

Исследование нелинейно-оптической релаксации в пленках MoS_2 с различным количеством слоев

© И.И. Кондрашов^{1,2}, П.В. Федотов^{1,2}, А.Н. Деревяго³, С.Н. Бокова-Сирош^{1,2}, А.В. Осадчий¹,
Е.Д. Образцова^{1,2}, П.А. Чижов^{1,2}✉

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московская обл., Россия

³ Белорусский государственный университет,
Минск, Беларусь

✉ e-mail: pvch@inbox.ru

Поступила в редакцию 10.12.2025 г.

В окончательной редакции 04.02.2025 г.

Принята к публикации 03.06.2025 г.

В настоящей работе представлены результаты исследований оптических свойств малослойных пленок дисульфида молибдена (MoS_2), синтезированных методом химического осаждения из газовой фазы (CVD), нанесенных на кварцевые подложки. Проведен анализ количества слоев в синтезированных пленках, исследованы их спектры фотолюминесценции и оптического поглощения. Методом оптической накачки-зондирования определены времена сверхбыстрой релаксации. Подтверждено существование зависимости времени медленной релаксации от числа слоев материала вблизи экситонных полос A и B .

Ключевые слова: химическое осаждение из газовой фазы (CVD), MoS_2 , малослойные пленки, спектроскопия комбинационного рассеяния, фотолюминесценция, накачка-зондирование, экситоны, сверхбыстрая релаксация.

DOI: 10.61011/OS.2026.08.63702.17-26

Введение

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) представляют собой слоистые неорганические полупроводники с формулой MX_2 , где M представляет переходные металлы (Mo , W , Ti), а X — халькогены (S , Se , Te). Они могут формировать структуры, состоящие из нескольких слоев материала, что позволяет гибко управлять их оптоэлектронными и фотолюминесцентными (ФЛ) свойствами [1–6]. Существуют разные способы получения малослойных пленок ДПМ, такие как механическая эксфолиация [7,8], эксфолиация в жидкости [9,10], магнетронное напыление [11], импульсное лазерное осаждение [12], химическое осаждение из газовой фазы (CVD) [13–15], молекулярно-лучевая эпитаксия [16]. Среди дихалькогенидов переходных металлов наиболее отработанным является синтез структур из дисульфида молибдена (MoS_2).

Исследование динамики релаксации фотовозбужденных состояний имеет важное значение, например, для разработки быстродействующих электронных устройств [17–19] и насыщающихся поглотителей [20–22]. Предыдущие работы по исследованию релаксации методом накачки-зондирования показывают многоэкспоненциальную динамику [23–30]. Доминирующими процессами релаксации носителей заряда в MoS_2 являются аннигиляция экситонов (сотни фемтосекунд), захват экситонов поверхностными состояниями (несколько пикосекунд) и межзонное рассеяние носите-

лей заряда на фононах (десятки пикосекунд). При этом стоит отметить, что метод синтеза и материал подложек способны менять скорость релаксации в образцах с одинаковым числом слоев.

В настоящей работе приводятся результаты исследований методом оптической накачки-зондирования временных динамик релаксации изменения пропускания моно- и малослойных пленок MoS_2 , выращенных CVD-методом и перенесенных на кварцевые подложки. Для определения числа слоев в выращенных образцах применялись методы спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света, спектроскопии оптического поглощения и ФЛ-спектроскопии.

1. Методы

1.1. Синтез MoS_2

В наших экспериментах использовалась кварцевая трубка диаметром 4 см, заполненная аргоном, для выращивания пленок MoS_2 при атмосферном давлении и температурах около 700–800 °С. Для выращивания пленок на кремниевых подложках использовались твердые прекурсоры (оксид молибдена и сера). В качестве дополнительного агента к оксиду молибдена добавлялся порошок NaCl . Он оказывает вспомогательное действие на процесс синтеза, снижая температуру разложения оксида молибдена, способствует равномерному распределению компонентов и помогает формировать допол-

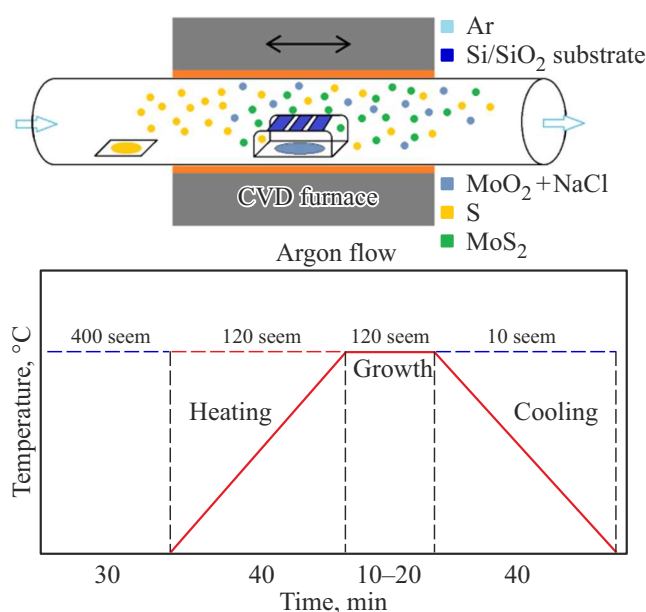


Рис. 1. Ростовая установка и диаграмма процесса синтеза.

нительные дисульфидные центры роста [31,32]. Временная шкала и принципиальная схема процесса синтеза представлены на рис. 1. Смесь порошков массой около 10–20 mg высокочистого (99.9 %) оксида молибдена и хлорида натрия в соотношении 1 к 5 помещалась в фарфоровую лодочку высотой и шириной около 1 см. Кремниевые пластины длиной около 1 см и толщиной оксида 300 nm, предварительно очищенные ультразвуком в ацетоне, в спирте, промытые в деионизированной воде и высушенные, помещались на верхнюю часть лодочки обратной стороной вверх. Подложки располагались на расстоянии около 2 mm друг от друга. Диффузия паров в такой конфигурации приводит к некоторым неоднородностям и росту объемного MoS₂. Но это справедливо только для подложек в центре, в то время как на боковых подложках рост более равномерный. 200 mg 99.9 % порошка серы помещались в фарфоровый тигель перед лодочкой на расстоянии около 20 cm. Сначала кварцевая трубка откачивалась до 10⁻³ mbar, а затем, пока печь нагревалась, в трубку в качестве газоносителя подавался аргон высокой чистоты — 99.99 %. Подложки и прекурсоры находились в трубке вне печи, не подвергаясь воздействию нагревательных элементов. Достижение требуемой температуры занимает около 40 min при скорости нагрева 17 deg/min. Лодочка со смесью MoO₃ и NaCl помещалась в центр печи, а порошок серы — на край, со стороны входа. Происходило разложение оксида молибдена и взаимодействие с парами серы, что приводило к осаждению на поверхности кремниевых пластин и образованию плёнки дисульфида молибдена [33,34]. Время синтеза составляло порядка 10–20 min при расходе аргона около 120 cm³/min. Затем печь выключалась, а кварцевая трубка возвращалась в исходное положение для быстрого охлаждения.

1.2. Перенос пленок MoS₂

Для последующего исследования методом оптической накачки-зондирования в просвечивающей геометрии дисульфидные пленки были перенесены с исходных кремниевых подложек на прозрачные кварцевые подложки. На кремниевую подложку поверх дисульфидной пленки наносился полиметилметакрилат методом центрифугирования со скоростью 3000 rpm, он запекался при температуре 180 °C. Затем подложка была помещена в раствор гидроксида калия и установлена на горячую плитку с температурой 120 °C. Схематическое изображение процесса переноса показано на рис. 2. Этот метод часто используется для переноса пленок MoS₂ с кремниевых подложек и при некритических концентрациях не влияет на свойства пленок [35,36]. В течение 1–2 h слой оксида кремния стравливался, в результате чего дисульфидная пленка с нанесенным ПММА (полиметилметакрилат) отделялась. Пленку промыли в деионизированной воде, перенесли на кварцевую подложку, а затем поместили в ацетон, который растворил ПММА. Затем подложку снова промыли и отожгли в печи под вакуумом при 150 °C в течение 30 min для удаления возможных остаточных загрязнений. В ФЛ- и КР-спектрах не было заметно значительных изменений по сравнению со спектрами до отжига [37]. Для наложения слоев дисульфида друг на друга пленку с одним слоем дисульфида переносили на подложку с уже перенесенной на нее пленкой.

1.3. Оптические измерения

Спектры КР и фотолюминесценции (ФЛ) регистрировались при помощи спектрометра LabRAM HR Evolution, оснащенного одним монохроматором и набором сверхнизкочастотных фильтров (ULF). Для оптического возбуждения использовались диодный лазер (длина волны 532 nm) и гелий-неоновый лазер (632.8 nm). Спектральное разрешение спектров КР и ФЛ составляло 1.0 cm⁻¹ и 1 nm соответственно.

Спектры оптического поглощения (УФ-Вид-БИК) образцов получали с помощью двухканального спектрофотометра (Perkin-Elmer Lambda 950). Спектральное разрешение составляло 0.5 nm в спектральном диапазоне 200–3000 nm (6.2–0.41 eV).

Для исследования сверхбыстрой временной динамики релаксации фотовозбужденных пленочных образцов использовалась схема накачки-зондирования (рис. 3). Выходной пучок титан-сапфировой лазерной системы (3 mJ, 800 nm, 40 fs, диаметр 12 mm по уровню 1/e², частота повторения 1 kHz) разделялся на две части (80%/20%).

Мощная часть излучения удваивалась по частоте в кристалле β-BVO (I-тип, 10 × 10 × 0.2 mm) для генерации излучения накачки на длине волны 400 nm. Для регулировки мощности в пучок устанавливались полуволновая пластинка и поляризатор Глана-Тейлора. Для устранения излучения основной гармоники использовался второй поляризатор Глана-Тейлора. Пучок накачки

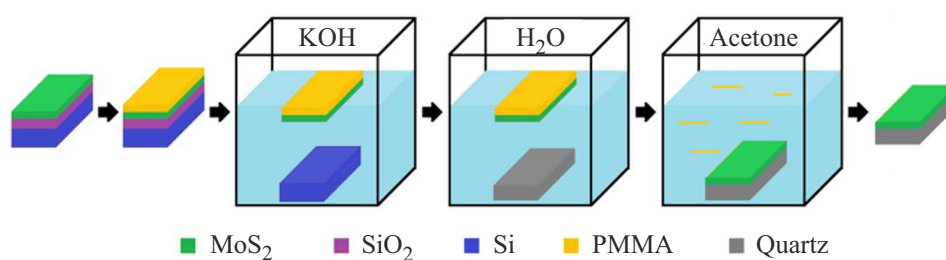
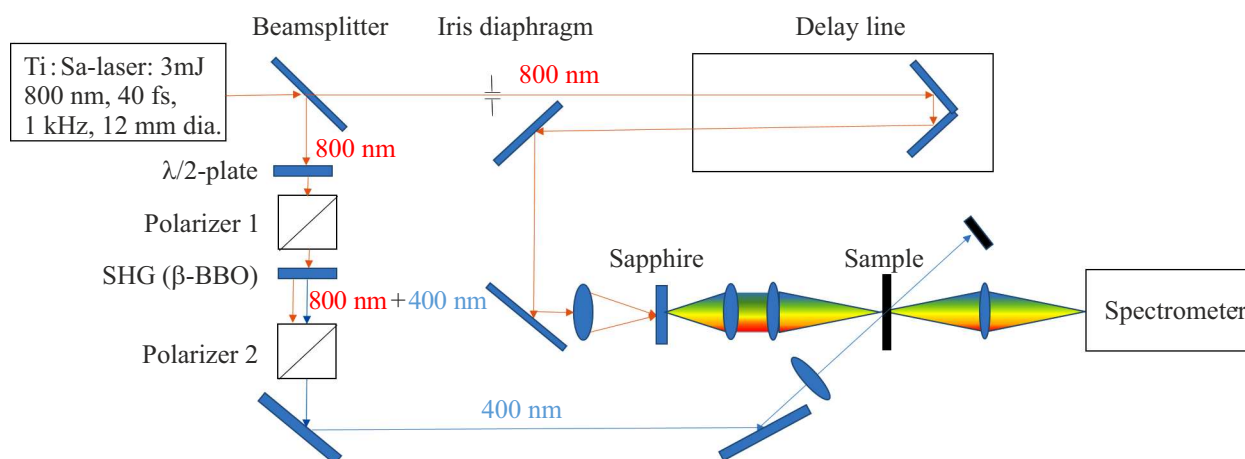
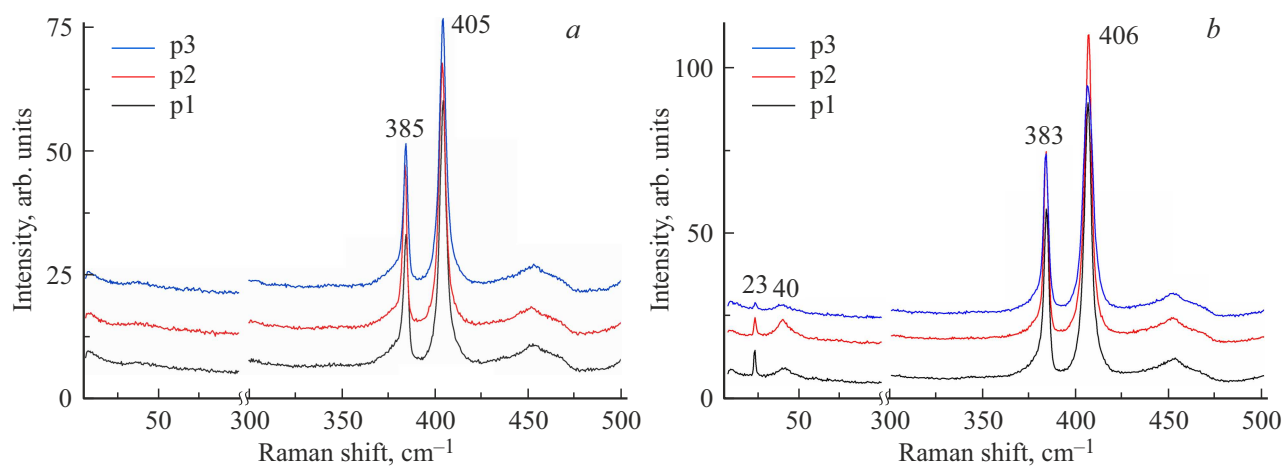
Рис. 2. Схема процесса переноса пленок MoS_2 .

Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования методом накачка-зондирование.

Рис. 4. Типичные спектры КР света синтезированных монослойных областей MoS_2 (a) и двухслойных областей MoS_2 (b). Длина волны возбуждения — 532 нм. Спектры измерены в различных областях образцов (p1, p2, p3).

фокусировался на образец линзой с фокусным расстоянием 15 см. Диаметр пучка на образце устанавливался около 3 мм таким образом, что фокус находился за образцом. Энергетика накачки на образце составляла порядка $300 \mu\text{J}/\text{cm}^2$.

Второй пучок проходил через ирисовую диафрагму для регулировки мощности, а затем через моторизованную линию задержки (для управления временной задержкой зондирующего излучения относительно фото-

возбуждения, вызванного накачкой). Он фокусировался линзой с фокусным расстоянием 12.5 см в сапфировой пластинке для генерации зондирующего излучения суперконтинуума. Выходной суперконтинуум коллимировался (линзой с фокусным расстоянием 5 см) и затем фокусировался другой линзой с фокусным расстоянием 15 см на образец с размером пучка $\sim 100 \mu\text{m}$. Излучение суперконтинуума, прошедшее через образец, собиралось линзой (с фокусным расстоянием 5 см) на волоконный

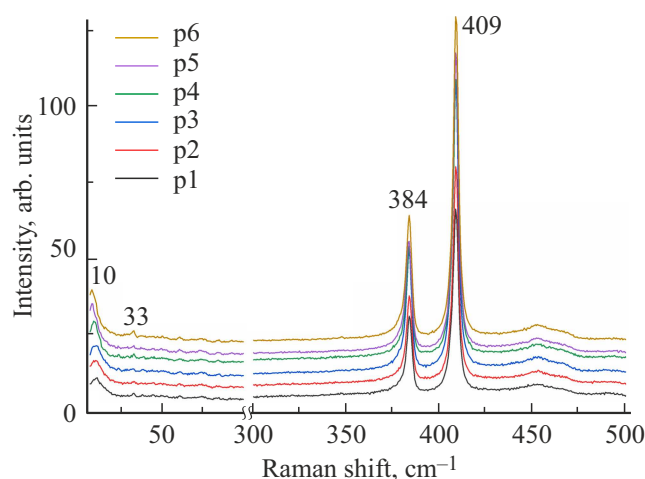


Рис. 5. Типичные спектры КР света синтезированных ML MoS₂-пленок. Длина волны возбуждения — 532 нм. Спектры измерены в различных областях образцов (p1–p6).

вход спектрометра (Avesta ASP-150T). Диапазон детектирования спектрометра устанавливался от 530 до 680 нм.

Пересечение пучков накачки и зондирования происходило под углом $\sim 15^\circ$, при этом зондирующий пучок распространялся через центр пятна накачки на образце. В пучок накачки устанавливался автоматический затвор для реализации измерений спектра зондирующего излучения с фотовозбуждением образца мощным пучком и без него.

Предполагается, что длительность импульсов накачки и зондирования составляет менее 60 fs из-за дисперсии в оптических элементах. Таким образом, минимальный используемый временной шаг задержки был установлен равным 50 fs. Усредненные спектры регистрировались для фотовозбужденного и невозбужденного образцов при различных задержках между импульсами накачки и зондирования.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Спектроскопия КР

Синтезированные образцы MoS₂ имеют характерные моды КР E_{2g}^1 и A_{1g} , свойственные кристаллическому MoS₂ [38]. Аналогичные моды наблюдались в образцах MoS₂, полученных методом отщепления от кристаллов объемного MoS₂ монослойных и малослойных флейков [38]. У аморфного MoS₂ эти пики гораздо менее выражены и уширяются [39,40].

Синтезированные образцы монослойного (1L) и многослойного MoS₂ были охарактеризованы методом спектроскопии КР. В типичных спектрах КР монослойных образцов MoS₂ наблюдаются характерные моды E_{2g}^1 и A_{1g} MoS₂ со сдвигом 385 и 405 см⁻¹ соответственно (рис. 4, а). Разность частот этих мод E_{2g}^1 и A_{1g} зависит от числа слоев. Наблюдаемая разность частот

20 см⁻¹ близка к типичным значениям для монослойного MoS₂ [38]. Как и ожидалось, ультранизкочастотные (ULF) моды для 1L MoS₂ отсутствуют (рис. 4, а).

В монослойных образцах наблюдались небольшие области двухслойного (2L) MoS₂. В типичных спектрах КР 2L MoS₂ присутствуют характерные моды E_{2g}^1 и A_{1g} MoS₂ со сдвигом 383 и 406 см⁻¹ соответственно (рис. 4, б). Разность частот этих мод составляет 23 см⁻¹, что близко к типичным значениям для 2L MoS₂ [38]. В области ULF-сдвигов для 2L MoS₂ зарегистрированы два пика при 23 и 40 см⁻¹, связанные со сдвиговой модой и „дыхательной“ модой слоя (LBM) двухслойного MoS₂ соответственно [41].

Синтезированные образцы малослойных (ML) пленок MoS₂ также демонстрируют характерные моды MoS₂ в спектрах КР (рис. 5). Характерные моды E_{2g}^1 и A_{1g} синтезированного ML MoS₂ располагаются со сдвигом 384 и 409 см⁻¹ соответственно, что связано с наличием 5 и более слоев MoS₂ [38]. В области ULF-сдвигов ML MoS₂ были зарегистрированы два пика примерно на частотах 33 и 10 см⁻¹. Пик при 33 см⁻¹ связан со сдвиговой модой 5 и более слоев MoS₂, а широкий пик примерно на частоте 10 см⁻¹ связан с LBM 6–10 слоев MoS₂ [41].

2.2. Спектроскопия оптического поглощения и ФЛ

Синтезированные образцы монослойных и многослойных пленок MoS₂ были исследованы методом ФЛ-спектроскопии. Было обнаружено, что синтезированные образцы монослойного MoS₂ демонстрируют яркую ФЛ: спектры ФЛ, как правило, содержат один пик с максимумом при 667–669 нм в зависимости от области на образце MoS₂ (рис. 6, а). Отношение интенсивности пика ФЛ 1L MoS₂ к интенсивности моды КР A_{1g} обычно находилось в диапазоне 40–75. Высокая интенсивность ФЛ синтезированного монослойного MoS₂ связана с высоким качеством полученного 1L MoS₂. В то же время синтезированные многослойные пленки MoS₂, как правило, демонстрируют слабую ФЛ (рис. 6, б). В спектрах ФЛ пленок ML MoS₂ был зарегистрирован один пик. Максимум пика ФЛ расположен в диапазоне 672–677 нм в зависимости от области пленки MoS₂. Расчётное отношение пиковой интенсивности ФЛ плёнки ML MoS₂ к интенсивности моды КР A_{1g} обычно составляло менее 0.15. Зарегистрированная низкая интенсивность ФЛ плёнки многослойного MoS₂ по сравнению с ФЛ монослойного MoS₂ ожидаема, поскольку 1L MoS₂ является прямозонным полупроводником, в то время как ML MoS₂ — непрямозонным. Наблюдаемая в синтезированных образцах ФЛ ассоциируется с А-экситонным переходом кристаллического MoS₂ и аналогична результатам для полученных методом отщепления от кристаллов объемного MoS₂ монослойных и малослойных флейков [42].

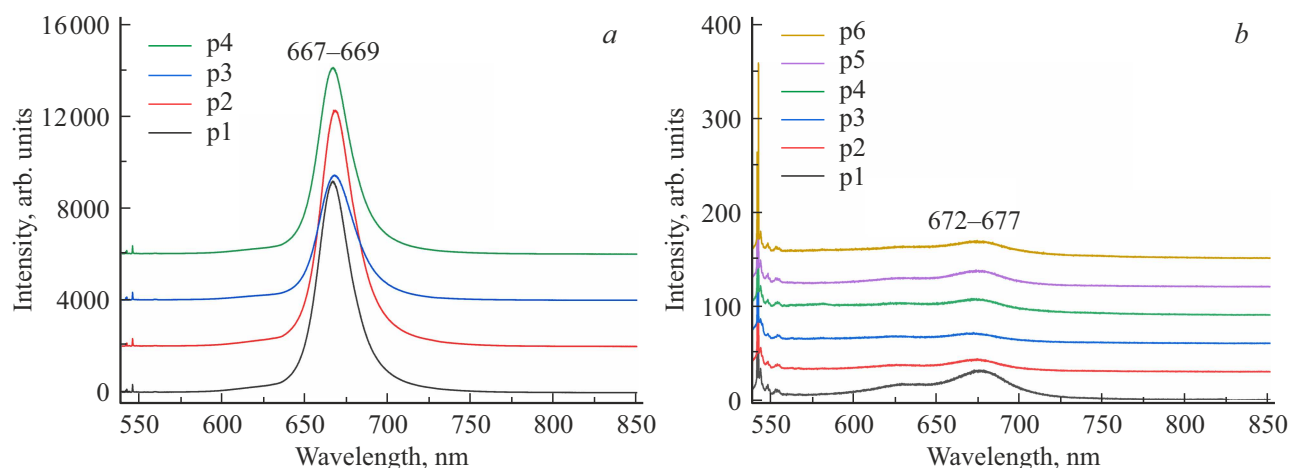


Рис. 6. Типичные спектры ФЛ синтезированного 1L MoS_2 образца (a) и ML MoS_2 пленки (b). Длина волны возбуждения — 532 nm. Спектры измерены в различных областях образцов (p1–p6).

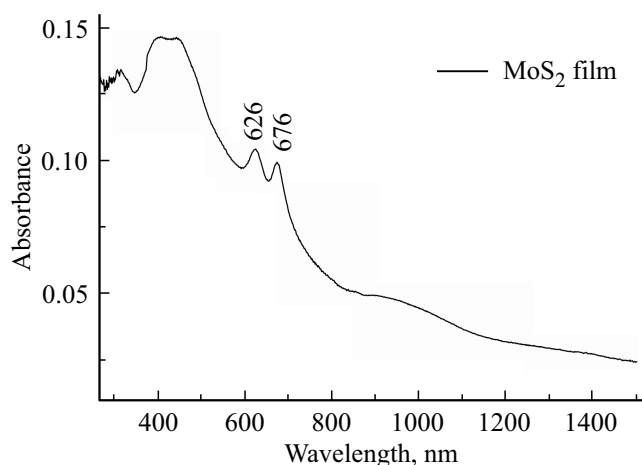


Рис. 7. Типичный спектр оптического поглощения синтезированных пленок ML MoS_2 .

Синтезированные образцы малослойных плёнок MoS_2 были исследованы методом спектроскопии оптического поглощения (ОП) (УФ-Вид-БИК). В типичном спектре ОП ML плёнок MoS_2 были зарегистрированы две характерные линии на длинах волн 676 и 626 nm (рис. 7). Эти пики связаны с фундаментальными переходами MoS_2 , обозначенными как экситонные пики A и B соответственно [43,44].

2.3. Измерения в схеме накачка-зондирование

К сожалению, чувствительность использованной системы накачка-зондирование оказалась недостаточной для выявления карты изменения пропускания по длинам волн в 1L-образце. Однако вблизи пика ФЛ на длине волны 670 nm удалось зарегистрировать кратковременное изменение пропускания (рис. 8). Пиковое изменение пропускания не превышало 1%. Временное поведение на этой длине волны можно описать двумя

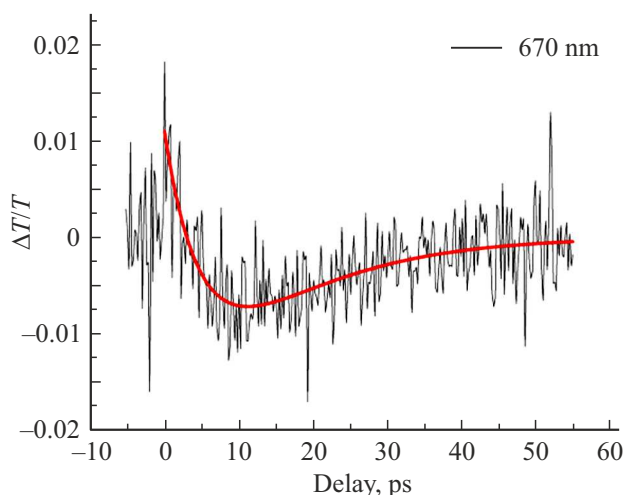


Рис. 8. Дифференциальное изменение пропускания в 1L-пленке на длине волны 670 nm.

экспоненциальными зависимостями с противоположными знаками $\Delta T/T$: быстрая релаксация с положительным изменением пропускания (просветление пленки) $T_{1_1L} = 5.0 \pm 1.5$ ps и медленная с отрицательным изменением пропускания (увеличение поглощения пленки) $T_{2_1L} = 20 \pm 5$ ps.

Двухслойный (2L) и трехслойный (3L) образцы продемонстрировали схожую структуру изменения пропускания с амплитудой до 3%: выделяются две спектральные полосы (рис. 9, a) в районе 660 и 610 nm с положительным значением изменения пропускания (просветление образца). Данные полосы соответствуют экситонам A и B и связываются с обеднением основного состояния [45]. Вне данных полос наблюдается отрицательное изменение пропускания (увеличение поглощения образца). Помимо этого, стоит отметить небольшое смещение положения центра экситонных полос в течение порядка

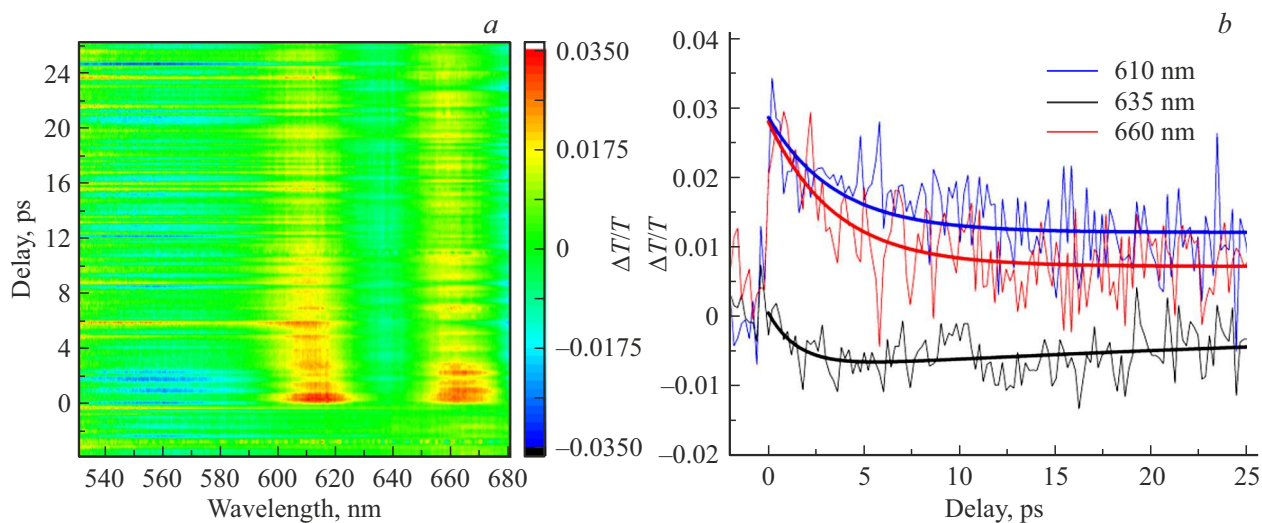


Рис. 9. Дифференциальное изменение пропускания для 3L MoS₂-образца: (a) спектральная карта; (b) для длин волн 660 и 610 nm, соответствующих экситонным пикам A и B, и 635 nm между экситонными полосами.

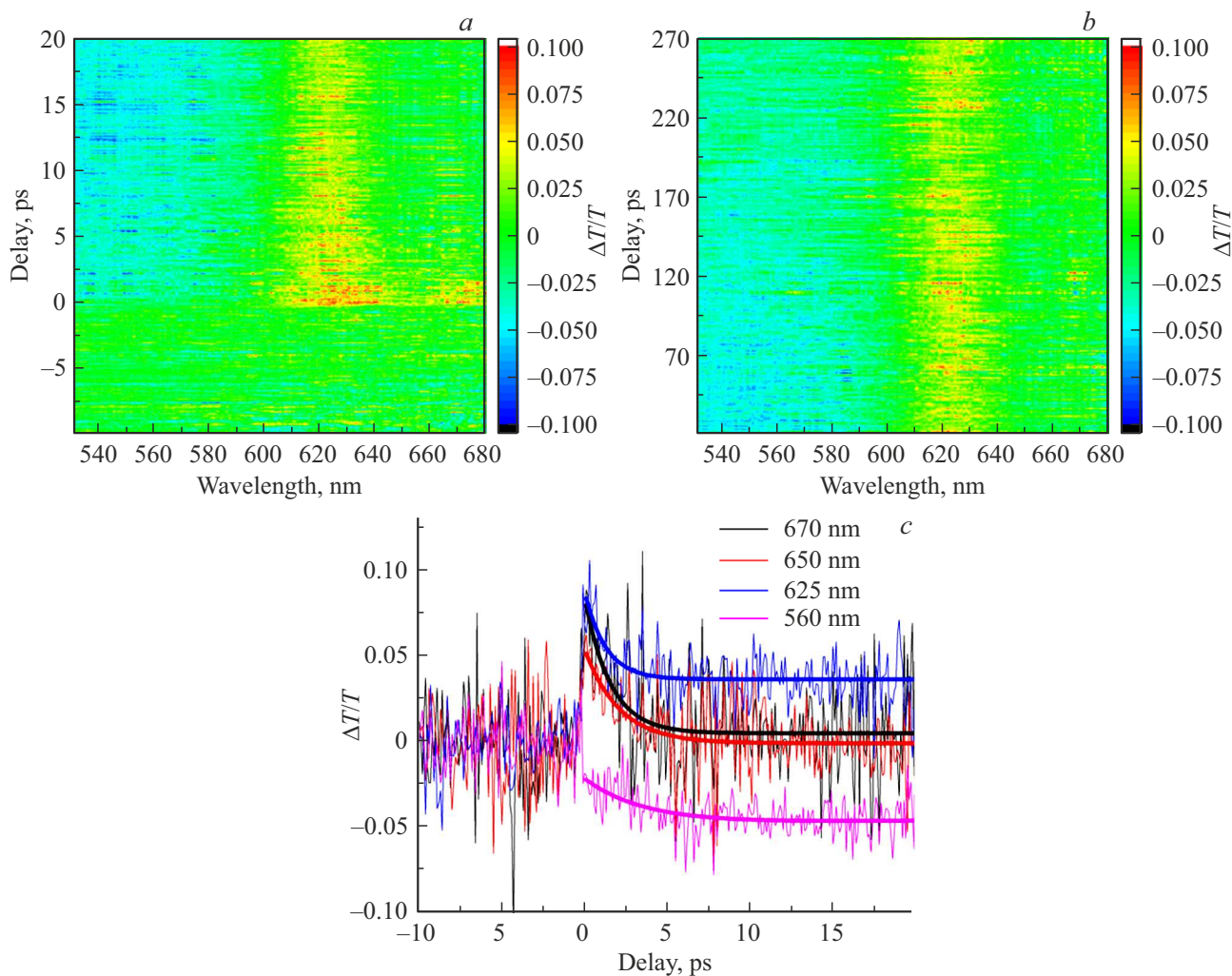


Рис. 10. Дифференциальное изменение пропускания для ML MoS₂: (a) спектральная карта на коротком временном масштабе после возбуждения, (b) спектральная карта на больших задержках относительно возбуждения, (c) для конкретных длин волн вблизи экситонных пиков (670 и 625 nm) и вне экситонных полос (650 и 560 nm).

5 ps после воздействия импульса накачки: центральная длина волны для *A*-экситона меняется с 662 на 660 nm, *B*-экситона — с 612 nm на 610 nm.

Быстрое время релаксации вблизи экситонных пиков в 2L-образце составляет $T_{11_2L} = 4.0 \pm 1.5$ ps, медленное — существенно больше десятков ps и надежно не определялось. Для лежащей между экситонными пиками длины волны 635 nm: быстрое $T_{12_2L} = 7.0 \pm 5$ ps, медленное $T_{22_2L} = 30 \pm 15$ ps. Для 3L-образца аналогичные значения: $T_{11_3L} = 3.5 \pm 0.7$ ps. На длине волны 635 nm (между экситонными линиями): $T_{12_3L} = 1.6 \pm 0.8$ ps, $T_{22_3L} = 45 \pm 15$ ps.

Для образца ML MoS₂ наблюдалось относительное изменение пропускания до 10 % (рис. 10). Также присутствуют экситонные полосы *A* (670 nm) и *B* (625 nm) с положительным изменением $\Delta T/T$, однако их положение испытывает красное смещение относительно малослойных 2L- и 3L-пленок. Обе полосы демонстрируют экспоненциальную релаксацию с быстрой постоянной времени $T_{11_ML} = 1.5 \pm 0.5$ ps. Однако экситон *B* на 625 nm обнаруживает долговременный ненулевой след, который практически не изменяется при задержке 270 ps после воздействия импульса накачки.

Стоит отметить, что в отличие от малослойных образцов переход в область отрицательных значений изменения пропускания между экситонами *A* и *B* существенно менее выражен. Поэтому временная динамика отслеживалась при смещении от экситонных полос на 560 nm, где хорошо наблюдается двухэкспоненциальная динамика (быстрая с положительным знаком изменения пропускания $\Delta T/T$ и медленная с отрицательным $\Delta T/T$), при которой минимальное значение $\Delta T/T$ наблюдается при задержке относительно момента воздействия накачки ~ 15 ps. Первая, кратковременная константа, близка к таковой для экситонов: $T_{12_ML} = 1.5 \pm 1$ ps. Вторая, долговременная константа спада, составляет $T_{22_ML} = 500 \pm 70$ ps.

Увеличение медленного времени релаксации (рис. 11) по мере роста числа слоев в MoS₂ наблюдалось ранее в работе [25], где зондирование проводилось на длине волны 905 nm. Однако стоит отметить, что временные константы, измеренные в настоящей работе вне экситонных полос, предполагают более быструю релаксацию (~ 1.5 – 2 раза) для малослойных образцов (1, 2, 3 слоя). Для толстой пленки из 6–7 слоев время медленной релаксации находится в пределах ошибки от значений, полученных в [25].

Заключение

В ходе работы методом химического осаждения из газовой фазы проведен синтез пленок преимущественно монослойных и малослойных пленок MoS₂. При помощи спектроскопических методов определено число слоев в образцах синтезированных пленок. При исследовании динамики релаксации фотовозбужденных пленок MoS₂

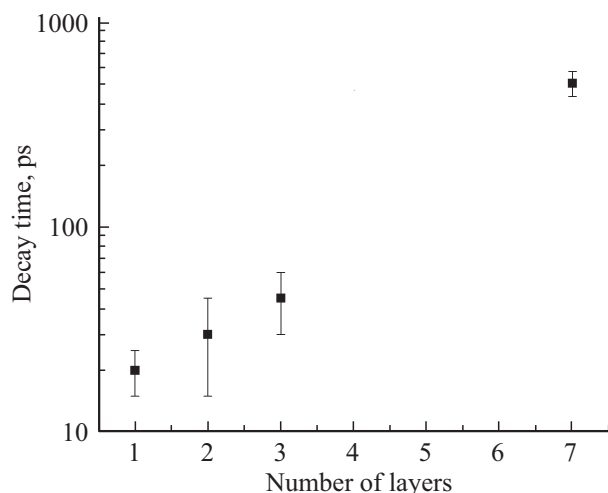


Рис. 11. Зависимость времени медленной релаксации от числа слоев MoS₂.

подтверждено существование зависимости характерного времени медленной релаксации фотовозбуждения от числа слоев MoS₂ вблизи *A*- и *B*-экситонных полос. Полученные времена релаксации для пленок из 1, 2 и 3 слоев существенно меньше известных литературных данных для длины волны 905 nm [25].

Благодарности

Авторы благодарят С.В. Гарнова за обсуждения и использование передового научного оборудования.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-42-10001.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K.F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, T.F. Heinz. Phys. Rev. Lett., **105**, 136805 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.136805
- [2] A. Splendiani, L. Sun, Y. Zhang, T. Li, J. Kim, C.-Y. Chim, G. Galli, F. Wang. Nano Lett., **10**, 1271–1275 (2010). DOI: 10.1021/nl903868w
- [3] A.M. Van der Zande, P.Y. Huang, D.A. Chenet, T.C. Berkelbach, Y. You, G.-H. Lee, T.F. Heinz, D.R. Reichman, D.A. Muller, J.C. Hone. Nat. Mater., **12**, 554–561 (2013). DOI: 10.1038/nmat3633
- [4] Q.H. Wang, K. Kalantar-Zadeh, A. Kis, J.N. Coleman, M.S. Strano. Nat. Nanotechnol., **7**, 699–712 (2012). DOI: 10.1038/nnano.2012.193
- [5] J.H. Strait, P. Nene, F. Rana. Phys. Rev. B, **90**, 245402 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevB.90.245402

- [6] Z. Yin, H. Li, H. Li, L. Jiang, Y. Shi, Y. Sun, G. Lu, Q. Zhang, X. Chen, H. Zhang. *ACS Nano*, **6**, 74–80 (2012). DOI: 10.1021/nn2024557
- [7] H. Li, J. Wu, Z. Yin, H. Zhang. *Accounts Chem. Research*, **47**, 1067–1075 (2014). DOI: 10.1021/ar4002312
- [8] G.Z. Magda, J. Pető, G. Dobrik, C. Hwang, L.P. Biró, L. Tapasztó. *Sci. Reports*, **5**, 14714 (2015). DOI: 10.1038/srep14714
- [9] I. Aksorngul, N. Buawat, T. Ngernsutivorakul, R. Botta, P. Yotprayoonsak. *Surfaces and Interfaces*, **45**, 103835 (2024). DOI: 10.1016/j.surfint.2023.103835
- [10] W. Qiao, S. Yan, X. He, X. Song, Z. Li, X. Zhang et al. *RSC Adv.*, **4**, 50981–50987 (2014). DOI: 10.1039/C4RA09001B
- [11] C. Mihai, I.-D. Simandan, F. Sava, A.-T. Buruiana, A.E. Bocirnea, T. Tite, M.Y. Zaki, A. Velea. *Sustainability*, **16**, 3819 (2024). DOI: 10.3390/su16093819
- [12] C.R. Serrao, A.M. Diamond, S.L. Hsu, L. You, S. Gadgil, J. Clarkson, C. Carraro, R. Maboudian, C. Hu, S. Salahuddin. *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 052101 (2015). DOI: 10.1063/1.4907169
- [13] B. Napoleonov, D. Petrova, N. Minev, P. Rafailov, V. Videva, D. Karashanova, B. Rangelov, S. Atanasova-Vladimirova, V. Strijkova, D. Dimov et al. *Nanomaterials*, **14**, 1213 (2024). DOI: 10.3390/nano14141213
- [14] A.B. Loginov, S.N. Bokova-Sirosh, P.V. Fedotov, I.V. Sapkov, D.N. Chmelenin, R.R. Ismagilov, E.D. Obraztsova, B.A. Loginov, A.N. Obraztsov. *Semiconductors*, **56** (12), 887 (2022). DOI: 10.21883/SC.2022.12.55146.4129
- [15] A.B. Loginov, M.M. Kuvatov, R.R. Ismagilov, I.V. Sapkov, P.V. Fedotov, V.I. Kleshch, E.D. Obraztsova, A.N. Obraztsov. *Nanotechnology*, **35**, 415601 (2024). DOI: 10.1088/1361-6528/ad5a16
- [16] D.K. Singh, G. Gupta. *Mater. Adv.*, **3**, 6142 (2022). DOI: 10.1039/D2MA00352J
- [17] B. Radisavljevic, A. Kis. *Nat. Mater.*, **12**, 815–820 (2013). DOI: 10.1038/nmat3687
- [18] Z. Zheng, L. Hai, H. Zhang, X. Lou, T. Zhai, F. Xia. *Matter*, **5** (11), 3580–3582 (2022). DOI: 10.1016/j.matt.2022.10.008
- [19] J. Tan, H. Lai, P. Liu, Y. Zhou, W. Xie. *Laser Photonics Rev.*, **18**, 2300941 (2024). DOI: 10.1002/lpor.202300941
- [20] R.I. Woodward, E.J.R. Kelleher, R.C.T. Howe, G. Hu, F. Torrisi, T. Hasan, S.V. Popov, J.R. Taylor. *Opt. Express*, **22**, 31113–31122 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.031113
- [21] L. Cao, X. Li, R. Zhang, D. Wu, S. Dai, J. Peng, J. Weng, Q. Nie. *Opt. Fiber Technology*, **41**, 187–192 (2018). DOI: 10.1016/j.yofte.2018.01.023
- [22] Z. Luo, D. Wu, B. Xu, H. Xu, Z. Cai, J. Peng, J. Weng, S. Xu, C. Zhu, F. Wang, Z. Sun, H. Zhang. *Nanoscale*, **8**, 1066 (2016). DOI: 10.1039/C5NR06981E
- [23] H. Wang, C. Zhang, F. Rana. *Nano Lett.*, **15** (1), 339–345 (2014). DOI: 10.1021/nl503636c
- [24] H. Shi, R. Yan, S. Bertolazzi, J. Brivio, B. Gao, A. Kis, D. Jena, H.G. Xing, L. Huang. *ACS Nano*, **7** (2), 1072–1080 (2013). DOI: 10.1021/nn303973r
- [25] H. Wang, C. Zhang, F. Rana. *Nano Lett.*, **15** (12), 8204–8210 (2015). DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b03708
- [26] P. Valencia-Acuna, P. Zereszki, M.M. Tavakoli, J.-H. Park, J. Kong, H. Zhao. *Phys. Rev. B*, **102**, 035414 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevB.102.035414
- [27] G. Agunbiade, N. Rafizadeh, R.J. Scott, H. Zhao. *Phys. Rev. B*, **109**, 035410 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevB.109.035410
- [28] D. Sun, Y. Rao, G.A. Reider, G. Chen, Y. You, L. Brézin, A.R. Harutyunyan, T.F. Heinz. *Nano Lett.*, **14** (10), 5625–5629 (2014). DOI: 10.1021/nl5021975
- [29] T. Zhang, J. Wang. *ACS Photonics*, **8** (9), 2770–2780 (2021). DOI: 10.1021/acsp Photonics.1c00932
- [30] H.-S. Tsai, Y.-H. Huang, P.-C. Tsai, Y.-J. Chen, H. Ahn, S.-Y. Lin, Y.-J. Lu. *ACS Omega*, **5** (19), 10725–10730 (2020). DOI: 10.1021/acsomega.0c00187
- [31] M. Suleman, S. Lee, M. Kim, V.H. Nguyen, M. Riaz, N. Nasir, S. Kumar, H.M. Park, J. Jung, Y. Seo. *ACS Omega*, **7** (34), 30074–30086 (2022). DOI: 10.1021/acsomega.2c03108
- [32] A. Singh, M. Sharma, R. Singh. *Cryst. Growth Des.*, **21** (9), 4940–4946 (2021). DOI: 10.1021/acs.cgd.1c00390
- [33] F. Chen, X. Jiang, J. Shao, B. Lu, L. Fu, S. Zhao, W. Su. *CrystEngComm*, **23**, 1345–1351 (2021). DOI: 10.1039/D0CE01711F
- [34] X. Ling, Y.-H. Lee, Y. Lin, W. Fang, L. Yu, M.S. Dresselhaus, J. Kong. *Nano Lett.*, **14** (2), 464–472 (2014). DOI: 10.1021/nl4033704
- [35] H.-Y. Cho, T.K. Nguyen, F. Ullah, J.-W. Yun, C.K. Nguyen, Y.S. Kim. *Physica B: Condensed Matter*, **532**, 84–89 (2017). DOI: 10.1016/j.physb.2017.10.026
- [36] A.P. Singh, H. Xu, A. Ghiami, S. Tang, Z. Wang, H. Kalisch, S. Hoffmann-Eifert, A. Daus, S. Ingebrandt, A. Vescan, V. Pachauri. *Appl. Surface Sci.*, **669**, 160331 (2024). DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.160331
- [37] L. Su, Y. Yu, L. Cao, Y. Zhang. *Phys. Rev. Applied*, **7**, 034009 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.7.034009
- [38] H. Li, Q. Zhang, C.C.R. Yap, B.K. Tay, T.H.T. Edwin, A. Olivier, D. Baillargeat. *Adv. Funct. Mater.*, **22** (7), 1385–1390 (2012). DOI: 10.1002/adfm.201102111
- [39] A. Jagminas, G. Niaura, R. Žalneravičius, R. Trusovas, G. Račiukaitis, V. Jasulaitiene. *Sci. Reports*, **6**, 37514 (2016). DOI: 10.1038/srep37514
- [40] J.-L. Meng, J.-Q. Zhu, S.-T. Jia, X. Ren. *Materials Science*, **26** (2), 143–146 (2020). DOI: 10.5755/j01.ms.26.2.21576
- [41] X. Zhang, W.P. Han, J.B. Wu, S. Milana, Y. Lu, Q.Q. Li, A.C. Ferrari, P.H. Tan. *Phys. Rev. B*, **87**, 115413 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevB.87.115413
- [42] K.F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, T.F. Heinz. *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 136805 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.136805
- [43] K.P. Dhakal, D.L. Duong, J. Lee, H. Nam, M. Kim, M. Kan, Y.H. Lee, J. Kim. *Nanoscale*, **6**, 13028–13035 (2014). DOI: 10.1039/c4nr03703k
- [44] A. Castellanos-Gomez, J. Quereda, H.P. van der Meulen, N. Agrait, G. Rubio-Bollinger. *Nanotechnology*, **27**, 115705 (2016). DOI: 10.1088/0957-4484/27/11/115705
- [45] Z. Nie, R. Long, L. Sun, C.-C. Huang, J. Zhang, Q. Xiong, D.W. Hewak, Z. Shen, O.V. Prezhdo, Z.-H. Loh. *ACS Nano*, **8** (10), 10931–10940 (2014). DOI: 10.1021/nn504760x