

## Наблюдение экситонной люминесценции из икосаэдрического ксенон-аргонового кластера

В.Л. Вакула, А.Г. Данильченко, Ю.С. Доронин, С.И. Коваленко,  
М.Ю. Либин, В.Н. Самоваров

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
E-mail: samovarov@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 3 июля 2009 г.

Впервые для бинарных смесей отвердевших инертных газов наблюдалась экситонно-примесная люминесценция в системе ксенон–аргон, в которой аргон являлся примесью. Интенсивная экситонно-примесная полоса излучения наблюдалась в бинарных кластерах, имеющих структуру многослойного икосаэдра. Оптический переход осуществлялся с уровня энергии, расположенного очень близко к нижайшему уровню объемного экситона в массивных образцах ксенона. Полученные результаты демонстрируют потенциальные возможности зондирования экситонных уровней в неупорядоченных конденсированных инертных средах.

Вперше для бінарних сумішей стверділих інертних газів спостережено екситонно-домішкову люмінесценцію в системі ксенон–аргон, в якій аргон був домішкою. Інтенсивна екситонно-домішкова смуга випромінювання спостерігалася у бінарних кластерах, що мають структуру багатошарового ікосаедра. Оптичний перехід здійснювався з рівня енергії, який розташований дуже близько до найнижчого рівня об'ємного екситону у масивних зразках ксенону. Отримані результати демонструють потенційні можливості зондування екситонних рівнів у неупорядкованих конденсованих інертних середовищах.

PACS: 36.40.Vz Оптические свойства кластеров;  
61.14.-x Дифракция и рассеяние электронов.

Ключевые слова: поверхностный экситон, объемный экситон, ксеноновый кластер, катодоллюминесценция.

1. В наших предыдущих работах [1,2] сообщалось о первом наблюдении люминесценции от объемных и поверхностно-разрешенных экситонов в свободных от подложек кластерах ксенона. До этих работ экситоны в чистых и бинарных кластерах инертных газов наблюдались только в спектрах поглощения [3], формируемых за времена  $10^{-14}$  с, однако их динамика за характерные времена жизни  $10^{-9}$  с не была известна, поскольку экситонные спектры люминесценции зафиксированы не были.

В работах [1,2] исследования проводились на кластерах, относящихся к двум крайним случаям: 1) кластеры ксенона без аргоновой оболочки; 2) кластеры ксенона, покрытые тонкой аргоновой оболочкой. Во втором случае наблюдалось сильное тушение экситонных полос люминесценции, в то время как в первом случае они хорошо проявлялись. При этом выяснилось, что объемные экситоны, имеющие в массивных кристаллах длины свободного пробега до

$1000 \text{ \AA}$ , не затухают в малых кластерах размером около  $50 \text{ \AA}$ , т.е. в условиях, когда существуют эффективные каналы тушения экситонов при их взаимодействии с поверхностью кластера [1].

С другой стороны, в работах [4,5] показано, что смешанные ксенон-аргоновые кластеры подвержены фазовому расслоению, при котором ксенон образует кор кластера, а аргон, выступая в качестве примеси и будучи поверхностно активным, обогащает поверхностные слои. Более того, совместные электронографические и спектроскопические исследования [6] показали, что в определенных условиях имеет место практически полный распад системы на чистые твердотельные компоненты. В этой связи представляется интересным проследить эволюцию экситонов в процессе распада системы из первоначального ксенон-аргонового раствора. Такая постановка задачи тесно примыкает к давней проблематике физики экситонов в примесных полупроводниках, где наблюдаются эф-

фекты образования экситонно-примесных комплексов с большими силами осциллятора и перестройка экситонного спектра вблизи поверхности, обогащенной дефектами или примесью [7]. Подобного рода целенаправленные исследования, насколько нам известно, не проводились ни для смешанных кластеров, ни для примесных массивных образцов отвердевших инертных газов\*. Для наносистем такие исследования могут представлять особый интерес в связи с экситонной спектроскопией квантовых точек, содержащих примесь.

В настоящей работе впервые удалось проследить изменение интенсивности и энергетического положения экситонных линий по мере распада ксенон-аргонового раствора на чистые компоненты. Достаточно неожиданным оказался тот факт, что мы наблюдали экситонные (поляритонные) полосы излучения из очень небольших ксенон-аргоновых кластеров размером около 1000 атомов ( $R_{cl} \approx 25 \text{ \AA}$ ), имеющих структуру многослойного икосаэдра.

Наиболее общий вывод по результатам данной работы состоит в следующем: впервые в некристаллической среде, какой являются ксенон-аргоновые кластеры со структурой икосаэдра, наблюдалась люминесценция экситонно-примесных комплексов, представляющих собой слабосвязанное состояние экситона ксеноновой матрицы с примесным аргоном.

2. В данной работе наряду со спектроскопическими проводились также электронографические измерения, что позволяло получать более надежную информацию о структуре кластеров. Спектры катодолюминесценции кластеров возбуждались пучком электронов с энергией 1 кэВ и регистрировались в спектральной области 6–8,5 эВ. Электронография позволяла наблюдать дифракционные картины от кластеров вплоть до значений вектора дифракции  $s \approx 6,5 \text{ \AA}^{-1}$ . Кластеры получали конденсацией аргон-ксеноновой смеси в сверхзвуковой струе, истекающей в вакуум через коническое сопло с критическим сечением 0,34 мм и углом раствора конуса  $8,6^\circ$ . Размер кластеров и их структуру можно было варьировать, изменяя содержание ксенона  $C_{Xe}$  в исходной бинарной газовой смеси, а также ее начальное давление  $p_0$  и температуру  $T_0$  на входе в сопло. В отличие от наших работ [1,2], в данной работе подробно исследовались ксенон-аргоновые кластеры без аргоновой оболочки по мере увеличения в них аргоновой компоненты. Для этого варьировалось содержание ксенона в интервале  $C_{Xe} = 1,8\text{--}4,7\%$  при постоянном давлении ( $p_0 = 1 \text{ атм}$ ) и температуре ( $T_0 = 190\text{--}200 \text{ К}$ ) исходной газовой сме-

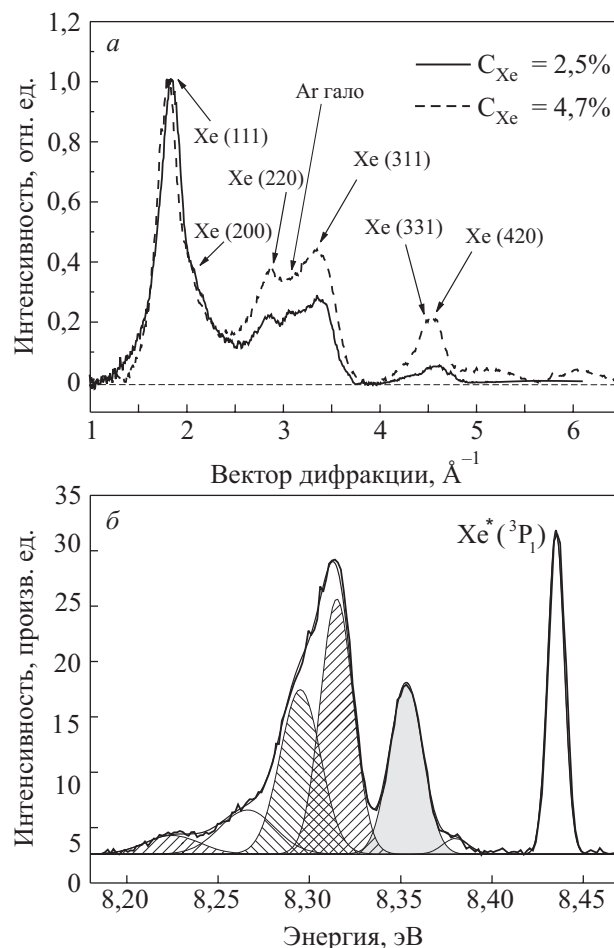


Рис. 1. Дифрактограммы и спектр люминесценции от ксенон-аргоновых кластеров со структурой многослойного икосаэдра, полученных при конденсации бинарной аргон-ксеноновой смеси ( $p_0 = 1 \text{ атм}$ ,  $T_0 \approx 200 \text{ К}$ ,  $C_{Xe} = 2,5\%$  и  $4,7\%$ ). Дифрактограммы (интенсивности пиков (111) приняты за единицу): сплошная линия —  $C_{Xe} = 2,5\%$ , штриховая —  $C_{Xe} = 4,7\%$ , стрелками обозначены дифракционные максимумы от твердого ксенона и положение гало от твердого аргона (а). Спектр катодолюминесценции от ксенон-аргоновых кластеров:  $C_{Xe} = 2,5\%$ . Тонкими линиями показано разложение спектра на гауссовы компоненты. Серым фоном выделена полоса объемного экситонного возбуждения при  $\approx 8,353 \text{ эВ}$ . Соответствие остальных компонент излучающим центрам дано в тексте (б).

си. Более детально экспериментальные методики описаны в [4,8].

3. На рис. 1 приведены дифрактограммы для ксенон-аргоновой смеси с концентрацией ксенона  $C_{Xe} = 2,5\%$  и  $4,7\%$  (а), а также спектр катодолюминесценции для  $C_{Xe} = 2,5\%$  (б). На дифрактограммах четко видны дифракционные максимумы от твердого ксено-

\* В смешанных ксенон-аргоновых массивных образцах с ограниченной растворимостью, полный распад на чистые компоненты не наблюдается, а происходит распад на растворы с малым содержанием примесной компоненты.

на (111), (200), (220), (311) и практически совпадающие максимумы (331) и (420). Пики (220) и (311) плохо разделяются (в отличие от ситуации с кластерами чистого ксенона [9]), что свидетельствует о наличии в области этих полос гало от хаотически расположенных в кластере примесных атомов аргона.

Характер дифрактограмм ясно указывает на то, что мы имеем дело с многослойным икосаэдром ксенона. Об этом свидетельствует сравнительно малая интенсивность пиков, находящихся в положении ГЦК максимумов (220) и (311), по отношению к пику (111), а также практически сливающийся с пиком (111) максимум в положении (200) ксенона, см. рис. 1, а. По положению пика (111) было оценено средневзвешенное межатомное расстояние в кластерах  $a = 5,9 \text{ \AA}$  (как для  $C_{Xe} = 2,5\%$ , так и для  $C_{Xe} = 4,7\%$ ), что в среднем на 4,5% меньше постоянной решетки для ГЦК структуры массивного ксенона:  $a = 6,15 \text{ \AA}$  ( $T = 40 \text{ K}$ ) и  $a = 6,19 \text{ \AA}$  ( $T = 70 \text{ K}$ ). Полученное значение подтверждает, что мы имеем дело с многослойным икосаэдром, у которого расстояния между внутренними плоскостями (111) меньше, чем для кристаллической ГЦК решетки [10]. Так, например, для многослойного кластера с 6 сферами Маккея (число атомов 923) расстояние между 1-й и 2-й сферами меньше на 6,5%, а между 4-й и 5-й — примерно на 3% по сравнению с ГЦК решеткой\*.

Как видно на рис. 1, на дифрактограмме для  $C_{Xe} = 2,5\%$  отсутствуют максимумы в области  $s = 3,9 \text{ \AA}^{-1}$  (311);  $5,3 \text{ \AA}^{-1}$  (331) + (421) и  $6,1 \text{ \AA}^{-1}$  (333) + (511), которые характерны для объемного аргона. Это свидетельствует о том, что аргон не образует оболочки из нескольких монослоев на поверхности ксенонового кора. Однако для случая  $C_{Xe} = 4,7\%$  появляются размытые максимумы в месте расположения пиков аргона (331)/(420) при  $5,3 \text{ \AA}^{-1}$  и (333)/(511) при  $6,1 \text{ \AA}^{-1}$ . Это свидетельствует об осязательном увеличении некристаллической аргоновой компоненты в приповерхностных слоях ксенонового кластера на начальном этапе фазовой сегрегации. Отметим, что при этом межатомное расстояние, определяемое по положению ксеноновых максимумов, остается практически неиз-

менным, поскольку во внутренних слоях содержание аргона меняется очень слабо.

Оценки по электронографическим данным и результатам наших работ (см., например, [2,9]) дают число атомов в кластере около 1000; температура кластеров, согласно работе [10], должна быть близка к 50 К.

Рассмотрим теперь спектр люминесценции, представленный на рис. 1, б. Сразу отметим, что он является многокомпонентным, тонкими линиями показано его разложение на гауссовы составляющие, а также их суммарную огибающую. Обсуждение результатов и выводы наших предыдущих работ (см. [1,2] и ссылки), позволяют отнести эти полосы к следующим излучающим центрам. Полоса при 8,353 эВ (полуширина 21 мэВ) близка к положению полосы излучения объемного экситона  $\Gamma(3/2)$  с квантовым числом  $n = 1$  из кристаллического ксенона (8,333 эВ при  $T = 50 \text{ K}$  при полуширине около 9 мэВ\*\*). Полосы при 8,225 эВ (35 мэВ) и 8,315 эВ (21 мэВ) возникают вследствие расщепления кристаллическим полем полосы излучения поверхностно разрешенного экситона, а полоса при 8,38 эВ ранее наблюдалась в спектрах люминесценции массивных образцов твердого ксенона и была сопоставлена с поверхностным поляритоном\*\*\*.

Сразу же отметим, что наблюдение экситонных (поляритонных) полос люминесценции для малых ксеноновых кластеров, имеющих структуру многослойного икосаэдра, является весьма необычным. Так, регистрация экситонных полос излучения в объемных кристаллических образцах инертных газов [13] потребовала в свое время специальных методик для получения совершенных кристаллов и их очистки от атмосферных примесей.

Другие полосы люминесценции можно сопоставить со следующими переходами (см. [2] и ссылки при обсуждении результатов). Интенсивная и узкая линия люминесценции при 8,435 эВ (11 мэВ) относится к излучению  $^3P_1 \rightarrow ^1S_0$  десорбированного атома ксенона вдали от поверхности кластера. Полоса при 8,295 эВ (26 мэВ) расположена в области запрещенного перехода  $^3P_2 \rightarrow ^1S_0$ , который может разрешаться вблизи

\* В массивных образцах аргон имеет ограниченную растворимость в ксеноне, не превышающую 5–7%. В этом случае он может приводить к уменьшению постоянной решетки, но в гораздо меньших пределах, чем за счет изменения межплоскостных расстояний в многослойном икосаэдре [11].

\*\* Для кластеров вследствие дополнительного (кластерного) сжатия решетки положение экситонного уровня матрицы должно располагаться немного выше по энергии, чем для массивного кристалла (при одинаковых температурах).

\*\*\* Известно, что твердый ксенон характеризуется достаточно сильным светозекситонным смешиванием [12], т.е. экситонные состояния в нем можно характеризовать как поляритонные. В дальнейшем для целей данной работы, учет различий между ними не принципиален, поэтому при описании спектров будут употребляться оба термина согласно сложившейся для твердого ксенона традиции.

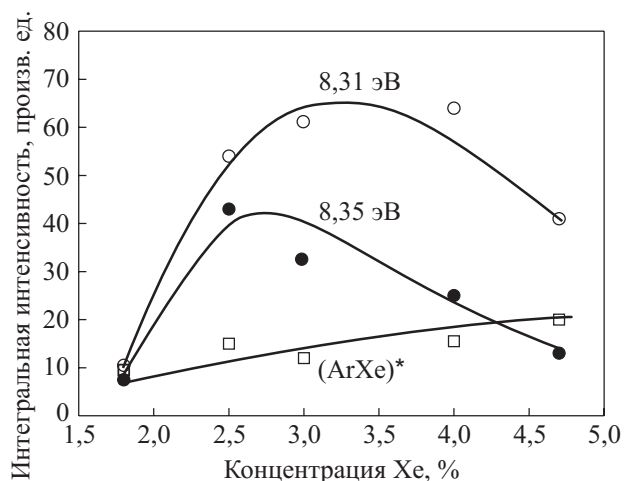


Рис. 2. Изменение интегральных интенсивностей излучения эксиплексной молекулы (ArXe)\*, а также полос излучения экситонных возбуждений объемного (8,35 эВ) и поверхностного (8,31 эВ) характера при изменении концентрации ксенона в исходной аргон-ксеноновой смеси.

поверхности образца. Полоса при 8,266 эВ (35 мэВ) связана с излучением эксиплексной молекулы (ArXe)\* и ранее наблюдалась при бомбардировке кристаллов аргона возбужденными атомами ксенона [14], что дополнительно свидетельствует о присутствии аргона в кластере.

Рассмотрим теперь эволюцию полос люминесценции по интенсивности и энергетическому положению для объемного и поверхностно-разрешенных экситонов при изменении концентрации ксенона  $C_{Xe}$  в исходной газовой смеси. На рис. 2 приведена зависимость интегральной интенсивности от концентрации для эксиплексной полосы (ArXe)\*, экситонных полос объемного и поверхностно-разрешенного характера. Интенсивность эксиплексной полосы (ArXe)\* непрерывно возрастает с увеличением концентрации ксенона во всем интервале  $C_{Xe}$ . В то же время, рост интенсивности экситонных полос наблюдается при росте концентрации от 1,8 до 2,5%, после чего в области 2,5–3,0% начинается их падение, и при концентрации 4,7% они уменьшаются в несколько раз по сравнению с их максимальным значением. Следует отметить, что с увеличением концентрации ксенона именно в этой области, 2,5–4,7%, мы наблюдали рост молекулярной полосы люминесценции (Xe<sub>2</sub>)\* при 7,0 эВ, что свидетельствует, как и в случае массивных кристаллов, о локализации экситонов в неупорядоченной решетке с образованием сильно связанного возбужденного молекулярного центра (в упорядоченной решетке эта полоса люминесценции расположена при 7,2 эВ) [15].

На рис. 3 показан красный сдвиг спектральной полосы объемного экситона 8,35 эВ при увеличении концентрации ксенона в исходной газовой смеси. Для других полос сдвиг не наблюдался, оставаясь в преде-

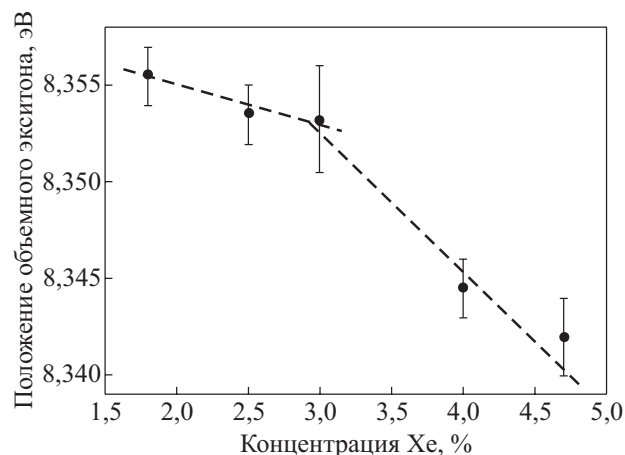


Рис. 3. Сдвиг энергетического положения полосы излучения объемного экситона (экситонно-примесного комплекса) при изменении концентрации ксенона в исходной аргон-ксеноновой смеси.

лах ошибок измерений. Как видно, при увеличении концентрации до  $\approx 3\%$  сдвиг остается небольшим, около 2 мэВ, но при дальнейшем увеличении он резко возрастает.

4. Переходя к обсуждению полученных результатов, следует еще раз указать, что в условиях настоящей работы аргон оставался в объеме кластера, не образуя, в отличие от экспериментов [1,2], выраженной аргоновой оболочки. Это следует из электронографических данных, об этом независимым образом свидетельствуют также измеренные спектры люминесценции. Дело в том, что, как показано для бинарных смесей Kr–Ar и Xe–Ar [1,2,16], о наличии в смешанных Xe–Ar кластерах внешней оболочки из более легкой компоненты должна свидетельствовать полоса при 8,41 эВ, расположенная с красной стороны от линии  $^3P_1$  при 8,44 эВ десорбированного атома ксенона. Появление этой полосы обусловлено тем, что возбужденный атом ксенона, находясь за пределами кластера вблизи его поверхности, излучает из «внешней» потенциальной ямы, образованной за счет его взаимодействия с аргоновой поверхностью кластера (так называемое излучение надповерхностного, или «висячего», атома). Такое связанное состояние может возникать только в случае гетероядерного взаимодействия возбужденного атома ксенона (криптона) с аргоновой поверхностью, имеющей отрицательное сродство к электрону [16]. Отсутствие данной полосы в наших спектрах (см., например, рис. 1,б) при всех начальных концентрациях ксенона указывает на то, что аргон растворен в объеме кластера, не образуя слоев на его поверхности. Однако в условиях, близких к полному фазовому расслоению, распределение аргона по радиусу кластера неравномерно.

Остановимся вначале на сдвиге экситонной полосы люминесценции, который наблюдается только при изменении концентрации примесного ксенона в исходной газовой смеси. По данным дифрактограмм на рис. 1, *a*, о чем уже говорилось выше, при увеличении  $C_{Xe}$  происходит рост содержания аргоновой компоненты в кластере. Поскольку при этом межатомные расстояния практически не меняются, наблюдающийся нами для инертных кластеров сдвиг экситонной полосы следует связывать именно с изменением концентрации атомов *аргона* в кластере.

В то же время, известно, что к красному сдвигу экситонных полос может приводить образование экситонно-примесных комплексов [7]. В нашем случае это будет соответствовать образованию связанного состояния экситона ксеноновой матрицы с атомами (агрегациями) аргона. Масштаб этого сдвига определяется энергией связи и, согласно нашим данным, составляет несколько мэВ и может меняться в зависимости от структуры примесного центра.

С ростом ксенонового кластера (при увеличении концентрации ксенона в смеси) наноклапты, зарождающиеся на первой стадии формирования твердых агрегаций, оказываются все более «горячими» за счет выделения скрытой теплоты конденсации. В них облегчается процесс диффузии поверхностно-активных атомов аргона во внешние слои, т.е. происходит избыточное обогащение внешних слоев аргоном, предшествующее радиальной фазовой сегрегации. Это обогащение увеличивает вероятность образования экситонно-примесных комплексов на 2-х, 3-х и более многоатомных агрегациях аргона.

В итоге, наблюдаемое усиление красного сдвига в области концентраций выше 2,5–3% можно связать с тем, что по мере роста числа атомов аргона в кластере, наряду с экситонно-примесными комплексами, на одиночном атоме аргона начинают эффективно возникать, особенно вблизи поверхности, экситонно-примесные комплексы на аргоновых агрегациях, обладающие большей энергией связи. Одновременно в окрестности этих комплексов за счет искажения решетки снижается барьер на локализацию, т.е. увеличивается вероятность релаксации экситонов на глубокие локальные уровни молекулярных центров  $(Xe_2)^*$ , которые высвечивают в виде широкой полосы с максимумом вблизи 7,0 эВ. По нашим данным эта локализация усиливается при концентрации ксенона в исходной газовой смеси выше 2,5–3%, т.е. когда происходит сильный сдвиг экситонных полос с одновременным уменьшением их интенсивности (см. рис. 2). Интенсивность эксиплексных комплексов  $(XeAr)^*$  в этой области непрерывно растет и, следовательно, при локализации экситонов наряду с эксимерными

молекулами  $(Xe)_2^*$  образуются также гетероядерные возбужденные центры.

5. Общая картина формирования экситонной люминесценции в некристаллической среде, какой является многослойный икосаэдр, представляется следующей. В отсутствие примеси экситон после своего рождения должен быстро, за характерные фоновые времена (вследствие небольшой величины энергетического барьера в неупорядоченной среде), заселить глубокие локальные состояния, каковыми являются возбужденные молекулярные центры типа  $(Xe)_2^*$ . Он может также, локализуясь на поверхности, вызвать десорбцию возбужденных атомов, в нашем случае ксенона. Однако, если имеются примесные центры (аргон), которые экситон не способен ионизировать, то ситуация кардинально изменяется: возникает канал образования экситонно-примесных комплексов. В случае небольшой энергии связи, намного меньшей ширины экситонной зоны, уровень энергии экситонно-примесного комплекса расположен очень близко к нижайшему состоянию объемного экситона матрицы. Еще раз подчеркнем, что для инертных газов уровни энергии объемных экситонов существуют для кластеров с числом атомов 50–100 и выше, т.е. в том числе со структурой многослойного икосаэдра, что подтверждается измеренными спектрами возбуждения люминесценции (спектрами поглощения с характерными временами масштаба  $10^{-14}$  с) [3]. Более того, по данным оптического поглощения уровень объемного экситона существует даже в жидком ксеноне, когда во флуктуирующей среде возникает короткоживущий кластер атомов повышенной плотности. Однако за времена 1–3 пс такой экситон исчезает, образуя эксимерную молекулу  $(Xe)_2^*$  [17].

У ксенона ширина нижайшей экситонной зоны  $\Gamma(3/2)$  равна  $\Delta \approx 1$  эВ, а энергия ван-дер-ваальсовой связи экситона на атоме аргона составляет  $\epsilon \approx 2$  мэВ при радиусе взаимодействия около 6 Å, близком к межплоскостному расстоянию для твердого ксенона (для вычислений можно воспользоваться оценкой из работы [18] с учетом того, что радиус экситона в ксеноне составляет  $\approx 3$  Å). Как известно, для молекулярных и полупроводниковых кристаллов величина отношения  $\Delta/\epsilon \approx 10^3$  определяет эффект гигантского увеличения силы осциллятора оптического перехода  $f \propto (\Delta/\epsilon)^{3/2}$  экситонно-примесного комплекса [7]. Мы полагаем, что именно по этой причине экситон проявляется с высокой интенсивностью в спектрах излучения из некристаллической среды. С увеличением содержания аргоновых атомов включается взаимодействие экситона с агрегациями аргона. Поскольку энергия связи таких экситонно-примесных комплексов увеличивается, наблюдается красный сдвиг полосы люминесценции. Максимумы излуче-

ния поверхностно-разрешенных экситонной и поляритонной полос оказываются заметно менее чувствительными к содержанию аргона.

При полной фазовой сегрегации, когда ксеноновый кор покрыт аргоновой оболочкой, объемные экситоны практически полностью конвертируются в глубокие локальные центры молекулярного типа. Поверхностно-разрешенные экситоны ксенона менее чувствительны к аргоновой оболочке, а возбужденные атомы ксенона, имея избыток кинетической энергии, способны даже «простреливать» оболочку и высвечивать в виде надповерхностных и десорбированных атомов [1,2,16].

Таким образом, в работе впервые для бинарных смесей отвердевших инертных газов наблюдалась экситонно-примесная люминесценция в системе ксенон–аргон, где аргон являлся примесью. Оптический переход осуществлялся с уровня энергии, расположенного очень близко к нижайшему состоянию объемного экситона ксеноновой матрицы. Экситонно-примесная полоса излучения наблюдалась с большой интенсивностью в бинарных кластерах, имеющих структуру многослойного икосаэдра. Вполне возможно ожидать возникновение этой полосы излучения и в массивном ксеноне с примесью аргона, в том числе для мелкозернистой фазы и даже для стекольного состояния, которое может реализовываться как в массивных образцах, так и в кластерах инертных газов [19]. Полученные результаты открывают возможности для исследования экситонных уровней в неупорядоченных конденсированных средах инертных элементов путем создания экситонно-примесных уровней с гигантскими силами осциллятора.

В заключение авторы выражают благодарность Е.И. Тарасовой и А.Г. Белову за полезное обсуждение результатов эксперимента.

1. В.Л. Вакула, А.Г. Данильченко, Ю.С. Доронин, С.И. Коваленко, М.Ю. Либин, В.Н. Самоваров, *ФНТ* **33**, 515 (2007) [*Low Temp. Phys.* **33**, 383 (2007)].
2. O.G. Danylchenko, Yu.S. Doronin, S.I. Kovalenko, M.Yu. Libin, V.N. Samovarov, and V.L. Vakula, *Phys. Rev.* **A76**, 043202 (2007).
3. J. Wörmer, V. Guzielski, J. Stapelfeldt, and T. Möller, *Chem. Phys. Lett.* **159**, 321 (1989); M. Joppien, R. Müller, J. Wörmer, and T. Möller, *Phys. Rev.* **B47**, 12984 (1993); R. von Pietrowski, K. von Haefen, T. Laarmann, T. Möller, L. Museur, and A.V. Kanaev, *Eur. Phys. J.* **D38**, 323 (2006).
4. O.G. Danylchenko, Yu.S. Doronin, S.I. Kovalenko, and V.N. Samovarov, *JETP Lett.* **84**, 324 (2006).
5. M. Tchapyguine, M. Lundwall, M. Gisselbrecht, G. Öhrwall, R. Feifel, S. Sörensen, S. Svensson, N. Mertensson, and O. Björneholm, *Phys. Rev.* **A69**, 031201R (2004).
6. А.Г. Данильченко, Ю.С. Доронин, С.И. Коваленко, В.Н. Самоваров, *Письма ЖЭТФ* **84**, 385 (2006).

7. Э.И. Рашба, *ФТП* **8**, 1241 (1974); В.А. Киселев, Б.В. Новиков, А.Е. Чередниченко, *Экситонная спектроскопия приповерхностной области полупроводников*, Изд-во Ленингр. ун-та, Ленинград (1987).
8. Э.Т. Верховцева, Е.А. Бондаренко, Ю.С. Доронин, *ФНТ* **30**, 47 (2004) [*Low Temp. Phys.* **30**, 34 (2004)].
9. С.И. Коваленко, Д.Д. Солнышкин, Е.А. Бондаренко, Э.Т. Верховцева, *ФНТ* **23**, 190 (1997) [*Low Temp. Phys.* **23**, 140 (1997)].
10. J. Farges, M.F. Feraudy, B. Raoult, and G. Torchet, *Adv. Chem. Phys.* **70**, 45 (1988).
11. V.G. Manzhelii, A.I. Prokhvatilov, I.Ya. Minchina, and L.D. Yantsevich, *Handbook of Binary Solutions of Cryocrystals*, Begell House, Inc., New York, Wallingford (UK) (1996).
12. I.Ya. Fugol, *Adv. Phys.* **27**, 1 (1978).
13. D. Varding, I. Reimand, and G. Zimmerer, *Phys. Status Solidi* **B185**, 301 (1994).
14. G. Nowak and J. Fricke, *J. Phys.* **B18**, 1355 (1985).
15. A.N. Ogurtsov, E.V. Savchenko, E. Sombrowski, S. Vielhauer, and G. Zimmerer, *ФНТ* **29**, 1125 (2003) [*Low Temp. Phys.* **29**, 858 (2003)].
16. M. Runne, J. Becker, W. Laasch, D. Varding, G. Zimmerer, M. Liu, and R.E. Johnson, *Nucl. Instrum. Methods* **B82**, 301 (1993).
17. E.S. Peterson, B.J. Schwartz, and C.B. Harris, *J. Chem. Phys.* **99**, 1693 (1993).
18. A.N. Ogurtsov, A.M. Ratner, E.V. Savchenko, V. Kisand, and S. Vielhauer, *J. Phys.: Condens. Matter* **12**, 2769 (2000).
19. P.C. Берри, Б.М. Смирнов, *УФН* **175**, 367 (2005); А.Г. Данильченко, С.И. Коваленко, В.Н. Самоваров, *ФНТ* **34**, 1308 (2008) [*Low Temp. Phys.* **34**, 1030 (2008)].

#### Observation of exciton luminescence from icosahedral xenon–argon clusters

V.L. Vakula, O.G. Danylchenko, Yu.S. Doronin, S.I. Kovalenko, M.Yu. Libin, and V.N. Samovarov

For the first time in binary mixtures of solid rare gases, the exciton-impurity luminescence is observed from the xenon–argon system containing argon as an impurity. The intense exciton-impurity emission band is observed in binary clusters with a structure of multilayer icosahedron. The optical transition occurs from the energy level lying very close to the lowest level of volume excitons in bulk xenon samples. The results obtained show the potential possibilities of probing the excitonic levels in disordered condensed media.

PACS: 36.40.Vz Optical properties of clusters;  
**61.14.-x** Electron diffraction and scattering.

Keywords: surface exciton, bulk exciton, xenon cluster, cathodoluminescence.