РЕЦЕНЗИЯ

на диссертационную работу **Секербаева Кайроллы Секербаевича** на тему: **«Оптоэлектронные свойства полупроводниковых структур на основе кремния и органометаллических перовскитов»**, представленную на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D071000 – Материаловедение и технология новых материалов».

1 Оценка актуальности темы диссертационной работы

Органометаллические перовскиты (ОМП) – гибридный полупроводниковый материал с уникальными оптоэлектронными свойствами. Устройства на основе ОМП демонстрируют выдающиеся показатели в сравнении с традиционными материалами. Так солнечные элементы на основе перовскитов достигают эффективности преобразования энергии 25%, а светоизлучающие устройства – 12%. Причем такой рост эффективности был достигнут в кратчайшие сроки. Однако фундаментальные причины столь высоких результатов до сих пор не ясны в полной мере. Такое положение дел обусловлено протеканием сложных процессов в ОМП.

Также в работе исследованы процессы разделения и рекомбинации фотоиндуцированных носителей заряда в гетеропереходе между слоем перовскита и подложками из кристаллического кремния. Такая информация будет полезна для лучшего понимания более сложных структур на основе перовскита и для разработки тандемных солнечных элементов на основе перовскита и кремния, эффективность которых достигла 32% в настоящее время.

Основной целью работы **«Оптоэлектронные свойства полупроводниковых структур на основе кремния и органометаллических перовскитов»** является выявление закономерностей в формировании оптических и фотоэлектрических свойств слоев анизотропных кремниевых наноструктур и органометаллических перовскитов на кремниевых подложках.

2 Научные результаты в рамках требований к диссертации (пп. 127, от 31.03.11 г., «Правил присуждения ученых степеней»)

В диссертации содержатся новые достоверные результаты, являющиеся итогом достижения цели и решением поставленных задач:

1. Теоретический анализ в рамках приближения эффективной среды оптических свойств слоев анизотропных кремниевых нанокристаллов выявил сильную зависимость их двулучепреломления, анизотропии отражения и дихроизма от концентрации свободных носителей заряда в нанокристаллах в диапазоне от 10^{18} до 10^{20} $см^{-3}$, а также от фактора заполнения среды нанокристаллами. Экспериментально обнаружена и теоретически обоснована немонотонная зависимость ИК спектров разностного пропускания анизотропных слоев пористого кремния.

2. Исследованы оптические свойства пленок ОМП, полученных двухступенчатым методом осаждения из растворов и имеющих различный состав по содержанию йода и брома. Полученные данные свидетельствуют об усилении вклада экситонов в поглощение света вблизи края запрещенной зоны в бромистых перовскитах по сравнению с йодсодержащими. Край поглощения ОМП на основе соединений метил-аммония с йодид-бромидом свинца можно описать в рамках модели экситонов Ванье-Мотта с энергиями связи около 10 и 20 мэВ для $CH_3NH_3PbI_3$ и $CH_3NH_3PbBr_3$ соответственно, что можно объяснить усилением связи в экситонах в материале с большей ионностью связи.

3. Обнаружен сдвиг спектра фотолюминесценции ОМП в сторону больших энергий фотонов и укорочение времени жизни фотолюминесценции по сравнению с слоями, нанесенными на стеклянную подложку с покрытием из проводящих оксидов металлов, что объясняется влиянием электрического поля с напряженностью порядка 10 кВ/см в формируемой гетероструктуре на кремниевой подложке, приводящего к полевой ионизации и распаду экситонов в слое перовскита. Проведенное экспериментальное и теоретическое исследование фотолюминесценции и фототока выявило возможности эффективного разделения и переноса фотовозбужденных носителей заряда, что проявляется в зависимости интенсивности и времен жизни фототока и фотолюминесценции от приложенного напряжения смещения.

4. Исследованы кинетики фотолюминесценции слоев метил-аммониевых свинцово-йодистых перовскитов, полученных испарением в вакууме на диэлектрические подложки, и продемонстрировано, что при концентрации фотовозбужденных носителей заряда 10^{15} – 10^{16} $см^{-3}$, при которой вкладом межзонной рекомбинации можно пренебречь, короткие времена жизни кинетики ФЛ объясняются относительно быстрой диффузией носителей заряда, приводящей к безызлучательной рекомбинации на поверхности. Используя численное решение одномерного уравнения диффузии проведено моделирование кинетик ФЛ и определены коэффициенты амбиполярной диффузии и поверхностной рекомбинации в таких слоях.

3 Степень обоснованности и достоверности каждого научного результата (положения), выводов и заключения соискателя, сформулированных в диссертации

Достоверность и обоснованность научных результатов не вызывает сомнения, так как они получены использованием апробированных и хорошо зарекомендованных себя методик экспериментов. Полученные результаты проходили проверку на достоверность путем рецензирования при издании в периодических международных журналах и докладах международных конференций, входящих в базы Thompson Reuters и Scopus.

4 Степень новизны каждого научного результата (положения), выводов и заключения соискателя, сформулированных в диссертации

1. Впервые теоретически и экспериментально установлено, что величина дихроизма наноструктурированных кремниевых слоев со свободными носителями заряда может иметь немонотонную спектральную зависимость в инфракрасной области спектра.

2. Теоретический анализ края спектров поглощения органометаллических перовскитов на основе соединений метил-аммония с йодид-бромидом свинца впервые позволил оценить величины энергии связи экситонов в данных соединениях.

3. Предложена феноменологическая модель для описания кинетик спада интенсивности фотолюминесценции и величины фототока в слоях перовскитов на полупроводниковой подложке.

4. На основе количественного анализа экспериментальных данных по кинетикам спада фотолюминесценции в слоях органометаллических перовскитов на основе соединений метил-аммония с йодидом свинца, полученных напылением в вакууме, показано, что коэффициент амбиполярной диффузии носителей заряда может достигать значений не менее 1 $см^2/с$, что делает их перспективными для использования в фотовольтаике.

5 Теоретическая и практическая значимость исследования

Представленные в работе результаты способствуют как развитию теоретических представлений о физических свойствах полупроводниковых наноструктур, так и помогают найти их оптимальные параметры для применений в фотонике и фотовольтаике. Слои и многослойные структуры на основе наноструктурированного кремния и органометаллических перовскитов являются особенно перспективными для применения в устройствах солнечной энергетики. Практическое использование разработанных методов теоретического анализа оптических свойств таких структур также вносит весомый вклад в развитие технологии создания солнечных элементов нового поколения.

6 Полнота опубликованных материалов диссертации в печати

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из которых 4 статей в рейтинговых журналах, входящих в базу Web of Knowledge (Clarivate Analytics, США), Scopus (Elsevier, Нидерланды) с ненулевым импакт-фактором: «The journal of physical chemistry letters» (импакт-фактор 7,329), «Semiconductors», «Technical Physics Letters», «Письма в ЖЭТФ»; 1 статья в изданиях, рекомендованных ККСОН МОН РК, 5 работ в материалах международных конференции.

7 Замечания, предложения по диссертации:

1. Из работы не волне ясно, почему бимолекулярная рекомбинация не была учтена в ходе моделирования одномерным уравнением диффузии (пункт 2.3.3).

2. Не прояснено почему взяты именно такие значения времени жизни носителей заряда в объеме, τ_B, используемые в моделировании.

3. Не на всех рисунках указаны погрешности измерений.

Содержания диссертации в рамках требований «Правила присуждения ученых степеней»

Несмотря на указанные замечания, результаты и выводы диссертационной работы значимы в научном, теоретическом и прикладном планах. Диссертационная работа Секербаева Кайроллы Секербаевича является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним

единством и последовательностью изложения. Все результаты, выводы и заключения взаимосвязаны между собой.

Считаю, что диссертационная работа «Оптоэлектронные свойства полупроводниковых структур на основе кремния и органометаллических перовскитов» обладает новизной и научно-практической значимостью, соответствует требованиям правил присуждения ученой степени доктора философии (PhD) КазНУ им. аль-Фараби по специальности «6D071000 – Материаловедение и технология новых материалов», а ее автор Секербаев Кайролла Секербаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора философии PhD.

Рецензент, д.ф.-м.н.,
декан факультета инжиниринга и информационных технологий АТУ

Алиев Б. А.