

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
Кафедра МНЭ

ОТЧЕТ

по научно-исследовательской работе

Тема: Исследование гетероструктуры эпитаксиальный графен – MoSe₂
методами СЗМ

Студент гр. 3283

Бородин Б.Р.

Руководитель

к.ф.-м.н. Алексеев П.А.

Санкт-Петербург

2018

**ЗАДАНИЕ
НА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ РАБОТУ**

Студент Бородин Б.Р.

Группа 3283

Тема НИР: Исследование гетероструктуры эпитаксиальный графен – MoSe₂ методами СЗМ

Задание на НИР:

Исследовать гетероструктуры эпитаксиальный графен – MoSe₂ методами СЗМ. Определить работу выхода и ее зависимость от количества слоев MoSe₂. По необходимости провести дополнительные исследования спектров фотолюминесценции.

Сроки выполнения НИР: 20.09.2018 – 20.12.2018

Дата сдачи отчета: 21.12.2018

Дата защиты отчета: 25.12.2018

Студент

Бородин Б.Р.

Руководитель

Алексеев П.А.

АННОТАЦИЯ

Целью данной работы является изучение свойств тонких слоев MoSe_2 на графене, определение работы выхода и поверхностного потенциала структур, а также их зависимостей от количества слоев MoSe_2 и влажности среды. Основными инструментами исследования являются методы СЗМ и спектроскопия фотолюминесценции.

В работе представлены данные о топографии, поверхностном потенциале и фотолюминесценции исследуемых образцов. А также построены зонные диаграммы, объясняющие зависимость интенсивности фотолюминесценции от количества слоев графена.

SUMMARY

The purpose of this work is to study the properties of thin layers of MoSe_2 on graphene, to determine the work function and surface potential of structures, as well as their dependencies on the number of MoSe_2 layers and the humidity of the medium. The main research tools are SPM methods and photoluminescence spectroscopy.

The paper presents data on the topography, surface potential and photoluminescence of the samples under study. And also built band diagrams explaining the dependence of the intensity of photoluminescence on the number of graphene layers.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	5
1.	Объект исследования	6
2.	Методы исследования	11
3.	Обработка результатов измерений и оценка результатов исследований	19
	Заключение	23
	Список использованных источников	24

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время свойства дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) представляют большой интерес для изучения. Это связано с применением их свойств [1,2] для создания устройств электроники, оптоэлектроники и валлитроники. Наиболее изученным ДПМ материалом, является MoS_2 [3]. Электронные свойства таких материалов сильно зависят от количества слоёв [4] и состояния поверхности. Так например, адсорбированная вода на поверхности таких устройств, приводит к изменению электронных свойств структуры [5]. Как правило, количество слоёв в ДПМ и влияние диэлектрического окружения на их электронные свойства может быть определено с помощью фотолюминесценции и Рамановской спектроскопии[6]. Однако электронные свойства Ван-дер-Вальсовых материалов (вдВ) также могут быть исследованы методом сканирующей Кельвин-зонд микроскопии (КЗМ). Так например, методом КЗМ была показана возможность определения количества слоёв в графене и MoS_2 . Также была изучено влияние адсорбированной воды на поверхностный потенциал в MoS_2 . Стоит отметить, что ДПМ представляет довольно широкий класс материалов, свойства которых всё ещё изучены слабо. Особый интерес представляют гетероструктуры сформированные из вдВ материалов. Целью данной работы было исследование электронных свойств слоёв MoSe_2 , перенесённых на моно- и бислои графена на подложке SiC. Стоит отметить, что MoSe_2 представляет большой интерес для применения в приборах оптоэлектроники, так например для этого материала недавно была предсказана возможность создания экситон-поляритонного конденсата при комнатной температуре[7].

1. Объект исследования

Для получения пленок графена использовался метод термического разложения поверхности SiC. Сублимация кремния из полуизолирующей монокристаллической подложки карбида кремния (SiC) является одним из наиболее перспективных способов эпитаксиального роста графена. Большим преимуществом данной технологии является отсутствие необходимости переносить выращенную пленку на подложку диэлектрика, как это имеет место, например, при синтезе графена на металлах. Кроме того, такая технология роста дает возможность выращивать графен на поверхности коммерческих подложек SiC диаметром до 4 дюймов, промышленный выпуск которых освоен в настоящее время. Подобные структуры могут быть использованы в стандартной технологической линейке для изготовления полупроводниковых приборов.

В качестве подложки применялись высокоомные пластины SiC политапа 6Н (производство ОАО «Светлана») с ориентацией $(0001) \pm 0.25^\circ$ (Si-грань). Рост графена производился в графитовом тигле, нагреваемом индуктивным методом с помощью высокочастотного генератора. Для определения оптимальных условий получения графена осуществлялось варьирование основных технологических параметров: температура роста изменялась от 1750 до 1900°C, время роста – от 10 до 30 мин, давление аргона в ростовой камере – от 600 до 800 Торр, скорость нагрева образца – от 100 до 350 °C /мин.

На рисунке 1 представлены результаты исследования образца с помощью Кельвин-зонд микроскопии.

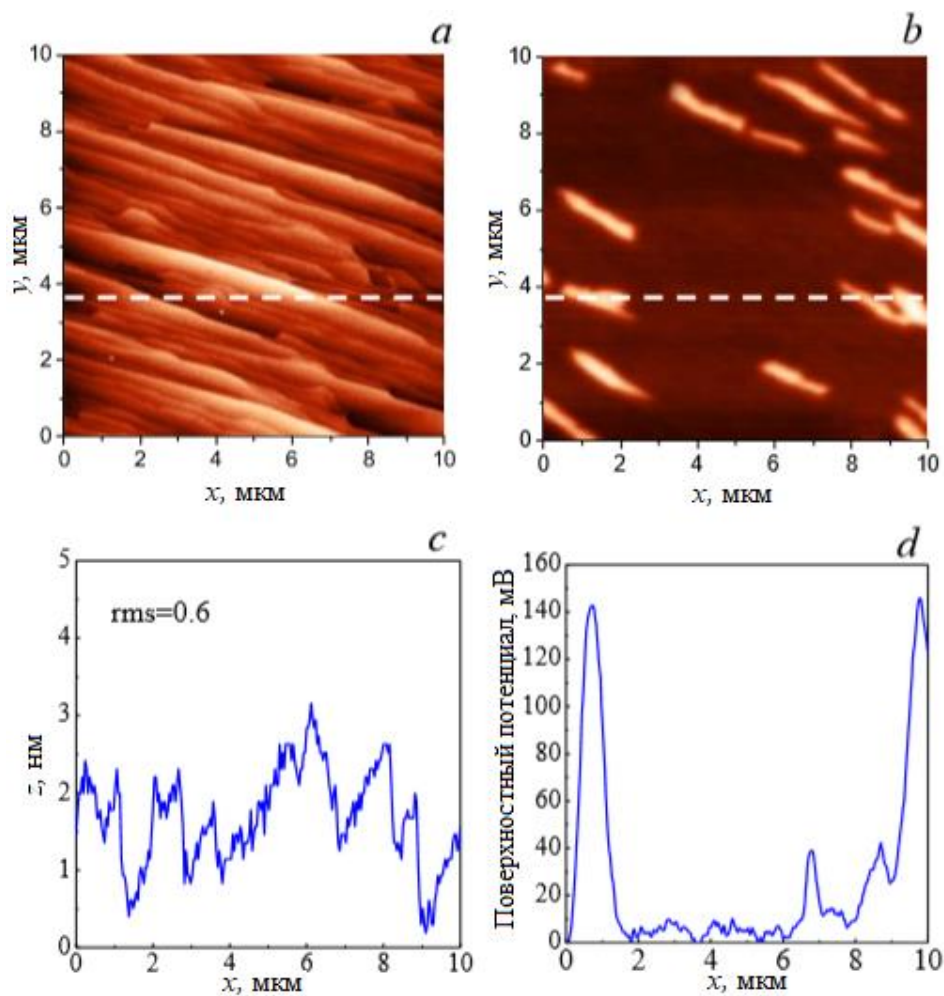


Рисунок 1 – Топография поверхности (a), распределение поверхностного потенциала (b), профиль топографии по линии (c), профиль поверхностного потенциала по линии (d).[8]

Из рисунке 1 (a,c) видно, что поверхность образца представляет из себя террасы высотой около 1 нм и шириной в среднем 1 мкм. На рисунке 1 (b,d) показано распределение поверхностного потенциала. Изображение содержит области повышенного потенциала, которые являются областями двухслойного графена [9]. Площадь заполнения поверхности однослойным графеном составляет около 90%.

На рисунке 2 представлен спектр комбинационного рассеяния света. При измерениях использовалась длина волны возбуждающего света 532 нм; мощность лазерного излучения на образце равнялась 2.0 мВт в пятне диаметром ~ 1 мкм; спектральное разрешение спектрометра составляло 2.5 см^{-1} .

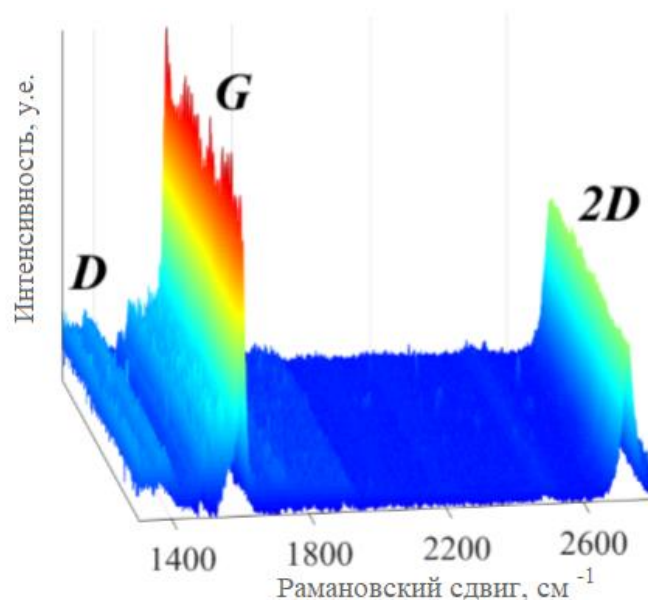


Рисунок 2 – Спектр комбинационного рассеяния света [8].

Из рисунка 2 видно, что интегральное отношение интенсивностей пиков D и G мало ($I_D/I_G \approx 0.08$), что говорит о высоком структурном совершенстве графеновой пленки. Наличие интенсивного 2D пика говорит о высокой концентрации бездефектных кластеров с sp^2 гибридизованной электронной структурой.

На рисунке 3 представлена вольт-амперная характеристика контакта к графеновой пленке.

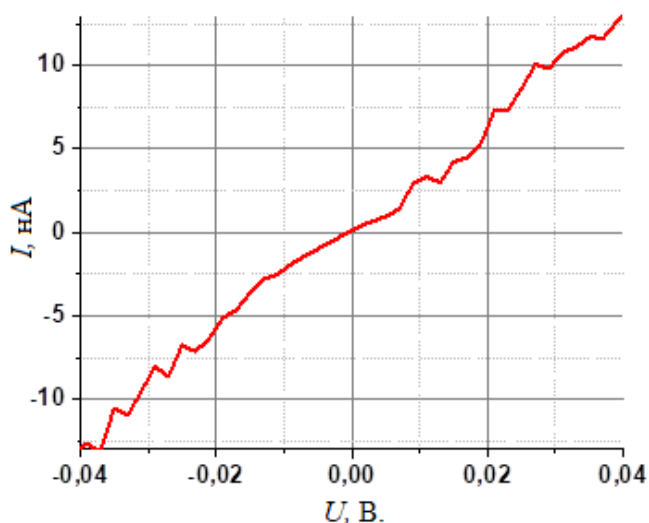


Рисунок 3 – Вольт-амперная характеристика контакта к графену.

После получения структуры 6H SiC – графен на нее были перенесены тонкие слои $MoSe_2$.

MoSe₂ представляет собой слоистый полупроводниковый материал, который может быть наноструктурирован до двумерной формы путем микромеханического расщепления. Особый интерес он представляет из-за своих электронных свойств. Объемный MoSe₂ является непрямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 1,2 эВ. При переходе к двумерной структуре происходит перестройка зонной структуры и полупроводник становится прямозонным с шириной запрещенной зоны 1,5 эВ. Относительно высокая подвижность носителей заряда (около 500 см²В⁻¹с⁻¹) и высокое (до 10⁸) отношение ON/OFF в транзисторной структуре делают данный материал перспективным для создания на его основе наноустройств. Также существование сильно связанных экситонов (0,5 эВ) и высокая интенсивность фотолюминесценции порождают интерес с точки зрения применения его в устройствах оптоэлектроники и нанофотоники [10].

На рисунке 4 представлено схематичное изображение исследуемой структуры.

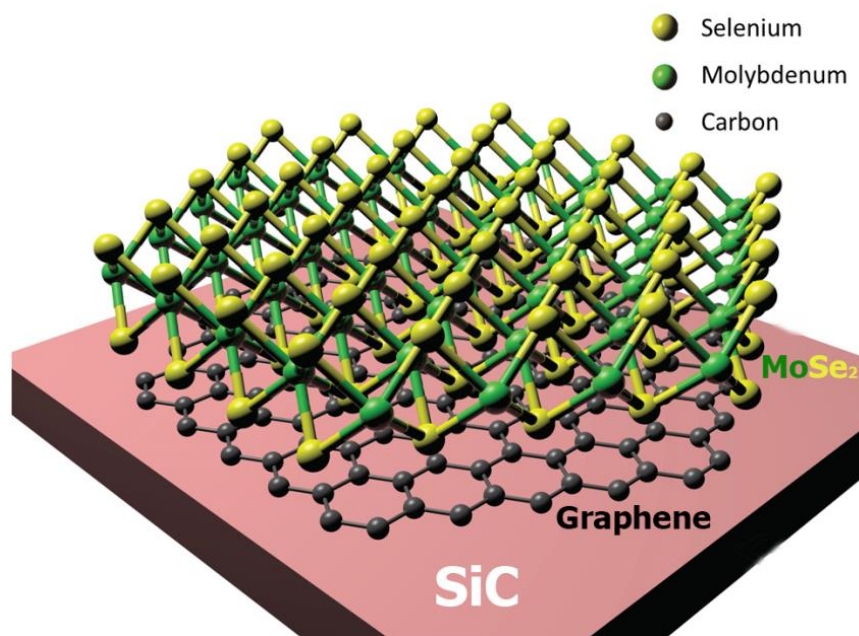


Рисунок 4 – Схематичное изображение структуры.

На рисунке 5 представлено изображение структуры и карта фотолюминесценции.

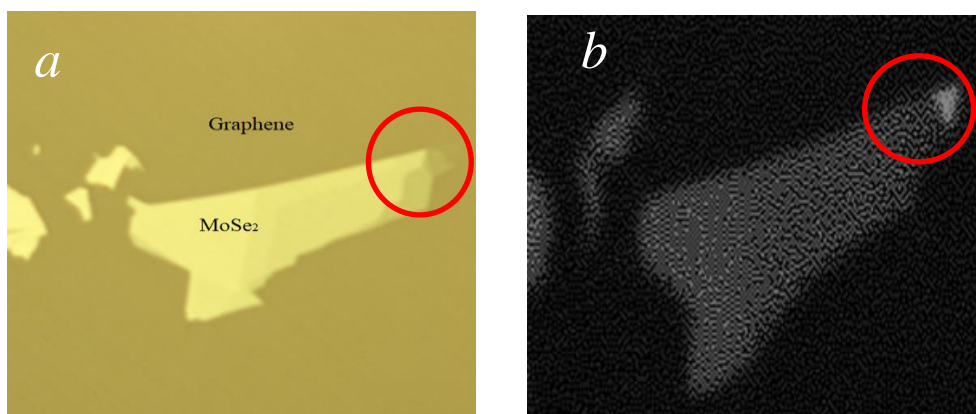


Рисунок 5 – Структура 6H SiC– графен– MoSe₂ (a) и карта фотолюминесценция (b)

Из рисунке 5 видно, что область острия MoSe₂ (выделенная область) интенсивно фотолюминесцирует. Это говорит о малом количестве слоев структуры.

На рисунке 6 представлены спектры фотолюминесценции различных точек внутри выделенной области.

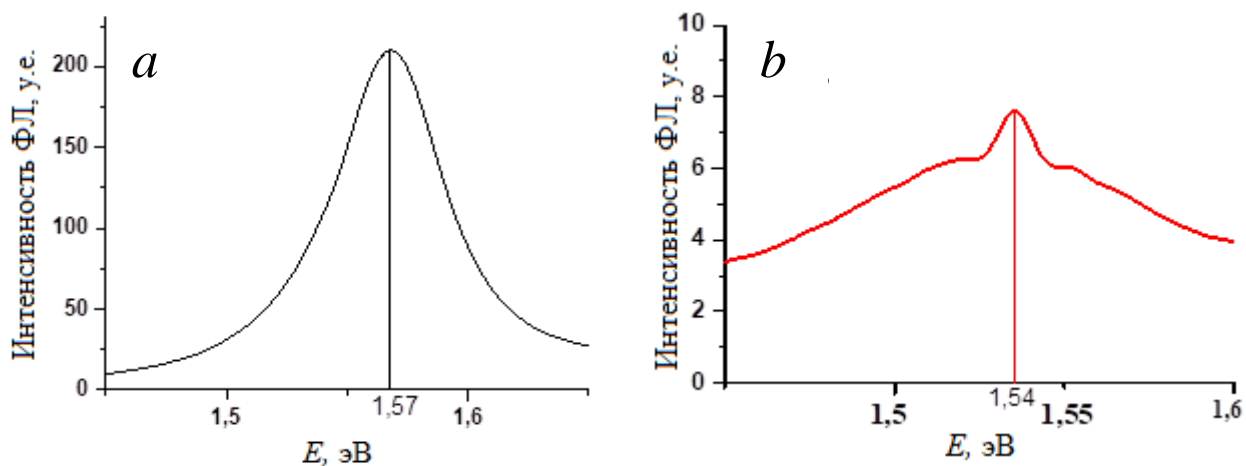


Рисунок 6 – Спектр фотолюминесценции моно- (a) и бислоя (b) MoSe₂.

Спектры фотолюминесценции имеют максимумы на энергиях 1,57 и 1,54 эВ, что соответствует моно- и бислою MoSe₂ соответственно [10]. Из рисунка 6 видно, что интенсивность фотолюминесценции монослоя значительно выше, чем бислоя.

2. Методы исследования

Исследование проводилось в ФТИ им. Иоффе РАН при помощи сканирующего зондового микроскопа. Для исследования структуры применялись различные режимы работы прибора, такие как атомно-силовая микроскопия, кельвин-зондовая микроскопия, токовая микроскопия.

Основой работы атомно-силового микроскопа является силовое взаимодействие между сканирующим зондом и поверхностью образца, регистрация которого производится с помощью специального датчика, представляющего собой упругую консоль с острием на конце (рисунок 6). Длина зонда составляет, как правило, несколько микрометров, а диаметр острия может достигать единиц нанометров. Взаимодействие зонда с поверхностью приводит к изгибу консоли. Зная величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью. АСМ способны регистрировать очень малые силы ($10^{-8} \dots 10^{-13}$ Н и менее), характерные для межатомного взаимодействия [15].

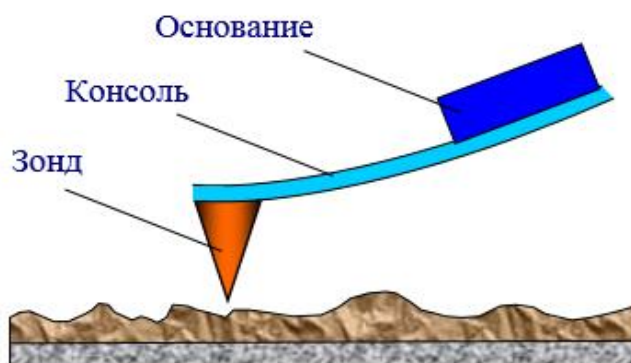


Рисунок 6 – Схематическое изображение зондового датчика АСМ [15]

Взаимодействие зонда с поверхностью можно описать на примере сил Ван-дер-Ваальса. Наиболее часто энергию ван-дер-ваальсова взаимодействия двух атомов, находящихся на расстоянии r друг от друга, аппроксимируют степенной функцией (2) – потенциалом Леннарда–Джонса (рисунок 7):

$$U_{LD}(r) = U_0 \left\{ -2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} \right\}, \quad (2)$$

где r_0 – равновесное расстояние между атомами; U_0 – значение энергии в минимуме.

Первое слагаемое характеризует дальнедействующее притяжение за счет дипольных взаимодействий атомов. Второе слагаемое описывает отталкивание атомов на малых расстояниях.

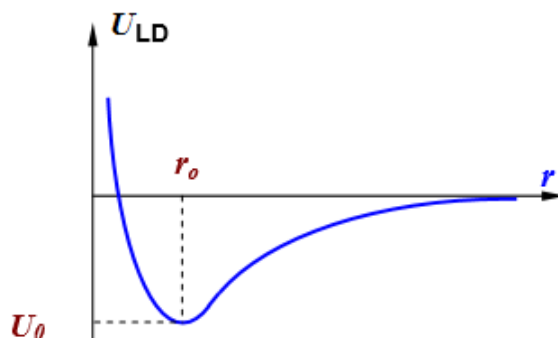


Рисунок 7 – Качественный вид потенциала Леннарда–Джонсона [15]

Возможность получать изображения рельефа поверхности с помощью АСМ основано на регистрации малых изгибов упругой консоли зондового датчика. Для этого в основном используются оптические методы (рисунок 8).

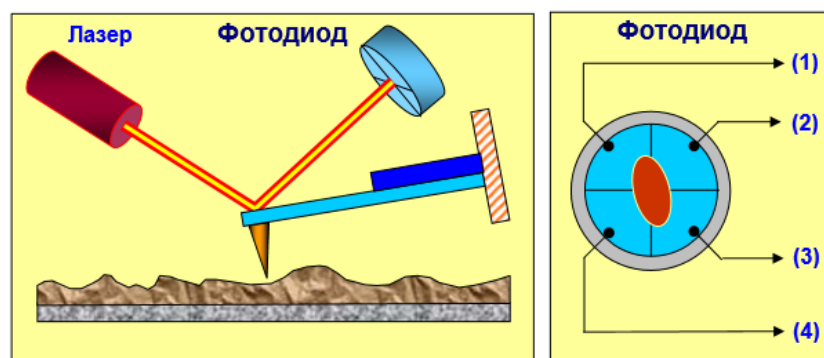


Рисунок 8 – Схема оптической регистрации изгиба консоли зондового датчика АСМ [15]

Система «лазер–зонд–фотодиод» юстируется таким образом, чтобы излучение полупроводникового лазера было сфокусировано на кантилере, а отраженный луч попадал на фотоприемник. В качестве позиционно-

чувствительных фотоприемников применяются четырехсекционные полупроводниковые фотодиоды.

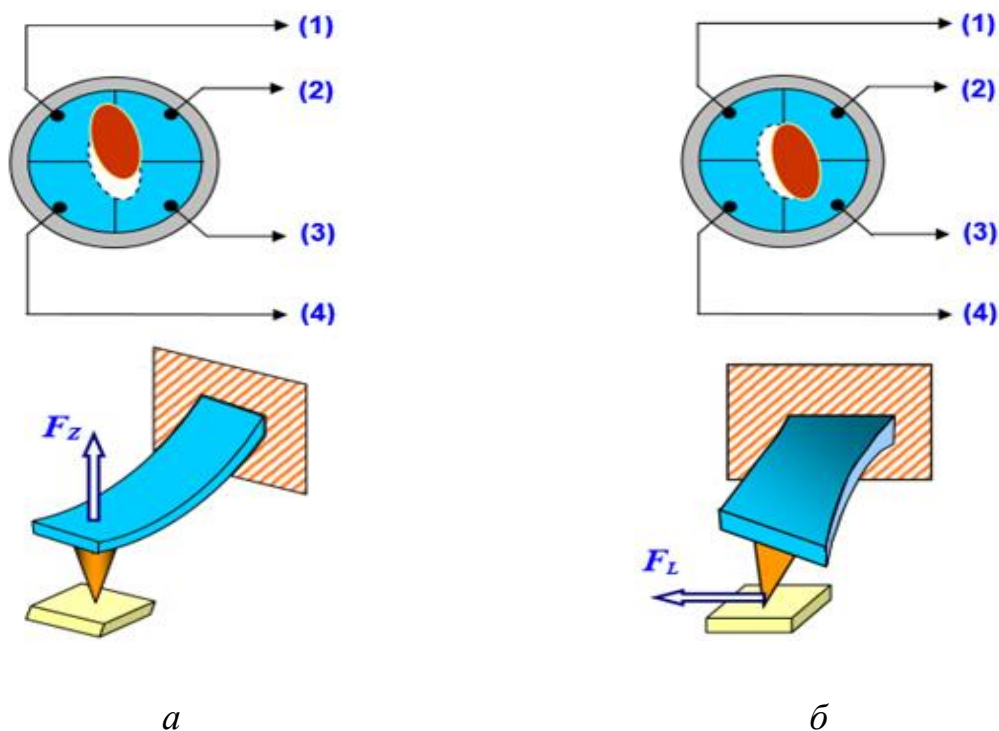


Рисунок 9 – Соответствие между типом деформаций консоли зондового датчика и изменением положения пятна засветки на фотодиоде [15]

Такая система регистрирует деформации изгиба консоли под действием сил взаимодействия зонда с поверхностью. Обозначим значения фототока в секциях фотодиода через $I_{01}, I_{02}, I_{03}, I_{04}$, а через I_1, I_2, I_3, I_4 – значения токов после изменения состояния консоли, тогда изменение токов с различных секций фотодиода $\Delta I_i = I_i - I_{0i}$ будут прямо характеризовать величину и вид изгиба консоли зонда АСМ. Разность токов вида $\Delta I_z = (\Delta I_1 + \Delta I_2) - (\Delta I_3 + \Delta I_4)$ пропорциональна изгибу консоли под действием силы, действующей перпендикулярно поверхности образца (рисунок 9, а), а разность токов вида $\Delta I_L = (\Delta I_1 + \Delta I_4) - (\Delta I_2 + \Delta I_3)$ характеризует изгиб консоли под действием силы, действующей вдоль поверхности образца (рисунок 9, б).

Величина ΔI_z используется как входной параметр в петле обратной связи АСМ (рисунок 10). Система обратной связи (ОС) обеспечивает постоянство этой величины при помощи пьезоэлектрического элемента, который регулирует изгиб консоли равным величине, задаваемой оператором.

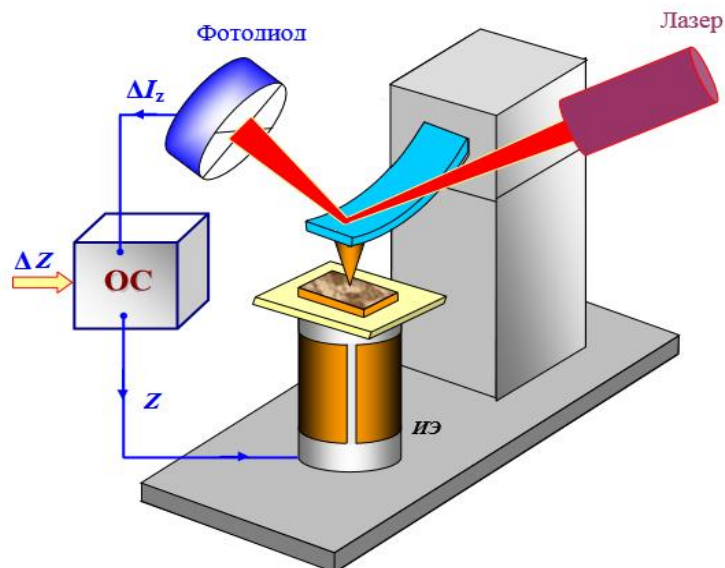


Рисунок 10 – Упрощенная схема организации обратной связи в атомно-силовом микроскопе [15]

Сканирование образца производится перемещением зонда вдоль поверхности, при этом напряжение на оптической системы записывается в память компьютера в качестве рельефа поверхности. Радиус закругления зонда и чувствительность системы регистрации – основные параметры определяющие пространственное разрешение АСМ. Современные АСМ позволяют получать атомарное разрешение при исследовании поверхности образцов.

Методы сканирования поверхности в атомно-силовой микроскопии делятся на две большие группы: контактные методы (контактный режим) и динамические методы. Разделение происходит по принципу движения кантилевера.

В контактных методиках остриё зонда находится в контакте с поверхностью. Формирование изображения рельефа в таких режимах происходит либо при постоянной силе взаимодействия зонда с поверхностью, либо при фиксированном среднем расстоянии между зондом и образцом. При сканировании образца в режиме постоянной силы система обратной связи поддерживает постоянной величину деформации кантилевера, а значит, и силу взаимодействия зонда с поверхностью (рисунок 11). Напряжение, подаваемое

на Z-электрод сканера для поддержания постоянно силы, будет повторять рельеф поверхности.

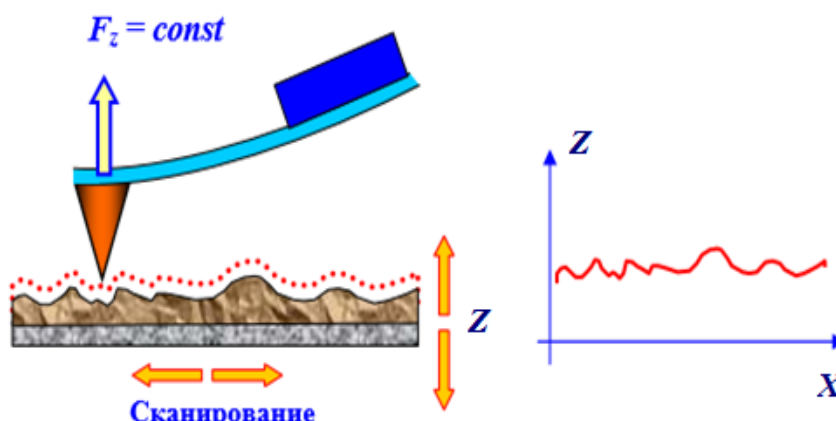


Рисунок 11 – Формирование АСМ изображения в контактном режиме [15]

Недостатком контактных АСМ методик является механическое воздействие зонда на поверхность образца. Это приводит не только к деградации параметров зонда, но иногда к его поломке или разрушению поверхности образца. В таких режимах используются кантилеверы хорошо поддающиеся деформации, что позволяет добиться большей чувствительности и избежать разрушительного воздействия зонда на образец. Стоит отметить, что контактные методики практически не пригодны для исследования образцов, обладающих малой механической жесткостью, таких как структуры на основе органических материалов и биологические объекты.

Динамические методы регистрации рельефа поверхности значительно расширяют возможности атомно-силовой микроскопии. В таких режимах зонд приводится в колебательное движение на собственной резонансной частоте кантилевера ω_0 . Такие параметры вынужденных колебаний, как амплитуда, частота и сдвиг фазы, зависят от среднего расстояния между зондом и поверхностью (рисунок 12). На этом основаны различные способы регистрации рельефа поверхности в динамических режимах.

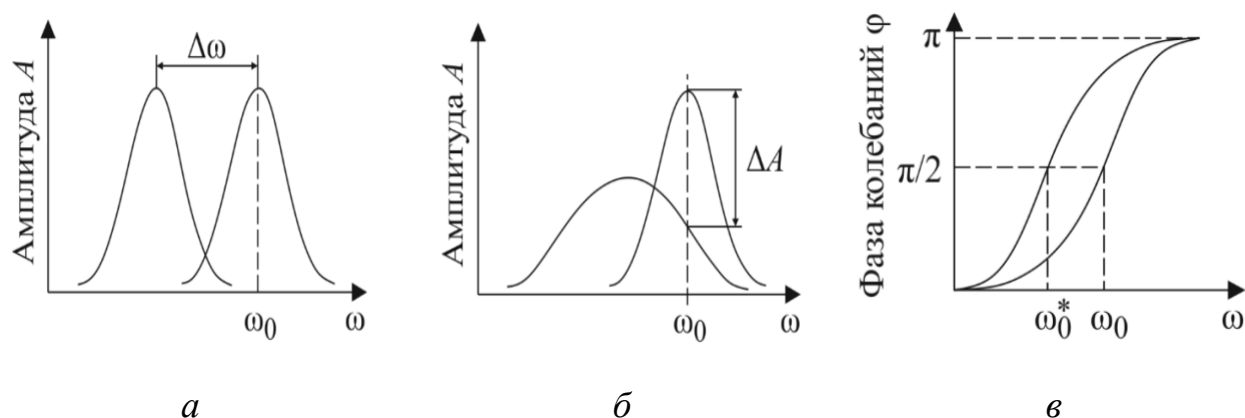


Рисунок 12 – Способы регистрации взаимодействия зонда с поверхностью образца: *a* – по сдвигу резонансной частоты; *б* – по уменьшению амплитуды вынужденных колебаний из-за изменения добротности; *в* – по сдвигу фазы колебаний кантилевера вследствие взаимодействия с поверхностью [16]

В режиме АМ-AFM («полуконтактный») для регистрации рельефа поверхности используется амплитуда колебаний. Для этого используют кантилеверы, обладающие высокой механической жесткостью, в которых возбуждаются колебания на резонансной частоте. Дополнительно локальные изменения свойств материала поверхности качественно могут быть визуализированы при регистрации фазового сдвига между «раскачивающим» сигналом и вибрацией зонда в процессе сканирования.

В режиме FM-AFM зонд АС-микроскопа колеблется с фиксированной амплитудой на частоте ω_0 , которая меняется силами взаимодействия зонда и поверхности. В качестве параметра для построения рельефа поверхности выступает зависимость сдвига фактической резонансной частоты от резонансной частоты свободного кантилевера. В таком режиме изображение поверхности регистрируется без механического контакта, поэтому такой режим называется «бесконтактным» (noncontact AFM, NC-AFM). Этот режим позволяет получать атомарное разрешение поверхности в условиях ультравысокого вакуума.

Эксперименты в ультравысоком (сверхвысоком) вакууме, как правило, проводятся в режиме FM-AFM, а эксперименты на воздухе и в жидкостях осуществляют с помощью AM-AFM. Обычно это связано с добротностью кантилевера: для одного и того же зондового датчика, к примеру, добротность Q в вакууме составляет ≈ 1000 , на воздухе $Q \approx 200\dots 500$ и $Q \approx 10\dots 50$ в жидкости.

Электросиловые методы позволяют получать информацию о свойствах образца, используя электрическое взаимодействие между зондом и образцом. Система состоит из зондового датчика, у которого зонд имеет проводящее покрытие, и образца, представляющего собой тонкий слой материала на хорошо проводящей подложке.

Между зондом и образцом подается постоянное напряжение U_0 и переменное напряжение $U_{\sim} = U_1 \sin(\omega t)$. Тонкий слой на подложке может содержать поверхностный заряд, так что на поверхности образца существует распределение потенциала $\varphi(x, y)$. Напряжение между зондом и поверхностью образца можно представить в виде (3):

$$U = U_0 + U_1 \sin(\omega t) - \varphi(x, y). \quad (3)$$

Система зонд–образец обладает некоторой электрической емкостью C , поэтому энергия этой системы может быть представлена в следующем виде (4):

$$E = \frac{CU^2}{2}, \quad (4)$$

тогда электрическая сила взаимодействия зонда и образца равна (5):

$$F = -grad(E), \quad (5)$$

а ее Z -компонента может быть представлена в виде (6):

$$F_z = -\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{1}{2}U^2 \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (6)$$

Составляющая на частоте ω_0 выражается формулой (7):

$$F_{z(\omega)} = -[(U_0 - \varphi(x, y))U_1 \sin(\omega t)] \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (7)$$

Детектирование сигнала на частоте ω_0 позволяет получить картину распределения поверхностного потенциала $\varphi(x, y)$ (так называемый метод

Кельвина). Для этого применяется двухпроходный метод сканирования. При сканировании образца на втором проходе в каждой точке производится перестройка источника постоянного напряжения U_0 таким образом, чтобы амплитуда колебаний кантилевера на частоте ω становилась равной нулю. Это происходит в том случае, если $U_0 = \varphi(x, y)$.

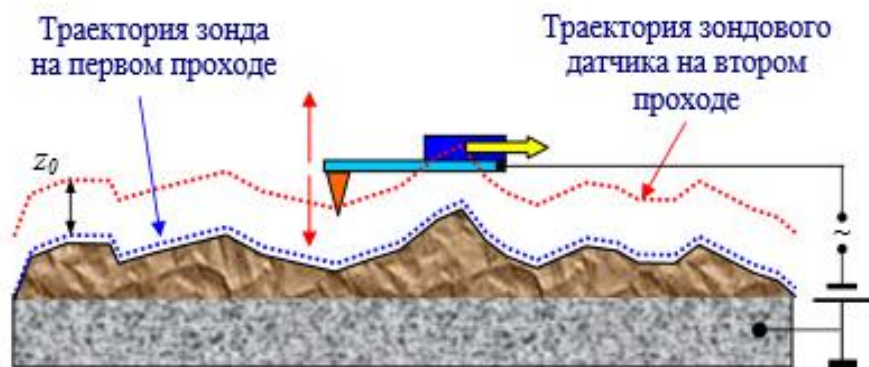


Рисунок 13 – Двухпроходный метод сканирования [15]

3. Обработка результатов измерений и оценка результатов исследований

Основываясь на картах фотолюминесценции была выбрана область с наибольшей интенсивностью фотолюминесценции с энергиями соответствующими монослою (1.57 эВ) и бислою (1.54 эВ).

На рисунке 14 представлена топография и поверхностный потенциал образца.

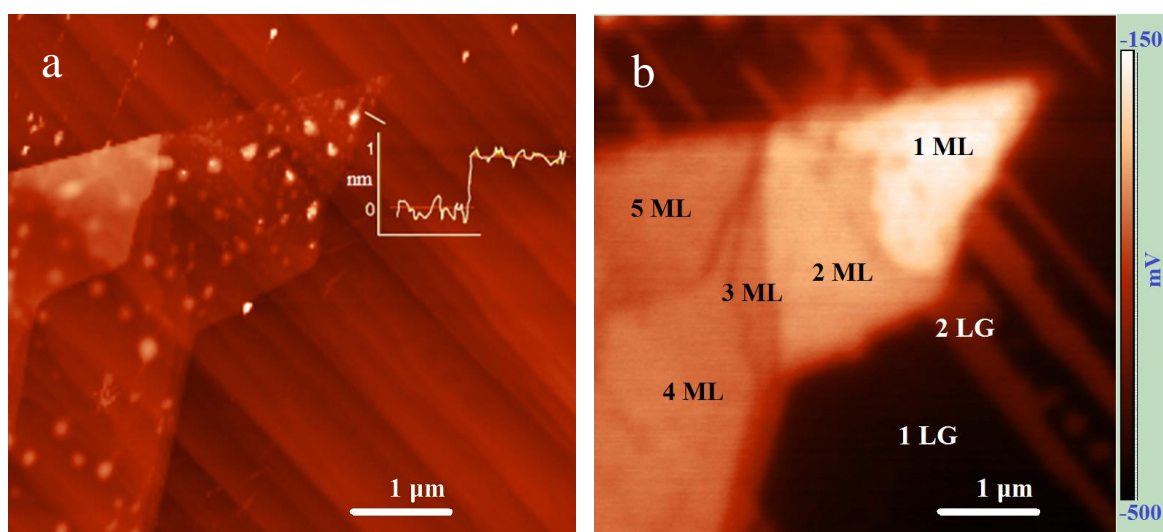


Рисунок 14 – Топография поверхности образца (a); Распределение поверхностного потенциала (b).

Из рисунка 14(a) видно, что острие области имеет ступеньку высотой около 1 нм, что можно оценить, как монослойную область. Шероховатость поверхности внутри террасы в среднем несколько единиц ангстрем. Также топография содержит области с большим количеством слоев. Перепад между этими областями также составляет около 1 нм.

На рисунке 14(b) Представлено распределение поверхностного потенциала того же участка, полученное в режиме зонда Кельвина. Из рисунка 14(b) видно, что монослойная область имеет самый высокий (-200 мВ) поверхностный потенциал, который снижается по мере увеличения числа слоев структуры. Самый низкий поверхностный потенциал имеют области однослойного графена(-450 мВ). Так же видно, что область содержит

более светлые террасы бислойного графена. Стоит отметить, что участок монослойного MoSe_2 лежит на поверхности с монослоем и бислоем графена. Однако распределение поверхностного потенциала MoSe_2 практически однородно, что указывает на полную экранировку потенциала подложки даже монослоем MoSe_2 . Подобные карты распределения были сняты для различных уровней влажности воздуха. По этим данным была построена зависимость поверхностного потенциала для различного числа слоев, при различных уровнях влажности воздуха, которая представлена на рисунке 15.

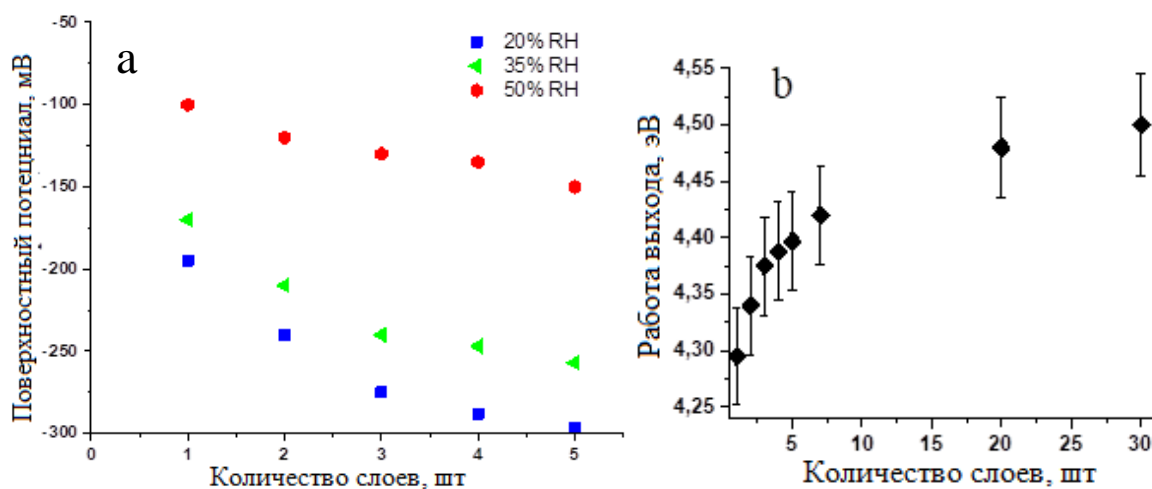


Рисунок 15 – Зависимость поверхностного потенциала(а) и работы выхода(б) от количества слоев структуры.

Из рисунка 15(а). видно, что с увеличением числа слоев структуры происходит снижение поверхностного потенциала, причем для первых слоев это снижение более существенно, чем для последующих. Увеличение влажности приводит к экранировке поверхностного потенциала слоя MoSe_2 слоем адсорбированной влаги, что согласуется с известными результатами подобного исследования для MoS_2 [4].

Для определения работы выхода участков MoSe_2 с разным количеством слоёв, использовалось известное значение работы выхода моно- и бислоёв графена, 4.55 и 4.44 эВ соответственно. Основываясь на распределении поверхностного потенциала, была построена зависимость работы выхода от количества слоев MoSe_2 (рисунок 15(б)). Из рисунке 15(б) видно, что увеличение количества слоёв MoSe_2 приводит к нелинейному увеличению их

работы выхода, что можно объяснить особенностями межслоевого экранирования[4]. Было исследовано несколько участков образца с различным количеством слоёв, измеренные значения работы выхода достаточно хорошо воспроизводились.

После определения количества слоев конкретных частей структуры было проведено исследование фотолюминесценции участков монослойного MoSe₂, лежащих на однослойном и на двухслойном графене (рис.16). Для сравнения был получен спектр фотолюминесценции монослоя MoSe₂ на подложке SiO₂.

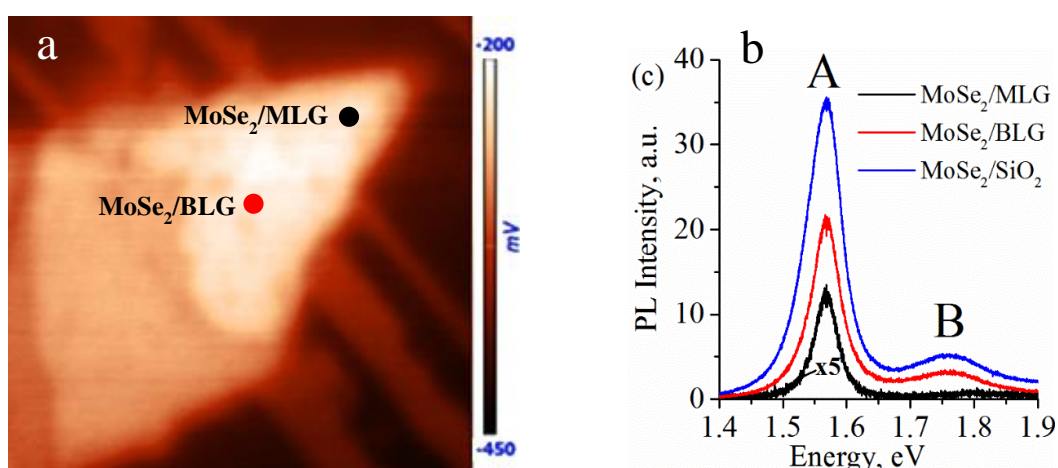


Рисунок 16 – Точки записи спектров люминесценции MoSe₂ графене (а); Спектры люминесценции MoSe₂ на однослойном и двухслойном графене, а также на SiO₂ (b).

Как видно из рисунка 16 (b), самую интенсивную фотолюминесценции MoSe₂ показывает на подложке SiO₂. Интенсивность фотолюминесценции MoSe₂ на двухслойном графене в 1.5 раза ниже, чем на SiO₂. Самую низкую интенсивность фотолюминесценции MoSe₂ показывает на однослойном графене, на порядок ниже, чем на двухслойном. Для объяснения причин такой зависимости фотолюминесценции от подложки необходимо детально рассмотреть фотоиндуцированные процессы, протекающие на границе гетероперехода MoSe₂ – графен.

На основании данных Кельвин-зонд микроскопии были построены зонные диаграмма гетеропереходов, которые позволяют объяснить протекающие процессы.

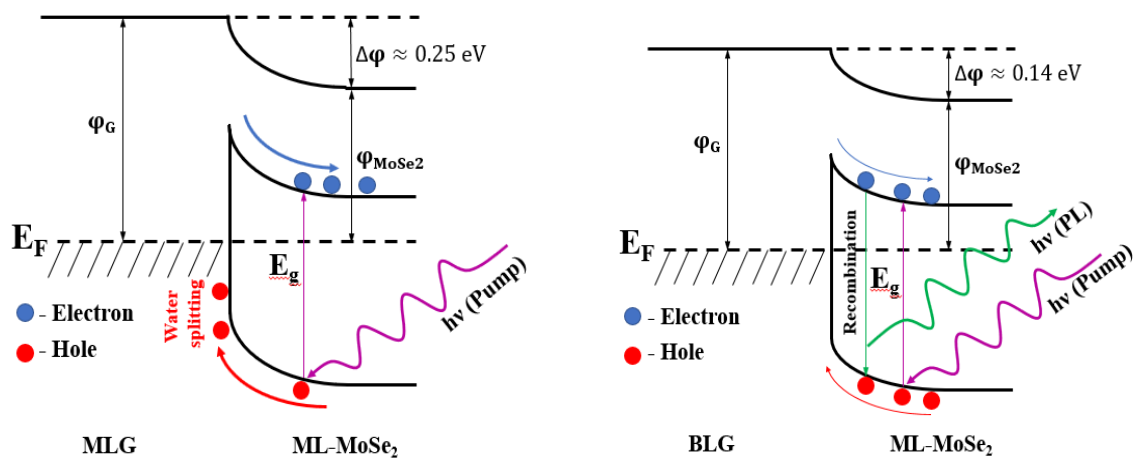


Рисунок 17 – Зонные диаграммы гетеропереходов на границе монослойного MoSe₂ с (a) монослойным и (b) двухслойным графеном.

Основываясь на зонных диаграммах MoSe₂/MLG и MoSe₂/BLG (рис.17), можно сказать, что в случае гетероперехода в однослойном графеном эффективная рекомбинация на гетеропереходе сильно затруднена высоким барьером, который эффективно разделяет носители заряда. Образовавшийся в результате фотогенерации экситон не успевает рекомбинировать и разрывается полем перехода. Поэтому фотолюминесценция на интерфейсе с монослойным графеном ослаблена. В случае с двухслойным графеном барьер не такой высокий и образовавшиеся экситоны успевают рекомбинировать до того, как поле перехода разорвет их и выбросит дырку на интерфейс гетероперехода. Это обеспечивает достаточно высокий уровень люминесценции на гетеропереходе с двухслойным графеном. Подобный эффект более интенсивной фотолюминесценции на двухслойном графене уже наблюдался в работе [14], где исследовалась фотолюминесценция WSe₂. В случае с интерфейсом SiO₂ на границе с диэлектриком не происходит разделения заряда и рекомбинация наиболее эффективна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе были исследованы тонкие слои MoSe_2 на графене с помощью сканирующей зондовой микроскопии. Определены зависимости поверхностного потенциала и функции работы от количества слоев и уровня влажности воздуха. Работа выхода монослоя MoSe_2 составляет 4,3 эВ. Работа выхода увеличивается с увеличением количества слоев и насыщается в значении 4,5 эВ, что соответствует объемному MoSe_2 . Исследована зависимость фотолюминесценции MoSe_2 от количества слоев графена. Построены зонные диаграммы, и рассмотрены фотоиндуцированные процессы, объясняющие зависимость фотолюминесценции. Данные, полученные в работе, могут быть важны для определения количества слоев MoSe_2 и для проектирования наноустройств. Результаты работы позволяют рассматривать СЗМ как эффективный метод определения количества слоев в MoSe_2 .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Fontana M. Electron-hole transport and photovoltaic effect in gated MoS₂ Schottky junctions./ M. Fontana, T. Deppe, A. Boyd, M. Rinzan, A. Liu, M. Paranjape, P. Barbara // Scientific Reports. –2013- Vol. 3- P. 1634.
2. Zeng H. Valley polarization in MoS₂ monolayers by optical pumping./ H. Zeng, J. Dai, W. Yao, D. Xiao, X. Cui // Nature Nanotechnology. –2012- Vol. 7- P. 490.
3. Duan X. Two-dimensional transition metal dichalcogenides as atomically thin semiconductors: opportunities and challenges./ X. Duan, C. Wang, A. Pan, R. Yu // Chem. Soc. Rev. –2015- Vol. 44- P. 8859.
4. Feng Y. In situ visualization and detection of surface potential variation of mono and multilayer MoS₂ under different humidities using Kelvin probe force microscopy./ Y. Feng, K. Zhang, H. Li, F. Wang, B. Zhou, M. Fang, W. Wang, J. Wei, H. Wong // Nanotechnology –2017- Vol. 28- P. 295705.
5. Schmidt H. Electronic transport properties of transition metal dichalcogenide field-effect devices: surface and interface effects./ H. Schmidt, F. Giustiniano, G. Eda // Chem. Soc. Rev. –2015- Vol. 44- P. 7715–7736.
6. Tonndorf P. Photoluminescence emission and Raman response of monolayer MoS₂, MoSe₂, and WSe₂./ P. Tonndorf, R. Schmidt, P. Böttger, X. Zhang, J. Börner, A. Liebig, M. Albrecht, C. Kloc, O. Gordan, D. Zahn, S. Michaelis, R. Bratschitsch // Optics Express. –2013- Vol. 21- P. 4908–4916.
7. Lundt N. Monolayered MoSe₂: a candidate for room temperature polaritonics./ N. Lundt, A. Maryński, E. Cherotchenko, A. Pant, X. Fan, S. Tongay, G. Şek, A. Kavokin, S. Höfling, C. Schneider // 2D Materials. –2017- Vol. 4- 015006.
8. Давыдов В. Ю. Исследование кристаллической и электронной структуры графеновых пленок, выращенных на 6H-SiC (0001) / В. Ю.

Давыдов, Д. Ю. Усачёв, С. П. Лебедев // Физика и техника полупроводников. – 2017- Т.51- № 6- С. 7–10.

9. Panchal V. Standardization of surface potential measurements of graphene domains / V. Panchal, R. Pearce¹, R. Yakimova // Scientific reports. – 2013- № 3- P. 1–20.

10. Чернозатонский Л.А. Квазидвумерные диалкогениды переходных металлов: структура, синтез, свойства и применение./ Л.А. Чернозатонский, А.А. Артюх // Успехи физической наук. – 2018- Т.188-№1, С. 4-30.

11. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие. / НН.: Изд-во ИФМ РАН, 2004. С. 87–110.

12. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие. / В. А. Мошников и др. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014 – 144 с.

13. Tongay S. Thermally Driven Crossover from Indirect toward Direct Bandgap in 2D Semiconductors: MoSe₂ versus MoS₂./ S. Tongay, J. Zhou, C. Ataca, K. Lo, T. Matthews, J. Li, J. Grossman, J. Wu // Nano Lett. – 2012- Vol. 12- P.5576–5580.

14. Giusca, C. E., Rungger, I., Panchal, V., Melios, C., Lin, Z., Lin, Y. C., ... & Kazakova, O. (2016). Excitonic effects in tungsten disulfide monolayers on two-layer graphene. ACS nano, 10(8), 7840-7846.