

Article

Раман-спектроскопия взаимодействия молекул (атомов) с поверхностью прозрачного твёрдого тела

М.А. Захидова^{1*} 

¹ Факультет Физики, Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкент, 100174, Узбекистан
mzakhidova@yahoo.com (М.З.)

* Correspondence: mzakhidova@yahoo.com; Tel.: +998 90 9167337 (М.З.)

Аннотация: Раман-спектроскопия - это мощный метод исследования взаимодействия атомов и молекул с поверхностью твердых материалов. Этот метод обеспечивает информацию о структуре, химической активности и физических свойствах поверхности на молекулярном уровне. В работе изучены спектральные свойства атомов ксенона на поверхности кварцевого стекла под действием монохроматического когерентного резонансного излучения. Приведены основные результаты экспериментального исследования процессов взаимодействия атомов ксенона с поверхностью прозрачного твёрдого тела методом раман-спектроскопии, которая позволяет нам буквально заглядывать в атомарное строение ксенона под воздействием лазерного излучения. Ксенон, будучи инертным газом, не проявляет себя в обычных условиях. Однако, при взаимодействии с лазерным излучением может возникать колебательные состояния атома ксенона, за счёт его взаимодействия со стенками пор. При этом за счёт взаимодействия адсорбата с поверхностью происходит характерные изменения его спектров. Значения частотных сдвигов стоксовой и антистоксовой полос в этом случае, менее 100 см⁻¹, свидетельствуют о незначительной силе такого взаимодействия и соответствующих изменениях адсорбционного потенциала атомов. Важность этих исследований заключается также и в том, что в них, используя фотостимулированное углубление потенциала адсорбированных атомов, определены молекулярные константы, которые отсутствуют в газовом состоянии того же ксенона.

Ключевые слова: межатомное взаимодействия, инертные газы, поляризационное взаимодействие с поверхностью, адсорбционный потенциал, лазерное излучение.

Raman spectroscopy of the interaction of molecules (atoms) with the surface of a transparent solid

Mavluda A.Zakhidova^{1*} 

¹ Faculty of Physics, Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, Tashkent, 100174, Uzbekistan
mzakhidova@yahoo.com (M.Z.)

Abstract:

Raman spectroscopy is a powerful method for studying the interaction of atoms and molecules with the surface of solid materials. This method provides information on the structure, chemical activity and physical properties of the surface at the molecular level. The paper studies the spectral properties of xenon atoms on the surface of quartz glass under the action of monochromatic coherent resonance radiation. The main results of an experimental study of the processes of interaction of xenon atoms with the surface of a transparent solid by the method of Raman spectroscopy are presented, which allows us to literally look into the atomic structure of xenon under the influence of laser radiation. Xenon, being an inert gas, does not manifest itself under normal conditions. However, when interacting with laser radiation, vibrational states of the xenon atom can occur due to its interaction with the pore walls. In this case, due to the interaction of the adsorbate with the surface, characteristic changes in its spectra occur. The values of the frequency shifts of

Цитирование: М.А. Захидова.

Раман-спектроскопия взаимодействия молекул (атомов) с поверхностью прозрачного твёрдого тела. 2024, 1, 1, 4.
<https://doi.org/>

Полученный: 10.11.2024

Исправленный: 18.11.2024

Принято: 25.11.2024

Опубликованный: 30.11.2024

Copyright: © 2024 by the authors.
Submitted to for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

the Stokes and anti-Stokes bands in this case, less than 100 cm⁻¹, indicate an insignificant force of such interaction and corresponding changes in the adsorption potential of atoms. The importance of these studies also lies in the fact that, using photostimulated deepening of the potential of adsorbed atoms, molecular constants were determined that are absent in the gas state of the same xenon.

Keywords: interatomic interactions, inert gases, polarization interactions with the surface, adsorption potential, laser radiation.

Введение

Взаимодействие отдельных атомов, молекул или других подобных им частиц с поверхностью твёрдого тела является важным фундаментальным физическим процессом, позволяющим создавать на этой основе новые, эффективные методы и технологии обработки поверхности, активации (или же подавления) поверхностных химических реакций, управления газовыми потоками и их разделения на различные компоненты. Эти методы могут быть основой для конструирования качественно нового класса высокоэффективных приборов и устройств в электронике, фотовольтаике, для химической промышленности, энергетики и др. В течение нескольких десятилетий исследования в данной области рассматриваются как приоритетные во многих направлениях физической электроники, материаловедения и др. [1].

Изучение физических свойств взаимодействия заряженных и ускоренных частиц с поверхностью твёрдого тела, в частности металлической, позволило выявить новые фундаментальные закономерности и разработать эффективные технологии для современной электроники, энергетики, машиностроения и др. [2].

В случае же незаряженных атомов и молекул, при отсутствии сильного кулоновского взаимодействия, возможные физические механизмы взаимодействия в такой системе неясны. Для объяснения возможности подобного взаимодействия электрически нейтральных частиц с поверхностью было выдвинуто множество подходов, одним из наиболее продвинутых из них является поляризационное взаимодействие [3]. В этом механизме, взаимный сдвиг электронной подсистемы и ядер молекул, приводящий к возникновению элементарного электрического диполя, обуславливает взаимодействие последнего с близкорасположенной поверхностью за счёт образования в последней «зеркального отображения» этого диполя. Следует отметить, что поляризационный механизм взаимодействия молекулы с поверхностью может иметь значительную силу, когда электронная подсистема и ядра поляризуемой молекулы могут претерпевать большие относительные сдвиги. Такого состояния можно добиться, например, при электронном возбуждении этих молекул путём облучения резонансным лазерным излучением. Причём, точно подбирая соответствующую длину волны лазерного излучения, можно вызвать сильное поляризационное взаимодействие молекул только определенного типа, например, состоящих из атомов определенного изотопа [4]. Уникальность лазерных методов заключается главным образом в том, что газовые (аргоновый и криптоновый и др.) лазеры со спектральной шириной генерации вплоть до десятков и сотен МГц и мощностью в несколько ватт служат наиболее подходящим монохроматическим источником для резонансного возбуждения атомов и молекул и изучения их взаимодействия с поверхностью твёрдого тела, когда соответствующие ширины полос поглощения крайне узкие. Поляризационное взаимодействие атомов инертного газа ксенона с поверхностью тонкого стеклянного капилляра, при облучении такой системы аргоновым лазером с длиной волны 488,0 нм [5], качественно усиливается именно благодаря такому резонансу. Особый физический интерес представляет, при этом, изучение РРР адсорбированных атомов, для которых в свободной газовой фазе такое рассеяние не наблюдается (нет колебательных состояний). Нами было экспериментально показано, что возникновение спектральных полос РРР атомов ксенона в этом случае обусловлено именно взаимодействием с поверхностью стекла.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали атомы ксенона вблизи поверхности пористого стекла. Для определения физических свойств пористого стекла, изучения взаимо-

действия атомов и молекул с поверхностью твёрдого тела при воздействии на них резонансного лазерного излучения применялась, для селективной регистрации потока резонансных газов, высокочувствительный квадрупольный масс-спектрометр КМ-2, спектры поглощения исследуемых объектов измерялись в видимой области спектра с помощью спектрофотометра UV-1280 UV-VIS (Shimadzu, Япония), а раман-спектры и спектры флуоресценции – с помощью спектрометра Renishaw Micro-Raman Spectrometer 2000 и спектрометр ДФС-24, при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 488 нм и 514 нм. Один из методов применённый нами в эксперименте, метод лазерной спектроскопии [6], предоставил возможность изучения взаимодействия атомов и молекул с поверхностью твёрдого тела в реальном времени с высокой временной разрешающей способностью. Эти методы позволяют наблюдать быстрые процессы и реакции, что особенно важно для понимания динамики взаимодействия. Под действием лазерного излучения взаимодействие молекул с поверхностью значительно изменяется, что может приводить к резкому изменению характера процессов адсорбции и диффузии молекул в мелкопористой среде. Следует отметить что, одним из ключевых подходов в этих исследованиях является возможность выбирать и манипулировать атомами и молекулами с разной степенью резонанса в поле лазерного излучения, который заключается в явлении резонансного поглощения, при котором атомы и молекулы могут поглощать фотоны лазерного излучения, если их энергия точно соответствует разнице в энергетических уровнях системы. Один из способов селекции резонансных атомов и молекул заключается в том, чтобы тщательно настроить частоту лазерного излучения. Это позволяет выбирать только те атомы и молекулы, для которых выполняется условие резонанса. Такой метод требует точной калибровки лазера и его частоты. Другой способ селекции состоит в использовании модуляции лазерного излучения. В этом методе лазерное излучение периодически включается и выключается, и только атомы и молекулы, способные реагировать на эту модуляцию (резонансные), могут быть обнаружены.

В качестве адсорбента в наших экспериментах использовались пластины из пористого стекла с губчатой структурой, технология изготовления которого была разработана ещё в конце прошлого века и до тех пор совершенствуется, применяется в диффузионных устройствах и в настоящее время всё большее находит применение в квантовой электронике [7]. Такой материал имеет огромную удельную поверхность - около 100 м²/г с объёмом пор около 0,18 см³/г, а радиус пор - порядка 10 нм. Пористые стекла могут быть получены в результате термической и химической обработки стекол особого состава. Для получения многоканальных фильтров из стекла, используют натриево-боросиликатные стекла состава (% мол.): 60–80% SiO₂; 20–35% B₂O₃; 4–12% Na₂O. При содержании в смеси оксида кремния менее чем 60 % в процессе кислотной обработки образуется порошок пористых стекол, при содержании SiO₂ в исходном составе менее чем 50–55 % при травлении происходит разрушения кремнеземного каркаса. Размеры пор контролируется изменением времени и температуры термообработки так как структура и диффузионные свойства таких пластин в значительной степени зависят от условий их термообработки, если обрабатывать исходный образец при 530°C в течение 70–72 часов, а затем при 465°C в течение 3–4 часов то получаем пористое стекло с диаметром пор до 10 нм [7].

Нами экспериментально наблюдалось рамановское рассеяние излучения аргонного лазера атомами ксенона, адсорбированного в мелкопористом стекле со средним диаметром пор 80 Å. Методика очистки образца пористого стекла и заполнения его ксеноном, экспериментальная установка по исследованию воздействия лазерного излучения на сорбцию атомов на поверхности твёрдого тела, подробно описаны в работе [8]. Спектр рассеяния чистого многоканального фильтра из кварцевого стекла, возбуждаемого излучением с длиной волны 514,5 нм, имеет слабую полосу в области 500 см⁻¹ и широкую простирающуюся до ИК-диапазона сильную полосу, с максимумом, расположенным на расстоянии 3000 см⁻¹ от возбуждающей линии (Рис. 1).

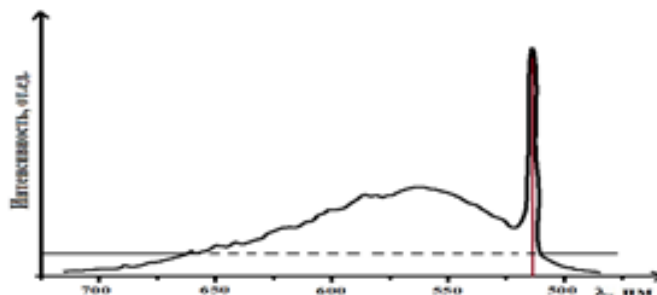


Рис. 1. Спектр рассеяния чистого многоканального фильтра из кварцевого стекла (длина волны возбуждения $\lambda = 514,5$

Fig.1. The scattering spectrum of a pure multichannel quartz glass filter (excitation wavelength $\lambda = 514.5$ nm

Из литературы [9] видно, что, полоса (рисунок- 1) на 500 см-1 соответствует рамановскому спектру кварцевого стекла, а полосе с максимумом на 3000см-1 связывают с наличием адсорбированных примесей в образце, интенсивность этого рассеяния увеличивается при долгом хранении образца на воздухе. Для уменьшения примесного рассеяния образец очищался кипячением его в азотной кислоте с добавлением перекиси водорода в соотношении 10:1. В спектре рассеяния наблюдались также несколько слабых рамановских линий, самые сильные из них лежат в области 440 см-1 и 488 см-1. Эти линии соответствуют движению в структуре кварцевого стекла S_i-O-S_i , но эти линии не мешали наблюдению спектра ксенона. Эксперименты с раман-спектроскопией на ксеноне позволяют точно определить энергетические уровни колебательных состояний молекул ксенона.

Излучение аргонового лазера ЛГ-68, с длиной волны 514,5 нм или криптонового лазера, с длиной волны 488,0 нм, падала на призму, а затем заводилась в кювету с многоканальным фильтром (пористое стекло). Образец освещался излучением мощностью несколько десятков милливатт и луч фокусировалось объективом с фокусным расстоянием 18 мм на торец образца. Во время записи спектра ксенон откачивали, что позволяла уменьшения поглощения рассеянного света. Перед установкой кюветы с многоканальным фильтром прогревалась до 1000С и откачивалась до вакуума ($2 \div 4$) 10^{-7} мм.рт.ст.

В эксперименте исследуемый образец размерами 4 x 4 x 10 мм³ помещался в вакуумную кювету, откачиваемую насосом НОРД-100. Откачка производилась при прогреве образца (1200С) в течении двух недель. Вакуум в кювете с образцом до заполнения ксеноном составлял ($2 \div 4$) 10^{-7} мм.рт.ст. Заполнение образца спектрально чистым ксеноном осуществлялось при давлении 600 мм.рт.ст. После выдерживания в течении длительного времени (12 часов), необходимого для насыщения образца ксеноном, наблюдались интенсивные полосы рассеяния, отсутствующие в чистом образце. При последующей длительной откачке и повторном заполнении ксеноном, эти полосы, соответственно, исчезали и полностью восстанавливались. Их интенсивность линейно зависела от мощности монохроматического когерентного излучения в пределах от 0,1 $\div$ 0,2 Вт и составляет одну миллионную долю от интенсивности рассеяния на частоте лазера. При облучении образца излучением на длинах волн 488,0 нм, 496,6 нм и 514,5 нм наблюдаемые спектры рассеяния света были идентичны.

Результаты

В изучении поведения атомов и молекул в различных физико-химических условиях ключевое значение имеет учёт межатомного взаимодействия. Количественной мерой межатомного взаимодействия служит энергия взаимодействия атомов. Эта энергия зависит от множества факторов, включая расстояние между атомами, их электронные оболочки и заряд ядра атома. Значение этой энергии может варьироваться в очень широком диапазоне, что обуславливает протекание различных химических реакций и физических явлений в разных условиях и при высоких или низких энергиях.

Наиболее яркими примерами влияния энергии межатомного взаимодействия являются образование гомоядерных двухатомных молекул и существование благородных газов в разных агрегатных состояниях. При высоких значениях энергии межатомного взаимодействия происходит образование гомоядерных двухатомных молекул. Это означает, что два атома одного и

того же элемента объединяются в молекулу. Этот процесс может происходить в различных условиях, включая высокие температуры и давления. Примером таких молекул может служить молекула кислорода (O_2), где два атома кислорода объединяются в одну молекулу, образуя кислородный газ, необходимый для жизни на Земле. В этих случаях, атомы образуют сильные химические связи, что приводит к образованию структур с уникальными свойствами.

Однако при низких значениях энергии межатомного взаимодействия атомы сохраняют свою индивидуальность. Это наблюдается, например, в случае благородных газов, таких как гелий, неон, аргон, криптон, ксенон и радон, которые при нормальных условиях существуют как моноатомные молекулы. Тем не менее, межатомное взаимодействие внутри этих газов обуславливает возможность существования разных агрегатных состояний. Гелий, например, при низких температурах образует жидкий и даже твёрдый вид, что является результатом сил, притягивающих атомы гелия друг к другу.

Эти газы известны своей стабильностью и инертностью, что делает их полезными в различных приложениях, например, в газоразрядных лампах.

Чтобы понять, как возникает межатомное притяжение, следует обратиться к Фрицу Лондону [10], который в 1930 году представил теорию межатомного взаимодействия. Согласно этой теории, межатомное притяжение обусловлено флуктуациями электрических зарядов в двух атомах, находящихся близко друг от друга. Каждый атом обладает мгновенным электрическим дипольным моментом, который отличен от нуля. Эти мгновенные диполи приводят к образованию противоположно направленных диполей в соседних атомах, и эти диполи притягиваются друг к другу, создавая силы притяжения, которые являются основой межатомного взаимодействия [11] и поляризационного механизма взаимодействия молекул, адсорбированных на поверхности прозрачного твердого тела.

При исследовании взаимодействия атомов и молекул с поверхностью важное значение имеет понимание межатомного взаимодействия и его влияния на различные системы. Одной из важных направлений исследований в этом контексте задача учёта межатомного взаимодействия при взаимодействии инертных газов с поверхностью твёрдого тела при облучении лазерным излучением. Лазеры предоставляют высокоинтенсивное и монохроматическое излучение, с помощью которого можно контролировать и измерять различные параметры в системах в режиме реального времени. Лазерная спектроскопия стала неотъемлемой частью исследований в области межатомного взаимодействия на поверхности. Спектроскопические методы позволяют анализировать изменения в спектре поглощения и рассеяния света в условиях взаимодействия инертных газов с поверхностью. Такие изменения связаны с различными физико-химическими процессами, происходящими на поверхности.

Ксенон, инертный газ, долгое время привлекает внимание исследователей своими уникальными химическими и физическими свойствами. У ксенона предельно упрощенная схема электронной конфигурации — $4d^{10}5s^25p^6$, плотность ксенона 5.851 кг/м^3 , атомный радиус 0.124 нм , атомный объём $37.3 \text{ см}^3/\text{моль}$, период полураспада изотопа 11.84 суток . Благородный газ ксенон не очень химически активен, так как его валентная оболочка содержит полный набор спаренных электронов, что автоматически делает невозможным образование новых пар, поэтому он не обладает электроотрицательностью, стабилен и не притягивает внешние электроны [12].

Одним из мощных методов изучения этого элемента является раман-спектроскопия, которая позволяет нам буквально заглядывать в атомарное строение ксенона под воздействием лазерного излучения. Ксенон, будучи инертным газом, не проявляет себя в обычных условиях. Однако, при взаимодействии с лазерным излучением может наблюдаться его рассеяние атомами ксенона на поверхности твёрдого тела, когда можно получить информацию о колебательных состояниях связанного с поверхностью атома ксенона [4]. Адсорбционный потенциал - это энергетический барьер, который атомы (молекулы) должны преодолеть, чтобы адсорбироваться на поверхности твердого тела. Воздействие лазерного излучения может изменить этот потенциал, делая адсорбцию более или менее вероятной. Этот процесс может быть объяснен следующими механизмами:

- ионизация адсорбированных атомов: лазерное излучение может ионизировать адсорбированные атомы, изменяя их заряд и, следовательно, их взаимодействие с поверхностью;

- образование активных радикалов: лазер может спровоцировать образование активных радикалов на поверхности, которые могут реагировать с адсорбентами и образовывать новые химические связи;

- лазерное нагревание поверхности: лазерное излучение может нагревать поверхность, что изменяет адсорбционный потенциал путем изменения физических свойств поверхности.

При физической адсорбции атомы и молекулы, находящиеся на поверхности, совершают колебания в адсорбционном потенциале. Наблюдение этих колебаний важно для изучения адсорбционного взаимодействия. Обычно, относительная плотность адсорбированных частиц бывает достаточно малой, что затрудняет их наблюдение в эксперименте. Однако, применение мелкопористых структур с сильно развитой поверхностью резко увеличивает число адсорбированных частиц в единице объема. Если, к тому же, эти структуры прозрачны для возбуждающего лазерного излучения, то возможно применение оптических методов исследования во всем объеме адсорбента. При этом для исследования колебательного движения непосредственно в адсорбционном потенциале желательно исключить влияние внутренних колебаний адсорбируемой частицы, значительно усложняющих наблюдаемые спектры. Поэтому, особый интерес представляет наблюдение спектров рамановского рассеяния адсорбированных атомов инертных газов. Даже при больших концентрациях атомов этих газов в объеме пор, в рамановском рассеянии лазерного излучения принимают участие лишь те атомы, которые непосредственно испытывают взаимодействие с поверхностью пор.

Нами экспериментально обнаружено рамановское рассеяние излучения аргонного лазера с длиной волны 488,0 нм атомами ксенона, адсорбированного в мелкопористом монодисперсном стекле. На рис. 2 приведены спектры рамановского рассеяния, со стоксовой и антистоксовой компонентами атомов ксенона на поверхности стекла.

Интересно, что антистоксовая компонента в $10 \div 11$ раз интенсивнее стоксовой компоненты (Рис. 2, кривая- а). При длительном воздействии света на один и тот же участок образца интенсивность антистоксовой компоненты уменьшалась и могла стать меньше стоксовой компоненты (Рис. 2, кривая- б). При смещении лазерного луча на новый участок образца первоначальное соотношение интенсивностей стоксовой и антистоксовой компонент восстанавливаются.

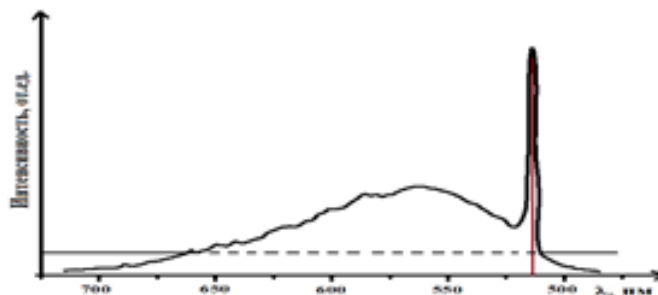


Рис. 2. Спектры рамановского рассеяния атомами ксенона, адсорбированными в пористом стекле (длина волны излучения 488 нм). Спектр -а – спектр рассеяния после 10 часов, б – после 20 часов и в - после 30 часов облучения.

Fig.2. The Raman scattering spectra of xenon atoms adsorbed in porous glass (radiation wavelength 488 nm). Spectrum (a) — scattering spectrum after 10 hours, (b) — after 20 hours, and (c) — after 30 hours of irradiation.

Наблюдаемые полосы могут интерпретироваться как проявление переходов между различными колебательными состояниями атомов ксенона в адсорбционном потенциале. В предположении, что поле адсорбционных сил характеризуется потенциалом Морзе, полученные спектры позволяют определить параметры колебательного движения. В нашем случае можно определить, что величина ангармонизма, $x_e \omega_e = 2.7 \text{ см}^{-1}$, глубина адсорбционного потенциала $D_0 = 1900 \text{ см}^{-1}$, характерный размер потенциала $l = 0.22 \text{ Å}$, основная частота колебания $\omega_0 = 143.5 \text{ см}^{-1}$. Последняя определена с точностью до одной - двух величин ангармонизма в связи с трудностью в установлении начала колебательной полосы, соответствующего переходу $1 \rightarrow 0$. Первый обертоп антистоксовой колебательной полосы наблюдается в

частотном интервале $200 \div 300 \text{ см}^{-1}$ (Рис. 2, кривая- а). Колебательная структура стоксовой полосы выражено слабо. Большая интенсивность антистоксовой полосы по отношению к стоксовой требует особого рассмотрения и анализа. Это же касается медленного выравнивания интенсивностей стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния при длительном лазерном воздействии.

Электронно-колебательное взаимодействие системы «атом ксенона + поверхность стекла» наряду с низкоэнергетическими компонентами вызывает также и компоненты более высоких энергий. На рис. 3, представлены спектры рамановского рассеяния атомами ксенона в мелкопористом стекле в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм.

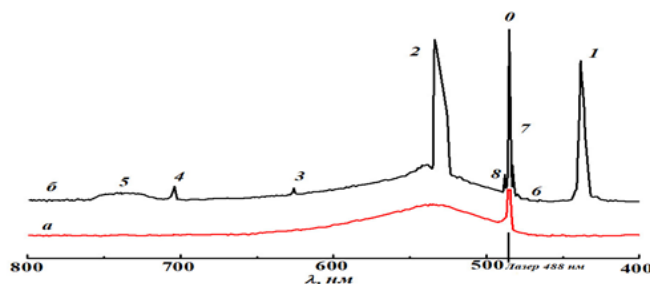


Рис. 3. Обзорный спектр рамановского рассеяния многоканального фильтра из кварцевого стекла (а) и ксенона, адсорбированного в нём (б) (длина волны лазерного излучения 488,0 нм).

Fig.3. Overview Raman scattering spectrum of a multi-channel filter made from quartz glass (a) and xenon adsorbed within it (b) (laser radiation wavelength 488.0 nm).

Кривая- а на рисунке 3 – спектр рассеяния пористого стекла до заполнения его ксеноном. Широкая полоса в области $500 \div 600 \text{ нм}$ вызвана люминесценцией самой матрицы [13]. После заполнения пористого образца ксеноном наблюдаются интенсивные полосы рамановского рассеяния адсорбированного ксенона (лежащие вне области появления полос рамановского рассеяния стекла, (Рис. 3-б). Интенсивности сильных полос рамановского рассеяния линейно зависят от интенсивности лазерного облучения в диапазоне $10 \div 200 \text{ мВт}$ и составляют приблизительно 10^{-6} от интенсивности рассеяния на частоте возбуждения.

Пики 7 и 8 (см. Рис. 3) лежат в диапазоне $80 \div 100 \text{ см}^{-1}$ и представляют антисоксову и стоксову компоненты рамановского рассеяния на колебаниях атомов ксенона в яме адсорбционного потенциала, а пик 6 соответствует антистоксовому обертому этих колебаний. Нами также наблюдался стоксовый обертом. Интенсивность этих пиков при облучении излучением 514,5 нм в два раза больше, чем при облучении светом 488,0 нм такой же мощности, интенсивность $1 \div 5$ полос – в три раза отличается.

Полосы $1 \div 5$ имеют сложную структуру (на Рис. 4 представлены спектры полос $1 \div 4$, измеренные при малых скоростях сканирования), однако спектры обладают отдельными характерными деталями: четкие максимумы, резкие границы.

Естественно предположить, что широкие полосы 1 и 2 представляют собой наложение отдельных более узких полос, и произвести идентификацию граничных полос.

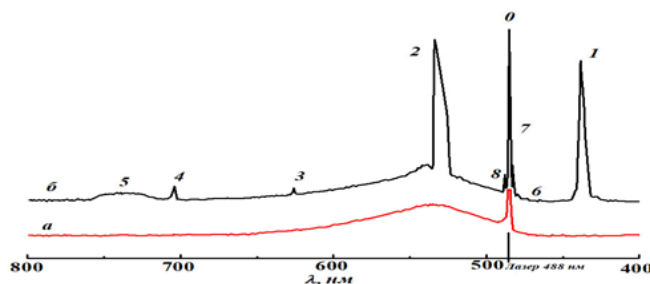


Рис. 4. Спектр рамановского рассеяния адсорбированного ксенона. (длина волны лазера - 488,0 нм, номера полос соответствуют проставленным на обзорном спектре рис. 3.

Fig.4. Raman scattering spectrum of adsorbed xenon (laser wavelength 488.0 nm). The band numbers correspond to those marked on the overview spectrum in Fig. 3.

Многие переходы ложатся внутри широких полос 1 и 2, а также на их хвосты, но они плохо спектрально разрешены. С уверенностью можно утверждать, что наблюдаемый спектр рассеяния является спектром рамановского рассеяния на электронно-колебательных переходах адсорбированных атомов ксенона.

Сравнение экспериментальных частот максимумов и границ полос с табличными данными спектральных линий [14] с хорошей точностью совпадают с частотами переходов между возбужденными уровнями атомов ксенона. Эти переходы следующие:

$$\begin{aligned} 5d [3/2]_2^o &\rightarrow 6p [5/2]_2 & (2203.4 \text{ см}^{-1}) \\ 6p [3/2]_2 &\rightarrow 6s' [1/2]_1^o & (2030.5 \text{ см}^{-1}) \\ 6p [5/2]_2 &\rightarrow 5d [1/2]_1^o & (1864.3 \text{ см}^{-1}) \\ 6s' [1/2]_1^o &\rightarrow 6p [5/2]_2 & (1923.5 \text{ см}^{-1}) \\ 8p [3/2]_2 &\rightarrow 8s [3/2]_2^o & (1566.4 \text{ см}^{-1}) \\ 7p [1/2]_1 &\rightarrow 8p [1/2]_0 & (4629.4 \text{ см}^{-1}) \\ 7p [1/2]_1 &\rightarrow 9p [1/2]_0 & (6360.3 \text{ см}^{-1}) \end{aligned}$$

Отметим некоторые особенности наблюдаемого рассеяния. Переходы при таком рассеянии происходят среди нижних возбужденных уровней ксенона, отстоящих, однако, на большом расстоянии от основного (~ 10 эВ). Так, переходы с уровней $6s'$, $6p[1/2]_1$, $6p[5/2]_2$ при облучении излучением 514.5 нм и с $6s'$, $6p[1/2]_1$ при облучении излучением 488.0 нм могут происходить через возбуждение высоких предионизационных уровней, а переходы с более высоких уровней — через ионизацию (порог ионизации ксенона 97834.4 см^{-1}). Переходы, наблюдаемые в антистоксе, отсутствуют в стоксе и наоборот, т.е. переход между двумя уровнями если существует, то только в одну сторону. При длительном воздействии лазерного излучения в одно и то же место образца интенсивность антистоксовых полос уменьшается, но при смещении излучения на новый участок образца вид спектра рассеяния восстанавливается.

Обсуждение:

Рамановские переходы в адсорбированном ксеноне не могут быть объяснены многофотонным поглощением, так как интенсивность лазерного излучения была достаточно малой ($< 100 \text{ Вт/см}^2$), уровни резонансные излучению с длиной волны 514.5 нм в ксеноне отсутствуют. Существует лишь один уровень $5d[5/2]_2^o$ (81929.1 см^{-1}) ближайший по энергии к четырём квантам излучения 488.0 нм (81969 см^{-1}), который, однако, никак не проявляется при рамановском рассеянии, переходы с него отсутствуют. Кроме того, на отсутствие резонансов указывает аналогичность спектров рамановского рассеяния света разных частот.

Следует предположить, что атомы адсорбированного ксенона находятся в возбужденном состоянии или приобретают энергию в момент адсорбции. Причем распределение возбуждения по электронным уровням неравновесное, существует инверсия в заселении отдельных уровней. Интересно, что самый большой пик в антистоксовой компоненте соответствует переходу, на котором получена интенсивная генерация в гелий-ксеноновом лазере. Воздействие лазерного излучения приводит к перегреву предельно адсорбированных атомов ксенона по энергетическим уровням. Изучение механизма возбуждения ксенона на поверхности требует проведения детального исследования адсорбции инертных газов.

Полученные результаты существенны для понимания гетерофазных процессов, происходящих в мелких порах. Они показывают, что поверхность пор покрыта тонким слоем физически адсорбированных атомов ксенона. Спектры резонансного рамановского рассеяния показывают, что атомы находящиеся на поверхности этого слоя совершают колебательное движение как целое. Движение атома в последних слоях схоже с атомами в газовой фазе, их движение в порах происходит по слою адсорбата.

Обзор исследований спектральных свойств двухатомных молекул на поверхности прозрачных пористых тел, а также RF, RI и PPP молекулярных брома, SF_6 и других галогенов [15] показал, что при адсорбции, молекулы могут изменять свою конформацию или взаимодействовать с атомами поверхности, что также может отразиться в раман-спектре. Кроме того, изменения в раман-спектре могут свидетельствовать о химической реактивности поверхности. Для объяснения физических процессов взаимодействие между незаряженными молекулами

(атомами) и поверхностью прозрачного твёрдого тела при воздействии лазерного излучения в работе [16] был предложен поляризационный механизм. Этот механизм учитывает взаимодействие молекул с возбуждённым электромагнитным полем лазерного излучения и его влияние на дипольные моменты молекул. Поляризационный механизм может быть особенно важным в случае резонансного воздействия лазерного излучения. Этот механизм подразумевает возможность коллективного взаимодействия молекул с лазерным излучением вблизи прозрачной поверхности.

Поляризационный механизм фосфоресцирующих и фотофлуидных был всесторонне проанализирован в работе [16] для объяснения экспериментов по проникновению молекул брома в пористое стекло и пластмассы, и их повторное действие на резонансное рамановское рассеяние для анализа взаимодействий излучения с веществом в гетерогенных средах, а также, возможно, при рассмотрении процессов дипольной эмиссии при взаимодействии между соседними молекулами и молекулами-адсорбентами. Эти процессы были предсказаны около поверхности под влиянием монохроматического когерентного излучения, носят общий характер взаимодействия в небольшом диапазоне длин волн при использовании большого класса мелкозернистых пор.

Убедительным свидетельством увеличения адсорбционного потенциала молекул под действием резонансного поля явились эксперименты по осаждению молекул брома на поверхность кварцевого стекла, облучаемого излучением аргонового лазера с длиной волны 514.5 нм [17]

Таким образом, сравнение наших экспериментов с выше указанными исследованиями доказывает поляризационный характер взаимодействия атомов ксенона с поверхностью стекла при их облучении резонансным лазерным излучением с длиной волны 488 нм. При этом рамановское рассеяние на колебаниях атомов ксенона, адсорбированных на поверхности, обуславливается исключительно электронно-колебательными переходами.

Заключение

Инертные газы, такие как аргон, ксенон и неон, традиционно рассматриваются как химически пассивные. Однако, при высоких энергиях лазерного излучения и изменении адсорбционного потенциала, они могут образовывать связи с поверхностью твёрдого тела. Этот процесс может привести к образованию структурных комплексов между инертными газами и поверхностью, что может иметь следующие практические применения:

- **Катализ:** образование молекулярных связей инертных газов на поверхности твёрдого тела, что может привести к созданию эффективных катализаторов для химических реакций, которые ранее не исследовались традиционными методами;
- **Хранение газов:** инертные или опасные газы, такие как водород, могут храниться и транспортироваться путем удержания вблизи поверхности.

Ксенон применяется в медицине в качестве ксенонового анестетика. Эти анестетики обеспечивают безопасность и эффективность при проведении медицинских процедур, минимизируя нежелательные побочные эффекты, так как ксенон не вступает в химическую реакцию с окружающей средой. Однако под действием резонансного излучения ксенон может образовывать молекулярную связь с атомами (молекулами) поверхности твёрдого тела, что делает его весьма интересным объектом исследования.

Изменение адсорбционного потенциала под воздействием лазерного излучения и образование связей между атомами ксенона и поверхностью твёрдого тела — это увлекательное исследовательское направление, которое имеет фундаментальное значение и обширные практические применения. Кроме того, спектроскопические исследования межатомного взаимодействия при взаимодействии инертных газов с поверхностью имеют широкий спектр приложений. Они могут быть использованы для разработки новых материалов, катализаторов, сенсоров и технологий поверхностной обработки. Это также имеет значение в области астрофизики и плазменных исследований.

Вклад авторов.

Статью подготовил сам автор.

Authors' contribution.

The article was prepared by the author himself

Источник финансирования.

Работа выполнена в рамках плана научных работ Физического факультета Национального Университета Узбекистана, а также в рамках исследований проекта Отдела теплофизики (в последующем Института ионно-плазменных и лазерных технологий Академия наук республики узбекистан.

Funding source.

The work was carried out within the framework of the scientific work plan of the Physics Department of the National University of Uzbekistan, as well as within the framework of the research project of the Department of Thermal Physics (later the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

Соответствие принципам этики.

Это исследование не требовало этического одобрения.

Ethics approval.

This study did not require ethical approval.

Информированное согласие на публикацию.

В этом исследовании не участвовали другие исследователи.

Consent for publication.

This study did not involve humans.

Заявление о доступности данных

Данные, поддерживающие представленные результаты, которые были проанализированы в ходе исследования можно найти по ссылкам следующих работ: Бразовская Н.В., Бразовский В.Е., Шальнев А.А. Диффузия молекул через поры под действием лазерного излучения // Горизонты образования 2005. № 7, СС.1-9.

Chang H. and Chen S. Photodissociation of Br₂ and the Electronic Raman Spectra of Br under Argon Ion Laser Light // Journal of Raman Spectroscopy. 1986. Vol. 17. PP. 453-458.

Карлов Н.В., Орлов А.Н., Петров Р.П., Якубова М.А. Резонансная флуоресценция брома и комбинационное рассеяние лазерного излучения бромом в мелких порах // Квантовая электроника. 1981. Т. 8, Вып. 5. СС. 1061-1068.

Data Availability Statement

The data supporting the presented results, which were analyzed during the study, can be found in the following references: Brazovskaya N.V., Brazovsky V.E., Shalnev A.A. Diffusion of molecules through pores under the action of laser radiation // Horizons of formation 2005. № 7, СС.1-9.

Chang H. and Chen S. Photodissociation of Br₂ and the Electronic Raman Spectra of Br under Argon Ion Laser Light // Journal of Raman Spectroscopy. 1986. Vol. 17. PP. 453-458.

Karlov N.V., Orlov A.N., Petrov R.P., Yakubova M.A. Resonance fluorescence of bromine and Raman scattering of laser radiation by bromine in small pores // Quantum Electronics. 1981. Vol. 8, Issue 5. СС. 1061-1068.

Благодарности

Хочу выразить благодарность сотрудникам лаборатории «Физика конденсированных сред» института «Ионно-плазменных и лазерных технологий» АН Республики Узбекистан за оказание поддержки при проведении экспериментов по данной тематике. Особо хочу поблагодарит сотрудников лаборатории В.Кувондикова, А.Сапарбоева и Э.А. Захидова.

Acknowledgments

I would like to express my gratitude to the staff of the laboratory "Physics of Condensed Matter" of the Institute of "Ion-Plasma and Laser Technologies" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan for providing support in conducting experiments on this topic. I would especially like to thank the laboratory staff V. Kuvondikov, A. Saparboev and E.A. Zakhidov.

Конфликт интересов

Автор заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflicts of interest.

Сокращения

PPP Резонансное Рамановское рассеяние

ИК Инфракрасное излучение

Литература

- [1] Bortolani V., March N.H., Tosi M.P., Interaction of atoms and molecules with solid surfaces, Springer Science and Business Media, 2013, 665.
- [2] Rasulov U.Kh., Interaction of polyatomic particles with surfaces, Selected Works, , 2011, 642, In Russian: Расулов У.Х. Взаимодействие многоатомных частиц с поверхностью. Избранные труды. Ташкент, 2011. 642 с.
- [3] Orlov A.N., Petrov R.P., Petrov Yu.N., The effect of laser radiation on the adsorption of molecules in a microporous filter, Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1983, 53, 883–887, In Russian: Орлов А.Н., Петров Р.П., Петров Ю.Н. Воздействие лазерного излучения на сорбцию молекул в мелкопористом фильтре. ЖЭТФ. 1983. Вып. 53. СС. 883-887.
- [4] Zakhidova M.A., Laser-induced spectroscopy of adsorbed atoms and molecules near the surface, Uzbek Journal of Physics, 2009, 04, 279–289, In Russian: Захидова М.А. Спектроскопия адсорбированных атомов и молекул вблизи поверхности, индуцированная лазерным излучением. Узбекский физический журнал. 2009. №4. СС. 279-289.
- [5] Zakhidova M.A., Laser-induced spectroscopy of energy changes of atoms and molecules near the surface, UzMU Khabarlar, 2009, 02, 134–140, In Russian: Захидова М.А. Спектроскопия изменений энергии атомов и молекул вблизи поверхности, индуцированная лазерным излучением. УзМУ хабарлари. 2009. №2. СС.134-140.
- [6] Demtroeder W., Sobelman I.I., Maslov A.I., Yukov E.A., Modern Laser Spectroscopy, Intellekt, , 2014, 1073, In Russian: Демтредер В. Современная лазерная спектроскопия. Перевод Маслова А.И. и Юкова Е.А., под ред. Собельмана И.И. Интеллект, Россия. 2014. 1073 с.
- [7] Evstrapov A., Antropova T.V., Jastrebov S.G., Drozdova I.A., Study of porous glasses by photometry methods, SPIE/Poland Chapter. Optica Applicata, 2003, 33, 01, 4554–4559.
- [8] Zakhidova M.A., Giyasova Z.R., Resonant selective heterogeneous processes in a laser field, Academic Research in Educational Sciences. CSPI Conference III, 2021, 2, 673–678, Google Scholar Scientific Library. Available at: www.ares.uz.
- [9] Olenych I.B., Monastyrskii L.S., Aksimentyeva O.I., Sokolovskii B.S., Effect of bromine adsorption on the charge transport in porous silicon-silicon structures, Electronic Materials Letters, 2013, 9, 03, 257–260.
- [10] Heitler W., London F., Wechselwirkung neutraler Atome und homöopolare Bindung nach der Quantenmechanik, Zeitschrift für Physik, 1927, 44, 455–472.
- [11] Kaplan I.G., Intermolecular Interactions: Physical Interpretation, Computer Calculations, and Model Potentials, Binom Knowledge Laboratory, , 2012, 394, In Russian: Пер. с англ. Межмолекулярные взаимодействия. Физическая интерпретация, компьютерные расчёты и модельные потенциалы. М. Бином. Лаборатория знаний. 2012. 394 с.
- [12] Loren D.W., Molecular Interactions and the Behaviors of Biological Macromolecules, 2021, 1, 100–120.
- [13] Zakhidova M.A., Heterogeneous Processes Induced by Resonant Laser Radiation, 2021, , Innovatsiya-Ziyo, 129, In Russian: Захидова М.А. Гетерогенные процессы, индуцированные резонансным лазерным излучением. Монография. Ташкент: "Innovatsiya-Ziyo", 2021. 129 с.
- [14] Striganov A.R., Sventitskii N.V., Tables of Spectral Lines, Atomizdat, , 1966, 478, In Russian: Стриганов А.Р., Свентицкий Н.В. Таблицы спектральных линий. Атомиздат, Москва, 1966. 478 с.
- [15] Karlov N.V., Orlov A.N., Petrov Yu.N., Yakubova M.A., Experimental study of bromine through microporous barriers, Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Seriya Fizicheskaya, 1985, 49, 03, 564–568, In Russian: Карлов Н.В., Орлов А.Н., Петров Ю.Н., Якубова М.А. Экспериментальное исследование брома через мелкопористые преграды. Изв. АН СССР. Сер. физ. 1985. Т. 49, Вып. 3. СС. 564-568.
- [16] Tsyganenko A.A., Kompaniets T.N., Novikov R.G., Pestsov O.S., Resonance laser-induced processes and energy transformations in adsorbed layers, Current Opinion in Chemical Engineering, 2019, 24, 69–78.
- [17] Karlov N.V., Laguchov A.S., Orlov A.N., Petrov Yu.N., Prokhorov A.M., Yakubova M.A., Heterogeneous selective processes under the action of laser radiation, Springer Series in Chemical Physics, 9, 505–515,

Springer, 1986.

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельным лицам. Авторы и участники, а Журнал и редакторы. Журнал и редакторы не несут ответственности за любой ущерб, нанесенный людям или имуществу, возникшее в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.

Disclaimer of liability/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications belong exclusively to individuals. The authors and participants, and the Journal and the editors. The journal and the editors are not responsible for any damage caused to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products mentioned in the content.