

ЛЕКЦИЯ 10

§ 7.7. Естественная ширина спектральных линий

Обсудим особенности атомных линейчатых спектров [4]. Почему мы видим в спектроскопе отдельные разноцветные линии? Каждая линия является изображением щели на входе трубы коллиматора.

Если вместо прямой щели на входе трубы коллиматора поставить ширму с маленьким круглым отверстием, получится спектр в виде набора разноцветных точек. Если отверстие изготовить в виде полуокружности, получится спектр из разноцветных дуг. Такой спектр получают астрономы при солнечных затмениях, сняв ширму с трубы коллиматора.

Следовательно, смысл слова «линейчатый» по отношению к спектру определяется не формой наблюдаемых линий. Суть в том, что свет с «линейчатым» спектром содержит не все возможные длины волн, а лишь некоторый ограниченный набор длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ или частот $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$.

Какие изменения будут происходить при уменьшении ширины щели коллиматора? Так как каждая линия спектра есть изображение освещенной щели в цвете, соответствующем определенной длине волны, то представляется, что по мере уменьшения ширины щели должно происходить уменьшение ширины спектральных линий до тех пор, пока не станет существенным влияние дифракции света на краях щели. Но это представление о линейчатом спектре оказывается весьма упрощенным.

При уменьшении ширины щели ширина спектральных линий уменьшается, как это и следует из законов геометрической оптики. Однако при достижении некоторого значения ширины щели дальнейшее ее уменьшение не приводит к уменьшению ширины спектральных линий, уменьшается лишь их яркость.

При использовании спектрографов высокого класса можно обнаружить, что разные линии спектра имеют разную ширину и спектральные линии не имеют четких границ. Если исследовать распределение поверхностной плотности потока светового излучения по длинам волн, то можно получить, например, такую картину, какая представлена на **рис. 97**. Как видно, «спектральные линии» в действительности не являются монохроматическими, они представляют собой набор световых волн с разными интенсивностями в некотором узком диапазоне длин волн. Диапазон частот, в пределах которого интенсивность спектральной линии (т. е. поверхностная плотность потока излучения) убывает в два раза по сравнению с максимальным значением, называется *шириной спектральной линии* (**рис. 98**).

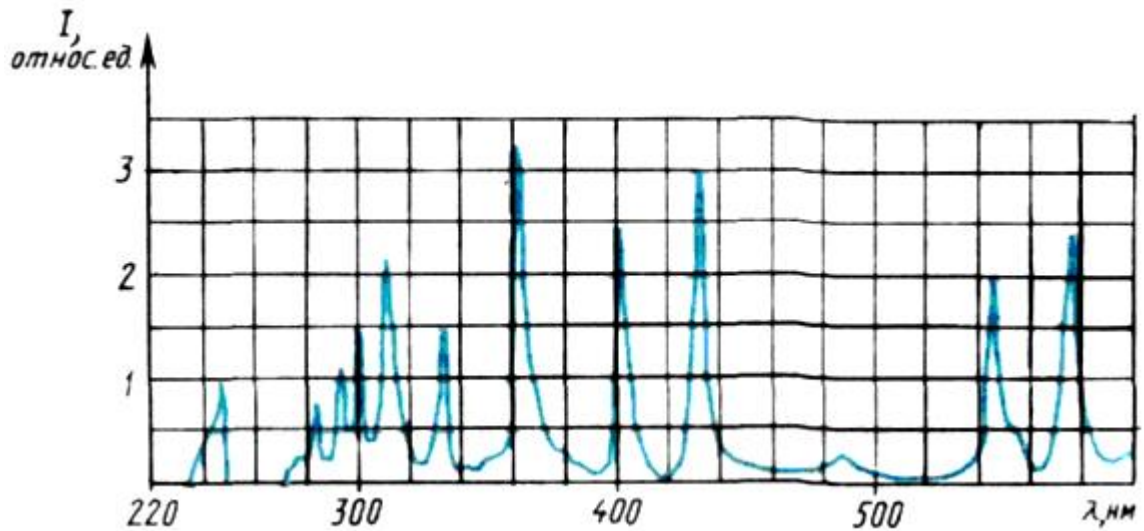


Рис. 97. "Тонкая" структура спектральной линии

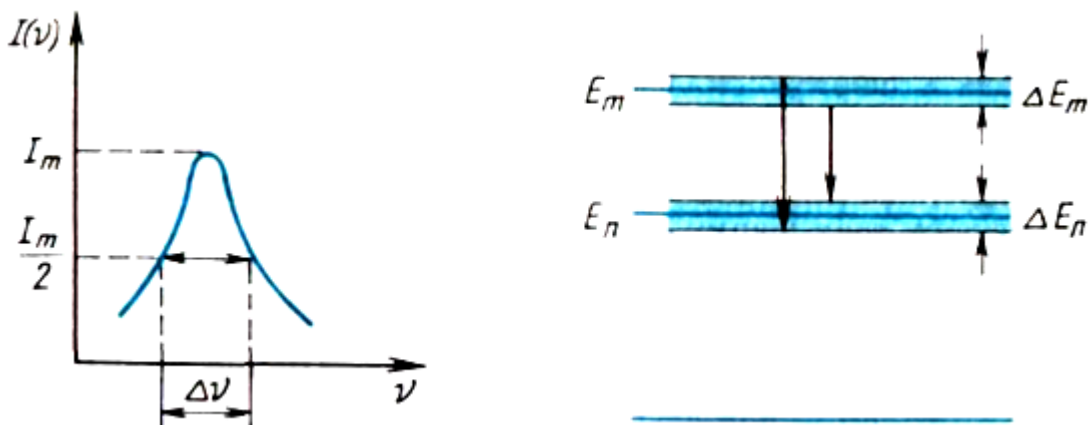


Рис. 98. Уширение спектральных линий

Одна из причин уширения спектральных линий – эффект Доплера. Действительно, атомы газа движутся с различными скоростями в разных направлениях. Даже если бы они излучали световые волны с абсолютно одинаковой длиной волны, то из-за влияния эффекта Доплера неподвижный наблюдатель регистрировал бы от удаляющихся атомов свет с несколько большей длиной волны, а от приближающихся атомов – с более короткой длиной волны. Этот эффект называется *доплеровским уширением спектральных линий*. Измеряя доплеровское уширение, можно определить среднюю скорость теплового движения атомов газа и тем самым его температуру.

Исследования линейчатых спектров показали, что уширение спектральных линий атомных спектров всегда превышает величину, которую можно объяснить эффектом Доплера. Ширину спектральных линий неподвижных и удаленных друг от друга атомов называют *естественной шириной спектральной линии*.

Так как любая спектральная линия имеет конечную ширину, то это означает, что энергия атома в возбужденном состоянии не имеет одного строго определенного значения. Энергия возбужденного атома в состояниях m и n может находиться в некоторых интервалах энергии шириной ΔE_m и ΔE_n

относительно средних значений энергий E_m и E_n (**рис. 98**). Естественная ширина спектральной линии определяется суммой значений ширины двух энергетических уровней:

$$\Delta\nu = \Delta E/h = (\Delta E_m + \Delta E_n)/h. \quad (7.21)$$

Соотношение неопределенностей и время жизни возбужденных атомов.

Неопределенность энергии атома в любом стационарном состоянии связана с действием фундаментального закона квантовой физики – соотношения неопределенностей.

Время жизни атомов в возбужденном состоянии обычно лежит в пределах $10^9 \div 10^{-7}$ с. Оценим естественную ширину спектральной линии для типичного случая $t = 10^{-9}$ с, считая, что совершается переход из возбужденного в нормальное состояние. Учитывая соотношение неопределенностей, имеем:

$$\Delta\nu = \frac{\Delta E}{h} \geq \frac{\hbar}{h\Delta t} = \frac{10^9}{2\pi} \text{ Гц} \approx 10^8 \text{ Гц}. \quad (7.22)$$

Так как видимый свет имеет частоту порядка 10^{14} Гц, то граница относительного изменения частоты спектральной линии, обусловленная ее естественной шириной, составляет примерно

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx \frac{10^8}{10^{14}} = 10^{-6}\%.$$

Характеристические рентгеновские спектры. В зависимости от разности энергий атома в двух состояниях, между которыми совершается переход, испускаемый квант электромагнитного излучения может принадлежать диапазону радиоволн, инфракрасного излучения, видимого света, ультрафиолетового или рентгеновского излучения.

В атомах с порядковым номером $Z \gg 1$ возможны переходы не только внешних, валентных, электронов. При достаточно большой энергии возбуждения в результате столкновения атома с заряженной частицей или поглощения кванта электромагнитного излучения может происходить освобождение электронов с внутренних оболочек атомов. Если с внутренней K -оболочки атома удален один электрон, то на освободившееся место переходит один из электронов с соседней оболочки L (**рис. 99**). На освободившееся место, в свою очередь, переходит один электрон с M -оболочки и т. д. Эти переходы совершаются в соответствии с принципом минимума энергии системы и сопровождаются испусканием дискретного спектра электромагнитного излучения (**рис. 100**).

При больших значениях зарядового числа Z это излучение принадлежит рентгеновскому диапазону и называется *характеристическим рентгеновским излучением*. На внутренние оболочки электронов пренебрежимо мало влияют взаимодействия атомов при вступлении их в химические взаимодействия. Поэтому характеристические рентгеновские спектры практически не изменяются при вступлении химических элементов в соединения с другими элементами. По характеристическим рентгеновским спектрам можно определить присутствие отдельных химических элементов в любых сложных соединениях, в любом агрегатном состоянии вещества.

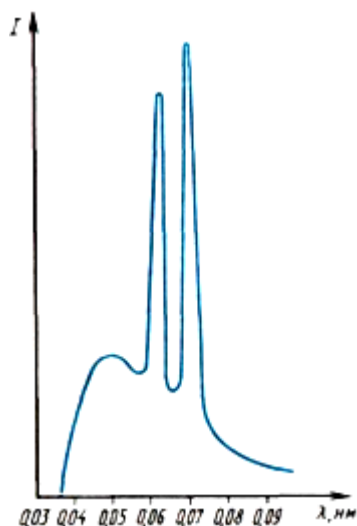


Рис. 99. Характерные рентгеновские спектры

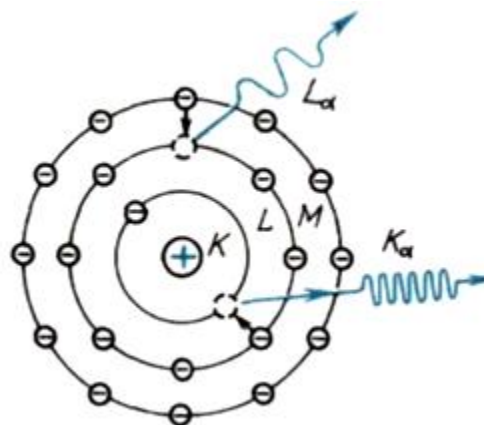


Рис. 100. Испускание фотона

Спектральный анализ. Исследование линейчатого спектра вещества позволяет определить, из каких химических элементов оно состоит и в каком количестве содержится каждый элемент в данном веществе. Количественное содержание элемента в исследуемом образце определяется путем сравнения интенсивности отдельных линий спектра этого элемента с интенсивностью линий в другом образце, в котором количественное содержание элементов известно. Метод определения качественного и количественного состава вещества по его спектру называется *спектральным анализом*.

Для выполнения спектрального анализа вещества с неизвестным химическим составом необходимо выполнить три операции: перевести вещество в газообразное состояние при такой высокой температуре, когда оно излучает свет, затем разложить этот свет в спектр и определить длины волн и интенсивности наблюдаемых в нем линий. Сравнивая полученные значения длин волн с известными спектрами отдельных элементов таблицы Менделеева, можно определить, какие химические элементы входят в состав исследуемого вещества.

Если исследуемое вещество находится в газообразном состоянии, то для получения его линейчатого спектра обычно применяется искровой разряд. Исследуемым газом заполняют трубку с двумя электродами на концах. На эти электроды подается высокое напряжение, и в трубке возникает электрический разряд. Для проведения спектрального анализа образцов вещества в твердом состоянии обычно используют дуговой разряд. В плазме дуги происходит превращение исследуемого вещества в пар и нагревание до высокой температуры. Электроды, между которыми зажигается дуговой разряд, обычно изготавливают из графита или меди. Углерод и медь удобны по той причине, что спектры излучения их атомов в видимой области имеют небольшое число линий и не создают серьезных помех для наблюдения спектра исследуемого вещества.

§ 7.8. Лазер

Одним из самых замечательных достижений физики второй половины XX в. было открытие физических явлений, послуживших основой для создания

удивительного прибора – *оптического квантового генератора*, или *лазера*¹ [4]. Пучок света от лазера может прожечь отверстие в самом твердом материале, расплавить металлическую броню, и он же помогает хирургам при выполнении самых тонких операций внутри человеческого глаза. По лучу лазера осуществляется телефонная связь и прокладка трасс, лазерное излучение применяется для измерения расстояний и для получения объемных изображений предметов — голограмм.

Физической основой работы лазера служит явление *индуцированного излучения*.

Спонтанное и индуцированное излучение. Излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое, называется *спонтанным* (самопроизвольным). Спонтанное излучение различных атомов происходит некогерентно, так как каждый атом начинает и заканчивает излучать независимо от других.

В 1916 г. А. Эйнштейн предсказал, что переход электрона с верхнего энергетического уровня на нижний с излучением фотона может происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля с частотой, равной собственной частоте перехода. Такое излучение называют *вынужденным*, или *индуцированным*.

Вероятность индуцированного излучения резко возрастает при совпадении частоты электромагнитного поля с собственной частотой излучения возбужденного атома, возникающего при переходе на более низкий энергетический уровень (резонансный эффект).

Таким образом, в результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, получаются два совершенно одинаковых по энергии и направлению движения фотона-близнеца (**рис. 101**).

С точки зрения волновой теории атом излучает электромагнитную волну, одинаковую по направлению распространения, частоте, фазе и поляризации с той, которая вынудила атом излучать. В итоге получается результирующая волна с амплитудой большей, чем у падающей. Особенностью индуцированного излучения является то, что оно монохроматично и когерентно. Именно это свойство индуцированного излучения положено в основу устройства лазеров.

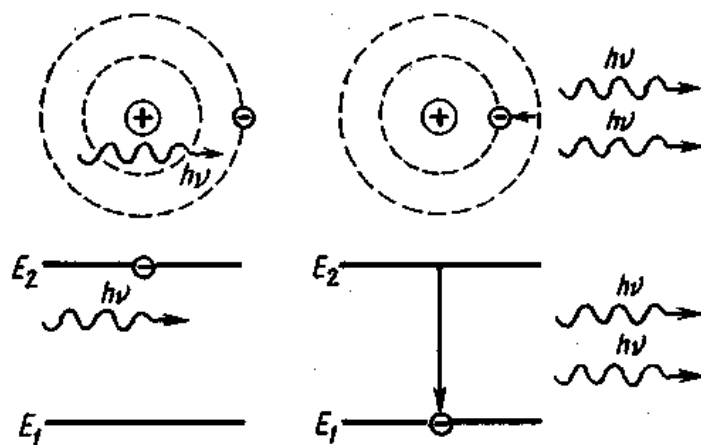


Рис. 101. Вынужденное излучение

При прохождении света через вещество происходит поглощение фотонов атомами, находящимися в основном состоянии, и излучение фотонов индуцированного излучения атомами, находящимися в возбужденном состоянии. Для того чтобы мощность светового излучения увеличилась после прохождения через вещество, больше половины атомов вещества должно находиться в возбужденном состоянии. Состояние вещества, в котором меньше половины атомов находится в возбужденном состоянии, называется состоянием с нормальной населенностью энергетических уровней (рис. 102 а). Состояние, при котором больше половины атомов вещества находится в возбужденном состоянии, называется состоянием с *инверсной* (от лат. *inversio* – переворачивать) населенностью уровней (рис. 102 б).

В веществе с инверсной населенностью уровней возбужденных атомов больше, чем невозбужденных. На пути фотонов чаще встречаются возбужденные атомы, чем атомы в основном состоянии, поэтому индуцированное излучение фотонов происходит чаще, чем их поглощение. В результате при прохождении света нужной частоты через вещество с инверсной населенностью уровней поток света усиливается, а не ослабляется.

Экспериментально явление усиления света при его прохождении через среду с инверсной населенностью уровней было открыто в 1951 г. В. А. Фабрикантом, М. М. Вудынским и Ф. А. Бутаевой.

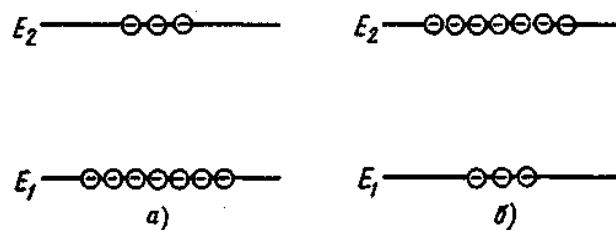


Рис. 102. Нормальная и инверсная заселенность уровней

Создание в веществе инверсной населенности уровней. Перевод вещества в состояние с инверсной населенностью энергетических уровней трудно выполним, так как в возбужденном состоянии атомы обычно находятся лишь 10^{-9} — 10^{-7} с, а затем самопроизвольно переходят в основное состояние. Чем больше атомов находится в возбужденном состоянии, тем больше совершается таких переходов.

Однако некоторые атомы имеют возбужденные состояния, в которых они могут находиться довольно длительное время, например 10^{-3} с. Такие состояния называются *метастабильными*. Вещество, в котором имеются метастабильные уровни, может использоваться для усиления света.

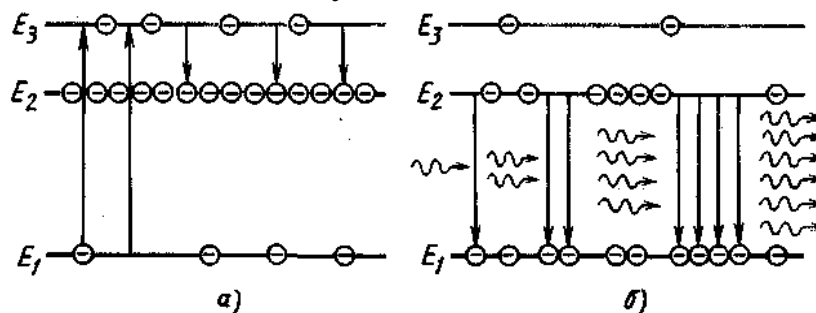


Рис. 103. Метастабильные уровни атома

Пусть атомы вещества в результате поглощения фотонов или другого взаимодействия переводятся из основного состояния с энергией E_1 в возбужденное состояние с энергией E_3 с коротким временем жизни (рис. 103 а). Затем совершается самопроизвольный переход этих атомов на метастабильный уровень с энергией E_2 . В результате таких процессов на метастабильном уровне можно создать инверсную населенность. При прохождении в веществе фотона с энергией, равной разности энергий метастабильного и основного состояния ($h\nu_{21} = E_2 - E_1$), происходит лавинообразный процесс усиления света за счет индуцированного излучения (рис. 103 б).

Оптический квантовый генератор – лазер. Система атомов с инверсной населенностью уровней способна не только усиливать, но и генерировать электромагнитное излучение. Для работы в режиме генератора необходима положительная обратная связь, при которой часть сигнала с выхода устройства подается на его вход. Для этого активная среда, в которой создается инверсная населенность уровней, располагается в резонаторе, состоящем из двух параллельных зеркал.

После облучения активной среды мощным потоком излучения более половины атомов переходят в метастабильное возбужденное состояние.

В результате одного из спонтанных переходов с метастабильного уровня на основной образуется фотон. При его движении в сторону одного из зеркал он вызывает индуцированное излучение других атомов, и к зеркалу подходит целая лавина фотонов с энергией $h\nu_{21}$ каждый. После отражения от зеркала лавина фотонов движется в противоположном направлении, попутно заставляя высвечиваться все новые возбужденные атомы, и т. д. Процесс продолжается до тех пор, пока существует инверсная населенность уровней.

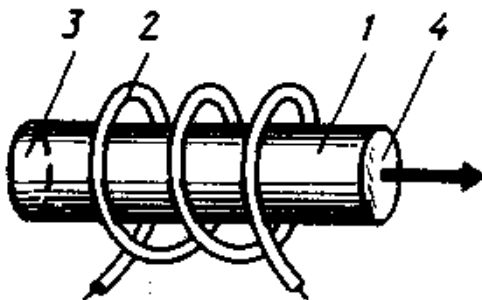


Рис. 104. Система накачки лазера

С квантовых позиций генерация света должна происходить при любом расстоянии между зеркалами. Но опыт показывает, что она возникает только при определенной длине L резонатора, кратной целому числу полувольт: $L = \frac{k\lambda}{2}$. При этом условии разность хода между вышедшей волной и волной, испытавшей отражение от двух зеркал, оказывается равной целому числу длин волн и на выходе лазера происходит сложение амплитуд световых волн, т.е. в резонаторе образуется стоячая волна. Рассмотренный принцип усиления и генерации электромагнитного излучения был предложен Н. Г. Басовым, А. М. Прохоровым и Ч. Таунсом.

В первых лазерах активной средой был кристалл рубина (Al_2O_3) с примесью около 0,05 % хрома. Этот основной (активный) элемент лазера обычно имеет форму цилиндра 1 (**рис. 104**) диаметром 0,4–2 см и длиной 3–20 см. Торцы цилиндра 3 и 4 строго параллельны, на них нанесен отражающий слой. Одна из зеркальных поверхностей частично прозрачна: 92 % светового потока отражается от нее и около 8 % светового потока пропускается ею.

Рубиновый стержень помещен внутри импульсной спиральной лампы 2, являющейся источником возбуждающего излучения. Атом хрома, поглощая излучение с длиной волны 560 нм, содержащееся в спектре излучения лампы, переходит с основного уровня с энергией E_1 на возбужденный уровень с энергией E_3 . Время жизни атомов хрома на возбужденном уровне мало. Поэтому большая часть атомов совершает переходы с этого уровня на метастабильный уровень с энергией E_2 (**рис. 103**).

Если мощность лампы-вспышки достаточно велика, то населенность метастабильного уровня окажется больше, чем населенность основного уровня. Процесс перевода атомов из основного в возбужденное состояние называют *накачкой*, соответственно используемую для этого лампу называют *лампой накачки*.

Достаточно одному атому хрома совершить спонтанный переход с метастабильного уровня на основной уровень с испусканием фотона, как возникает лавина фотонов, вызванная индуцированным излучением атомов хрома, находящихся в метастабильном состоянии. Если направление движения первичного фотона строго перпендикулярно плоскости зеркала на торце рубинового цилиндра, то первичные и вторичные фотоны отражаются от первого зеркала и летят через кристалл до второго зеркала. На своем пути они вызывают вынужденное излучение у новых атомов хрома и т. д. Процесс высвечивания всех возбужденных атомов хрома завершается за 10^{-8} – 10^{-10} с. Мощность светового излучения лазера при этом может быть более 10^9 Вт, т. е. превышать мощность крупной электростанции.

Основными достоинствами лазерного излучения являются его когерентность, возможность получения световых пучков с очень малой расходимостью, а также потоков излучения с очень большой мощностью.

В настоящее время, кроме лазеров на кристаллах, разработаны газовые лазеры, лазеры на жидкостях (на красителях). В отличие от лазеров на кристаллах, работающих в импульсном режиме коротких вспышек, газовые лазеры работают в непрерывном режиме. Лазеры на красителях обладают тем достоинством, что излучаемая ими частота может меняться в довольно широких пределах (лазеры с перестраиваемой частотой).

Применение лазеров. Мощные лазеры, в частности инфракрасные лазеры на углекислом газе, используются для обработки материалов (резание, сварка, сверление) с помощью сфокусированного лазерного пучка. Такие же пучки применяются в хирургии вместо скальпеля, при этом края раны коагулируют и почти не кровоточат.

Лазерные пучки нашли широкое применение в офтальмологии. С их помощью производятся операции на хрусталике и сетчатке глаза. Возможность

«приваривать» отслоившуюся сетчатку к главному дну позволяет избавить многих больных от неизбежной слепоты.

Выше уже говорилось о том, что только с помощью лазеров удалось реализовать новый метод получения изображений – голографию.

На монохроматическом когерентном лазерном пучке с помощью волоконной оптики может быть осуществлена кабельная, телефонная, вещательная и телевизионная связь. Высокая несущая частота (порядка 10^{13} – 10^{14} Гц) позволит по одному светопроводу передать до миллиарда музыкальных передач или до миллиона телевизионных передач.

В настоящее время ведутся серьезные исследования возможности осуществления лазерного термоядерного синтеза, лазерного разделения изотопов, использования лазерного облучения для стимуляции химических реакций и т. п. По мере совершенствования конструкций лазеров, использования различных активных сред – полупроводников, жидких красителей, новых сортов стекол и т. д. – возможности применения лазеров с различными свойствами будут все более расширяться.

С помощью лазерного излучения можно определять расстояние до движущихся объектов и скорость их движения по эффекту Доплера. Лазерная локация точнее радиолокации, поскольку световые волны значительно короче радиоволн.