

LASER SPECTROSCOPY,
LIMITED BY DOPPLER
BROADENING

A. K. POPOV

Basic information on the structure of the matter at the atomic and molecular level was obtained with the aid of optical spectroscopy. The discovery of lasers opened new fascinating opportunities in spectroscopy. The paper is aimed at consideration of some of such opportunities.

Основная часть наших знаний о строении вещества на атомно-молекулярном уровне получена с помощью оптической спектроскопии. Появление лазеров открыло принципиально новые возможности в спектроскопии. Статья посвящена обсуждению некоторых из таких реализованных возможностей.

**ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ,
ОГРАНИЧЕННАЯ
ДОПЛЕРОВСКИМ УШИРЕНИЕМ**

А. К. ПОПОВ

Красноярский государственный технический университет
Красноярский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

Спектр колебаний – это совокупность простых гармонических колебаний, на которые может быть разложено сложное колебательное движение. Спектроскопия – раздел физики, посвященный изучению спектров электромагнитного излучения. Колебательные движения заряженных частиц, входящих в состав атомов и молекул, сопровождаются поглощением и испусканием электромагнитных излучений. Вид спектра испущенного или поглощенного излучения определяется строением электронной оболочки атомов и молекул, влиянием ядер, а также внешними факторами: составом, температурой, давлением окружающей среды, внешними электрическими и магнитными полями. Большинство наших сведений о структуре атомов и молекул получено в результате спектроскопических исследований. Важнейшие области применения спектроскопии – физика атомов и молекул, анализ состава вещества, дистанционные методы изучения окружающей среды, астрофизика. Спектроскопия внесла выдающийся вклад в формирование важнейших физических и астрофизических концепций, в современный уровень понимания атомной и молекулярной физики, а также других естественных наук.

Спектроскопия сыграла решающую роль в создании мазеров и лазеров, развитии квантовой электроники. Но когда в начале 60-х годов нашего столетия были созданы лазеры, стало ясно, что с их использованием спектроскопия вступает в качественно новый этап развития. За прошедшие 35 лет был достигнут прогресс, соизмеримый с предыдущим этапом развития длиной в несколько столетий. В настоящее время трудно представить себе современную оптическую спектроскопию без использования лазеров.

Существует чрезвычайно широкий круг научных и практических задач, для решения которых не требуется слишком детальной информации о спектрах (высокого разрешения спектров). И наоборот, разработаны специальные методы спектроскопии сверхвысокого разрешения для задач, где эта информация играет определяющую роль. Указанные методы существенно различаются. Статья посвящена изложению физических принципов лазерной

спектроскопии – спектроскопии, основанной на использовании лазерного излучения. При этом основное внимание будет уделено первому из упомянутых кругу задач, когда достаточно разрешения, не превышающего величины порядка доплеровской ширины спектральной линии (см. ниже).

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЛИНИИ

Спектры испускания и поглощения атомов и молекул обычно имеют вид набора спектральных линий, то есть узких интервалов частот электромагнитного излучения, на которых происходит поглощение или испускание. Распределение интенсивности излучения по частоте внутри спектральной линии называется формой спектральной линии. Положение и форма спектральных линий являются основными источниками информации о структуре атомов и молекул, а также их взаимодействии с окружающей средой. Такой вид спектров находят объяснение в классической физике с помощью понятия резонанса, а в квантовой физике – квантовых переходов. Суммируем основные представления, относящиеся к этим понятиям.

Если частота изменения во времени силы, приложенной к колебательной системе, приближается к ее собственной частоте, то амплитуда колебаний последней резко возрастает. Эта зависимость для отстоящего изменения квадрата амплитуды представлена кривой 1 на рис. 1, а. Ширина резонанса на полувысоте определяется скоростью затухания колебательного процесса за счет потери энергии после выключения внешней силы. Рисунок 1, а соответствует потеря энергии по закону $\exp[-\delta\omega_0 t]$. Такое проявление релаксации в спектрах является общим свойством колебательных систем независимо от природы осциллятора.

Если выключить внешнюю силу, то колебания зарядов на частоте ω_0 будут сопровождаться затухающим излучением на этой же частоте. Такое излучение можно также представить в виде совокупности незатухающих электромагнитных колебаний с некоторым набором (спектром) частот. Например, для излучения, амплитуда напряженности которого затухает по закону $\exp[-\delta\omega_0 t/2]$, зависимость квадратов амплитуд этих колебаний (интенсивности излучения) от частоты в относительных единицах также соответствует кривой 1 на рис. 1, а. Эта кривая описывает форму спектральной линии, в соответствии с которой оптический осциллятор (атом) излучает и поглощает на различных частотах вблизи данного резонанса.

Вынужденные колебания осциллятора могут как отставать, так и опережать по фазе колебания вынуждающей силы в зависимости от знака разности частот вынуждающих и собственных колебаний (отстройки от резонанса). Эта зависимость разности фаз в относительных единицах представлена кривой 2 на рис. 1, а. Для электромагнитного излу-

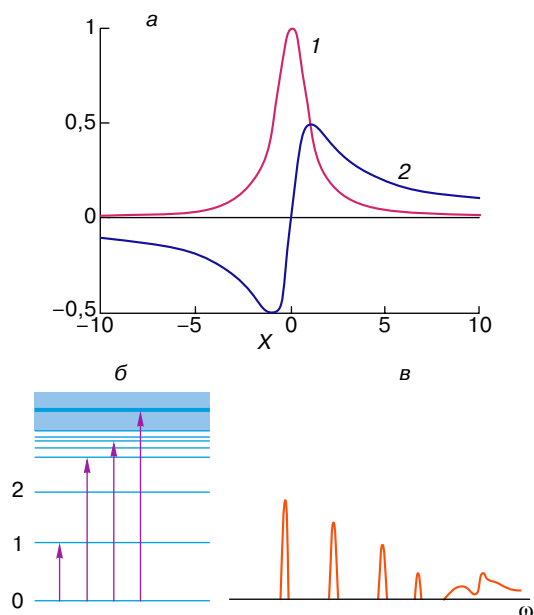


Рис. 1. Спектры испускания и поглощения излучения: а – резонанс. $X = (\omega - \omega_0)/(\delta\omega_0/2)$ (красная и синяя кривые описывают частотные зависимости многих физических процессов, примеры даны в тексте); б – характерный энергетический спектр атома; в – соответствующий спектр поглощения излучения из основного состояния. (Дискретный уровень и асимметричный резонанс на фоне сплошного спектра соответствуют автоионизационному состоянию.)

чения указанное различие фаз определяет различие фазовых скоростей распространения излучения в вакууме и протяженных материальных средах. Отношение фазовых скоростей распространения света в вакууме c и среде v непосредственно связано с важнейшей оптической характеристикой среды – показателем преломления $n(\omega)$: $n(\omega) = c/v$. В разреженных газах вблизи резонанса зависимость величины $n - 1$ от частоты в относительных единицах также имеет вид кривой 2 на рис. 1, а.

В более широком интервале частот спектры поглощения и преломления света атомными и молекулярными газами имеют вид совокупности уширенных резонансов типа рис. 1, а в полном соответствии с описанными классическими представлениями. Однако для более полного объяснения закономерностей спектров, присущих объектам микромира, классических представлений оказывается недостаточно. Это достигается лишь с помощью законов квантовой физики. Согласно им, энергия колебаний связанных атомных электронов не может быть произвольной, а может принимать лишь дискретные (квантованные) значения E_n (рис. 1, б), которые определяют энергетический спектр атома. Атомы испускают электромагнитное излучение в результате квантовых переходов с вышележащих уровней

энергии E_m на нижележащие E_n , а поглощают при обратных переходах. Поэтому энергия излучения, испущенного атомами на частоте ω в результате квантовых переходов, также является дискретной и пропорциональной энергии квантов света $\hbar\omega$. Таким образом, из квантовой физики следует, что положение резонансов определяется энергетическим спектром атома, а именно значениями $\omega_{mn} = (E_m - E_n)/\hbar$, где $\hbar = 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка. Этим объясняется дискретная часть спектра, схематически представленного на рис. 1, а.

Как уже отмечалось, значения ширины резонансов (спектральных линий) определяются скоростью затухания колебаний связанных в атомах и молекулах заряженных частиц. Эта скорость, в свою очередь, определяется различной излучательной способностью, присущей различным состояниям одного и того же атома, а также взаимодействием излучающих частиц с окружающей средой. Последнее также зависит от состояния заряженных частиц внутри атомов и молекул. Таким образом, каждая из дискретных спектральных линий, изображенных на рис. 1, в, при более высоком разрешении имеет форму, близкую к изображенной на рис. 1, а, кривая I.

По мере возбуждения связанного атомного электрона на все более высокие возбужденные уровни он может оторваться от атома (процесс ионизации) и стать свободным. При таких переходах электрон может приобретать уже произвольную энергию. Соответствующий спектр энергий перестает быть дискретным и становится сплошным. При одновременном возбуждении двух электронов (или электрона из внутренних оболочек) спектр дискретных состояний простирается выше и может налагаться на сплошной спектр одноэлектронных возбуждений из внешней оболочки. При релаксации вниз любого из электронов атом самопроизвольно ионизируется. Поэтому дискретные уровни на фоне сплошного спектра называются автоионизационными. Ионизации соответствует сплошной спектр поглощаемого излучения (правая часть рис. 1, в), который обычно лежит в коротковолновом ультрафиолетовом либо мягком рентгеновском диапазонах длин волн.

ПРИНЦИПЫ СПЕКТРОСКОПИИ

Информацию о структуре атомов и молекул и их взаимодействиях с окружающей средой можно получить различными способами из спектров поглощения, испускания или рассеяния, возникающих в результате взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Так, например, измерения длин волн спектральных линий позволяют определить положения энергетических уровней, а их интенсивности – вероятности переходов. Вероятности переходов, в свою очередь, зависят от волновых функций энергетических уровней, между которыми происходит переход, то есть от распределения зарядов в соответствующих состояниях. Специальные

методы спектроскопии высокого разрешения позволяют измерить естественные ширины спектральных линий, то есть минимальные ширины, которые обусловлены потерей энергии за счет излучения. Таким образом определяются средние времена жизни в возбужденных состояниях.

Движение атомов приводит к доплеровскому сдвигу спектральных линий отдельных атомов, зависящему от скорости и направления движения относительно регистрирующего прибора. Максвелловское распределение атомов по скоростям приводит к тому, что спектральные линии, присущие разреженным газам, оказываются дополнительно уширенными. Распределение интенсивности излучения по частоте ω внутри доплеровской спектральной линии с центром при ω_0 описывается гауссовской функцией

$$I(\omega) = I(\omega_0) \exp[-4 \ln 2 (\omega - \omega_0)^2 / \delta\omega_D^2],$$

где $\delta\omega_D = \omega_0(8kT \ln 2 / (mc^2))^{1/2}$ – полная ширина спектральной линии на полувысоте, зависящая лишь от температуры газа T и массы атомов m (k – постоянная Больцмана, c – скорость света).

Такое уширение называется неоднородным доплеровским, поскольку различные участки доплеровского профиля спектральной линии обусловлены поглощением или излучением атомов с различными скоростями и направлениями движения. Доплеровские профили спектральных линий дают распределение по скоростям излучающих объектов и температуру вещества.

Из уширения и сдвига спектральных линий можно также получить информацию о столкновительных процессах и межатомных потенциалах взаимодействия. Расщепление спектральных линий в электрических и магнитных полях позволяет измерить величину этих полей, электрические и магнитные моменты, а также выяснить типы связей различных угловых моментов в атомах и молекулах. Сверхтонкая структура спектральных линий дает информацию о взаимодействии между ядрами и электронным облаком и позволяет определить электрические квадрупольные и магнитные дипольные моменты ядер.

Это лишь часть примеров, показывающих, как спектроскопия позволяет исследовать микромир. При этом информация резко возрастает с увеличением спектрального разрешения и чувствительности методов детектирования.

ПРЕИМУЩЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Применение лазеров в сочетании с другими современными оптическими и электронными приборами открыло качественно новые возможности в спектроскопии. Эти возможности можно условно разбить на две группы: 1) существенное усовершенствование ранее существовавших методов, что позволяет получать новые результаты, и

2) принципиально новые методы. Кардинальное усовершенствование ранее существовавших методов определяется возможностями концентрации лазерного излучения, которые приближаются к предельным, допускаемым законами физики и возможным лишь для когерентного (регулярного в пространстве и во времени) электромагнитного излучения. К таким принципиальным преимуществам лазерного излучения и вытекающим из них возможностям усовершенствования методов спектроскопии относятся следующие.

1. **Большая спектральная мощность** (концентрация в спектральный интервал), на много порядков превышающая таковую для некогерентных источников. Например, отношение ширины спектра лазерного излучения к его частоте может быть уменьшено вплоть до величины порядка $\Delta\omega/\omega \sim 10^{-14}$, тогда как для специальных ламп эта величина при меньших либо соизмеримых мощностях излучения составляет 10^{-8} или большую величину. Это значительно облегчает проблему снижения уровня шумов. За счет выделения узкого спектрального интервала удается резко снизить уровень шумов приемников и фонового излучения.

2. **Малая расходимость лазерных пучков** (концентрация в малый телесный угол) также дает значительные экспериментальные преимущества. Например, при измерении малых коэффициентов поглощения можно использовать большую длину пути через поглощающий образец. При этом фоновые шумы из-за рассеяния света на стенках или окошках кюветы можно устранить значительно легче, чем в случае расходящихся пучков от некогерентных источников.

3. **Фокусировка** (концентрация в предельно малый объем) и последующее эффективное **отображение на щель спектрографа** излучения лишь из этого малого объема позволяют резко повысить пространственное разрешение получаемой информации.

4. Особенно существенным для спектроскопии высокого разрешения является **малая спектральная ширина лазерного излучения** (концентрация в спектральный интервал). Помимо уже упомянутых возможностей понизить уровень шумов она позволяет добиться спектрального разрешения, на много порядков превышающего разрешение самых больших по размерам и дорогостоящих спектрографов. В лазерной спектроскопии разрешение часто ограничивается уже не инструментальным разрешением (порядка 1 Гц для непрерывного излучения), а спектральной шириной переходов изучаемых объектов (1 ГГц–1 кГц). (Принципиально новые методы, основанные на использовании нелинейных оптических явлений в спектроскопии, — методы нелинейной лазерной спектроскопии позволяют преодолеть и этот предел.)

5. **Возможность плавной перестройки частоты** высокомонохроматического узконаправленного лазерного излучения открыла новую эру в спектро-

скопии, поскольку предоставляет уникальную возможность сочетать сверхвысокое разрешение с большой спектральной яркостью регистрируемых излучений. (Совокупность разработанных к настоящему времени лазеров позволяет перекрыть практически полностью диапазоны длин волн от далекого инфракрасного до далекого ультрафиолетового).

6. **Концентрация во времени** (сверхкороткие импульсы с длительностью вплоть до величин порядка 10 фс) позволяет разрешать во времени сверхбыстрые переходные процессы с длительностью порядка 10^{-14} с, такие, как релаксационные процессы в газах, жидкостях, твердых телах, элементарные химические и биологические процессы.

7. Использование лазеров значительно расширяет возможности использования современной электроники и вычислительной техники для автоматизации и повышения точности регистрации и обработки спектроскопической информации.

Проиллюстрируем сказанное на примере некоторых методов абсорбционной лазерной спектроскопии.

АБСОРБЦИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, ОГРАНИЧЕННАЯ ДОПЛЕРОВСКИМ УШИРЕНИЕМ

Преимущества использования лазеров лучше всего видны из сравнения с традиционным методом, основанным на использовании некогерентных источников излучения.

Классическая абсорбционная спектроскопия

В классической абсорбционной спектроскопии обычно используют источники спонтанного излучения с широким спектром (например, дуговой разряд в парах ртути высокого давления, ксеноновые импульсные лампы и т.д.). Схема метода приведена на рис. 2, а.

Излучение коллимируется линзой L_1 и проходит через поглощающую ячейку. С помощью диспергирующего прибора, разделяющего излучение с различными длинами волн (спектрометра или интерферометра), интенсивность прошедшего излучения $I(\lambda)$ измеряется как функция длины волны λ . Вычитанием интенсивности опорного пучка $I_0(\lambda)$, которое можно реализовать, например, путем попеременного введения и выведения поглощающей ячейки из светового пучка, можно получить спектр поглощенного излучения $\Delta I(\lambda)$:

$$\Delta I(\lambda) = a[bI_0(\lambda) - I(\lambda)],$$

где постоянные a и b учитывают не зависящие от длины волны потери I_0 и I (например, при отражении от стенок кюветы или разделительных зеркал).

Спектральное разрешение обычно ограничивается разрешающей способностью диспергирующего прибора, причем доплеровского предела удается достичь лишь с помощью больших и дорогих

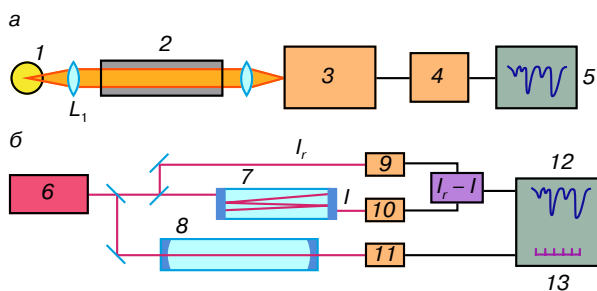


Рис. 2. Сравнение абсорбционной спектроскопии с использованием широкополосного некогерентного источника излучения (а) и перестраиваемого по частоте лазера (б): 1 – источник сплошного спектра, 2 – поглощающая ячейка, 3 – спектрограф, 4 – фотоприемник, 5 – самописец, 6 – перестраиваемый лазер, 7 – многоходовая кювета, 8 – длинный интерферометр Фабри–Перо, 9–11 – фотодиоды, 12 – самописец, 13 – метки частоты

приборов. Чувствительность установки определяется минимальной поглощаемой мощностью, которую удастся зарегистрировать на фоне исходного излучения. В большинстве случаев она ограничивается шумами приемника и флуктуациями интенсивности источника излучения. Обычно предел обнаруживаемого поглощения в рассматриваемых условиях достигается при относительных поглощениях $\Delta I/I \geq 10^{-4} - 10^{-5}$ и может быть понижен лишь в благоприятных условиях за счет использования специальных источников и методов синхронного детектирования или техники накопления и усреднения сигналов. Замена в этом методе широкополосного некогерентного излучения на перестраиваемое по частоте узкополосное лазерное сопровождается рядом преимуществ.

1. Отпадает необходимость в использовании диспергирующих приборов, так как частотную зависимость поглощаемого излучения можно измерять непосредственно по разности интенсивностей опорного I_r и прошедшего I пучков (рис. 2, б). При этом в силу монохроматичности излучения спектральное разрешение определяется шириной спектральной линии поглощения (а при использовании методов нелинейной спектроскопии можно достичь и субдоплеровского разрешения).

2. Одновременно значительно возрастает чувствительность регистрации. Как уже отмечалось, чувствительность определяется отношением поглощенной мощности излучения к ее характерному исходному значению $\Delta I/I$. Первая величина пропорциональна ширине линии поглощения, а вторая – минимальной спектральной ширине излучения, выделяемой спектральным прибором. Для некогерентного излучения эта ширина обычно существенно превышает ширину линии поглощения, тогда как весь спектр лазерного излучения может находиться внутри спектральной линии поглощения. Таким образом, излучение, которое в принципе

не может поглотиться, на фотоприемник не попадает. В результате переход к лазерному излучению и устранение ограничений со стороны спектральных приборов приводят к возрастанию чувствительности примерно на указанный фактор, который может составить десятки и более раз.

3. Помимо этого чувствительность дополнительно значительно возрастает за счет уменьшения роли шумов приемников при использовании столь интенсивного узкополосного излучения и возможности подавления флуктуаций путем стабилизации этой интенсивности.

4. Малая расходимость лазерного излучения позволяет реализовать большие длины пути в поглощающей среде за счет многократного ее прохождения. При этом можно использовать для регистрации вещества даже слабые спектральные линии поглощения. Разрешение двух близких линий поглощения, принадлежащих разным веществам или переходам, может быть улучшено путем уменьшения давления газа, а следовательно, и уширения спектральных линий при столкновениях частиц.

5. Частоту лазерного излучения значительно легче калибровать. Если его малую долю пропустить через интерферометр Фабри–Перо длиной d , то фотодетектор 11 (рис. 2, б) будет регистрировать пики всякий раз, когда частота лазерного излучения совпадает с интерференционными максимумами пропускания, соответствующими частотам $\nu_m = mc/2d$. Для интерферометра длиной 1 м расстояние между соседними $m + 1$ и m пиками составляет $\Delta\nu = c/2d = 150$ МГц, что соответствует разности длин волн 10^{-4} нм в зеленой области спектра около $\lambda = 550$ нм.

6. Методы стабилизации частоты лазерного излучения на центр линии поглощения позволяют повысить точность измерения длины волны до относительной величины порядка 10^{-8} и выше. С такой же точностью становится возможным измерять длины волн поглощающих переходов.

7. Длину волны лазерного излучения можно очень быстро перестраивать. Например, электронно-оптические методы позволяют просканировать несколько соседних переходов, соответствующих колебаниям молекул, за доли микросекунды. Это открывает широкие перспективы регистрации и исследования промежуточных короткоживущих радикалов в химических реакциях.

8. Возможность с высокой точностью изучать профили спектральных линий методами лазерной спектроскопии позволяет в случае уширения давлением получать информацию о потенциалах взаимодействия сталкивающихся партнеров, определять концентрацию и температуру электронных и ионных компонент плазмы.

9. Узкополосность и высокая интенсивность лазерного излучения позволяют при его поглощении избирательно возбуждать значительное количество

молекул в определенные возбужденные состояния, что открывает принципиально новые возможности изучения и использования этих возбужденных состояний.

10. Как уже отмечалось, использование лазеров облегчает применение электроники в экспериментах. Так, например, модулируя напряжение, приложенное к пьезокерамике, на которой крепятся зеркала лазерного резонатора, можно немного модулировать частоту лазерного излучения. Как следствие будет модулироваться и поглощение этого излучения. Использование синхронного детектирования сигнала с фотодетектора и узкополосных электронных усилителей фототока на частоте модуляции позволяет на много порядков повысить отношение полезного сигнала к шуму, а следовательно, и чувствительность метода.

В рассмотренном выше методе поглощенное излучение регистрируется как разность между интенсивностями прошедшего через среду и опорного пучков излучения. В зависимости от изучаемых объектов и процессов часто оказывается целесообразным регистрировать акты поглощения излучения с помощью некоторых других физических процессов, сопровождающих поглощение. Использование лазеров при этом приводит также к качественному прогрессу. Обратимся к некоторым примерам.

Лазерная спектроскопия возбуждения

В этом методе регистрируются фотоны, переизлученные возбужденными атомами и молекулами. Обычно переизлучение (флуоресценция) происходит на более длинноволновых квантовых переходах. Поэтому данный метод чаще всего используется при наличии у поглощающей среды ультрафиолетовых переходов.

Использование лазеров позволяет реализовать все перечисленные выше преимущества. Техника счета фотонов флуоресценции обеспечивает достижение нижнего предела обнаружения порядка сотен молекул в кубическом сантиметре.

Лазерная оптоакустическая спектроскопия

Этот чувствительный метод измерения малых поглощений используется главным образом тогда, когда нужно определить ничтожные концентрации молекулярных продуктов в присутствии других компонент при больших давлениях, например загрязнений атмосферы. При этом могут быть использованы переходы и источники лазерного излучения в инфракрасной области. Сущность метода состоит в том, что энергия возбуждения поглощающих молекул в результате столкновений в конечном итоге перераспределяется по всем степеням свободы вещества. Это приводит к росту температуры и давления при постоянной плотности в ячейке. Если лазерный пучок прерывать с некоторыми частотами (обычно менее 10 кГц), то в ячейке генерируется акустическая

волна на соответствующей частоте. Она может быть зарегистрирована чувствительным микрофоном, помещенным внутри кюветы (рис. 3). С помощью такого спектрофона удастся зарегистрировать относительные концентрации молекул порядка 10^{-10} при общем давлении смеси от нескольких торр до нескольких атмосфер.

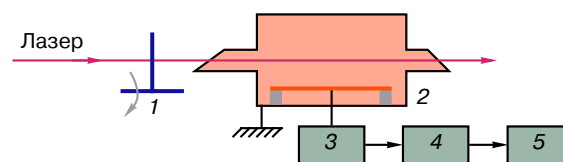


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки для оптоакустической спектроскопии: 1 – модулятор интенсивности лазерного излучения, 2 – емкостный микрофон, 3 – предусилитель, 4 – синхронный усилитель, 5 – самописец

Оптоакустическая спектроскопия успешно используется для быстрого контроля небольших утечек ядовитых газов, определения относительного содержания изотопов, изучения структуры молекул и процессов передачи энергии в различные степени свободы при их столкновениях, изучения слабых переходов молекул, которые проявляются в спектрах атмосфер планет и т.д.

Лазерная оптогальваническая спектроскопия

Это простой и эффективный метод спектроскопии газовых разрядов. Его сущность состоит в том, что вероятности ионизации атомов с различных уровней разные. Поэтому резонансное излучение поглощаясь приводит к изменению разрядного тока, которое регистрируется по изменению падения напряжения на балластном сопротивлении (рис. 4). Если интенсивность излучения лазера модулируется с помощью прерывателя, то возникает переменное напряжение, которое можно непосредственно подавать на синхронный усилитель. При умеренных мощностях лазеров в несколько милливольт и разрядных токах в несколько миллиампер можно получать большие сигналы от микро- до милливольта. Помещая в разряд незначительное количество атомов с известным “густым” спектром (например, уран и торий), оптогальванические сигналы можно использовать как абсолютные реперы и простой способ калибровки длины волны лазерного излучения. Одновременно можно определить наличие других элементов и темп их поступления в газовый разряд из исследуемых твердотельных образцов.

Лазерная ионизационная спектроскопия

В этом методе поглощение фотонов измеряется путем регистрации ионов или электронов, создаваемых различными способами, в то время как атомы

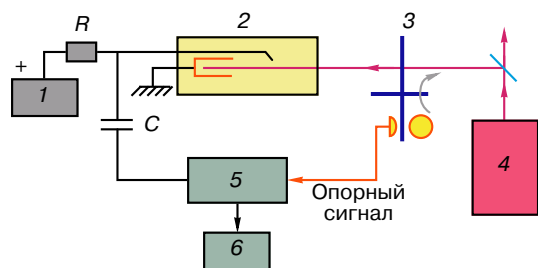


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки для оптогальванической спектроскопии: 1 – источник питания для поддержания разряда, 2 – лампа с полым катодом, 3 – модулятор интенсивности лазерного излучения и опорного излучения лампы для синхронизации усилителя 5, 4 – непрерывный лазер на красителе, 5 – синхронный усилитель, 6 – самописец

или молекулы находятся в возбужденных состояниях в результате поглощения фотонов. Ионизационная спектроскопия – один из самых чувствительных методов лазерной спектроскопии. Он позволяет приблизиться к пределу регистрации единичных атомов и актов поглощения единичных фотонов.

Лазерная внутрирезонаторная спектроскопия

Интенсивность излучения внутри лазерного резонатора в десятки раз больше, чем на выходе из лазера. Поэтому, помещая исследуемые кюветы внутрь резонатора, можно значительно улучшить характеристики всех перечисленных выше методов (рис. 5). Кроме того, сами по себе характеристики генерации лазера весьма чувствительны к внесению поглощения внутрь резонатора. Это обусловлено как многократным проходом излучения через ячейку внутри резонатора и соответствующим накоплением эффектов, так и некоторыми специфическими резонансными нелинейно-оптическими процессами, определяющими генерацию. Внесение поглощающих атомов, например, вносит дисбаланс во взаимодействие нескольких близких по частоте одновременно генерируемых лазерных излучений (типов колебаний резонатора). За счет нелинейности процесса эффект многократно усиливается, так что становится возможным регистрировать исключительно слабые линии поглощения. Фактор увеличения чувствительности за счет использования внутрирезонаторного поглощения может составлять величину порядка 10^5 .

Способность атома взаимодействовать с резонансным излучением и совершать переходы характеризуется “силой осциллятора” для данного перехода. Для нормальных переходов эта величина близка к единице. Методы внутрирезонаторной лазерной спектроскопии позволяют регистрировать чрезвычайно слабые переходы вплоть до сил осцилляторов, меньших 10^{-12} . Подобные эксперименты чрез-

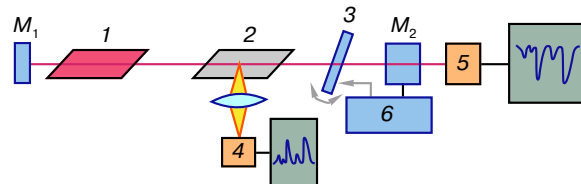


Рис. 5. Техника внутрирезонаторного поглощения: 1 – лазер, 2 – поглощающая ячейка, 3 и 6 – система для перестройки частоты лазерного излучения, 4 – детектор флуоресценции, 5 – приемник лазерного излучения, M_1, M_2 – зеркала

вычайно важны для решения принципиальных задач современной физики и астрофизики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, во многих случаях использование лазеров в спектроскопии приводит к значительно меньшим материальным и временным затратам, чем при использовании некогерентных источников света. В результате создания нелинейной лазерной спектроскопии (тема отдельной статьи) появились принципиально новые экспериментальные возможности. Иногда методы лазерной спектроскопии существенно дополняют другие дорогостоящие экспериментальные методы фундаментальной физики (как, например, в экспериментах по сохранению четности при ядерных взаимодействиях). Возникли новые направления спектроскопии, связанные с дистанционным зондированием состава атмосферы, поверхности суши, состояния водоемов и океана, мониторингом производственных и технологических процессов. Лазерная спектроскопия является самостоятельным разделом физики, лежащим на стыке оптической спектроскопии с квантовой электроникой. Совокупность достоинств применения лазеров позволяет говорить о лазерной революции в спектроскопии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Летохов В.С.* Лазерная спектроскопия атомов и молекул. М.: Мир, 1979. 483 с.
2. *Демтредер В.* Лазерная спектроскопия, основные принципы и техника эксперимента. М.: Наука, 1985. 607 с.
3. *Сэм М.Ф.* Лазеры и их применения // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 6. С. 92–98.
4. *Попов А.К.* Введение в нелинейную спектроскопию. Новосибирск: Наука, 1983. 274 с.

* * *

Александр Кузьмич Попов, доктор физико-математических наук, профессор Красноярского государственного университета и Красноярского государственного технического университета, зав. лабораторией Института физики СО РАН. Специалист в области лазерной физики и резонансной нелинейной оптики. Автор более 150 научных работ и трех монографий.