

А. Юсупов, З.З. Тураев, А. Туляганов

О МЕХАНИЗМЕ ТОКОПЕРЕНОСА В ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs

В статье приводятся результаты изучения механизма токопереноса в анизотипных гетеропереходах p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs. На основе анализа ВАХ и построения зонной модели ГП установлены механизмы токопереноса. При малых прямых напряжениях доминируют токи, ограниченные пространственным зарядом. В области $0,2 < U < 1,3$ В преобладает туннельно-рекомбинационный механизм токопереноса, а при $U > 1,3$ В ВАХ подчиняется линейному закону. При малых обратных напряжениях прохождение тока ограничивается пространственным зарядом в режиме подвижности, а при $|U_{обр}| > 2,5$ В начинается мягкий пробой.

Полупроводниковое четверное соединение Cu₂ZnSnS(Se)₄ (CZTSSe) рассматривается как перспективный материал для создания поглощающего слоя солнечного элемента (СЭ) [1-3]. На основе соединения CZTSSe за последние несколько лет созданы СЭ с эффективностью от 5,4 до 12,6% [2,3]. Большой интерес к фотоэлектрическим тонкопленочным преобразователям на основе CZTSSe связан с высоким коэффициентом оптического поглощения и дешевизной и доступностью его компонентов [1,2].

Следует отметить, что благодаря более оптимальной ширине запрещенной зоны (1,43 эВ) и высокого коэффициента поглощения (порядка 10^4 см⁻¹) фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе GaAs имеют более высокий КПД, чем кремниевые [4]. Высокий коэффициент поглощения оптического излучения GaAs также обусловлен прямыми оптическими переходами. Поэтому большой КПД гетероэпитаксиальных ФЭП на основе GaAs достигнут при значительно меньшей по сравнению с кремнием толщине материала [5]. Кроме того, параметры кристаллических решеток Cu₂ZnSnSe₄ (CZTSe) и GaAs близки [6], поэтому можно ожидать, что на границе раздела ГП на их основе не будут образовываться дополнительные дефекты несоответствия. Следовательно, при получении гетеропереходов Cu₂ZnSnSe₄/GaAs можно ожидать возможность создания ФЭП с более высокой эффективностью.

В СЭ на основе ГП рекомбинационно-генерационный процесс преобладает в обедненном слое узкозонного полупроводника, из-за наличия высокого потенциального барьера, препятствующего инжекции неосновных носителей заряда в широкозонный материал [5]. В связи с этим представляет научный и практический интерес изучение механизма токопереноса в ГП Cu₂ZnSnSe₄/GaAs. В данной работе приводятся результаты исследования механизма токопереноса в анизотипных ГП p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs.

ГП p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs по методике, описанной в работе [7]. Были измерены стационарные вольт-амперные характеристики (ВАХ) ГП. На рис. 1 представлена типичная ВАХ одного из ГП, измеренная при комнатной температуре. Из рисунка видно, что ГП p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs обладают ти-

пичной для выпрямляющих диодов характеристикой. Пропускное направление в ГП соответствовало положительной полярности внешнего смещения на пленке p-Cu₂ZnSnSe₄

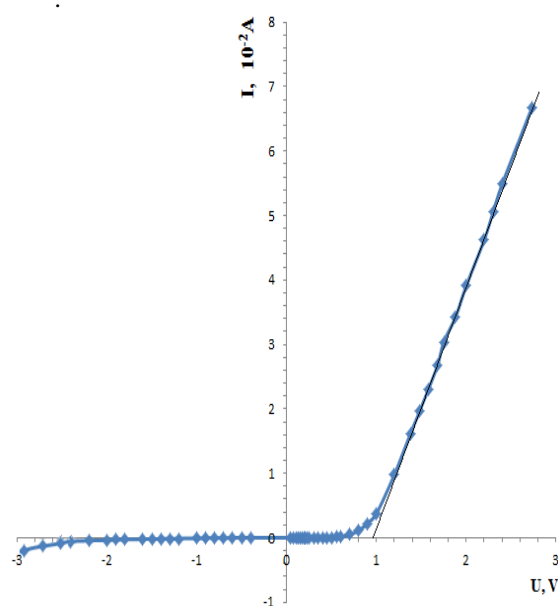


Рис. 1. ВАХ ГП p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs при T=300 К.

Коэффициент выпрямления в структурах при $|U| = 1$ В достигали значений $K = 100 - 130$. Полученные сравнительно небольшие значения K , по-видимому, связаны с несовершенством переходной области гетеропереходов. Значения высоты потенциального барьера гетероструктуры были определены путем экстраполяции линейного участка ВАХ до пересечения с осью напряжений U . Установлено, что высота барьера для гетероструктур p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs лежит в пределах 0,93-1,0 эВ.

Для анализа процесса токопрохождения была построена энергетическая зонная диаграмма анизотипного ГП p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs (рис. 2). При этом были использованы следующие параметры составляющих компонентов: $E_g(\text{CZTSe}) = 1.0$ эВ, $\chi(\text{CZTSe}) = 4.56$ эВ, $E_g(\text{GaAs}) = 1.42$ эВ, $\chi(\text{GaAs}) = 4.07$ эВ, $\Delta E_c = 0.49$ эВ, $\Delta E_v = 0,07$ эВ, $\phi_0 = 0.95$ эВ (E_{vac} — уровень вакуума, E_F — уровень Ферми, E_c и E_v — края зоны проводимости и валентной зоны, χ —

электронное сродство, E_g — ширина запрещенной зоны).

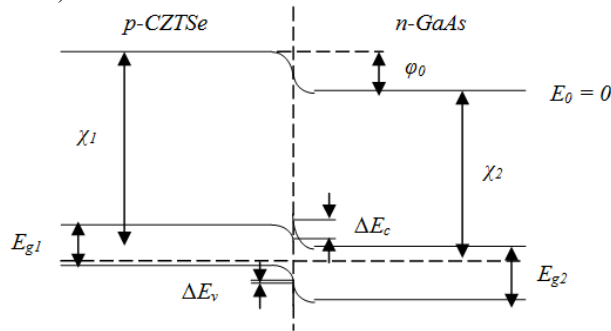


Рис.2. Энергетическая диаграмма анизотипных гетероструктур p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs.

Механизмы токопереноса в гетероструктурах p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs были установлены на основе анализа ВАХ структур в полу- и двойном логарифмическом масштабах (рис.2 и 3). Прямые ветви ВАХ можно разделить на три участка. В области малых напряжений $U < 0,2$ В (рис. 3, кривая 1) она имеет степенной характер, подчиняется закону $I \sim U^m$. Значение показателя составляет $m = 1,0 - 1,1$. Это указывает в пользу преобладания токов, ограниченных пространственным зарядом в режиме насыщения скорости [8].

$$I = (2\epsilon\epsilon_0 S/d^2)U, \quad (1)$$

где S -площадь и d -ширина ГП.

Как видно из рис. 3 (кривая 1), при напряжениях $0,2 < U < 1,3$ В наблюдается экспоненциальная зависимость ВАХ, которая выражается известной формулой

$$U = I_0 \exp(eU/nkT), \quad (2)$$

где ϵ - диэлектрическая проницаемость, ϵ_0 - электрический постоянный, S -площадь и d -ширина гетероструктуры.

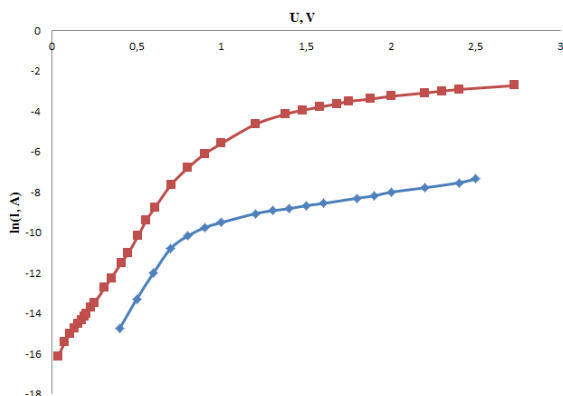


Рис.2. Прямая (1) и обратная (2) ветви ВАХ ГП p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs в полулогарифмическом масштабе.

Оценка тока насыщения и диодного показателя дала следующие результаты: $I_s = (6-8) \cdot 10^{-8}$ А, $n = 2-$

3 ($T=300$ К). Анализ этих величин показывает, что в области напряжений $0,2 < U < 1,3$ В в ГП более вероятным является туннельно-рекомбинационный механизм токопереноса.

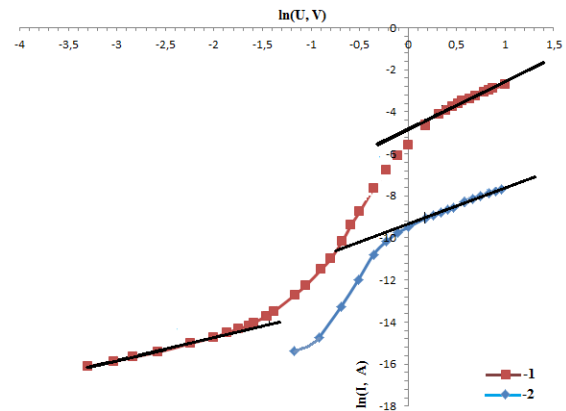


Рис. 3. Прямая (1) и обратная (2) ветви ВАХ ГП p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs в двойном логарифмическом масштабе.

Из рис.1 видно, что прямая ветвь ВАХ ГП p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs при напряжении $U > 1,3$ В описывается линейной зависимостью, которую можно выразить следующей формулой:

$$U = U_0 + I R_B, \quad (3)$$

Были оценены значений напряжений отсечки и сопротивления базы: $U_0 \approx 1,0$ В и $R_B = 22-28$ Ом.

Из рис.2 (кривая 2) видно, что обратные токи ГП p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs в области напряжений $0,35 < |U| < 1,0$ В описывается формулой (2). При увеличении обратного напряжения ($|U| > 1$ В), ВАХ подчиняется степенному закону $I \sim U^m$ (рис.3, кривая 2), при этом значение показателя составляет $m = 2,0$. Как показано в [9], это свидетельствует о преобладании тока, ограниченного пространственным зарядом в режиме подвижности (безловушечный квадратичный закон). При напряжениях $|U| > 2,5$ В начинается мягкий пробой ГП.

Таким образом, на основе анализа ВАХ и энергетической зонной модели установлены механизмы токопереноса в анизотипных ГП p-Cu₂ZnSnSe₄/n-GaAs. При малых прямых смещениях доминируют токи, ограниченные пространственным зарядом, в области напряжений $0,2 < U < 1,3$ В преобладает туннельно-рекомбинационный механизм токопереноса. При напряжениях $U > 1,3$ В ВАХ подчиняется линейному закону. При малых обратных смещениях прохождение тока ограничивается пространственным зарядом в режиме подвижности, а при напряжениях $|U_{обр}| > 2,5$ В начинается мягкий пробой.

Литературы:

1. Katagiri H. and Jimbo K. // Appl. Phys. Express, 2008, 041201.
2. Wang W., Winkler M. T., Gunawan O., Gok-

menT., TodorovT. K., ZhuY., Mitzi D. B. Advanced Energy Materials, DOI: 10.1002/aenm.201301465.

3. CuZnSnS₄ Thin Film Solar Cells: Present Status and Future Prospects <http://dx.doi.org/10.5772/50702>.

4. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент.- М.: Энергоатомиздат. 1987.275 с.

5. Ж.И. Алфёров. ФТП, 32, стр. 3 (1998).

6. В.Ф. Гременок, М.С. Тиванов, В.Б. Залесский. «Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов»- Минск: Изд.

ЦентрБГУ, 2007, 224 с.

7. Юсупов А., Адамбаев К., Тураев З.З., Кутлимов А. Естественные и технические науки, №3, стр. 59 (2015).

8.Г.Ламперт, П.Марк, Инжекционные токи в твердых телах.М.Мир,1973.

9. E.Hernandez, Cryst.Res.Technol. v.33, p.285 (1998).

Б. Усмонов

УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМИ ПРОЕКТАМИ В СФЕРЕ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Объектом исследования в данной статье является процесс управления жизненным циклом ИП ИКТ. Тогда **целью исследования** - является повышение эффективности управления ИП ИКТ в процессе его жизненного цикла путем разработки системы поддержки принятия управленческих решений (СППР) на комплексной математической, алгоритмической и инструментальной основе, учитывающей наличие неопределенности. Ключевыми аспектами решаемой задачи управления ИП ИКТ являются: многокритериальный характер задачи оценивания и выбора ИП ИКТ, для которого предоставляется финансирование; обоснование полноты и непротиворечивости показателей ИП ИКТ, наилучшим образом характеризующих качество его выбора; неопределенность, сопровождающая процесс оценки ИП ИКТ на протяжении рассматриваемых этапов жизненного цикла; необходимость отслеживания качественного роста, профинансированного ИП ИКТ для определения точек «дофинансирования» и «выхода из проекта». Достижение цели, с учетом выделенных аспектов, должно обеспечиваться системой поддержки принятия решений, охватывающей жизненный цикл инновационного проекта по ИКТ.

Ключевые слова: Инновация, проект, нечеткая логика, нечеткие множества

Постановка задачи исследования

На сегодня существует множество определений термина «инновации». Так, в [9] установлено, что данное определение встречается более чем у 20-ти различных авторов. Под инновациями будем понимать новое знание, технологию, метод, реализация которых приводит к продуктивному новшеству, а результатом выступает повышение эффективности.

Большинство инноваций имеет проектный, т.е. конкретный и прикладной характер. Под инновационным проектом понимают план-обоснование (экономическое, техническое, организационное и пр.) создания инновационного продукта (услуги, технологии и т.д.) в процессе инновационной деятельности. Инновационная деятельность - поэтапное применение научных, маркетинговых, финансово-инвестиционных и производственных расчётов в реальном бизнес- проекте, направленном на получение прибыли, либо изменения действующих систем.

Основная задача инновационного проекта – соединить науку и потребности рынка.

Учитывая универсальность инноваций, их массовое внедрение и глобальное влияние на экономику, существует множество видов их классификации – от отраслевого типа, до степени новизны и типа внедрения.

Следует подчеркнуть, что в рамках данной работы исследуются только **инновационные проекты информационно-коммуникационных технологий** (ИП ИКТ) (со спецификой - рисунок 1), которые выходят на рынок (внутренние ИП ИКТ компаний не рассматриваются, т.к. имеют инсайдерский характер принятия решений).

Необходимость управления ИП ИКТ обусловливается: наличием временных сроков его реализации; вероятностью возникновения рисков на каждом из этапов жизненного цикла; наличием взаимосвязи между участниками проекта, что способствует возникновению транзакционных издержек; ограниченностью в ресурсах проекта, что требует привлечения инвестиций, а значит, и обуславливает необходимость в управлении процессом инвестирования; возможностью возникновения изменений в проекте, что должно быть предусмотрено, например, в виде разработки модели по учету рисков; возможностью изменений во внешней среде, которую надо учесть при проведении маркетинговых исследований [7].

Особенности инновационного проекта информационно-коммуникационных технологий

Сложность разработки и реализации ИП ИКТ связана с высокой долей неопределённости результата, повышенных технологических и финансовых