Е. Зуев, В. В. Зуев. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 232 с.
 11. Козлов, В.Л. Прецизионный рециркуляционный дальномер /В.Л. Козлов // Патент Республики Беларусь № 8172. 2006.
 12. Козлов, В.Л. Прецизионный лазерный дальномер / В.Л. Козлов, В.К. Кононенко, И. С. Манак // Патент Республики Беларусь № 6263. 2004.
 13. Козлов, В.Л. Измеритель хроматической дисперсии оптического волокна / В.Л. Козлов // Патент Республики Беларусь № 8172. 2006.
 14. Козлов, В.Л. Лазерный доплеровский измеритель скорости / В.Л. Козлов // Патент Республики Беларусь №10018. 2007.
 15. Козлов, В.Л. Волоконно-оптический гироскоп / В.Л. Козлов // Патент Республики Беларусь №10209. 2007.
 16. Козлов, В.Л. Способ измерения профиля земной поверхности на двухволновом лазере / В.Л. Козлов // Патент Республики Беларусь № 12471. 2009.

Kozlov V.L., Kygeiko M.M.

Measuring systems based on two-wavelength semiconductor lasers and concept of «a priori information elimination»

Construction principles of highly effective measuring systems based on two-wavelength semiconductor lasers and the concept «a priori information elimination» are presented. These systems provide advantages before similar one-wavelength laser measuring instruments. (E-mail: KozlovVL@bsu.by)

Key words: two-wavelength semiconductor laser, concept of «a priori information elimination», laser measuring instruments.

Поступила в редакцию 15.3.2012.