

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ МЕТАНА В ВОЗДУХЕ

Ю.П. МАЧЕХИН

В работе обсуждаются условия реализации метода частотно-модулированной лазерной спектроскопии для регистрации метана в воздухе. Рассматривается возможная структура построения измерительной системы, аналогичная волоконно-оптическим линиям связи.

In the present paper is discussed conditions for realizing a method of frequency-modulation laser spectroscopy to registrate availability of methane in air. The possible structure of measuring system as a analog of fibre-optic communication system are considered.

ВВЕДЕНИЕ

Достижения современной измерительной техники, обеспечивающей измерения различных физических величин, опираются на успехи оптоэлектроники и лазерной техники. Использование оптоэлектронных устройств для формирования информационных оптических сигналов, а также их непосредственную передачу на большие расстояния уже сформировало в измерительной технике направление волоконно-оптических датчиков, сенсоров и средств измерений. Использование лазеров в качестве источников излучения для многих типов оптоэлектронных измерительных устройств позволило реализовать новые возможности не только при решении задач прецизионного измерения длины и измерения механических воздействий [1], но и при изучении состава и свойств материалов и веществ. Одно из таких применений лазеров, которое развивается уже много лет, но окончательно, эффективного решения еще пока не достигнуто, связано с задачей практической реализации методов лазерной спектроскопии для регистрации вредных и опасных газов и паров веществ в атмосфере [2–3].

Решение проблемы улучшения экологического состояния Украины в первую очередь зависит от достоверности, надежности и оперативности результатов мониторинга состояния атмосферы и водных бассейнов на выбранных для контроля территориях. Система непрерывного мониторинга экологически небезопасных предприятий должна обеспечивать оперативную регистрацию контролируемых веществ и газов, а также визуализацию информации о их появлении в атмосфере и воде на территории этих предприятий. Оперативность осуществления мониторинга зависит, в первую очередь, от используемых измерительных приборов и способов передачи от них измерительной информации в центры сбора и анализа этой информации.

Безусловно, большинство технических вопросов, связанных с измерением концентрации вредных и опасных газов в воздухе, уже давно и успешно решены, подтверждением чему является широкая номенклатура газоанализаторов, которые выпускаются

предприятиями Украины и СНГ, а также многочисленными иностранными фирмами. Эти приборы выпускаются либо в виде стационарных установок, либо в виде переносных транспортабельных газоанализаторов. Принцип действия их также отличается разнообразием: это термохимические, плазменно-ионизирующие, основанные на методе УФ-спектрометрии и методе хемотропной флуоресценции. Характерным для всех этих приборов является необходимость подготовки проб для проведения исследований. В зависимости от принципа действия измерительного газоанализатора, операции по подготовке проб и выполнению измерений занимают конечное время. А это, в свою очередь, снижает оперативность выполнения измерений, тем более что многие из этих приборов стационарны и расположены на достаточном расстоянии от места забора проб. Преобладающая часть известных спектроскопических методов позволяет по поглощению и излучению в области коротких длин волн от 250 до 500 нм (УФ и фиолетово-голубая области) осуществлять регистрацию и идентификацию газов и химических элементов. Однако, поскольку поглощение или излучение в этой области спектра обусловлено электронными переходами в атомах, то эту часть спектра можно использовать только при возбуждении атомов исследуемого вещества любым активным способом, а именно — в пламени, электрическом разряде, лазерной искре и т. д.

Спектральная область от 700 до 1750 нм для спектроскопии интересна тем, что включает, в основном, линии поглощения, обусловленные колебательно-вращательными переходами в молекулах газов, которые, как, например, метан необходимо контролировать. Однако в этой области спектра у большинства газов линии поглощения слабые, а активно воздействовать на молекулярные газы для использования возбужденных линий не всегда представляется возможным. Поэтому, в этой области спектра спектроскопию молекулярных газов целесообразно осуществлять по известным слабым линиям эффективными пассивными методами. К таким методам относятся методы лазерной спектроскопии, основанные на взаимодействии лазерного излучения с веществом.

В настоящее время хорошо изучены линии поглощения в ацетилене [4], аммиаке [5] и метане [6]. С использованием линий поглощения в ацетилене разработан стандарт частоты, включенный в список стандартов, рекомендованных Международным комитетом по мерам и весам для реализации определения метра [1].

Следует сразу обратить внимание на то, что исследованные линии поглощения указанных газов расположены в спектральном диапазоне от 1,5 до 1,65 мкм, т. е. в спектральном диапазоне одномодовых оптических волокон. Безусловно, это не случайное совпадение, а результат целенаправленного поиска оптических реперов для стандартов частоты, необходимых, в первую очередь, для когерентной оптической связи. Поэтому, основываясь на исследованных линиях поглощения газов в спектральном диапазоне 1,5–1,65 мкм, разрабатываются новые типы дистанционных регистраторов и сенсоров газов в воздухе [7].

Другим примером современных разработок являются основанные на лазерах оптические трассовые газоанализаторы. Принцип действия этих приборов, предназначенных для измерения суммарной концентрации газов вдоль выбранной трассы, основан на измерении уровня селективного поглощения лазерного излучения. Безусловными преимуществами использования таких приборов для экологического мониторинга являются высокая чувствительность к малым концентрациям и возможность проводить измерения в любом месте. Основными недостатками являются зависимость от метеоусловий, невозможность работать на трассах вдоль земли из-за опасности попадания лазерного излучения в глаза людям, а также высокая стоимость и сложность в эксплуатации.

Из очень короткого обзора существующих методов и измерительной техники, предназначенных для контроля содержания опасных газов в атмосфере, следует, что существует достаточно обширный парк приборов, позволяющий решать многочисленные задачи по измерению состава окружающей атмосферы.

В то же время ясно, что для полного решения задач экологического мониторинга, а именно для осуществления непрерывного, дистанционного и качественного контроля состояния атмосферы, необходимы новые приборы, которые должны позволять в автоматизированном режиме выполнять все необходимые измерительные функции экологического мониторинга, при контроле за содержанием вредных газов в атмосфере.

В настоящей статье предлагается модель построения системы для измерения концентрации метана в воздухе. Обсуждаются основные принципы построения и работы волоконно-оптической измерительной системы. В основу разработанной системы положен один из методов лазерной спектроскопии молекулярных газов и способ непосредственной передачи оптических информационных сигналов по волоконно-оптическим линиям связи.

Для регистрации газа в воздухе предлагается использовать метод частотно-модулированной (ЧМ) лазерной спектроскопии на базе полупроводниковых лазерных источников. Этот метод позволяет не только регистрировать газы, но и измерять концентрацию газов по слабым линиям поглощения в спектральном диапазоне окон прозрачности кварцевого волокна (от 0,7 до 0,9 мкм; от 1,2 до 1,35 мкм и от 1,45 до 1,65 мкм). С этой целью, для увеличения чувствительности измерительной системы, предлагается использовать метод ЧМ лазерной спектроскопии с одновременной регистрацией первой и второй гармоник частоты модуляции.

Для передачи информационных оптических сигналов, содержащих данные о концентрации контролируемого газа, предлагается использовать волоконно-оптические каналы связи. Передача оптического излучения по волокну в спектральном диапазоне от 1,2 до 1,55 мкм проходит с потерями, не превышающими 0,2 дБ/км. Такой небольшой уровень потерь в волокне позволяет передавать оптические сигналы на расстояния до нескольких десятков километров без потери информации об уровне концентрации газов в воздухе.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ЧМ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ МЕТАНА В ВОЗДУХЕ

Обсуждаемый в настоящей статье способ регистрации метана в воздухе основан на эффекте селективного поглощения лазерного излучения веществом [8]. Поскольку условия измерения концентрации метана на основе этого эффекта могут быть разными, то необходимо реализовать такой процесс измерений, который в любых условиях проведения измерений не потребует сложной и дорогостоящей аппаратуры. По этой причине одна из задач проведенных исследований заключалась в разработке такого способа измерений, который позволил бы создать доступную и удобную измерительную аппаратуру. По причине необходимости удешевления разрабатываемой аппаратуры и достижения максимальной ее простоты, проведенные исследования основывались на следующих условиях.

Во-первых, регистрация метана должна быть реализована методами лазерной спектроскопии в спектральном диапазоне 1,5–1,65 мкм.

Во-вторых, для реализации методов лазерной спектроскопии должны использоваться серийно выпускаемые полупроводниковые лазеры, которые используются в системах волоконно-оптической связи.

В-третьих, реализация принципов детектирования метана в спектральном диапазоне от 1,5 до 1,65 мкм методами лазерной спектроскопии основывается на условии, что в этом диапазоне отсутствуют сильные поглощающие линии воздуха и паров воды, которые могут интерферировать с используемой линией поглощения в метане 1,65 мкм.

Эффект селективного поглощения лазерного оптического излучения можно зарегистрировать методом частотно-модулированной лазерной спектроскопии [8]. Следует отметить, что методы частотно-модулированной лазерной спектроскопии используются для решения задач создания стабилизированных по частоте лазеров с использованием естественных частотных реперов [1], роль которых обычно выполняют линии поглощения газов и паров веществ. Однако, расширяя область применения метода ЧМ спектроскопии на задачи регистрации газов в естественных, а не лабораторных условиях, необходимо учитывать, что регистрация газов по линиям поглощения в диапазоне от 1,5 до 1,65 мкм может происходить несколько иначе за счет уширения линий поглощения газов в воздухе.

Рассмотрим основные теоретические положения используемого метода ЧМ спектроскопии. При прохождении лазерного излучения через поглощающий газ изменение мощности можно описать следующим выражением [9]:

$$W(\nu) = W_0 S \exp(-C(\nu)), \quad (1)$$

где: $W(\nu)$ – регистрируемая мощность лазерного излучения на частоте ν ; W_0 – мощность на входе оптической измерительной системы; S – коэффициент ослабления мощности излучения в оптической системе (включая оптическое волокно, линзовую систему преобразования излучения из волокна в пространственный параллельный пучок и обратно); $C(\nu)$ – оптические потери в поглощающем газе на частоте излучения ν .

В общем случае $C(\nu)$ зависит от длины пройденного пути в поглощающей среде, от концентрации поглощающего газа и от частоты оптического излучения. Для уточнения аналитической формы зависимости $C(\nu)$ от этих параметров следует учесть конструктивные особенности устройства, в котором оптическое излучение выходит из волокна, взаимодействует с поглощающей средой и обратно вводится в волокно. Во-первых, разработка метода регистрации метана в диапазоне 1,5–1,65 мкм основывается на использовании не очень сильной линии поглощения $2\nu_3 R(3)$ [6] на длине волны 1,65 мкм. По этой причине можно считать, что $C(\nu) \ll 1$. Во-вторых, $C(\nu)$ линейно зависит от концентрации молекул газа в области взаимодействия с оптическим излучением, а также линейно зависит от размеров этой области взаимодействия. Длина области взаимодействия может быть создана большой, но в любом случае для каждой конкретной системы размеры области взаимодействия представляют собой постоянные величины. Поэтому выражение для оптических потерь может быть переписано в следующем виде:

$$C(\nu) \approx \alpha(\nu) C_{\text{метан}},$$

где $\alpha(\nu)$ – коэффициент поглощения оптического излучения в метане на частоте ν , обусловленный

формой выбранной линии поглощения, а также размерами объема взаимодействия; $C_{\text{метан}}$ – концентрация метана в воздухе.

С учетом условия $\alpha(\nu) C_{\text{метан}} \ll 1$ выражение для регистрируемой мощности (1) можно упростить:

$$W(\nu) \approx W_0 S (1 - \alpha(\nu) C_{\text{метан}}). \quad (2)$$

Коэффициент $\alpha(\nu)$ пропорционален форме линии поглощения, хорошо описываемой лоренцевской функцией, т. е.

$$\alpha(\nu) = \alpha_0 \gamma^2 / ((\nu - \nu_0)^2 + \gamma^2). \quad (3)$$

Здесь ν_0 – центральная частота линии поглощения; α_0 – поглощение на центральной частоте; γ – полуширина линии на полувысоте.

В том случае, когда используется ЧМ спектроскопия, то излучение должно быть промодулировано по синусоидальному закону, тогда текущая частота излучения ν описывается выражением

$$\nu = \nu_l + \nu_m \cos(2\pi f t), \quad (4)$$

где ν_l – невозмущенная частота излучения лазера; ν_m – амплитуда девиации частоты излучения лазера; f – частота модуляции.

Коэффициент поглощения (3) с учетом (4) можно записать в следующем виде:

$$\alpha(\nu) = \alpha_0 \gamma^2 / ((\nu_l + \nu_m \cos(2\pi f t) - \nu_0)^2 + \gamma^2) \quad (5)$$

или

$$\alpha(\beta) = \alpha_0 / ((\beta + \delta \cos(2\pi f t))^2 + 1),$$

где $\beta = (\nu_l - \nu_0) / \gamma$; $\delta = \nu_m / \gamma$.

Выражение (5) можно представить через Фурье ряд

$$\begin{aligned} \alpha(\beta) &= \alpha_0 / ((\beta + \delta \cos(2\pi f t))^2 + 1) = \\ &= \alpha_0 \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f t). \end{aligned} \quad (6)$$

Регистрируемая мощность W (2), при наличии частотной модуляции, также содержит гармоники частоты модуляции. Для решения вопросов применения разрабатываемого метода в выражении для W следует оставить не более трех гармоник в разложении Фурье:

$$\begin{aligned} W(\beta) &= \chi_0(\beta, \delta) \chi_1(\beta, \delta) \cos(2\pi f t) + \\ &+ \chi_2(\beta, \delta) \cos(2\pi 2f t) + \chi_3(\beta, \delta) \cos(2\pi 3f t). \end{aligned} \quad (7)$$

Величины $\chi_0, \chi_1, \chi_2, \chi_3$ определяются через коэффициенты ряда Фурье a_n . Методы ЧМ спектроскопии предусматривают, что на основе измерений коэффициентов в разложении (7) можно делать выводы о наличии и концентрации поглощающего газа.

Предлагаемый метод определения концентрации метана основан на одновременной регистрации двух

величин — χ_2 и χ_3 или χ_1 . Поскольку максимальное поглощение происходит в центре линии поглощения, т.е. на частоте ν_0 , то обеспечить регистрацию совпадения частоты излучения ν_1 с частотой центра линии поглощения ν_0 можно по коэффициенту χ_3 , который в этой точке обращается в нуль. При регистрации χ_2 определяется необходимая для расчета концентрации величина.

Зарегистрировать совпадение частот $\nu_1 = \nu_0$ можно по амплитуде любой из всех нечетных гармоник разложения, которые становятся равными нулю только тогда, когда $\beta = 0$, что соответствует условию $\nu_1 = \nu_0$. Поэтому информативными, несущими информацию о концентрации метана, являются только амплитуды четных гармоник. Амплитуда второй гармоники имеет максимальное значение в центре линии поглощения, т.е. когда $\beta = 0$. Регистрируя амплитуду второй гармоники, которая несет информацию о концентрации газа в установленной частотной точке центра линии поглощения, можно найти величину концентрации газа.

Выражая $\chi_2(\beta, \delta)$ через коэффициент a_2 при второй гармонике разложения в ряд Фурье (6) [4], регистрируемая величина описывается следующим образом:

$$\chi_2(0, \delta) = 2W_0 S \frac{[2 + \delta^2 - 2(1 + \delta^2)^{1/2}]}{\delta^2(1 + \delta^2)^{1/2}} \alpha_0 C_{\text{метан}}. \quad (8)$$

При $\delta = 2,197$ [6] $\chi_2(0, \delta)$ будет иметь максимальное значение

$$\chi_2 = 0,343 W_0 S \alpha_0 C_{\text{метан}}. \quad (9)$$

Чтобы исключить влияние нестабильности мощности излучения, необходимо регистрировать амплитуду второй гармоники, нормированную на общую мощность регистрируемого излучения, т.е.

$$\chi_2 / \chi_0 = 0,343 \alpha_0 C_{\text{метан}}. \quad (10)$$

Эта величина не зависит от входной мощности излучения, и может быть использована для объективной оценки поглощения без учета вариаций мощности излучения.

2. СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ МЕТАНА В ВОЗДУХЕ

Основываясь на рассмотренной теоретической модели ЧМ метода регистрации молекулярного газа в воздухе, реализацию предлагаемого метода регистрации метана в воздухе можно осуществить путем измерения коэффициента при второй гармонике в разложении модуляционного спектра регистрируемой мощности излучения после взаимодействия последнего с поглощающей средой. При этом, чтобы исключить неоднозначность в определении концентрации метана, измерение необходимо осуществлять в одной и той же точке спектра. В качестве такой точки выбран центр линии поглощения, в которой амплитуда нечетных гармоник равна нулю. Поэтому,

измеряя амплитуду второй гармоники в момент, когда амплитуда первой равна нулю, а значит, частота излучения совпадает с центром линии излучения, можно добиться воспроизводимости результата измерений. Кроме того, для устойчивой регистрации частоты центра линии излучения в системе предлагается использовать эталонную ячейку с фиксированной концентрацией метана. В этом случае, независимо от концентрации метана в исследуемой области, частота излучения лазера будет всегда настроена на центр линии поглощения метана.

Следовательно, для реализации обсуждаемого метода измерения концентрации метана в воздухе необходима аппаратура, обеспечивающая измерение амплитуды первой и второй гармоник модуляционного спектра, зарегистрированных после взаимодействия излучения с поглощающей средой. С этой целью регистрацию гармоник модуляционного спектра предлагается осуществлять методом синхронного детектирования, который хорошо зарекомендовал себя в системах стабилизации частоты излучения лазеров. Этот метод позволяет не только точно определить экстремальную частотную точку в оптическом спектре, но и обеспечить измерение амплитуды второй гармоники модуляции. По этой причине в системе, реализующей метод, используются два синхронных детектора, настроенных на первую и вторую гармоники частоты модуляции.

Для реализации обсуждаемого ЧМ метода регистрации газов в воздухе непринципиально, каким образом будет доставляться зондирующее оптическое излучение к месту контроля за содержанием метана в воздухе. Однако, на практике, контроль за содержанием метана чаще всего требуется осуществлять в труднодоступных отдаленных местах, например, в шахтах. Поэтому, ориентируясь именно на реальные условия проведения постоянного наблюдения за содержанием метана в воздухе, в предлагаемой системе регистрации молекулярных газов, из всех возможных вариантов транспортировки оптического излучения к месту взаимодействия с газом (к месту контроля), выбрана волоконно-оптическая система канализации излучения. Передача непосредственно по волоконному кабелю информационного оптического сигнала обеспечивает минимальные потери мощности излучения, полное отсутствие зависимости от метеоусловий, а также низкий уровень шумов, обусловленных промышленными помехами, и, следовательно, обеспечивает высокую чувствительность у системы.

Таким образом, при реализации рассмотренного метода ЧМ метода лазерной регистрации молекулярных газов в воздухе использование волоконной системы для транспортировки оптического зондирующего излучения устанавливает необходимость реализации следующих основных технических характеристик у системы.

1. Регистрация газов должна осуществляться с использованием линий поглощения в спектральном диапазоне 1,25–1,65 мкм, который соответствует

спектральной области работы всех современных волоконно-оптических линий связи. Использование серийно выпускаемой комплектации для формирования волоконных каналов системы значительно упрощает изготовление системы, и, кроме того, делает ее стоимость соизмеримой со стоимостью регулярно прокладываемых линий связи. Уровень погонного затухания в оптическом волокне, используемом в спектральном диапазоне 1,55–1,65 мкм, составляет величину около 0,2 дБ/км, что позволяет рассчитывать на довольно протяженные (до 10 км) волоконные каналы регистрирующей системы. Кроме того, идентичность в комплектации позволит сопрягать разрабатываемые системы с действующими волоконно-оптическими линиями связи, что может дать возможность увеличивать расстояния по передаче информации о состоянии атмосферы.

2. Для реализации метода лазерной спектроскопии в создаваемой системе необходимы лазеры, которые также являются составной частью волоконных линий связи. При этом параметры серийно выпускаемых лазеров, используемых в устройствах оптической связи, должны позволять реализацию метода частотно-модулированной лазерной спектроскопии. У полупроводниковых лазеров, работающих в диапазоне 1,5–1,65 мкм, межмодовый интервал составляет величину не менее 1,2 нм, а ширина линии излучения может быть в пределах 10–200 МГц. Следуя условию наиболее эффективной регистрации второй гармоники, которая имеет максимальное значение величины амплитуды при $\nu_m = 2,17\gamma$, при условии, что для метана $\gamma = 0,01$ нм, амплитуда девиации оптической частоты должна быть не менее 0,0217 нм. У полупроводниковых лазеров, используемых в системах связи, можно реализовать через цепь питания необходимый уровень девиации частоты.

3. Межмодовый интервал у полупроводниковых лазеров позволяет осуществлять регистрацию на частоте центральной моды, совпадающей с линией поглощения метана, при этом не учитывать наличие остальных мод. Даже при условии модуляционного уширения боковых мод они не будут влиять на процесс взаимодействия центральной моды с поглощающим газом.

Следуя этим оценкам, для задач регистрации метана не требуется использование дорогостоящих полупроводниковых лазеров с распределенной обратной связью, у которых одна мода излучения имеет ширину не более 1 МГц.

Использование температурной перестройки частоты излучения серийно выпускаемых лазеров в широком (до 20 нм) диапазоне позволяет осуществлять точную настройку частоты лазера на линию поглощения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, совмещая ЧМ метод лазерной спектроскопии с возможностями современных волоконно-оптических линий передачи информации,

можно осуществлять регистрацию газов и веществ по поглощению лазерного излучения в них на большом (до 10 км) расстоянии от места регистрации и обработки информации.

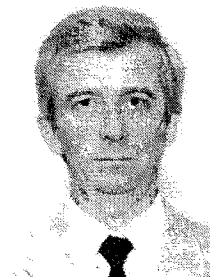
Технические характеристики оптических волокон и серийно выпускаемых полупроводниковых лазеров позволяют реализовать волоконно-оптическую систему для регистрации метана в воздухе экономически соизмеримой со стоимостью обычных каналов оптической связи.

Поскольку уровень концентрации метана, который можно зарегистрировать данным методом, реализованным в волоконно-оптической системе, определяется из условия одновременной регистрации двух гармоник модуляции в спектре модуляции оптического излучения, то чувствительность у системы зависит от величины минимально возможной амплитуды второй гармоники, регистрируемой фотоприемным устройством.

Уровень шумов фотоприемника и электронной регистрирующей системы определяет порог регистрации амплитуды второй гармоники. Таким образом, создавая условия, обеспечивающие минимальный уровень шумов фототока, и используя малошумящие элементы системы, можно получить достаточно хорошую чувствительность у измерительной системы.

Литература. 1. Quinn T.J Practical realization of definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards // Metrologia. 2003. Vol. 40, pp 103-133. 2. Srivastava S.C, Kumar V., Optical fiber sensors and transmission of data using optical fibers for environmental monitoring in underground coal mines // Research and Industry. 1989. Vol. 34, N2. pp 107-109. 3. Dakin J.P. Review of fibre optic gas sensors // SPIE, Fiber Optic Sensors III. 1988. Vol 1011. pp 173-182. 4. Sudo S., Sakai Y. Frequency stabilization of 1,55 mkm DFB laser diode using vibrational-rotational absorption of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ molecules // IEEE. Phot.Tech.Lett. 1989. Vol. 1. N 1. pp 392-401. 5. Иянагава Т., Сонто С. Частотная стабилизация 1,5 мкм InGaAsP лазера с РОС по линиям поглощения NH_3 // Appl.Phys.Lett. 1984. Vol.45. N 3. Pp826-828. 6. Chikako I., Motonobu K., et all. Absolute frequency measurement of the saturated absorption lines of methane in the 1.66 mkm region // Bulletin of NRLM. 1999. Vol. 83. Pp 293-296. 7. Takaya I., Hideo T. A portable remote methane sensor using a tunable diode laser // Meas. Sci. Technol. 2000. Vol. 11. pp 594-602. 8. Silver J.A. Frequency modulation spectroscopy for trace species detection: Theory and comparison among experimental methods // Appl. Opt. 1992. Vol.31. pp. 707-731. 9. Wahlquist H. Modulation broadening of unsaturated Lorentzian lines // J. Chem. Phys. 1961. Vol. 35. pp 1708-1710.

Поступила в редколлегию 05.08.2005



Мачехин Юрий Павлович, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора ННЦ «Институт метрологии». Область научных интересов: стабилизированные по частоте лазеры и лазерные системы.