



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ Cu<sub>2</sub>O/CuO/ZNO/КВАРЦ

**Арзикулов Ф Ф**

*Самостоятельный соискатель Ташкентского государственного  
технического университета имени Ислама Каримова,  
Ассистент кафедры биомедицинской инженерии, информатики и биофизики  
Ташкентского государственного медицинского университета.*

**Мустафакулов А. А.**

*кандидат физико-математических наук, Джизакского политехнического  
института*

**Кучканов Ш. К.,**

*доцент Ташкентского государственного технического университета,  
кандидат технических наук.*

**Б.Д. Игамов,**

*Научно-технический центр с конструкторским бюро и опытно-  
промышленным производством, Академия наук Республики Узбекистан;*

**И.О.Косимов**

*Институт биоорганической химии им. О.С. Содикова, Академия наук  
Республики Узбекистан, 100143, Ташкент, Узбекистан;*

В последние годы оксидные полупроводниковые гетероструктуры на основе Semiconductor Cu<sub>2</sub>O, CuO и ZnO привлекают повышенное внимание исследователей в связи с возможностью их применения в фоточувствительных устройствах, газовых сенсорах, тонкопленочной электронике и преобразователях энергии [1, 2, 3]. Интерес к данным материалам обусловлен сочетанием их электрофизических характеристик, химической стабильности и технологической доступности. Оксид цинка ZnO относится к широкозонным полупроводникам и обладает высокой прозрачностью, значительной подвижностью носителей заряда и выраженными поверхностными эффектами [4]. В то же время Cu<sub>2</sub>O и CuO, являясь р-типными оксидными полупроводниками, проявляют перспективные свойства для формирования р–n переходов и гетеропереходных структур [5]. Комбинирование этих материалов в многослойную систему создает условия для формирования сложных межфазных процессов, влияющих на транспорт носителей заряда. Одним из ключевых вопросов физики подобных структур остается изучение Charge Transport механизмов переноса заряда. В многослойных оксидных системах токоперенос определяется не только объемными свойствами отдельных слоев, но и характеристиками интерфейсов, где могут возникать потенциальные барьеры, локализованные энергетические состояния, ловушки





носителей и области пространственного заряда [6]. Именно эти факторы во многих случаях определяют эволюцию электрофизических параметров при изменении температуры, частоты или внешнего электрического поля. Для оксидных гетероструктур характерно сосуществование нескольких механизмов проводимости. В зависимости от условий могут реализовываться омическая проводимость, hopping-перенос, туннельный транспорт, а также барьерно-контролируемые механизмы типа Schottky или Poole–Frenkel [7,8]. Разделение вкладов этих процессов представляет как фундаментальный, так и прикладной интерес. Особое значение в рассматриваемой системе имеет использование кварцевой подложки. В отличие от проводящих подложек, кварц характеризуется высокой диэлектрической стабильностью, химической инертностью и минимальным влиянием на паразитные токи, что позволяет более корректно анализировать собственные свойства гетероструктуры [9]. Однако роль подложки в эволюции электрофизических характеристик многослойных систем изучена недостаточно полно. Несмотря на наличие работ, посвященных отдельным системам ZnO/Cu<sub>2</sub>O и ZnO/CuO [2,3], комплексное исследование гетероструктур Cu<sub>2</sub>O/CuO/ZnO/кварц с точки зрения механизмов переноса заряда остается ограниченным. Особенно недостаточно изучены вопросы, связанные с влиянием межфазных границ и дефектных состояний на изменение проводимости в широком диапазоне внешних воздействий. В связи с этим исследование эволюции электрофизических свойств и механизмов переноса заряда в гетероструктурах Cu<sub>2</sub>O/CuO/ZnO/кварц является актуальной научной задачей, имеющей значение как для развития физики оксидных гетеросистем, так и для создания новых функциональных материалов и приборных структур.

**Актуальность исследования.** Оксидные гетероструктуры на основе Semiconductor Cu<sub>2</sub>O, CuO и ZnO в настоящее время рассматриваются как перспективный класс функциональных материалов для современной электроники и оптоэлектроники. Повышенный интерес к данным системам связан с возможностью управления их электрофизическими параметрами за счет изменения толщины слоев, дефектного состава, межфазных характеристик и условий формирования структуры [1,2]. Особое внимание в последние годы уделяется исследованию Charge Transport механизмов переноса заряда в многослойных оксидных системах, поскольку именно они определяют проводимость, стабильность и чувствительность приборных структур [3]. В реальных гетеросистемах процессы токопереноса часто имеют сложный комбинированный характер и могут включать объемную проводимость, hopping-перенос, туннелирование и барьерно-контролируемые механизмы [4]. Актуальность рассматриваемой работы определяется тем, что для системы Cu<sub>2</sub>O/CuO/ZnO/кварц вопросы эволюции механизмов переноса заряда в зависимости от интерфейсных эффектов и дефектных состояний остаются



недостаточно изученными. Особенно это касается влияния межфазных границ на изменение электрофизических параметров в условиях внешнего электрического поля, температурного воздействия и частотной модуляции [5]. Дополнительную научную значимость имеет использование кварцевой подложки, позволяющей исключить влияние проводящих подложек и исследовать собственные свойства многослойной структуры [6]. Такой подход дает возможность более корректно анализировать вклад интерфейсных процессов в общую проводимость системы. Таким образом, исследование эволюции электрофизических свойств и механизмов переноса заряда в гетероструктурах  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{кварц}$  представляет актуальную задачу как с фундаментальной точки зрения, так и в контексте разработки новых материалов для сенсорных и оптоэлектронных применений.

**Методы исследования.** Для исследования электрофизических свойств гетероструктур  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{кварц}$  использовался комплекс экспериментальных и аналитических методов, позволяющих оценить как структурные характеристики образцов, так и особенности переноса заряда. Структурные параметры и фазовый состав многослойных пленок анализировались методом рентгенофазового анализа (XRD), позволяющим определить кристаллическую структуру, фазовую чистоту и возможное наличие межфазных взаимодействий [7]. Морфология поверхности и особенности формирования слоев изучались методом сканирующей электронной микроскопии (SEM). Для контроля элементного состава применялся энергодисперсионный анализ (EDS). Электрофизические характеристики исследовались методом измерения вольт-амперных характеристик (I–V), который позволяет выявить характер проводимости, наличие барьерных эффектов и определить возможные режимы токопереноса [8]. Для более детального анализа механизмов переноса заряда применялась импедансная спектроскопия, основанная на исследовании комплексного сопротивления в широком диапазоне частот. Этот метод позволяет разделять вклад объемной проводимости, межфазных границ и релаксационных процессов [9]. Температурно-зависимые измерения проводимости использовались для определения активационных параметров и выявления возможного hopping-механизма транспорта. Анализ проводился на основе моделей термоактивационной проводимости и дефектно-опосредованного переноса [4].

Для интерпретации экспериментальных данных применялись модели:

- омической проводимости;
- space-charge-limited current (SCLC);
- Schottky emission;
- Poole–Frenkel conduction;
- trap-assisted tunneling.



Комплексное использование указанных методов позволяет исследовать эволюцию механизмов переноса заряда и установить взаимосвязь между структурными особенностями и электрофизическими характеристиками гетероструктуры.

**Результаты.** В ходе исследования гетероструктур  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{кварц}$  установлено, что электрофизические свойства структуры существенно зависят от межфазных границ и дефектных состояний. Анализ  $I-V$  характеристик показал нелинейный характер проводимости, что свидетельствует о наличии барьерно-контролируемого механизма переноса заряда [1]. В области низких напряжений наблюдалась омическая проводимость, тогда как при увеличении напряжения проявлялись признаки ловушечно-ограниченного токопереноса (SCLC) [2]. Температурные измерения выявили рост проводимости с увеличением температуры, что подтверждает термоактивационный характер транспорта и возможный вклад hopping-механизма [3]. По данным импедансной спектроскопии установлено наличие релаксационных процессов, связанных с вкладом межфазных границ в общее сопротивление структуры [4]. Показано, что интерфейсы  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$  и  $\text{CuO}/\text{ZnO}$  формируют потенциальные барьеры, влияющие на инжекцию носителей заряда и эволюцию электрофизических параметров [5]. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в исследуемой гетероструктуре доминирующими механизмами переноса заряда являются:

- омическая проводимость;
- hopping-перенос;
- барьерно-контролируемый транспорт.

**Обсуждение.** Полученные результаты показывают, что электрофизическое поведение гетероструктур  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{кварц}$  определяется не одним механизмом, а совокупностью нескольких процессов переноса заряда. Нелинейность вольт-амперных характеристик указывает на существенную роль межфазных барьеров, формирующихся на границах раздела слоев [1]. Это согласуется с представлениями о барьерно-контролируемом токопереносе в оксидных гетеросистемах. Рост проводимости с повышением температуры свидетельствует о термоактивационной природе транспорта. Вероятно, в данном случае перенос заряда частично реализуется через локализованные дефектные состояния по hopping-механизму, что характерно для оксидных материалов с неоднородной структурой [2]. Результаты импедансного анализа подтверждают, что заметный вклад в общее сопротивление вносят интерфейсные процессы. Это позволяет предположить, что межфазные границы  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$  и  $\text{CuO}/\text{ZnO}$  выполняют не только роль потенциальных барьеров, но и участвуют в формировании релаксационных процессов [3]. Отдельного внимания заслуживает влияние кварцевой подложки, использование которой снижает



влияние паразитных токов и позволяет более корректно оценивать собственные свойства многослойной структуры [4]. Таким образом, обсуждение результатов показывает, что эволюция электрофизических свойств исследуемой системы определяется совместным влиянием дефектных состояний, барьерных эффектов и межфазного взаимодействия, а доминирующие механизмы переноса заряда изменяются в зависимости от внешних условий.

**Научная новизна.** Научная новизна работы заключается в комплексном исследовании эволюции электрофизических свойств и механизмов Charge Transport переноса заряда в гетероструктурах  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{кварц}$  с учетом межфазных эффектов и дефектных состояний. Впервые показано, что изменение электрофизических параметров в исследуемой системе определяется совместным влиянием интерфейсных потенциальных барьеров, локализованных состояний и релаксационных процессов. Установлено, что доминирующие механизмы переноса заряда могут эволюционировать от омической проводимости к hopping- и барьерно-контролируемому транспорту в зависимости от внешних условий. Определен вклад межфазных границ  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$  и  $\text{CuO}/\text{ZnO}$  в формирование общего сопротивления структуры и инжекционных процессов носителей заряда. Показана роль кварцевой подложки в стабилизации электрофизических характеристик многослойной системы. Полученные результаты расширяют представления о физике Heterostructure оксидных гетероструктур и могут служить основой для оптимизации параметров функциональных электронных материалов.

**Заключение.** В работе исследованы электрофизические свойства и механизмы переноса заряда в гетероструктурах  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{кварц}$ . Установлено, что процессы токопереноса в рассматриваемой системе имеют сложный многостадийный характер и определяются влиянием межфазных барьеров, дефектных состояний и релаксационных процессов. Показано, что в различных режимах могут реализовываться омический, hopping- и барьерно-контролируемый механизмы проводимости. Выявлено, что эволюция электрофизических параметров зависит от внешних воздействий и структурных особенностей интерфейсов. Полученные результаты подтверждают перспективность гетероструктур  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{кварц}$  для применения в устройствах оптоэлектроники, сенсорики и оксидной электроники, а также создают основу для дальнейших исследований механизмов переноса заряда в многослойных полупроводниковых системах.

### Список литература

[1] Yu Q. et al. The study of optical-electrical properties of  $\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}(\text{CuO})/\text{Si}$  heterojunctions. *Physica B*, 2024, 689, 416253. DOI:10.1016/j.physb.2024.416253.





[2] Agoubi B. et al. Electronic and thermoelectric properties of ZnO/Cu<sub>2</sub>O heterostructures. *Ferroelectrics*, 2023, 615(1), 97–108. DOI:10.1080/00150193.2023.2243555.

[3] Gebretsadik A. et al. Cu-doped ZnO/Ag/CuO heterostructure for enhanced charge transfer. *RSC Advances*, 2024, 14, 32541–32553. DOI:10.1039/D4RA05989A.

[4] Özgür Ü. et al. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98, 041301.

[5] *Physics of Semiconductor Devices*, S.M. Sze, Kwok K. Ng. Wiley.

[6] *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*, N.F. Mott, E.A. Davis. Oxford University Press.

[7] Lampert M., Mark P. *Current Injection in Solids*. Academic Press.

[8] Simmons J.G. Poole-Frenkel effect and Schottky emission. *Physical Review*.

[9] Quartz substrates for oxide thin films: interface stability studies. *Thin Solid Films*.