

УДК 538.915

DOI: 10.17223/00213411/62/6/88

*В.С. БАГАЕВ<sup>1</sup>, С.Н. НИКОЛАЕВ<sup>1</sup>, В.С. КРИВОБОК<sup>1</sup>, М.А. ЧЕРНОПИЦКИЙ<sup>1</sup>, А.А. ВАСИЛЬЧЕНКО<sup>2</sup>, Г.Ф. КОПЫТОВ<sup>2</sup>***ЭКСИТОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ БИСЛОЕВ  $WSe_2$  \***

С помощью top-down-технологии на  $SiO_2/Si$ -подложках получены пленки  $WSe_2$  толщиной в два монослоя. Толщины и состав пленок подтверждены измерениями спектров комбинационного рассеяния света, фотолюминесценции и интерференционного контраста в трех RGB-каналах. Исследована люминесценция бислоев  $WSe_2$  при уменьшении температуры до 5 К. Показано, что при низких температурах тонкая структура спектра излучения вблизи прямого края собственного поглощения определяется рекомбинацией А-экситонов, находящихся в основном или возбужденном состоянии, а также различными комплексами (трионами и экситонами, связанными на дефектах) с их участием. Спектр излучения вблизи непрямого края фундаментального поглощения описан в рамках представлений о процессах экситонной люминесценции, при которых энергия и импульс экситона передаются фононам, соответствующим Λ-точке зоны Бриллюэна. Обсуждается возможный вклад электронно-дырочной жидкости в спектр излучения.

**Ключевые слова:** слоистые полупроводники, люминесценция, экситоны, многочастичные эффекты.

**Введение**

К настоящему времени показана перспективность использования атомарно тонких пленок слоистых полупроводников для создания одноэлектронных транзисторов, чувствительных фотодетекторов, газоанализаторов и других оптоэлектронных устройств. Прогресс в области химического осаждения одной из наиболее значимых групп слоистых полупроводников – дихалькогенидов переходных металлов (ДХПМ) стимулирует дальнейшие фундаментальные исследования в данной области и позволяет надеяться на возможность масштабирования существующих технологий, основу которых составляют небольшие фрагменты атомарно тонких пленок, полученные с помощью top-down-технологии из объемных материалов [1, 2]. Тем не менее одним из ограничений применимости полупроводниковых ДХПМ в электронике, вне зависимости от метода их получения, является недостаточное понимание процессов многочастичных взаимодействий, возникающих при высокой плотности носителей заряда в двумерной системе, которую формирует ультратонкая пленка. Поэтому исследованию многочастичных взаимодействий в атомарно тонких пленках ДХПМ, демонстрирующих полупроводниковые свойства, в последнее время уделяется отдельное внимание [1, 3].

Среди семейства полупроводниковых материалов на основе ДХПМ следует выделить диселенид вольфрама ( $WSe_2$ ), оптические свойства которого представляют как фундаментальный [1, 3], так и прикладной интерес, связанный, в частности, с созданием светодиодов [4, 5] и масштабируемых источников одиночных фотонов [6]. Известно, что для монослоев  $WSe_2$  реализуется прямой край фундаментального поглощения, сменяющийся непрямым при переходе к пленкам, состоящим из двух монослоев и более. В свою очередь, основное экситонное состояние  $WSe_2$ , соответствующее прямому краю фундаментального поглощения, формируется в окрестности К-точки зоны Бриллюэна и содержит, по крайней мере, два наблюдаемых подуровня – основное состояние (А-экситон) и возбужденное состояние ( $A^*$ ). Положение данных подуровней зависит от количества монослоев, демонстрируя водородоподобную (3D) структуру в объемном  $WSe_2$  и структуру, заметно отличающуюся от водородоподобной в пленках  $WSe_2$  толщиной несколько монослоев. Переход от объемных материалов к атомарно тонким пленкам сопровождается резким увеличением энергии связи А-экситонов – от ~ 60 мэВ в пределе объемной пленки  $WSe_2$  до ~ 370 мэВ в монослое [1]. Эта тенденция качественно сохраняется и для других типов экситонных состояний, в том числе сформированных непрямым краем фундаментального поглощения, за счет уменьшения экранировки кулоновского взаимодействия в ультратонких пленках.

Перечисленные особенности  $WSe_2$  указывают на то, что наиболее интересная с точки зрения исследования коллективных эффектов структура экситонных состояний реализуется именно в бислое. С одной стороны, для бислоя реализуется не прямой край собственного поглощения, что

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ а 18-02-01129 (разд. 2 и 3) и РНФ № 18-72-00235 (разд. 4).

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>