

О МЕХАНИЗМАХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ФОТОЭФФЕКТ

Для лучшего понимания механизма, управляющего фотоэффектом, т.е. пути, по которому энергия электромагнитного излучения передается вначале атомам вещества, а затем отдельным электронам, полезно обратиться к классической электронной теории дисперсии света. Данная теория, являющаяся естественным продолжением и успешным развитием электромагнитной теории Максвелла, была разработана в начале XX века Г.А. Лоренцем и к настоящему времени, испытав многократную проверку, получила достаточно полное подтверждение. Полезно отметить тот факт, что подавляющее большинство эффектов, связанных с взаимодействием излучения с веществом, могут быть объяснены не только качественно, но и прекрасно описаны данной теорией количественно. В качестве примера на рис. П.3.4 приведены наиболее характерные зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения от частоты вблизи резонансной частоты ω_0 , которые сравнительно легко и естественно получаются из классической электронной теории.

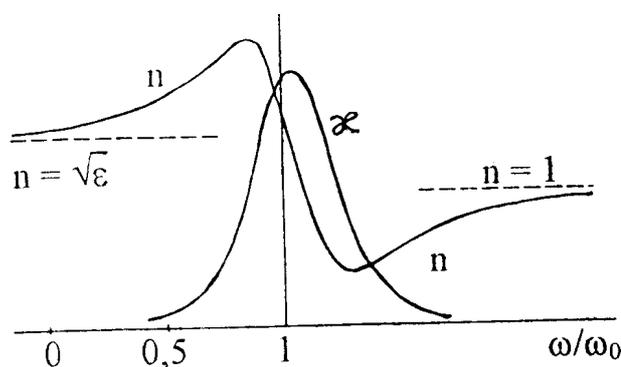


Рис. П.3.4. Типичный вид кривых для показателя преломления n и коэффициента поглощения α к согласно электронной теории дисперсии

Даже беглое знакомство с оптическими эффектами в веществе, достаточно хорошо объясненными классической электромагнитной теорией, заняло бы значительное время, поэтому для получения общего представления просто перечислим лишь некоторые из них. К этим эффектам можно отнести следующие: френелевское отражение света от поверхности тел с эффектами поляризации волн при различных углах падения; наличие угла Брюстера, при котором возможно достичь коэффициента отражения, равного нулю; поперечность электромагнитных волн; преломление света – закон Малюса и явление

дихроизма в анизотропных кристаллах; дисперсия комплексного показателя преломления и коэффициента отражения и их зависимость от угла падения света; наличие полного внутреннего отражения при выходе света из оптически более плотной среды в менее плотную; связь показателя преломления с диэлектрической проницаемостью вещества; вынужденная анизотропия в оптических средах – явление Керра и Погкельса; плеохроизм – зависимость поляризации света в кристаллах от частоты; поляризация света на упорядоченных длинных молекулах, поглощающих свет; сдвиг фазы волны при отражении от поверхности вещества и связанная с этим эллипсометрия; эффект Фарадея, т.е. вращение вектора поляризации света в оптически активных средах; эффект Коттон – Мутон в перпендикулярном магнитном поле; зеркальное отражение от металлов и других сред, обладающих высоким коэффициентом поглощения света; селективное отражение вблизи частот поглощения примесными центрами или остаточные лучи; наличие граничной плазменной частоты – красной границы поглощения света и фотоэффекта, ниже которой свет только отражается, а выше этой границы излучение проникает внутрь вещества, интенсивно поглощается, вызывая тем самым фотоэффект; резонансное поглощение света примесными центрами с узкими линиями поглощения и дисперсии волн, также обуславливающее фотоэффект; явления дифракции и интерференции волн; конечная длина когерентности обычного света и образование стоячих волн при отражении от зеркала; дифракция рентгеновских лучей в кристаллических решетках, закон Вульфа – Брэгга и эффект Лауэ; рэлеевское рассеяние света молекулами и на неоднородностях среды; рассеяние Рамана с изменением частоты света, колебательный и вращательный эффект Рамана; взаимодействие света с молекулами – закон Лорентц – Лоренца и явление Тиндаля; нелинейная оптика и эффект удвоения частоты в нелинейных средах; эффект Ми при рассеянии света на шариках; давление света и перенос энергии лучом; законы Кирхгофа для излучения и поглощения света нагретыми телами; закон Стефана – Больцмана для интегрального излучения абсолютно черного тела; закон Вина для спектральной плотности излучения абсолютно черного тела; голография и вся геометрическая оптика; дипольное излучение поперечных волн заряженными частицами; радиационная ширина линий излучения, доплеровское уширение линий и влияние столкновений между атомами и молекулами в газах; простой эффект Зеемана и т.д. И все это многократно проверено в рамках классической физики, начиная от рентгеновского диапазона для внутренних оболочек атомов до газов и ионосферы. Поэтому довольно трудно усомниться в справедливости или ограниченности электромагнитной теории Максвелла – Лоренца.

Тем не менее, часть явлений, связанных с взаимодействием света с атомами, молекулами и твердым телом не были достаточно поняты в рамках классической электромагнитной теории. В самом начале изучения этих явлений физики проявили растерянность перед подобными эффектами. Так, М. Борн пишет в конце 30-х годов [98]: “Электромагнитная теория света в состоянии объяснить в основном все явления, относящиеся к распространению света, но она отказывается служить в случае процессов испускания и поглощения света”. В итоге этого теория атомных спектров выделилась в отдельную физику, не только слабо связанную с классической электромагнитной теорией, но и очень часто в корне ей противоречащую, что хорошо просматривается в модели света в виде фотонов. Поскольку работа планетарных атомов была не понята в рамках электромагнитной теории Максвелла – Лоренца, да и всей классической физики, то и взаимодействие излучения с веществом остается до конца не ясным и до настоящего времени. По признанию М. Борна, “законченной квантовой теории электромагнитного поля в настоящее время еще нет... Перед физикой стоит трудная задача: создать квантовую теорию света или, более обще, электромагнитного поля, которая включала бы обе концепции”.

В современной физике был выбран путь абстрактного математического моделирования, которое не требовало более или менее полного объяснения и понимания сути явлений, не говоря уже о каких-то приемлемых механизмах этих явлений.

Попытаемся привести в соответствие сложные эффекты, связанные с взаимодействием света с веществом с классической электромагнитной теорией Максвелла – Лоренца и законами классической физики.

Согласно классической электронной теории дисперсия света обусловлена взаимодействием электромагнитных волн с заряженными частицами, входящими в состав атомов и вещества и совершающими вынужденные колебания в переменном электромагнитном поле. Так как в стационарном, т.е. невозбужденном состоянии, электроны в атомах не находятся в покое, а совершают периодические движения в кулоновском поле ядер, то свет фактически воздействует на движущиеся электроны, а не на осцилляторы, как это иногда приближенно принимается в качестве модели взаимодействия излучения с веществом.

Поглощение света в веществе происходит лишь вблизи резонансных линий, т.е. когда частота ω падающей волны совпадает с частотой ω_0 движения соответствующих электронов (рис. П.3.4). В видимом диапазоне в процессе поглощения участвуют лишь внешние электроны атомов или молекул, имеющие наименьшие средние частоты движения и наименьшую энергию связи.

Полезно проследить пути прохождения электромагнитной энергии в веществе при воздействии светового луча. Как уже было отмечено, прохождение света в веществе достаточно хорошо описывается классической электронной теорией. Часть энергии отражается от поверхности тела за счет френелевского отражения. Значительная доля может быть потеряна на джоулево тепло, особенно в металлах, а также на других различных каналах диссипации энергии, которая в конечном итоге уходит на разогрев вещества.

На резонансных частотах происходит накопление механической энергии в тех атомах вещества, в которых фаза орбитального движения электронов совпала с фазой падающей волны. И так как скорости орбитальных электронов в атомах достаточно велики, то поглощение света происходит очень интенсивно, поскольку мощность, развиваемая световой волной в поглощающем атоме, пропорциональна амплитуде световой волны и скорости электрона. В этом акте поглощения проявляется избирательность взаимодействия света с индивидуальными электронами атомов, что воспринимается в современной физике как попадание в атом фотона, поскольку именно за счет резонансного поглощения возможна концентрация значительной энергии в отдельных атомах.

Далее можно предположить, что происходит перераспределение электромагнитной энергии между электронными оболочками атомов в соответствии со статистическими закономерностями и, прежде всего, с законом сохранения полной энергии. При этом атомы, принимая избыток энергии, переходят в возбужденные состояния с изменением частоты движения орбитальных электронов на величину $\Delta\omega$, пропорциональную энергии возбуждения в соответствии с динамическим уравнением Шредингера (3.9). Распределение электронных оболочек атомов по энергиям определяется статистическими методами с использованием стационарного уравнения Шредингера (2.25). Решение данного уравнения показывает, что распределение электронов по энергиям в атомах является дискретным.

Теперь приобретенная энергия возбуждения в атомах вещества может либо излучиться в виде люминесценции, либо диссипировать на центрах тушения, либо конвертироваться в кинетическую энергию внешних электронов, находящихся по соседству с возбужденными атомами. Хорошо известно, что возбужденный атом, переходя в основное состояние, может передать избыточную электромагнитную энергию безызлучательным путем, т.е. непосредственно за счет ближних электромагнитных полей, соседним частицам. Здесь мы встречаемся с фактом перехода кулоновской энергии орбитального электрона атома в

кинетическую энергию внешнего электрона, который и воспринимается нами как выбитый из вещества фотоэлектрон.

Убедительным доказательством возможности безызлучательной передачи энергии от возбужденного атома электрону проводимости металла является опыт Лэмба и Ризерфорда по обнаружению и измерению лэмбовского сдвига уровней возбуждения в атоме водорода. Не останавливаясь на подробностях данного эксперимента, описанного в работе [99], отметим лишь его основное содержание.

Идея опыта Лэмба и Ризерфорда основана на том, что возбужденный уровень $2p_{1/2}$ в атоме водорода является нестабильным, а возбужденный уровень $2s_{1/2}$ – метастабильным. Время жизни на уровне $2s_{1/2}$ примерно в 10^8 раз больше, чем на уровне $2p_{1/2}$. Действительно, радиационный переход с уровня $2p_{1/2}$ на основной уровень $2s_{1/2}$ *разрешен правилами отбора* $\Delta l = \pm 1$. Переход же с уровня $2s_{1/2}$ на уровень $1s_{1/2}$ *запрещен*, поскольку при этом $\Delta l = 0$.

В опытах Лэмба и Ризерфорда молекулы водорода диссоциировали под действием высокой температуры. В результате получался пучок атомов водорода в основном состоянии $1s_{1/2}$, направляющийся на металлическую пластинку – мишень, соединенную с гальванометром. Если атомы пучка не были возбуждены, они не могли передавать энергию электронам проводимости мишени. Вырывания электронов из мишени не происходило, и гальванометр не обнаруживал электрического тока.

Но часть атомов (примерно одну стомиллионную) можно было перевести в возбужденные состояния $2s_{1/2}$ и $2p_{1/2}$, облучив пучок атомов ускоренными электронами. При этом возбуждение атомов водорода производится ударами электронов, так что правила отбора здесь не действуют. Энергия возбуждения составляет 10,2 эВ. Атомы в состоянии $2p_{1/2}$ до мишени не долетают, так как они практически мгновенно переходят в основное состояние $1s_{1/2}$. На мишень могут попасть из возбужденных атомов только метастабильные атомы в состоянии $2s_{1/2}$. Энергию возбуждения они при столкновениях с металлом передают свободным электронам, вырывая последние с поверхности мишени. Гальванометр начинает показывать ток, по величине которого можно судить о числе атомов в метастабильном состоянии $2s_{1/2}$, попадающих на мишень.

Если теперь на пути пучка атомов водорода включить переменное магнитное поле соответствующей частоты, то при резонансе, когда частота поля совпадет с разностной частотой движения электронов на уровнях $2s_{1/2}$ и $2p_{1/2}$, электроны с метастабильного уровня $2s_{1/2}$ начнут переходить на уровень $2p_{1/2}$ с последующим быстрым излучением электромагнитной энергии. Поэтому число возбужденных атомов в

состоянии $2s_{1/2}$, попадающих на мишень, начинает убывать. Вместе с тем начинает убывать и ток через гальванометр. По минимуму тока можно определить резонансную частоту поля, а с ней и разность уровней $2s_{1/2} - 2p_{1/2}$.

Этот опыт стал уже классическим, показывая, насколько глубоко мы проникли в механизмы атомных процессов. Кроме демонстрации безызлучательных процессов передачи энергии от возбужденных атомов свободным электронам, данный опыт служит в качестве проверки правильности существующих теорий.

Интересным примером служит также факт безызлучательной передачи энергии возбуждения от ядер к орбитальным электронам [100].

Возбужденное ядро может перейти в основное состояние не только за счет излучения электромагнитных волн, но и путем непосредственной передачи энергии возбуждения одному из электронов атомных оболочек (K -, L -, M -электрону и т.д.). Этот процесс, конкурирующий с γ -излучением, называется внутренней конверсией энергии, а электроны, получившие энергию, - электронами внутренней конверсии. Электроны внутренней конверсии являются моноэнергетичными, что и позволяет отличить их от электронов, испускаемых при β -распаде ядер, спектр которых непрерывен. Если энергия возбуждения ядра меньше энергии связи электрона в K -слое, что может иметь место для тяжелых ядер, то внутренняя конверсия может происходить на электронах других слоев.

Внутренняя конверсия сопровождается характеристическим рентгеновским излучением, которое возникает в результате переходов электрона с вышележащих электронных оболочек на место, освобожденное электроном внутренней конверсии. Этот процесс вполне аналогичен обычному возбуждению рентгеновского характеристического спектра атомов. В результате внутренней конверсии могут появиться и электроны Оже.

Если энергия E возбуждения ядра превышает удвоенную собственную энергию электрона или энергию связи электронно-позитронной пары, т.е.

$$E > 2mc^2 = 1,02 \text{ МэВ},$$

то может происходить процесс парной конверсии, при котором ядро теряет энергию возбуждения путем одновременного испускания электрона и позитрона. Такой процесс можно рассматривать как ионизацию эфира, содержащего электронно-позитронные пары в связанном состоянии. Однако вероятность парной конверсии не

превышает примерно тысячной доли вероятности испускания γ -излучения.

Следует также упомянуть и о том, что безызлучательные процессы передачи энергии довольно сильно развиты и внутри различных веществ: твердого тела, жидкости и в газах. Поэтому данные явления следует рассматривать как вполне естественные и хорошо изученные. И все они происходят не за счет излучения, а непосредственно за счет ближних электромагнитных полей атомов и ядер. В случае атомов и молекул это могут быть ван-дер-ваальсовы силы, в случае ядер - это ядерные электромагнитные поля, по своим свойствам напоминающие ван-дер-ваальсовы, поскольку и те и другие являются короткодействующими.

А теперь вернемся снова к фотоэффекту. Энергия атома в соответствии с решениями статистического уравнения Шредингера (2.25) изменяется дискретно по закону

$$\Delta E = h\Delta\nu, \quad (3.69)$$

где ΔE – расстояние между энергетическими уровнями орбитальных электронов, а $\Delta\nu$ - разность средних частот движения электронов на орбитах двух уровней, между которыми происходит излучение энергии. Данная энергия может быть передана безызлучательным путем непосредственно соседнему свободному электрону.

Таким образом, становится возможной концентрация достаточно большой энергии на отдельных слабо связанных электронах для преодоления последними работы выхода из вещества в вакуум. За счет наличия различных каналов диссипации энергии суммарная кинетическая энергия выбитых фотоэлектронов всегда меньше энергии падающего луча света.

Поглощение света может происходить как примесными атомами, так и самой кристаллической решеткой фотокатода. В первом случае мы имеем дело с сенсibilизированным фотоэффектом, который ярко показывает резонансный характер данного явления, во втором случае участвует так называемое фундаментальное или плазменное поглощение в веществе. Обычное вещество не принято называть плазмой, однако орбитальные электроны атомов решетки, участвующие в периодических движениях, расположены в веществе достаточно плотно и, играя роль сосредоточенной нагрузки для электромагнитных волн, интенсивно взаимодействуют с излучением на резонансных частотах как электронная плазма.

Плазменное поглощение волн характеризуется граничной частотой, называемой частотой Ленгмюра ω_l и равной

$$\omega_l = \sqrt{ne^2 / 4\pi\epsilon_0 m}, \quad (3.70)$$

где n – плотность оптических электронов, e и m – заряд и масса электрона.

Из волновой теории известно, что при частоте ниже плазменной волны поглощаться электронной плазмой не могут и практически полностью отражаются. На этом принципе работают различные зеркала с металлическими и другими покрытиями. При частоте волн выше плазменной начинается их проникновение в вещество с интенсивным поглощением электронами плазмы. Это поглощение так велико, что даже совершенно прозрачные в видимом диапазоне среды начинают поглощать свет как металлы. Именно этим обусловлена резкая длинноволновая или так называемая красная граница поглощения волн и, как следствие этого, красная граница фотоэффекта.

Поглощение света в металлах имеет свои особенности. В случае волн не слишком высокой частоты (радиоволны, инфракрасные лучи и видимый свет) источниками вторичных волн в металлах в основном являются электроны проводимости, плотность которых достаточно высока. Поэтому свет, интенсивно рассеиваясь на этих электронах, отражается от поверхности металла. При этом коэффициент отражения от чистых поверхностей металлов, обладающих хорошей проводимостью (натрий, серебро, алюминий, медь и т.д.), весьма близок к единице. Интенсивность волны, проходящей внутрь металла, невелика и быстро убывает до нуля в пределах тонкого поверхностного слоя вследствие потерь энергии на ленц-джоулеву теплоту. Кроме этого, волна быстро затухает благодаря плазменному отражению ниже критической частоты.

Характер отражения света от металлов достаточно хорошо описывается электромагнитной теорией Максвелла – Лоренца с использованием комплексного показателя преломления, что в равной степени применимо и к любым другим средам, поглощающим свет. Следует учесть, что картина взаимодействия света в металлах значительно усложняется по сравнению с диэлектриками из-за наличия свободных электронов, обуславливающих ленц-джоулевы потери.

При более высоких частотах, соответствующих ультрафиолетовому излучению, существенную роль играют вынужденные колебания связанных электронов в ионах кристаллической решетки, интенсивно поглощающих свет в области выше резонансной частоты. В данной области поведение и металлов, и диэлектриков примерно одинаковое.

Поэтому металлы в дальней ультрафиолетовой области могут стать почти прозрачными. Вполне естественно, что наиболее удобными материалами для изучения механизма фотоэффекта являются диэлектрики и полупроводники, у которых участие электронов проводимости во взаимодействии со светом является незначительным, поэтому другие резонансные эффекты проявляются более отчетливо.

Следует также упомянуть о том, что значительно более слабые эффекты поглощения света возникают при резонансе на разностных частотах движения орбитальных электронов или так называемых частотах биений электронной плотности.

Подводя итог рассмотренным эффектам, сопровождающим взаимодействие света с веществом, заметим, что если подавляющее большинство из них сравнительно легко рассчитывается с помощью электромагнитной теории Максвелла – Лоренца, то расчет эффективности передачи энергии от возбужденных атомов свободным электронам уже представляет значительные трудности, поскольку требует статистического анализа явлений в веществе с использованием уравнения Шредингера.