

INTERACTION OF LASER RADIATION WITH ATOMS

B. A. ZON

The development of powerful sources of coherent monochromatic radiation such as lasers has stimulated investigations of new physical phenomena accompanying the interaction of powerful light beam with atoms. Some of these phenomena – multiphoton excitation and ionization, tunneling effect – are considered.

Создание мощных источников когерентного монохроматического излучения – лазеров послужило толчком к изучению физических явлений, возникающих при взаимодействии мощного светового пучка с атомами. Иллюстрацией могут служить такие явления, как многофотонное возбуждение и ионизация, а также туннельный эффект.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С АТОМАМИ

Б. А. ЗОН

Воронежский государственный университет

Создание оптических квантовых генераторов (лазеров) заслуженно считается одним из крупнейших достижений физики второй половины XX века. Это открытие привело к возникновению нового раздела технической физики – квантовой электроники. Поскольку лазерное излучение обладает уникальными свойствами, отличающими его от традиционных, классических источников света, возникла потребность в выяснении особенностей его взаимодействия с материальными объектами.

Известно, что простейшими такими объектами являются атомы, из которых построены все вещества. Поэтому понимание взаимодействия лазерного излучения с атомами, изложению которого посвящена статья, лежит в основе технических, биологических, медицинских и других применений лазеров.

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Частота и монохроматичность

Первый квантовый генератор был создан на пучке молекул аммиака и давал излучение в диапазоне миллиметровых длин волн. Это излучение относится к радиодиапазону, и соответствующие устройства были названы мазерами. Лазеры, излучающие в оптическом и близком к нему инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах, были созданы позже. Существуют разные виды лазеров, которые по частоте перекрывают весь оптический, а также ближние инфракрасный и ультрафиолетовый диапазоны. Имеются первые результаты по генерации излучения в мягкой рентгеновской области спектра (рентгеновские лазеры).

Для традиционных источников света, как естественных, например излучения Солнца или горящего костра, так и искусственных – электрических ламп накаливания или люминесцентных ламп, – характерен широкий спектр излучения. Свечение естественных источников и ламп накаливания определяется только температурой источника: чем температура выше, тем больше излучается энергии в коротковолновой области спектра и тем больше ширина этого спектра. Эти зависимости содержатся в знаменитой формуле Планка, описывающей излучение абсолютно черного тела, в которой впервые возникла постоянная, названная впоследствии постоянной Планка и определяющая масштаб квантовых свойств природы.

В отличие от таких источников лазерное излучение характеризуется очень узким спектром. Поэтому монохроматичность лазерного излучения, которая обусловлена целенаправленным использованием квантовых свойств света, является одним из его важнейших качеств. У современных твердотельных лазеров, работающих в импульсном режиме генерации, ширина спектра излучения составляет примерно 10 ГГц (это соответствует энергетической ширине спектра около 40 мкэВ), а специальные установки, используемые для получения стандартов длин волн оптического диапазона, обладают шириной спектра всего 10 Гц.

Мощность

Наряду с монохроматичностью лазерные источники света обладают очень большой мощностью. Достигается это тем, что энергия, накопленная в активной среде лазера в течение сравнительно длительного времени, затем быстро высвечивается. В результате мощность лазерного импульса возрастает на много порядков величины по сравнению с мощностью источников, используемых для накачки лазера. Кроме того, лазерное излучение вследствие его когерентности, о которой речь пойдет дальше, можно хорошо сфокусировать, так что поперечные размеры области фокусировки становятся сравнимы с длиной световой волны. При этом возрастает плотность световой энергии, а с ней и поток мощности. Можно считать освоенным диапазон потоков мощностей до 10^{19} Вт/см², поскольку соответствующие установки имеются во многих научных лабораториях. На стадии разработок или получения первых эксплуатационных результатов находятся лазерные установки с мощностью в 10^2 – 10^4 раз больше. Для того чтобы представить себе подобные величины, их часто сравнивают с мощностями крупных электростанций. Так, если всю мощность Красноярской ГЭС 6000 МВт пропустить через проводник с радиусом около 0,1 мкм, то как раз получается поток мощности в 10^{19} Вт/см².

Длительность лазерных импульсов

Так как большая мощность лазерных импульсов достигается в течение короткого времени, длительность каждого лазерного импульса также является очень важным параметром. Чем короче импульс, тем большее разрешение по времени можно получить при исследовании того или иного быстро протекающего физического, химического или биологического процесса. Получены лазерные импульсы длительностью в несколько десятков фемтосекунд ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$). Это означает, что в течение одного импульса успевают произойти всего около десятка электромагнитных колебаний световой волны.

Следует, однако, учесть, что при сокращении длительности лазерного импульса увеличивается ширина его спектра излучения, то есть ухудшается

монохроматичность. Согласно квантовомеханическому соотношению неопределенности, при длительности лазерного импульса τ энергетическая ширина спектра излучения не может быть меньше $h/(2\pi\tau)$, где h – постоянная Планка. Поэтому, например, при длительности импульса в 10 фс ширина спектра не может быть меньше 0,06 эВ.

Когерентность

Наконец, еще одним важным свойством лазерного излучения является его когерентность. Это означает, что все фотоны лазерного излучения находятся в одной и той же фазе в отличие, скажем, от фотонов, излучаемых тепловыми источниками. Там каждый атом или молекула излучают кванты света независимо друг от друга. В результате в общем световом потоке фазы фотонов распределены хаотически. В лазерном же источнике атомы или молекулы излучают кванты одновременно, поэтому их фазы совпадают. В этом смысле лазерное излучение похоже на излучение обычных радиостанций. Как известно, радиоизлучение создается классическими (не квантовыми) переменными токами или магнитными полями, поэтому радиоволна, содержащая огромное количество квантов, характеризуется тем не менее определенной фазой. В то же время радиоизлучение Солнца определенной фазой не обладает. По этой причине раздел физики, изучающий и использующий когерентность лазерного излучения, получил название квантовой радиофизики.

Одним из следствий когерентности является малая угловая расходимость лазерного излучения (у газовых лазеров, работающих в непрерывном режиме, менее 1 мрад). Другими словами, лазерный луч имеет практически строго цилиндрическую форму, что существенно упрощает его использование как в технике, так и в физических экспериментах.

Перейдем к описанию некоторых эффектов, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с атомами.

МНОГОФОТОННАЯ ИОНИЗАЦИЯ

История открытия

Ионизацию вещества под действием света называют фотоионизацией. Основные законы фотоионизации были выяснены на рубеже XIX и XX столетий. Фундаментальный вклад в экспериментальное изучение фотоэффекта (открытого Г. Герцем) внес известный физик А.Г. Столетов. Теоретическая интерпретация законов фотоэффекта дана А. Эйнштейном и наряду с открытиями Планка послужила основой для создания квантовой механики.

Основные законы фотоэффекта

1. Число электронов N , выбиваемых из вещества под действием света, пропорционально интенсивности светового потока I :

$$N \sim I. \quad (1)$$

2. Фотоэлектроны не образуются, если длина волны излучения больше некоторого критического значения (красной границы фотоэффекта), которое характерно для каждого конкретного вещества.

Наличие красной границы фотоэффекта означает, что вещество характеризуется некоторой минимальной энергией (потенциалом ионизации), которую необходимо затратить, чтобы вырвать из вещества один электрон. Энергия каждого фотона определяется его длиной волны λ с помощью формулы $E = hc/\lambda$, где c — скорость света. Отсюда видно, что если длина волны слишком велика, то энергии фотона может не хватить для выбивания электрона.

Из пропорциональности числа фотоэлектронов интенсивности светового потока следует, что фотоны “рождают” электроны независимо друг от друга.

Потенциалы ионизации разных веществ сильно различаются. Например, для оксида серебра он имеет величину около 1 эВ, а для платины — 5,32 эВ. Потенциалы ионизации атомарных газов превышают, как правило, потенциалы ионизации твердых тел. Максимальный потенциал ионизации у гелия (24,6 эВ), а минимальный (среди нерадиоактивных атомов) у атома цезия (3,89 эВ). Поэтому, казалось бы, оптическое излучение не может приводить к ионизации атомов.

Однако такой вывод следует из классических законов фотоэффекта. Если же оптическое излучение является достаточно сильным, то ионизация может произойти вследствие одновременного поглощения нескольких фотонов. Другими словами, большая мощность света отменяет закон о наличии красной границы фотоэффекта: ионизация может произойти под действием излучения с большой длиной волны, если мощность этого излучения достаточно велика. Данное явление получило название многофотонной ионизации. Теория его впервые была развита Л.В. Келдышем в 1964 году, а первое экспериментальное наблюдение осуществлено в 1965 году Г.С. Вороновым и Н.Б. Делоне в атомах благородных газов.

Поскольку при многофотонной ионизации для выбивания одного электрона требуется несколько квантов, фототок перестает линейно зависеть от интенсивности света. Таким образом отменяется и второй закон классического фотоэффекта.

Основные закономерности

В начале исследований многофотонной ионизации считалось, что зависимость фототока от интенсивности должна быть степенной:

$$N \sim I^q, \quad (2)$$

причем показатель степени q определяет минимальное число квантов, необходимых для ионизации. Нетрудно видеть, что формула (1) является частным случаем (2) для $q = 1$.

Эксперименты показали, что степенные зависимости (2) с одним и тем же значением q в сколь угодно заметном интервале изменения интенсивности практически не наблюдаются. Объяснение этого факта удалось получить приняв во внимание квантовомеханические законы поглощения атомом фотонов. Согласно квантовой механике, электроны в атомах могут находиться лишь в состояниях с некоторыми вполне определенными значениями энергии. Поэтому после поглощения первого фотона, энергия которого недостаточна для ионизации, атом не может ждать, когда к нему подлетит второй фотон, поскольку энергия состояния ожидания запрещена квантовой механикой. Тем не менее случайно (а из-за сложности атомных спектров такие случаи достаточно вероятны) может оказаться, что после поглощения какого-либо фотона энергия атома приблизится к разрешенному энергетическому состоянию.

А далее следует учесть, что энергетическое положение этого состояния само зависит от интенсивности лазерного излучения, поскольку интенсивность велика. Возникает явление, называемое динамическим эффектом Штарка и состоящее в изменении (физики говорят — возмущении) атомного спектра лазерным полем. В результате положения атомных уровней начинают меняться с изменением лазерной интенсивности и простая степенная зависимость (2) заменяется более сложными.

Прямая и резонансная ионизация

Выше уже говорилось, что в процессе поглощения фотонов один из них может подойти достаточно близко к разрешенному атомному состоянию. После создания лазеров с перестраиваемой частотой излучения такие ситуации стали создавать специально. В частности, удалось “организовать” многофотонное возбуждение высоколежащих атомных уровней.

В зависимости нелинейного фототока от частоты многофотонное возбуждение проявляется в виде резонанса. Поэтому многофотонную ионизацию с промежуточным возбуждением реальных атомных состояний называют резонансной, тогда как ионизацию с отсутствующими промежуточными резонансами называют прямой. Сказанное иллюстрирует рис. 1, на котором схематически изображены процессы прямой и резонансной многофотонной ионизации.

Многофотонное возбуждение оказалось очень полезным для атомной спектроскопии, поскольку удалось наблюдать много новых атомных состояний, которые для обычной, нелазерной спектроскопии были недоступными. Это обстоятельство

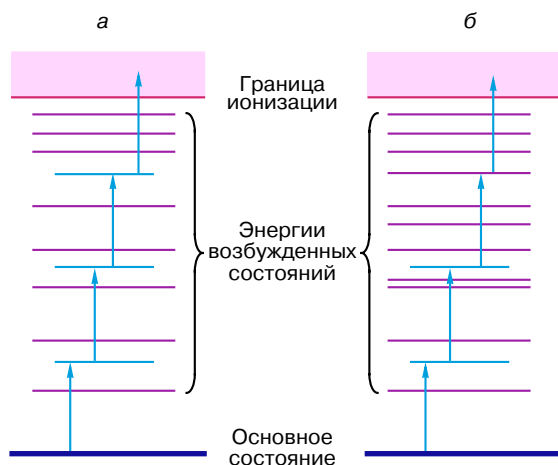


Рис. 1. Схемы прямой (а) и резонансной (б) 4-фотонной ионизации атома. Во втором случае при поглощении трех фотонов происходит трехфотонное возбуждение атома

привлекло к явлению многофотонного возбуждения и физиков, изучающих строение молекул, так как молекулярные спектры намного сложнее в сравнении с атомными. Сейчас многофотонная молекулярная спектроскопия является весьма бурно развивающимся разделом молекулярной физики.

Туннельный эффект в лазерном поле

Одно из принципиальных отличий многофотонной ионизации от однофотонной состоит в следующем. Поскольку энергия каждого светового кванта в многофотонном случае может быть очень мала, а следовательно, велик период световых колебаний, многофотонная ионизация должна в пределе переходить в случай ионизации атома в постоянном электрическом поле.

Как известно, полевая ионизация описывается квантовой механикой как туннелирование электрона под потенциальным барьером (аналогичным образом Г. Гамовым был описан ядерный α -распад, что явилось одним из триумфов квантовой механики в годы ее становления). Другими словами, ионизацию атома в постоянном поле можно рассматривать как многофотонное поглощение, когда энергия каждого отдельного фотона стремится к нулю, а число поглощенных фотонов становится бесконечным. Впервые туннельный эффект в переменном поле теоретически был описан в той же пионерской работе Л.В. Келдыша.

Очевидно, что при $q \rightarrow \infty$ формула (2) перестает быть справедливой. Вместо степенной в этом случае возникает экспоненциальная зависимость фототока от интенсивности

$$N \sim \exp \left[-\frac{8\pi}{3h} \sqrt{\frac{mcU^3}{2\pi e^2 I}} \right]. \quad (3)$$

В этой формуле m и e — масса и заряд электрона, а U — потенциал ионизации атома.

Условие возникновения туннельного эффекта в переменном поле можно качественно понять следующим образом (рис. 2). В силу когерентности лазерное излучение возможно представить как классическую электромагнитную волну, причем магнитной составляющей волны можно пренебречь¹. Тогда на атомный электрон действует электрическое поле, периодически изменяющееся во времени с частотой лазерного излучения. В случае, если электрон успеет протуннелировать из атомной потенциальной ямы глубиной U за один полупериод поля, он окажется ионизованным в соответствии с законами туннельного эффекта, описываемого формулой (3). В противном случае будет реализован, как говорят, многофотонный режим, который описывается формулой (2).

Предэкспоненциальный множитель в формуле (3) был рассчитан в работе А.М. Переломова, В.С. Попова и М.В. Терентьева и в окончательном виде получен в работе М.В. Аммосова, Н.Б. Делоне и В.П. Крайнова. Записанная таким образом формула (3) прекрасно согласуется с экспериментальными результатами по наблюдению туннельной ионизации атомов лазерным излучением, которые

¹ Магнитное поле действует на частицы с той же силой, что и электрическое, если частицы движутся с релятивистскими скоростями. Атомные же электроны, исключая самые глубокие оболочки в самых тяжелых атомах, являются нерелятивистскими.

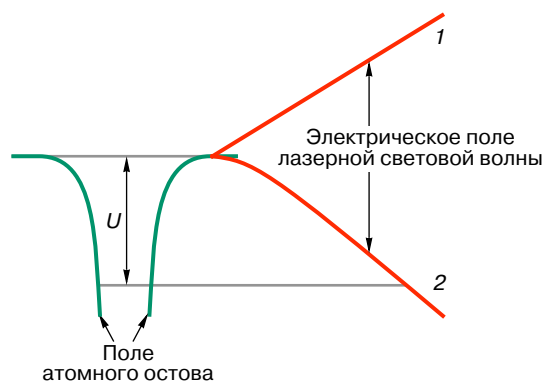


Рис. 2. Возникновение туннельного эффекта в переменном поле. За один полупериод поле в окрестности атома изменяется от кривой (1) до кривой (2). Если за это время электрон успеет «просочиться» через потенциальный барьер, образованный полем атомного остатка и лазерным полем, произойдет туннельный эффект; в противном случае реализуется многофотонный режим

впервые были получены канадским физиком Чинном (S. Chin), а позже наблюдались во многих лабораториях.

Современные проблемы

Многофотонная ионизация атомов продолжает активно изучаться и сейчас как экспериментально, так и теоретически. Поэтому представляется преждевременным излагать здесь другие, хоть и весьма интересные особенности этого явления. Тем не менее нельзя не назвать некоторые факты, обнаруженные сравнительно недавно и еще не получившие полного объяснения.

Оказалось, что наряду с отрывом одного электрона в лазерном поле от атома могут отрываться сразу несколько электронов, так что в результате образуются многозарядные ионы атомов. Впервые это явление наблюдалось И.П. Запесочным и В.В. Сураном на атомах щелочноземельных элементов. Сам по себе этот факт не был бы удивителен, если бы не одно обстоятельство — вероятность отрыва нескольких электронов весьма велика и иногда сравнима с вероятностью отрыва одного электрона.

При исследовании энергий ионизованных электронов было обнаружено, что они не всегда равны наименьшей энергии, необходимой для того, чтобы электрон покинул атом. Природа этого эффекта, получившего название надпороговой ионизации, также продолжает активно дискутироваться.

Следует отметить, что изучение явления многофотонной ионизации атомов привело к возникновению целого направления в физике — физики многофотонных процессов при взаимодействии лазерного излучения с веществом. Для более подробного оз-

накопления с некоторыми достижениями этого направления можно рекомендовать перечисленные ниже публикации.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Делоне Н.Б., Крайнов В.П. Основы нелинейной оптики атомарных газов. М.: Наука, 1986.
2. Рапопорт Л.П., Зон Б.А., Манаков Н.Л. Теория многофотонных процессов в атомах. М.: Энергоатомиздат, 1978.
3. Казанцев А.П., Сурдатович Г.И., Яковлев В.П. Механическое действие света на атомы. М.: Наука, 1991.
4. Балыкин В.И., Летохов В.С., Миногин В.Г. Охлаждение атомов давлением лазерного излучения // Успехи физ. наук. 1985. Т. 147. С. 117.
5. Делоне Н.Б., Зон Б.А., Федоров М.В. Поляризация ядер при резонансной ионизации атомов // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1979. Т. 76. С. 505.
6. Зон Б.А., Карпешин Ф.Ф. Ускорение распада ядра $^{235\text{m}}\text{U}$ в поле лазерного излучения // Там же. 1990. Т. 96. С. 401.
7. Делоне Н.Б. Многофотонные процессы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 3. С. 75–81.

* * *

Борис Абрамович Зон, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой математической физики Воронежского университета. Специалист в области атомной и молекулярной физики. Автор трех монографий и более чем 150 научных работ в отечественных и зарубежных журналах.