
СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 621.375.826

ПРОЗРАЧНОМЕРЫ-ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ НА ДВУХВОЛНОВОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ЛАЗЕРЕ

Козлов В.Л., Кугейко М.М.

Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Приводятся методики построения прецизионных измерителей оптических характеристик с использованием двухволновых лазеров на основе базисного и нефелометрического методов. Показана устойчивость системы к изменениям аппаратурных констант, влиянию окружающей среды, загрязнению оптики. Система автоматически учитывает изменение длины контролируемой трассы, что расширяет функциональные возможности измерителя. (E-mail: KozlovVL@bsu.by)

Ключевые слова: измеритель оптических характеристик, двухволновой полупроводниковый лазер, базисный и нефелометрический методы.

Введение

Для повышения точностных и эксплуатационных характеристик информационно-измерительных и диагностических систем различного функционального назначения необходимо использование новых подходов, принципов и функциональных элементов. Одним из путей решения этой задачи является использование новых типов источников зондирующего излучения, к которым можно отнести двухволновые полупроводниковые лазерные диоды [1, 2]. Двухволновые лазеры имеют 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. Эти преимущества обеспечивают более высокую эффективность работы измерительных систем на основе двухволновых лазеров перед аналогичными одноволновыми лазерными измерителями и перед многочастотными измерительными системами, в которых используются не-

сколько различных лазерных источников зондирующего сигнала.

Другим путем улучшения параметров лазерных измерительных систем является использование принципов концепции «безаприорности» [3, 4], заключающейся 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 на основе базисного и нефелометрического методов [4–6] для измерения оптической толщины, прозрачности, коэффициента обратного рассеяния, индикатрисы рассеяния подстилающей поверхности. Основная причина ограничения точности измерений в таких системах обусловлена неточным совмещением пучков зондирующего излучения, флуктуациями разностной частоты излучений и неточным знанием длины контролируемого участка среды. Использование в качестве источников зондирующего из-

лучения двухволновых лазеров позволяет устранить указанные недостатки. В литературных источниках отсутствуют сведения об использовании двухволновых лазеров в измерительных системах, построенных на основе концепции «безаприорности». Двухволновые полупроводниковые лазерные диоды с асимметричной квантово-размерной гетероструктурой [2] обеспечивают генерацию на двух различных оптических длинах волн. Переключение длины волны излучения в импульсе с λ_1 на λ_2 происходит при скачкообразном изменении амплитуды тока накачки в импульсе с I_1 на I_2 . Длительность электрических импульсов и, соответственно, импульсов излучаемого света на разных длинах волн может быть сделана достаточно малой, менее единицы наносекунд. Разность длин волн генерации $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ достигает значений 10-90 нм. Если использовать терморегулятор и стабилизировать амплитуду тока инжекции, то достигается высокая стабильность разности длин волн генерации. Ниже приводятся принципы использования двухволновых лазеров в прецизионных измерителях оптических характеристик, построенных на основе концепции «безаприорности».

Нефелометрический измеритель прозрачности рассеивающей среды

Рассмотрим измеритель оптической толщины газовой струи с быстропеременной концентрацией в условиях ограниченных пространств. В данном случае использование локационного принципа, основанного на регистрации рассеянного в обратном направлении света, не приемлемо. В таких условиях рассеяние от близлежащих областей вызывает насыщение фотодетектора, что резко снижает точность регистрации или даже приводит к его повреждению. Использование же квазистатической схемы измерений для исключения указанного выше фактора насыщения невозможно из-за образования теневой зоны, которая может даже превышать ширину исследуемой струи. Для базовых систем характерно влияние на результат измерений состояния среды, окружающей струю, загрязнения или запотевания оптики. Предлагаемая методика это устраняет, а также не требует калибровки системы [4]. Функциональная схема нефелометрического измерителя прозрачности рассеивающей среды на двухволновом лазере представлена на рисунке 1.

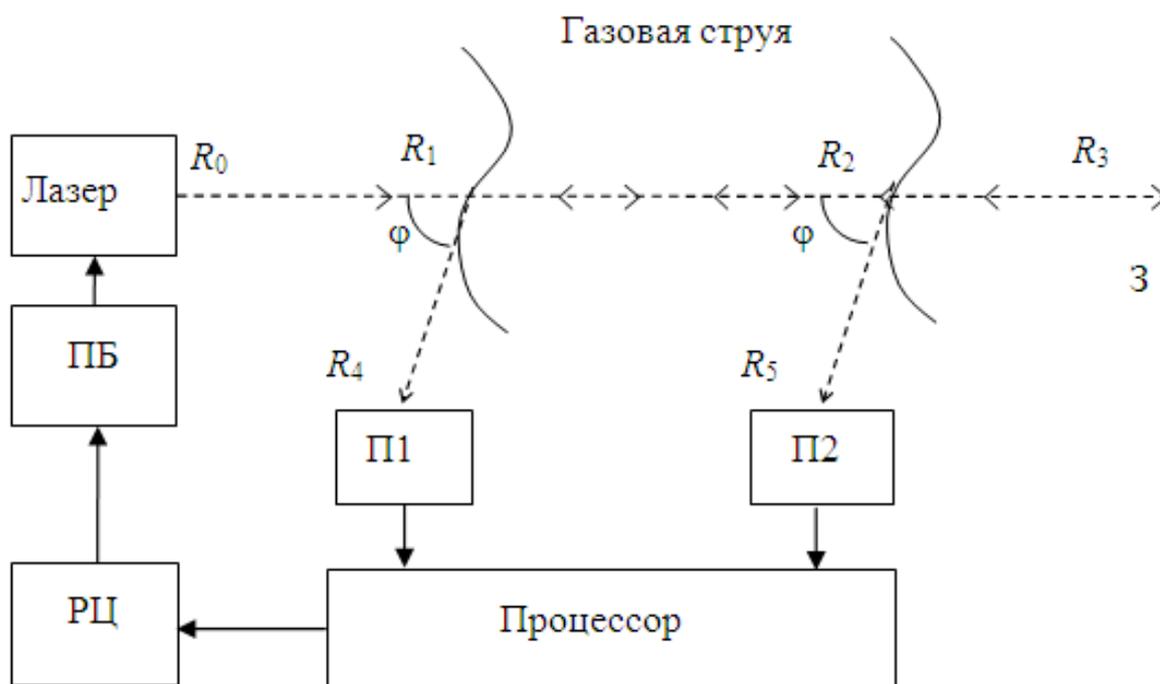


Рисунок 1 – Функциональная схема нефелометрического измерителя прозрачности рассеивающей среды на двухволновом лазере

Система содержит: двухволновой лазер, блок питания лазера БП, зеркало З, первый приемник излучения П1, второй приемник излучения П2, блок Процессор, блок рециркуляции РЦ.

Через исследуемую среду двухволновым лазером посылаются импульсное зондирующее излучение на длине волны λ_1 . Излучение, рассеянное в первой и второй граничных точках R_1 и R_2 контролируемого участка среды под углом φ , величины которых $S_{\lambda_1}(R_0, R_1)$ и $S_{\lambda_1}(R_0, R_2)$, регистрируются приемниками П1 и П2 соответственно, и поступают в процессор. Затем зондирующее излучение отражается от зеркала и осуществляет обратный проход через исследуемую среду.

На приемниках П1 и П2 регистрируются значения сигналов $S_{\lambda_1}(R_3, R_1)$ и $S_{\lambda_1}(R_3, R_2)$ которые записываются в память процессора. Из-за разных длин трасс рассеянное излучение будет поступать на приемники в разные моменты времени, поэтому система цифровой обработки процессора позволяет эффективно разрешить и идентифицировать эти сигналы. Для величин сигналов при прямом проходе среды на длине волны λ_1 , рассеянных под углом φ к направлению посылки в точках R_1 и R_2 , восстановленных на квадрат расстояния, можно записать следующие выражения:

$$S_{\lambda_1}(R_0, R_1) = A_1 P_1 \sigma_{\varphi}(R_1) T_{\lambda_1}(R_0, R_1) T_{\lambda_1}(R_1, R_4),$$

$$S_{\lambda_1}(R_0, R_2) = A_2 P_1 \sigma_{\varphi}(R_2) T_{\lambda_1}(R_0, R_1) T_{\lambda_1}(R_1, R_2) T_{\lambda_1}(R_2, R_5),$$

где A_1, A_2 – аппаратные константы приемников П1 и П2 соответственно; P_1 – мощность излучения на длине волны λ_1 при прямом проходе, σ_{φ} – коэффициент рассеяния под углом φ , R_4, R_5 – координаты местонахождения приемников П1 и П2 соответственно; R_0, R_3 – координаты местонахождения соответственно лазера и зеркала; $T_{\lambda_1}(R_i, R_j) = \exp\{-\varepsilon_{\lambda_1}(R_i, R_j) \cdot (R_j - R_i)\}$ – прозрачности участков $[R_i, R_j]$, $i, j = 0 \dots 5$ на длине волны λ_1 .

При обратном проходе среды излучением на длине волны λ_1 , отраженным от зеркала, величины сигналов, рассеянных под углом $(180^\circ - \varphi)$ в точках R_1 и R_2 , имеют вид:

$$S_{\lambda_1}(R_3, R_1) = A_1 P_2 \sigma_{180-\varphi}(R_1) T_{\lambda_1}(R_2, R_3) T_{\lambda_1}(R_1, R_2) T_{\lambda_1}(R_1, R_4),$$

$$S_{\lambda_1}(R_3, R_2) = A_2 P_2 \sigma_{180-\varphi}(R_2) T_{\lambda_1}(R_2, R_3) T_{\lambda_1}(R_2, R_5),$$

где P_2 – мощность излучения на длине волны λ_1 при обратном проходе.

Отношение сигналов, рассеянных в точке R_1 , равно:

$$N_1 = \frac{S_{\lambda_1}(R_0, R_1)}{S_{\lambda_1}(R_3, R_1)} = \frac{P_1 \sigma_{\varphi}(R_1) T_{\lambda_1}(R_0, R_1)}{P_2 \sigma_{180-\varphi}(R_1) T_{\lambda_1}(R_2, R_3) T_{\lambda_1}(R_1, R_2)}.$$

Последнее выражение можно записать следующим образом:

$$\ln N_1 = \ln B + \ln C_1 + \tau_{\lambda_1}(R_1, R_2), \quad (1)$$

где $N_1 = S_{\lambda_1}(R_0, R_1) / S_{\lambda_1}(R_3, R_1)$; $B = P_1 T_{\lambda_1}(R_0, R_1) / P_2 T_{\lambda_1}(R_2, R_3)$; $C_1 = \sigma_{\varphi}(R_1) / \sigma_{180-\varphi}(R_1)$; $\tau_{\lambda_1}(R_1, R_2) = \varepsilon_{\lambda_1}(R_1, R_2) \cdot (R_2 - R_1)$.

Для сигналов, рассеянных в точке R_2 :

$$N_2 = \frac{S_{\lambda_1}(R_0, R_2)}{S_{\lambda_1}(R_3, R_2)} = \frac{P_1 \sigma_{\varphi}(R_2) T_{\lambda_1}(R_0, R_1) T_{\lambda_1}(R_1, R_2)}{P_2 \sigma_{180-\varphi}(R_2) T_{\lambda_1}(R_2, R_3)}.$$

Данное выражение можно записать в следующем виде:

$$\ln N_2 = \ln B + \ln C_2 - \tau_{\lambda_1}(R_1, R_2), \quad (2)$$

где $N_2 = S_{\lambda_1}(R_0, R_2) / S_{\lambda_1}(R_3, R_2)$; $C_2 = \sigma_{\varphi}(R_2) / \sigma_{180-\varphi}(R_2)$.

Решение системы линейных уравнений (1) и (2) относительно τ_{λ_1} равно:

$$\tau_{\lambda_1}(R_1, R_2) = \frac{1}{2} \left\{ \ln \frac{S_{\lambda_1}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_2)}{S_{\lambda_1}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_1)} + \ln \frac{\sigma_{\varphi}(R_2) \sigma_{180-\varphi}(R_1)}{\sigma_{\varphi}(R_1) \sigma_{180-\varphi}(R_2)} \right\}. \quad (3)$$

В неоднородных рассеивающих средах для исключения влияния индикатрисы рассеяния σ_{φ} , как следует из (3), необходимо регистрировать рассеяние под одним и тем же углом в каждой из рассеивающих точек, т.е. под углом $\pi/2$. В этом случае выражение (3) имеет вид:

$$\tau_{\lambda_1}(R_1, R_2) = \frac{1}{2} \left\{ \ln \frac{S_{\lambda_1}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_2)}{S_{\lambda_1}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_1)} \right\}. \quad (4)$$

Из выражения (4) легко перейти к коэффициенту ослабления:

$$\varepsilon_{\lambda_1}(R_1, R_2) = \frac{1}{2(R_2 - R_1)} \ln \frac{S_{\lambda_1}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_2)}{S_{\lambda_1}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_1)}. \quad (5)$$

Затем через исследуемую среду двухволновым лазером посылается импульсное зондирующее излучение на длине волны λ_2 . Как и в предыдущих измерениях, при прямом и обратном прохождении т. R_1, R_2 рассеянные излучения величиной $S_{\lambda_2}(R_0, R_1)$, $S_{\lambda_2}(R_3, R_1)$ и $S_{\lambda_2}(R_0, R_2)$, $S_{\lambda_2}(R_3, R_2)$ записываются в процессор. Аналогично приведенным выше выкладкам, получаем коэффициент ослабления на длине волны λ_2 :

$$\varepsilon_{\lambda_2}(R_1, R_2) = \frac{1}{2(R_2 - R_1)} \ln \frac{S_{\lambda_2}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_2)}{S_{\lambda_2}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_1)} \quad (6)$$

Так как длины волн λ_1 и λ_2 различаются незначительно, вычисление среднего значения коэффициента ослабления в соответствии с выражением:

$$\varepsilon(R_1, R_2) = \frac{\varepsilon_{\lambda_1}(R_1, R_2) + \varepsilon_{\lambda_2}(R_1, R_2)}{2} = \frac{1}{4\Delta R} \times$$

$$\times \left[\ln \frac{S_{\lambda_1}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_2)}{S_{\lambda_1}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_1)} + \right. \quad (7)$$

$$\left. + \ln \frac{S_{\lambda_2}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_2)}{S_{\lambda_2}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_1)} \right],$$

где $\Delta R = R_2 - R_1$ – длина контролируемой трассы, обеспечит повышение точности измерений в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с одноволновыми измерениями.

Одновременно с измерением интенсивности рассеянного излучения в системе осуществляется режим оптоэлектронной рециркуляции последовательно относительно первой и второй граничных точек. Зарегистрированный сигнал $S_{\lambda_1}(R_0, R_1)$, рассеянный первой граничной точкой R_1 , запускает блок рециркуляции. В результате замыкания петли оптической обратной связи в системе устанавливается процесс рециркуляции, период τ которой определяется оптической задержкой излучения на дистанции при постоянной электрической задержке в блоке рециркуляции. Период (частота f_1) рециркуляции относительно первой граничной точки R_1 будет определяться следующим образом:

$$1/f_1 = \tau_1 = t_{opt1} + t_e, \quad (8)$$

где, $t_{opt1} = L_1/c$ – время задержки излучения на трассе, L_1 – длина трассы, состоящая из участка $R_0 \dots R_1$ и участка $R_1 \dots R_4$, c – скорость света в воздухе, t_e – время электрической задержки. Время электрической задержки t_e в блоке рециркуляции выбирается таким образом, чтобы оно было больше суммарной задержки излучения на всей контролируемой трассе. Следовательно, все импульсы рассеянного излучения при прямом и обратном проходе трассы будут зарегистрированы приемниками, и только после этого лазер посылает на трассу очередной оптический импульс.

Затем процессор, зарегистрировав сигнал $S_{\lambda_1}(R_0, R_2)$, рассеянный второй граничной точкой R_2 , запускает режим рециркуляции относительно точки R_2 . Период (частота f_2) рециркуляции относительно второй граничной точки R_2 будет определяться следующим образом:

$$1/f_2 = \tau_2 = t_{opt2} + t_e, \quad (9)$$

где $t_{opt2} = L_2/c$ – время задержки излучения на трассе; L_2 – длина трассы, состоящая из участка $R_0 \dots R_1$, участка $R_1 \dots R_2$ и участка $R_2 \dots R_5$. Из выражений (8, 9) можно найти длину контролируемой трассы ΔR по разности частот рециркуляции из выражения

$$\Delta R = R_2 - R_1 = c \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right), \quad (10)$$

где f_1, f_2 – частоты рециркуляции относительно первой и второй граничных точек, соответственно. Полученное значение длины контролируемой трассы ΔR учитывается в (5–7) при расчете оптических характеристик.

Если разность измеренных коэффициентов $\varepsilon_{\lambda_1}(R_1, R_2)$ и $\varepsilon_{\lambda_2}(R_1, R_2)$ имеет большое значение, то наблюдается зависимость коэффициента ослабления от длины волны, что можно использовать для измерения концентрации газа. Ширина спектральных линий поглощения различных газов составляет величину в доли и единицы нанометров, поэтому для измерения концентрации газа, длины волн генерации двухволнового лазера выбираются таким образом, чтобы длина волны λ_1 находилась в центре полосы поглощения контролируемого газа, а длина волны λ_2 – вне полосы поглощения газа. Представим коэффициенты ослабления $\varepsilon(\lambda)$ на длинах волн λ_1 и λ_2 в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\lambda_1} &= C_x K(\lambda_1) + \beta(\lambda_1), \\ \varepsilon_{\lambda_2} &= C_x K(\lambda_2) + \beta(\lambda_2), \end{aligned} \quad (11)$$

где $K(\lambda_1)$ – коэффициент поглощения исследуемой газовой компоненты на длине волны λ_1 ; $K(\lambda_2)$ – коэффициент поглощения исследуемой газовой компоненты на длине волны λ_2 , C_x – концентрация исследуемой газовой компоненты; $\beta(\lambda_1)$, $\beta(\lambda_2)$ – суммарные коэффициенты поглощения и рассеяния на λ_1 , λ_2 всеми другими компонентами, присутствующими в среде.

Решение системы уравнений (5, 6) с учетом выражений (11) относительно C_x будет иметь вид:

$$C_x = -\frac{1}{2[K(\lambda_1) - K(\lambda_2)]\Delta R} \left[\ln \frac{S_{\lambda_1}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_2)}{S_{\lambda_1}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_1)} - \ln \frac{S_{\lambda_2}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_2)}{S_{\lambda_2}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_1)} \right] - \frac{1}{[K(\lambda_1) - K(\lambda_2)]} [\beta(\lambda_1) - \beta(\lambda_2)].$$

Так как длины волн генерации двухволнового лазера выбираются близкими по значению $\lambda_1 \approx \lambda_2$ с разницей в единицы нанометров, то $\beta(\lambda_1) - \beta(\lambda_2) \rightarrow 0$, следовательно, искомая концентрация газа будет равна

$$C_x = -\frac{1}{2\Delta K \Delta R} \left[\ln \frac{S_{\lambda_1}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_2)}{S_{\lambda_1}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_1}(R_3, R_1)} \times \frac{S_{\lambda_2}(R_0, R_2) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_1)}{S_{\lambda_2}(R_0, R_1) \cdot S_{\lambda_2}(R_3, R_2)} \right], \quad (12)$$

где $\Delta K = K(\lambda_1) - K(\lambda_2)$ – дифференциальный коэффициент поглощения; ΔR – длина контролируемой трассы.

Базисный измеритель прозрачности рассеивающей среды

Наиболее точные методы измерения прозрачности участков рассеивающих сред – базисные, суть которых в измерении проходящего излучения. При этом погрешности, связанные с нестабильностью аппаратных констант приемопередающего тракта, с неточным совмещением пучков зондирующего излучения, присутствию и этому методу. Использование в качестве источника излучения двухволнового лазера позволяет устранить упомянутые недостатки. Функциональная схема базисного измерителя прозрачности на двухволновом лазере представлена на рисунке 2.

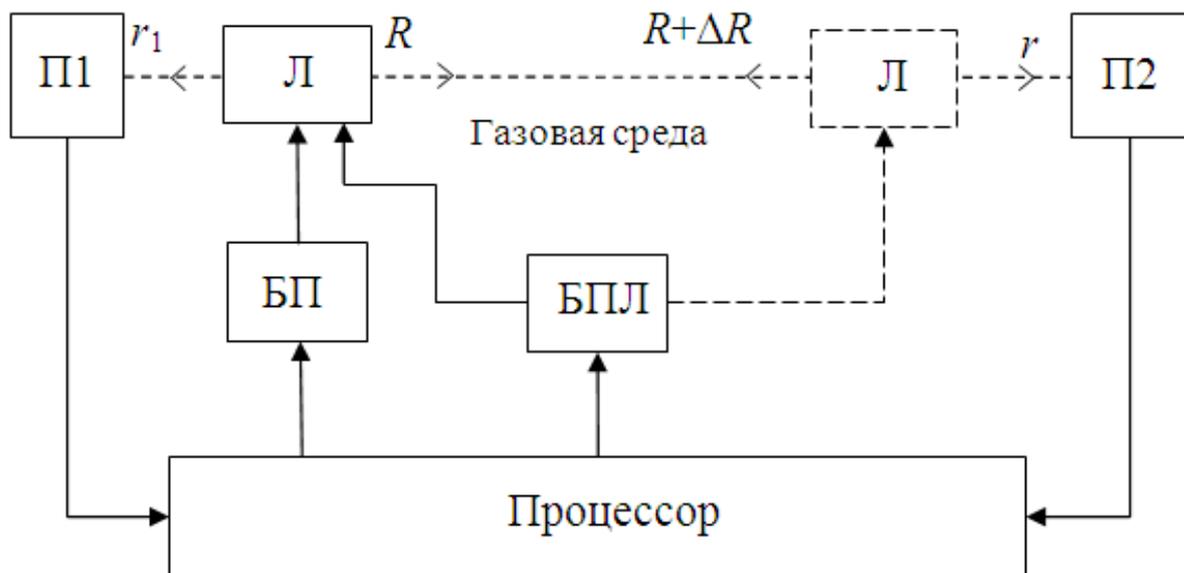


Рисунок 2 – Функциональная схема базисного измерителя прозрачности на двухволновом лазере

Система содержит: двухволновой лазер Л, блок питания лазера БП, первый приемник излучения П1, второй приемник излучения П2, блок перемещения лазера БПЛ, блок питания лазера БП, блок Процессор.

В качестве источника излучения используется двухволновой полупроводниковый лазерный диод с асимметричной квантово-размерной гетероструктурой, описанный выше [2]. Двухволновой лазер имеет 2 полупрозрачных зеркала резонатора, поэтому оптическое излучение выводится в обе стороны. Через исследуемую среду двухволновым лазером посылается импульсное зондирующее излучение на длине волны λ_1 . При одновременной посылке лазером световых потоков в противоположных направлениях, когда лазер находится на одной из границ участка (например, R), для величин потоков, зарегистрированных вторым приемником излучения (измерительного $P_{1\lambda_1}$) и первым приемником излучения (компенсационного $P_{3\lambda_1}$) можно записать следующие выражения:

$$P_{1\lambda_1}(R, r) = A_1 P_{01\lambda_1} T_{\lambda_1}(R, R + \Delta R) T_{\lambda_1}(R + \Delta R, r),$$

$$T_{\lambda_1}(R, R + \Delta R) = \exp\left\{-\int_R^{R+\Delta R} \varepsilon_{\lambda_1}(r) dr\right\};$$

где

$$T_{\lambda_1}(R + \Delta R, r) = \exp\left\{-\int_{R+\Delta R}^r \varepsilon_{\lambda_1}(r) dr\right\},$$

где A_1 – аппаратурная константа приемника излучения П2; $P_{01\lambda_1}$ – величина светового потока в направлении приемника П2; T_{λ_1} – прозрачность участка среды на длине волны λ_1 ; ε_{λ_1} – коэффициент ослабления на длине волны λ_1 ;

$$P_{3\lambda_1}(R, r_1) = A_2 P_{02\lambda_1} \exp\left\{-\int_{r_1}^R \varepsilon_{\lambda_1}(r) dr\right\} =$$

$$= A_2 P_{02\lambda_1} T_{\lambda_1}(r_1, R),$$

где A_2 – аппаратурная константа приемника излучения П1; $P_{02\lambda_1}$ – величина светового потока в направлении приемника П1.

Затем двухволновой лазер посылает через исследуемую среду импульсное зондирующее излучение на длине волны λ_2 . Как и в предыдущем измерении для величин потоков, зарегистрированных вторым приемником излучения

(измерительного $P_{1\lambda_2}$) и первым приемником излучения (компенсационного $P_{3\lambda_2}$) можно записать следующие выражения:

$$P_{1\lambda_2}(R, r) = A_1 P_{01\lambda_2} T_{\lambda_2}(R, R + \Delta R) T_{\lambda_2}(R + \Delta R, r),$$

$$P_{3\lambda_2}(R, r_1) = A_2 P_{02\lambda_2} T_{\lambda_2}(r_1, R).$$

С помощью блока перемещения лазер передвигается в точку $R+\Delta R$ и посылает в исследуемую среду коллинеарно направлениям посылки из точки R в противоположных направлениях импульсное зондирующее излучение на длине волны λ_1 . Для величин измерительного потока $P_{4\lambda_1}$, регистрируемого приемником П2, и компенсационного $P_{2\lambda_1}$, регистрируемого приемником П1, можно записать:

$$P_{2\lambda_1}(R + \Delta R, r) = A_1 P_{01\lambda_1} \exp\left\{-\int_{R+\Delta R}^r \varepsilon_{\lambda_1}(r) dr\right\} =$$

$$= A_1 P_{01\lambda_1} T_{\lambda_1}(R + \Delta R, r),$$

$$P_{4\lambda_1}(R + \Delta R, r) = A_2 P_{02\lambda_1} \exp\left\{-\int_{r_1}^{R+\Delta R} \varepsilon_{\lambda_1}(r) dr\right\} =$$

$$= A_2 P_{02\lambda_1} T_{\lambda_1}(r_1, R) T_{\lambda_1}(R, R + \Delta R).$$

Затем лазер посылает через среду импульсное излучение на длине волны λ_2 . Аналогично получаем выражения для $P_{4\lambda_2}$ и $P_{2\lambda_2}$:

$$P_{2\lambda_2}(R + \Delta R, r) = A_1 P_{01\lambda_2} T_{\lambda_2}(R + \Delta R, r),$$

$$P_{4\lambda_2}(R + \Delta R, r) = A_2 P_{02\lambda_2} T_{\lambda_2}(r_1, R) T_{\lambda_2}(R, R + \Delta R).$$

Отношения $P_{1\lambda_1}$ к $P_{3\lambda_1}$ и $P_{2\lambda_1}$ к $P_{4\lambda_1}$ соответственно равны:

$$N_1 = \frac{P_{1\lambda_1}}{P_{3\lambda_1}} = \frac{A_1 P_{01\lambda_1} T_{\lambda_1}(R, R + \Delta R) T_{\lambda_1}(R + \Delta R, r)}{A_2 P_{02\lambda_1} T_{\lambda_1}(r_1, R)},$$

$$N_2 = \frac{P_{2\lambda_1}}{P_{4\lambda_1}} = \frac{A_1 P_{01\lambda_1} T_{\lambda_1}(R + \Delta R, r)}{A_2 P_{02\lambda_1} T_{\lambda_1}(r_1, R) T_{\lambda_1}(R, R + \Delta R)}.$$

Последние выражения можно представить в виде системы линейных уравнений:

$$\ln N_1 = \ln B + \varepsilon \Delta R, \ln N_2 = \ln B - \varepsilon \Delta R, \quad (13)$$

где $\ln B = \ln [A_1 P_{01\lambda_1} T_{\lambda_1}(R+\Delta R, r) / A_2 P_{02\lambda_1} T_{\lambda_1}(r_1, R)]$.

Решение системы (13) относительно ε_{λ_1} имеет вид:

$$\varepsilon_{\lambda_1} = -\frac{1}{2\Delta R} \ln \frac{P_{1\lambda_1} P_{4\lambda_1}}{P_{2\lambda_1} P_{3\lambda_1}}. \quad (14)$$

Прозрачность же на участке ΔR на длине волны λ_1 равна

$$T_{\lambda_1}(\Delta R) = \left[\frac{P_{1\lambda_1} P_{4\lambda_1}}{P_{2\lambda_1} P_{3\lambda_1}} \right]^{1/2} \quad (15)$$

Аналогично получаем коэффициент ослабления и прозрачность на участке ΔR на длине волны λ_2

$$\varepsilon_{\lambda_2} = -\frac{1}{2\Delta R} \ln \frac{P_{1\lambda_2} P_{4\lambda_2}}{P_{2\lambda_2} P_{3\lambda_2}}, \quad (16)$$

$$T_{\lambda_2}(\Delta R) = \left[\frac{P_{1\lambda_2} P_{4\lambda_2}}{P_{2\lambda_2} P_{3\lambda_2}} \right]^{1/2}.$$

Очевидно, что вычисление среднего значения ε_{λ_1} и ε_{λ_2} обеспечит повышение точности по сравнению с одноволновыми измерениями. Если относительная разность ε_{λ_1} и ε_{λ_2} имеет большее значение, то это можно использовать для измерения концентрации газа аналогично нефелометрическому измерителю. Для измерения концентрации газа длины волн генерации двухволнового лазера выбираются таким образом, чтобы длина волны λ_1 находилась в центре полосы поглощения контролируемого газа, а длина волны λ_2 – вне полосы поглощения газа. Коэффициенты ослабления $\varepsilon(\lambda)$ на длинах волн λ_1 и λ_2 могут быть представлены выражениями (11). Решение системы уравнений (14–16) с учетом выражений (11) относительно C_x будет иметь вид:

$$C_x = -\frac{1}{2[K(\lambda_1) - K(\lambda_2)]\Delta R} \left[\ln \frac{P_{1\lambda_1} P_{3\lambda_1}}{P_{2\lambda_1} P_{4\lambda_1}} - \ln \frac{P_{1\lambda_2} P_{3\lambda_2}}{P_{2\lambda_2} P_{4\lambda_2}} \right] - \frac{1}{[K(\lambda_1) - K(\lambda_2)]} \beta(\lambda_1) - \beta(\lambda_2).$$

Так как длины волн генерации двухволнового лазера выбираются близкими по значению $\lambda_1 \approx \lambda_2$, то $\beta(\lambda_1) - \beta(\lambda_2) \rightarrow 0$, следовательно, искомая концентрация газа будет равна

$$C_x = -\frac{1}{2\Delta K \Delta R} \left[\ln \frac{P_{1\lambda_1} P_{3\lambda_1} P_{2\lambda_2} P_{4\lambda_2}}{P_{2\lambda_1} P_{4\lambda_1} P_{1\lambda_2} P_{3\lambda_2}} \right]. \quad (17)$$

где $\Delta K = K(\lambda_1) - K(\lambda_2)$ – дифференциальный коэффициент поглощения.

Заключение

Предложены и обоснованы принципы использования двухволновых лазеров в прецизионных измерителях оптических характеристик, построенных на основе концепции «безаприорности». Как видно из приведенных выше выкладок, выражения для оптических характеристик (T, ε) и концентрации газа C_x как для базисного, так и для нефелометрического измерителей не содержат ни аппаратурных констант, ни энергии посылаемого излучения, ни параметров, отражающих влияние окружающей среды. Это означает, что отсутствует необходимость калибровки измерительной системы и установки аппаратурных констант ввиду их отсутствия в алгоритмах, которые получены без использования каких-либо допущений или пренебрежений этими константами. Устойчивость системы к изменениям аппаратурных констант означает и устойчивость к изменениям окружающей среды (появление пыли, влаги и др.), загрязнению оптики.

Показано повышение точности измерения оптических характеристик, обусловленное тем, что 2 зондирующих сигнала генерируются в одной активной области лазера, что обеспечивает совмещение оптических осей зондирующих сигналов и более высокую стабильность их параметров. Важным достоинством измерителей является то, что оптические характеристики определяются как для всей ширины струи, так и для любого участка внутри струи. Если в процессе измерений возникает необходимость изменить границы контролируемого участка, то система будет автоматически учитывать изменение длины контролируемой трассы, что значительно расширяет функциональные возможности измерителя.

Возможность реализации двухчастотного нефелометрического метода в ограниченных по

размерам (малых) объемах пространства с использованием малогабаритных излучателей и приемников позволит создавать измерители оперативного контроля выбросов труб предприятий, дымности выбросов транспорта (вплоть до контроля в процессе движения). Двухчастотный базисный измеритель эффективно может применяться для контроля дымности выбросов, причем этот вариант будет обладать наивысшей чувствительностью из-за использования проходящего излучения. Эффективно использование обоих методов в измерителях прозрачности, мутности воды, как стационарных, так и буксируемых, при измерении флуктуаций параметров ослабления оптического излучения различных объектов, в газоаналитических системах, в медицине.

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. Сергеев, Н.М. Измерение прозрачности атмосферы с использованием двухлазеров / Н.М. Сергеев // Тез.докл. VI Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск. – Ч.1. – 1980. – С.123–125.
6. А.с. СССР №1523974, МКИ G 01 N 21/47. Способ определения прозрачности участка рассеивающей среды / Б. Б. Виленциц [и др.] Оpubл. 1989 г. Бюл. №43.

Kozlov V.L., Kygeiko M.M.

Transparency meters and gas analyzers based on two-wavelength semiconductor lasers

Construction techniques of precision measuring instruments of optical characteristics on the basis of two-wave lasers with use of basic and nephelometer methods are presented. System stability to changes of hardware constants, influence of an environment, pollution of optics is shown. The system automatically takes into account changes of a controllable line length that expands functionalities of a measuring instrument. (E-mail: KozlovVL@bsu.by)

Key Words: two-wavelength semiconductor laser, optical characteristics measuring instrument, basic and nephelometer methods.

Поступила в редакцию 20.10.2011.