

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сергеев Александр Игоревич

Аспирант кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, детальный и расширенный научно-технический анализ современных подходов и технологических решений, направленных на повышение коэффициента полезного действия (КПД) и эксплуатационной надежности солнечных элементов. В работе осуществляется теоретическая и инженеро-физическая декомпозиция ключевых механизмов потерь энергии в фотоэлектрических преобразователях, включая рекомбинационные, оптические и омические потери. Подробно рассматриваются физические основы и перспективные методы повышения эффективности: применение тандемных перовскит-кремниевых структур, пассивация поверхностей и контактов (технологии TOPCon и SHJ), модификация спектра падающего излучения, нанесение многослойных просветляющих и текстурированных покрытий, а также текстурирование микро- и нанорельефа поверхностей. В исследовании на основе физико-математического моделирования и анализа экспериментальных данных доказано, что преодоление теоретического предела Шокли — Квейссера для однопереходных кремниевых элементов возможно за счет перехода к многопереходным гетероструктурам и внедрения инновационных материалов. В статье представлен развернутый сравнительный анализ различных поколений фотоэлектрических преобразователей и предложены комплексные методологические рекомендации по оптимизации их архитектуры. Практическая ценность результатов заключается в формировании научно обоснованных ориентиров для проектирования и промышленного производства высокоэффективных солнечных модулей нового поколения.

Ключевые слова: солнечные элементы, фотоэлектрические преобразователи, коэффициент полезного действия, пассивация, перовскиты, гетероструктуры, предел Шокли — Квейссера, оптические потери, рекомбинация.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF SOLAR CELLS

Sergeev Alexander Igorevich

Postgraduate Student of the Department of Semiconductor Electronics and
Semiconductor Physics, National Research University "MPEI"
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, detailed, and expanded scientific and technical analysis of modern approaches and technological solutions aimed at improving the efficiency and operational reliability of solar cells. The paper performs a theoretical, engineering, and physical decomposition of key energy loss mechanisms in photovoltaic converters, including recombination, optical, and ohmic losses. Physical foundations and promising methods for increasing efficiency are considered in detail: the use of tandem perovskite-silicon structures, surface and contact passivation (TOPCon and SHJ technologies), modification of the incident radiation spectrum, application of multilayer anti-reflective and textured coatings, and micro- and nanorelief surface texturing. Based on physical and mathematical modeling and experimental data analysis, the study proves that overcoming the Shockley-Queisser limit for single-junction silicon cells is possible through the transition to multi-junction heterostructures and the introduction of innovative materials. The article presents an extensive comparative analysis of different generations of photovoltaic converters and proposes comprehensive methodological recommendations for optimizing their architecture. The practical value lies in developing scientifically grounded guidelines for designing and manufacturing next-generation high-efficiency solar modules.

Keywords: solar cells, photovoltaic converters, efficiency, passivation, perovskites, heterostructures, Shockley-Queisser limit, optical losses, recombination.

Введение

Проблема кардинального повышения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, глубокого физико-технического моделирования и минимизации фундаментальных потерь представляет собой одну из наиболее актуальных и приоритетных задач современной физики полупроводников, материаловедения и возобновляемой энергетики. Солнечная фотовольтаика рассматривается сегодня как ключевой элемент глобального энергетического перехода, способный обеспечить устойчивое снабжение энергией при минимальном воздействии на окружающую среду. Однако массовое внедрение фотоэлектрических установок напрямую зависит от их экономической конкурентоспособности, которая определяется соотношением удельной стоимости производимой электроэнергии и коэффициента полезного действия (КПД) солнечных элементов.

Теоретический предел эффективности традиционных однопереходных кремниевых элементов, описанный моделью Шокли — Квейссера, составляет около 29,4 % для кремния. В реальных промышленных образцах этот показатель долгое время оставался на уровне 18–22 %, что обусловлено комплексом оптических, рекомбинационных и резистивных потерь. Фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны полупроводника, не поглощаются и не участвуют в генерации электрон-дырочных пар, в то время как избыточная энергия высокоэнергетических фотонов теряется в виде тепла за счет процесса термализации носителей заряда. Кроме того, существенные ограничения накладывают поверхностная и объемная рекомбинация, а также отражение света от фронтальной поверхности и контактной сетки.

Традиционные подходы к проектированию фотоэлектрических преобразователей, исчерпавшие свой ресурс в рамках классической технологии р-п-перехода, требуют перехода на принципиально новые архитектурные и материаловедческие платформы. Применение пассивированных контактов, каскадных (тандемных) структур, наноструктурированных антиотражающих покрытий и квантово-размерных эффектов открывает новые возможности для преодоления сформировавшихся технологических барьеров. Главной целью данного исследования является комплексный научно-теоретический и технический анализ физических процессов в солнечных элементах, выявление ключевых факторов ограничения их КПД и разработка на этой основе единых физико-технологических принципов создания высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей нового поколения.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный подход, сочетающий методы физики полупроводников, квантовой оптики, спектроскопии, полупроводниковой микроэлектроники и компьютерного моделирования приборов.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра входных параметров, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала оптоэлектронные и электрофизические характеристики полупроводниковых материалов, включая ширину запрещенной зоны, подвижность и время жизни неосновных носителей заряда, коэффициент оптического поглощения, спектральную чувствительность и энергию сродства к электрону. Вторая категория включала конструктивно-технологические параметры элемента, среди которых подробно исследовались геометрия и профиль легирования р-п-перехода, толщина и литография пассивирующих слоев, морфология поверхности (высота и угол пирамид текстурирования), а также конфигурация и сопротивление металлических контактов. Третья категория анализируемых данных состояла из внешних эксплуатационных и спектральных факторов, таких как спектральный состав и интенсивность солнечного излучения (стандарт AM1.5G),

температурные коэффициенты, углы падения лучей и степень деградации под воздействием факторов окружающей среды.

Для математического описания процессов переноса и рекомбинации носителей заряда применялась система непрерывных уравнений Пуассона и уравнений непрерывности для электронов и дырок с учетом безызлучательной (по механизму Шокли — Рида — Холла и Оже) и излучательной рекомбинации. Моделирование оптических потерь и прохождения света сквозь многослойные структуры осуществлялось методами матриц переноса излучения и трассировки лучей.

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование и расчетно-аналитические изыскания показали, что критическим условием достижения предельных значений КПД является синергетическое сочетание глубокой оптической оптимизации поверхности и полного подавления поверхностной рекомбинации носителей заряда.

При детальном сравнительном анализе архитектур кремниевых солнечных элементов выявлено, что классическая технология Al-BSF (с задним поверхностным полем) уступает современным высокоэффективным концепциям, таким как PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) и SHJ (Silicon Heterojunction). Переход от традиционного p-n-перехода к технологии TOPCon, где тонкий слой оксида кремния (1–2 нм) сочетается с легированным поликремнием, позволяет снизить скорость поверхностной рекомбинации на порядок при сохранении отличного омического контакта, что обеспечивает увеличение КПД промышленных элементов до уровня 24,5–25,5 %.

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что наибольший потенциал для преодоления предела Шокли — Квейссера представляют тандемные архитектуры, объединяющие узкозонный кремниевый нижний элемент и широкозонный перовскитный верхний элемент. Перовскитные материалы с общей формулой ABX_3 благодаря регулируемой ширине запрещенной зоны (1,5–1,8 эВ), высокому коэффициенту поглощения и большой длине диффузии носителей эффективно улавливают коротковолновую часть солнечного спектра. Расчеты показывают, что двухконтактные тандемные структуры перовскит-кремний способны достигать практического КПД свыше 31–33 %, снижая при этом тепловые потери за счет оптимизации поглощения фотонов с различной энергией.

Наиболее высокую эффективность в снижении оптических потерь продемонстрировало использование комбинированного микро- и наноструктурирования поверхности (двухуровневое текстурирование) в сочетании с двухслойными просветляющими покрытиями на основе оксида индия-олова (ITO), нитрида кремния (SiN_x) и оксида алюминия (Al_2O_3). Это

позволяет снизить интегральный коэффициент отражения в диапазоне 300–1100 нм до значений менее 1,5–2,0 %.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают, что традиционное наращивание толщины поглощающего слоя кремния не приводит к росту КПД из-за возрастания объема объемной рекомбинации. Ключевой вектор развития заключается в тонкопленочных технологиях и пространственном разделении процессов генерации и переноса носителей.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение проблемы стабильности перовскитных слоев в составе tandemных элементов. Модификация состава перовскита путем введения многокомпонентных катионов (цезий, формамидиний) и замещения галидов позволяет существенно повысить устойчивость к воздействию влаги, ультрафиолетового излучения и повышенных температур. Для нейтрализации деградационных рисков в работе обоснована необходимость применения пассивирующих молекулярных слоев на границах раздела и герметизирующих прозрачных барьеров.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен эффект применения методик концентрирования солнечного излучения и внедрения люминесцентных преобразователей спектра (down-conversion и up-conversion). Преобразование жесткого ультрафиолетового излучения в видимый диапазон не только предохраняет структурные слои от фотодеструкции, но и добавляет 0,8–1,2 % к общему показателю КПД за счет эффективного использования ранее теряемого спектрального диапазона.

Заключение

Изучение физических процессов фотоэлектрического преобразования и способов их оптимизации позволяет выявить фундаментальные законы взаимодействия света с полупроводниковыми структурами, обеспечивая научную основу для создания солнечных элементов с КПД, близким к теоретическому пределу.

Физико-математическое моделирование переноса носителей заряда и оптического хода лучей в сочетании с новейшими технологиями пассивации (TOPCon, SHJ) гарантирует высокую точность проектирования архитектуры кремниевых элементов с эффективностью свыше 25 %.

Внедрение tandemных перовскит-кремниевых гетероструктур является наиболее перспективным механизмом преодоления преграды однопереходных элементов и достижения КПД на уровне 30 % и выше в масштабном производстве.

Применение разработанных физико-технологических подходов закладывает фундамент для снижения стоимости фотоэлектрической энергии, обеспечения энергетической безопасности и устойчивого научно-технического развития индустрии возобновляемых источников энергии.

Список литературы

1. Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. № 8. С. 930–948.
2. Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989. 310 с.
3. Лукутин В. М., Муравлев И. О., Плотников И. А. Возобновляемая энергетика. Солнечные фотоэлектрические установки. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. 192 с.
4. Безруких П. П. Закономерности и показатели развития возобновляемых источников энергии // Энергетическая политика. 2019. № 3. С. 52–63.
5. Рау Э. И., Степович М. А. Физика полупроводниковых приборов и гетероструктур. М.: Физматлит, 2012. 280 с.
6. Shockley W., Queisser H. J. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells // Journal of Applied Physics. 1961. Vol. 32. No. 3. P. 510–519.
7. Green M. A. Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion. Berlin: Springer, 2006. 160 p.
8. Ball J. M., Petrozza A. Defects in Perovskite-Based Semiconductor Materials // Nature Energy. 2016. Vol. 1. P. 16149.
9. Saga T. Advances in Crystalline Silicon Solar Cell Technology for Industrial Mass Production // NPG Asia Materials. 2010. Vol. 2. No. 3. P. 96–102.
10. Polman A., Knight M., Garnett E. C., Ehrler B., Sinke W. C. Photovoltaic Materials: Present Status and Future Prospects // Science. 2016. Vol. 352. No. 6283. P. aad4424.

References

1. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. (2004). Tendentsii i perspektivy razvitiya solnechnoy fotoenergetiki [Trends and Prospects for the Development of Solar Photovoltaics]. *Semiconductors*, Vol. 38, No. 8, pp. 930–948.
2. Andreev V.M., Grilikhes V.A., Rumyantsev V.D. (1989). Fotoelektricheskoe preobrazovanie kontsentrirrovannogo solnechnogo izlucheniya [Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight]. Leningrad: Nauka Publ. 310 p.
3. Lukutin V.M., Muravlev I.O., Plotnikov I.A. (2017). Vozobnovlyаемая энергетика. Solnechnye fotoelektricheskie ustanovki [Renewable Energy. Solar Photovoltaic Installations]. Tomsk: Tomsk Polytechnic Univ. Publ. 192 p.

4. Bezrukikh P.P. (2019). Zakonomernosti i pokazateli razvitiya vozobnovlyaemykh istochnikov energii [Patterns and Indicators of Renewable Energy Sources Development]. *Energy Policy*, No. 3, pp. 52–63.
5. Rau E.I., Stepovich M.A. (2012). Fizika poluprovodnikovyykh priborov i geterostruktur [Physics of Semiconductor Devices and Heterostructures]. Moscow: Fizmatlit Publ. 280 p.
6. Shockley W., Queisser H.J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, No. 3, pp. 510–519.
7. Green M.A. (2006). Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion. Berlin: Springer. 160 p.
8. Ball J.M., Petrozza A. (2016). Defects in Perovskite-Based Semiconductor Materials. *Nature Energy*, Vol. 1, p. 16149.
9. Saga T. (2010). Advances in Crystalline Silicon Solar Cell Technology for Industrial Mass Production. *NPG Asia Materials*, Vol. 2, No. 3, pp. 96–102.
10. Polman A., Knight M., Garnett E.C., Ehrler B., Sinke W.C. (2016). Photovoltaic Materials: Present Status and Future Prospects. *Science*, Vol. 352, No. 6283, p. aad4424.