В. Л. Козлов, А. М. Кугейко

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА НА ОСНОВЕ ДВУХВОЛНОВОГО ЛАЗЕРА

Предлагается метод построения непрерывного трассового измерителя малых концентраций газа, использующего принцип оптико-электронного рециркулятора. Недостатком известных методов измерения концентрации газа на основе дифференциального поглощения [1], использующих несколько источников зондирующего излучения, является ограниченная точность измерений, обусловленная невысокой точностью измерения амплитуды импульсов, неидентичностью и флуктуациями параметров источников излучения, различием оптических путей прохождения среды зондирующим излучением, неидентичностью каналов приема и обработки сигналов.

Для повышения точности трассовых измерений концентрации газа в качестве источника излучения предлагается использовать полупроводниковый лазерный диод [2], обеспечивающий генерацию на двух различных оптических длинах волн. В системе реализуется режим оптико-электронной рециркуляции одновременно на двух оптических длинах волн. По разности частот рециркуляции на двух длинах волн можно определить отношение амплитуд дистанционных импульсов на этих длинах волн, а, следовательно, рассчитать концентрацию контролируемого газа.

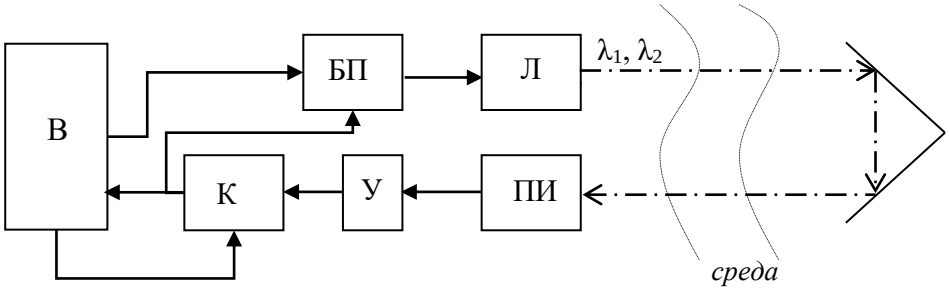

Рис. 1 Функциональная схема трассового газоанализатора:
источник лазерного излучения Л, блок питания лазера БП, приемник излучения ПИ, усилитель У, вычислительный блок В, компаратор К

На рис.1 представлена функциональная схема трассового измерителя малых концентрации газа на основе оптико-электронного рециркулятора. Переключение длины волны излучения лазерного диода с λ_1 на λ_2 происходит при скачкообразном изменении амплитуды тока накачки в импульсе с I_1 до I_2. Длительность электрических импульсов и, соответ-

ственно, импульсов излучаемого света на разных длинах волн может быть сделана достаточно малой, вплоть до единиц наносекунд. Разность длин волн генерации $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ для асимметричных квантоворазмерных лазерных диодов достигает значений 20-70 нм.

Принцип измерений основан на оптико-электронной рециркуляции одновременно на двух оптических длинах волн λ_1. и λ_2, причем одна длина волны излучения расположена в центре полосы поглощения контролируемого газа, другая – вне полосы поглощения. Порог регистрации дистанционных импульсов устанавливается на участке максимальной крутизны фронта импульса. В результате поглощения газом зондирующего изучения, изменится амплитуда дистанционного импульса, следовательно, появится задержка срабатывания компаратора, что приводит к изменению частоты рециркуляции на данной длине волны. Таким образом, по разности частот рециркуляции на двух длинах волн можно определить отношение амплитуд дистанционных импульсов на этих длинах волн, и, следовательно, рассчитать концентрацию контролируемого газа. Измеряя частоту (период) рециркуляции на длине волны вне полосы поглощения газа определяется длина контролируемой трассы.

Период рециркуляции на длинах волн λ_1, λ_2 при длинах трассы единицы метров будет определяться следующим образом

$$\tau = 2Ln/c + t_e + t_k, \qquad (1)$$

где L – длина контролируемой трассы, n – коэффициент преломления воздуха для длин волн излучения λ_1, λ_2, c – скорость света в вакууме, t_e – время электрической задержки в блоках системы, t_k – время задержки в компараторе, равное

$$t_k = \frac{U_p}{U_s} t_\phi, \qquad (2)$$

где U_p – порог срабатывания компаратора, U_s – амплитуда импульсов, пришедших с дистанции, t_ϕ – длительность фронта импульса. Порог срабатывания компаратора U_p выбирается на участке максимальной крутизны фронта дистанционного импульса и составляет величину $U_p \approx 0{,}5 \ldots 0{,}7 U_s$

При одинаковых амплитудах дистанционных импульсов $U_{s1} = U_{s2}$ на длинах волн λ_1, λ_2 (отсутствие поглощения в среде на длине волны λ_1) задержки в компараторе будут также равны $t_{k1} = t_{k2}$, а, следовательно, будут равны периоды рециркуляции $\tau_1 = \tau_2$ на длинах волн λ_1, λ_2. Если в среде появляется поглощающий газ на длине волны λ_1, то амплитуды дистанционных импульсов будут не равны $U_{s1} < U_{s2}$, а значит, не будут рав-

ны периоды рециркуляции $\tau_1 > \tau_2$. Разность периодов рециркуляции $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$ из (1), (2) можно выразить следующим образом

$$\Delta\tau = t_{k1} - t_{k2} = \frac{U_{s2} - U_{s1}}{U_{s1}} \frac{U_p}{U_{s2}} t_{\phi}. \quad (3)$$

Рециркулирующие импульсы на длине волны λ_1 будут сдвигаться во времени относительно импульсов на длине волны λ_2 каждый период рециркуляции на величину $\Delta\tau$. В начальный момент запуска системы импульсы на длинах волн λ_1 и λ_2 разнесены во времени на интервал $T+t_z$., где t_z. – величина, определяемая длительностью лазерного импульса и быстродействием блока питания. В режиме рециркуляции происходит накопление разности временных задержек $\Delta\tau$. За число периодов рециркуляции N разность задержек станет равной $T = N\,\Delta\tau$. После того, как число периодов рециркуляции станет равным $N = T/\Delta\tau$, система заканчивает первый этап измерения концентрации газа.

Так как предполагается измерение малых концентраций газа на уровне предельно допустимых, то число поглощающих частиц контролируемого газа можно определить формулой из [1], при этом, используя (2),(3) получаем

$$C_x = \frac{U_{s2}}{U_p t_{\phi}} \frac{T}{N} \frac{1}{2\Delta K L}, \quad (4)$$

где ΔK – дифференциальный коэффициент поглощения газа.

В выражении (4) параметры T, ΔK, t_{ϕ} , - известны, N – определяется в процессе измерений, а отношение амплитуды U_{s2} к порогу U_p и длина контролируемой трассы L определяются на втором этапе измерений. После измерения числа N лазер работает только на длине волны λ_2 (вне полосы поглощения). Также как и на первом этапе, блок питания лазера формирует два импульса на длине волны λ_2, разнесенные во времени на интервал $T_1 + t_z$.. Первый импульс регистрируется при пороге компаратора U_p, второй – при уменьшенном в два раза пороге $U_{p2} = 0{,}5U_p$. Таким образом, при замкнутой петле оптической обратной связи в системе устанавливается два процесса рециркуляции, один с периодом τ_2 при пороге компаратора U_p, а другой - с периодом рециркуляции τ'_2 при пороге компаратора U_{p2}. В режиме рециркуляции происходит накопление разности временных задержек Δt и за число периодов рециркуляции N_1 разность задержек станет равной $T_1 = N_1\,\Delta t$. Выбирая $T = T_1$, окончательная расчетная формула числа поглощающих частиц газа будет иметь вид

$$C_x = \frac{0{,}5N_1}{N} \frac{1}{2\Delta K L}. \quad (5)$$

Как видно из расчетной формулы, в нее не входят амплитуды дистанционных импульсов, величина порога компаратора, длительность фронта импульса. Поэтому одновременное изменение амплитуды дистанционных импульсов на длинах волн λ_1 и λ_2, обусловленное, например, изменением параметров окружающей среды, задымленностью, изменением параметров приемно-передающего тракта и т.п. не будет влиять на точность измерений, что повышает надежность работы системы и улучшает точность измерений.

Длина контролируемой трассы L вычисляется из значения периода рециркуляции τ'_2 при пороге $0{,}5U_{\text{р}}$ на длине волны λ_2

$$L = \frac{c}{2n}(\tau'_2 - t_e - \Delta t). \qquad (6)$$

Время электрической задержки t_{e} определяется при калибровке системы на нулевом расстоянии. Чтобы ограничить увеличение частоты рециркуляции при измерениях на малых трассах ($L\approx$ единицы метров) и обеспечить стабильный режим работы лазера, необходимо установить время электрической задержки $t_{\text{e}}\approx$ 0,5…1 мкс, при этом максимальное значение частоты рециркуляции составит 1-2 МГц. Так как частоту f следования импульсов можно измерить более просто и с большей точностью, чем временной интервал τ между импульсами, то в системе измеряется частота рециркуляции импульсов, а период следования импульсов определяется $\tau = 1/f$. На рис.2 и рис.3 представлены зависимости разности периодов рециркуляции $\Delta\tau$ и числа периодов рециркуляции N от относительного изменения амплитуды дистанционных импульсов $\Delta U/U_{\text{s}}$ на длине волны λ_1 соответственно.

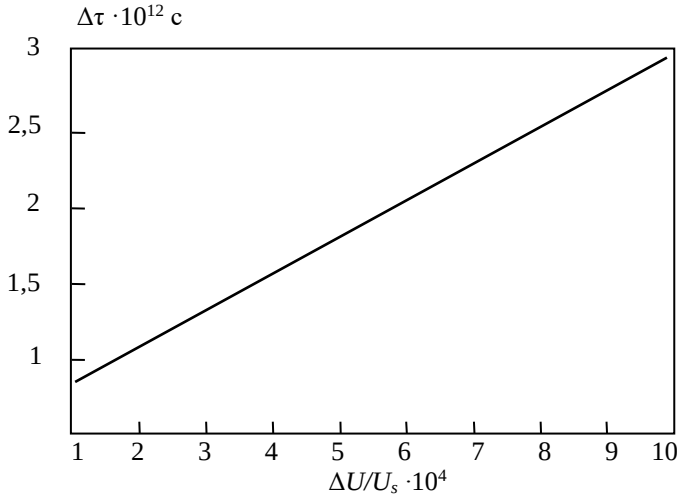

Рис. 2. Зависимость разности периодов рециркуляции $\Delta\tau$ от относительного изменения амплитуды дистанционных импульсов $\Delta U/U_{\text{s}}$

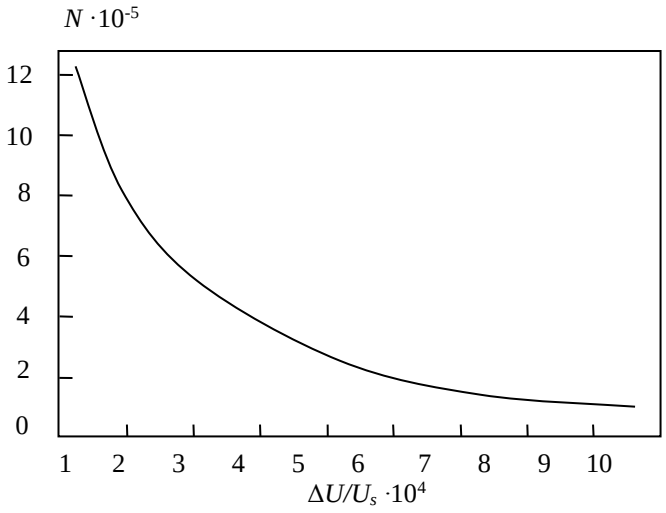

Рис. 3. Зависимость числа периодов рециркуляции N от относительного изменения амплитуды дистанционных импульсов $\Delta U/U_s$

Если взять $T = T_1 = 500$ нс, длительность фронта импульса $t_ф \approx 3$ нс, длину контролируемой трассы $L \approx 30$ м, изменение амплитуды импульсов за счет поглощения $\Delta U = (10^{-3}…10^{-4})U_{s1}$, то для измерения концентрации газа необходимо будет порядка 10^5 периодов рециркуляции, т.е. полное время измерений составит приблизительно 1 с.

Повышение точности измерений по сравнению с известными аналогами обусловлено тем, что в предлагаемой системе не происходит прямого измерения амплитуды дистанционного импульса, а изменения амплитуды импульса преобразуются в изменения частоты рециркуляции на данной длине волны. При этом значение частоты можно легко измерить с погрешностью $10^{-5}…10^{-6}$, а погрешность измерения амплитуды короткого импульса равняется $10^{-2}…10^{-3}$. Система обеспечивает возможность непрерывного трассового измерения малых концентраций газа (CO, CO_2) на уровне предельно допустимых, например в черте города над автомобильными магистралями с интенсивным движением, а также измерение длины контролируемой трассы, что расширяет функциональные возможности устройства и обеспечивает более высокую точность трассовых измерений.

Литература

1. Лазерный контроль атмосферы. Под ред. Э. Д. Хинкли. Пер. с англ. М.: Мир, 1979. С. 124–127, 313–316.
2. *Ikeda S., Shimizu A.* Evidence of the wavelength switching caused by a blocked carrier transport in an asymmetric dual quantum well laser // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol.59, No.5. P. 504–506.