

БИОНИЧЕСКИЙ ГЛАЗ НА ОСНОВЕ ИОНОГЕЛЕВЫХ И ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Крымская П.А., Ордо С.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: Туровец У.Е. – аспирант, м. н. с. НИЛ 4.6 НИЧ БГУИР,
Позняк А.А – к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры ЭТТ, с. н. с. НИЛ 4.6 НИЧ БГУИР*

Аннотация. В работе рассмотрены наноматериалы, используемые в качестве синаптических фоторецепторов бионических протезов глаз, а также прототипы устройств, изготовленных с их применением. Основное внимание уделено обсуждению ионогелевых материалов и полусферических матриц перовскитных нанопроводов, а также ключевых аспектов процессов передачи сигнала, самоуправляемого функционирования и связанных с этих характеристик устройств.

Ключевые слова: ионогель, перовскитные нанопровода, фототок, гетеропереход.

Введение. Развитие нанoeлектроники открыло широкие перспективы для создания высокотехнологичных устройств, имитирующих функции биологических систем. Одной из актуальных задач является разработка бионических глаз, которые способны воспроизводить сложные функции человеческой сетчатки, включая светочувствительность, высокое разрешение изображения и высокую адаптивность к внешним условиям. В качестве материалов, используемых в этих устройствах, заслуживающих более пристального рассмотрения, являются проводящие ионогели и перовскитные нанопровода. Устройства бионических глаз на их основе находят применение как в медицине, в частности для восстановления зрения у пациентов с офтальмологическими заболеваниями, так и в области искусственного интеллекта, где они становятся основой для создания нейроморфных систем [1–3].

Основная часть. В качестве наглядного примера такой системы приведена схематическая 3D-модель (рисунок 1) современной искусственной зрительной системы бионического электрохимического глаза (БЭГ) с полусферической сетчаткой [1, 2]. Сетчатка БЭГ изготавливается из массива перовскитных (CsPbI_3) нанопроводов, имитирующих фоточувствительные нервные волокна человека (палочки и колбочки). Массив перовскитных нанопроводов (ПН) представляет собой выращенные путем осаждения из газовой фазы индивидуальные столбики длиной порядка 1 мкм в матрице анодного оксида алюминия (АОА). В данной модели в качестве переднего контакта к ПН предлагается использование водного раствора электролита с показателем преломления 1,35, одновременно имитирующего стекловидное тело, а жидкометаллический эвтектический сплав Ga–In служит в качестве заднего контакта. В модели БЭГ имитация склеры формируется вольфрамовой пленкой на алюминиевой полусферической оболочке.

В другой модели искусственного глаза светочувствительный слой основан на гетеропереходе на границе раздела двух слоев синтетического ионогеля: чистого геля, обладающего высокой оптической прозрачностью (93%) и эластичностью, и черного легированного геля [4]. Обе фазы ионогеля содержат катионы лития (Li^+) и анионы бис(трифторметансульфонил)имида (TFSI^-), образуя гетеропереход за счет контакта чистого и легированного геля, содержащего наночастицы полипиррола (НЧП). Область легированного геля является задней стенкой имитируемой сетчатки и выполняется в виде массива нанопроводов, в то время как чистый гель является внешней стенкой имитируемой сетчатки.

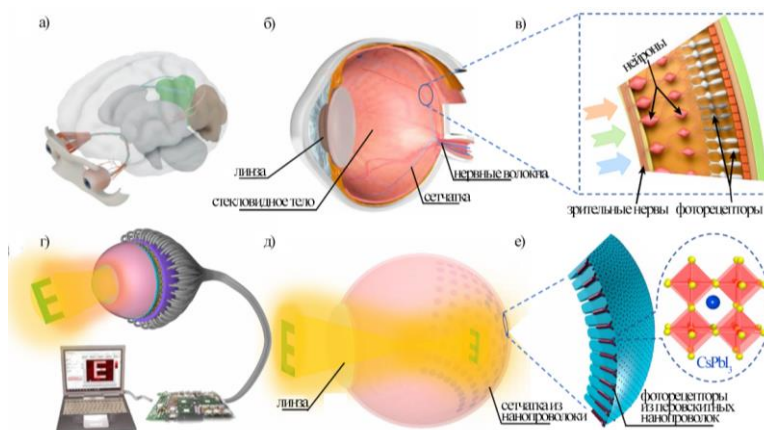


Рисунок 1 – Общее сравнение зрительной системы человека и системы БЭГ: а) схема зрительной системы человека; б) схема человеческого глаза; в) схема сетчатки человеческого глаза; г) механизм работы БЭГ; д) ПН в матрице АОА; е) кристаллическая структура ПН

Под воздействием света ионы мигрируют из примесного геля, содержащего НЧП, в область чистого геля. Этот процесс приводит к несбалансированной концентрации ионов в гетеропереходе из-за различных скоростей миграции катионов и анионов (рисунок 2). При синергетическом воздействии процессов фототермического и термоэлектрического преобразования внутри гетероперехода, градиент температуры создает ионный ток. Так, в чистом геле возникает избыток положительных ионов Li^+ , в то время как в примесном геле – отрицательных ионов $TFSI^-$. В результате в гетеропереходе возникает внутреннее электрическое поле, направленное от чистого геля к легированному.

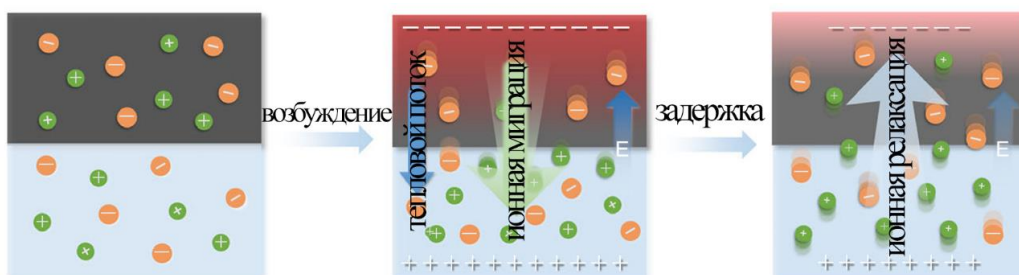


Рисунок 2 – Механизм опико-электрического преобразователя в ионогеле

Рассмотрим фотоотклик ионогеля (рисунок 3, а), в котором фототок и время отклика (ВО) измеряются на участке гетеро-интерфейса.

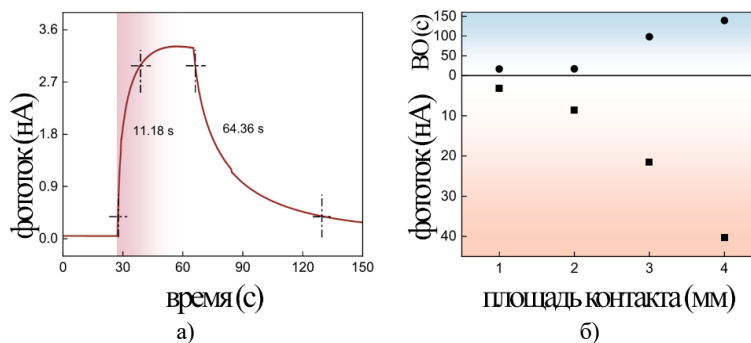


Рисунок 3 – а) Фотоотклик гетероперехода, экспонированного светом 365 нм без внешнего источника питания; б) влияние размера на фототок и время отклика

Из графика видно, что задержка отклика составляет около 11 с, а остаточный фототок присутствует на протяжении 64 с. Это делает ионгель подходящим материалом для создания синаптических фоторецепторов, имитирующих работу сетчатки глаза, поскольку такая задержка позволяет моделировать процессы, аналогичные функционированию биологических нейронов, где временные задержки также играют существенную роль [1, 2]. Меньшая площадь контакта со стороны примесного геля (рисунок 3, б) дает меньший ток и более быстрое затухание, что означает уменьшение времени отклика.

Массив ПН в матрице АОА представляют собой искусственную сетчатку с фоточувствительными «палочками» и «колбочками» (рисунок 4), расположенные плотной гексагональной упаковкой. ПН состава CsPbI_3 имеют относительно узкую запрещенную зону (~1,8 эВ), что делает их чувствительными ко всему видимому диапазону. Место контакта электролита и ПН образует искусственный синапс, возбуждаемый попадающим на сетчатку светом, вызывающим движение ионов. Длина ПН имеет решающее значение для фоточувствительности системы БЭГ. Так, для ПН длиной 1 мкм при освещении более короткой длиной волны (синим светом) носители заряда в основном генерируются на верхней части нанопроволоки и дают положительный фототок. Напротив, ПН генерирует отрицательный фототок при освещении более длинными волнами (зеленый и красный свет). Таким образом, системы БЭГ могут обладать не только фото-, но и цветочувствительностью [3]. Расположенный у основания нанопроволоки Рb-электрод также может поглощать оставшийся свет для уменьшения оптической aberrации.

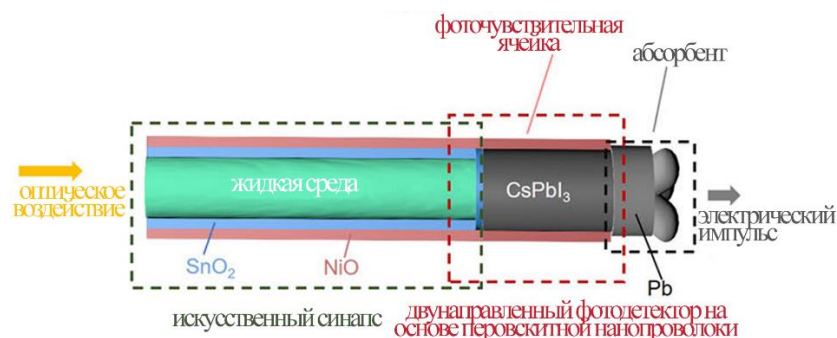


Рисунок 4 – Структура индивидуального фоторецептора ПН искусственной сетчатки

На рисунке 5, а) представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ), демонстрирующие асимметричный фотоответ искусственной сетчатки БЭГ на основе ПН. На рисунке 5, б) представлена зависимость фототока от освещенности искусственной сетчатки БЭГ.

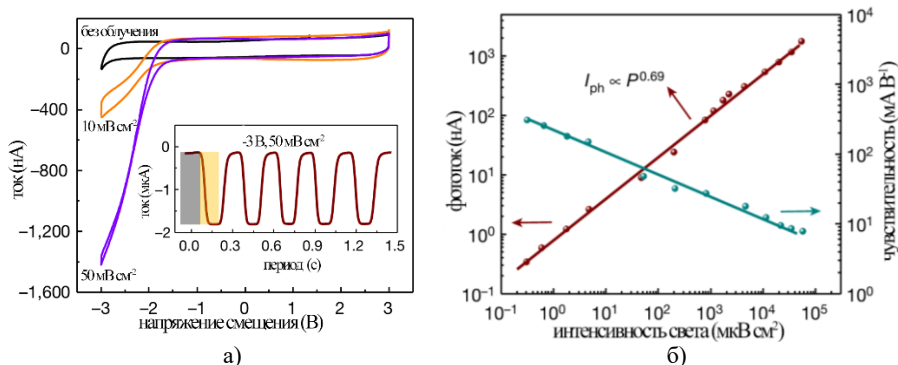


Рисунок 5 – а) Вольт-амперные кривые при различном освещении и переходный отклик отдельных пикселей при освещении с интенсивностью 50 мВт см^{-2} ; б) зависимость фототока (красная линия) и чувствительности отдельного пикселя (синяя линия) от интенсивности освещения

Относительно быстрый и воспроизводимый отклик указывает на то, что устройство имеет превосходную стабильность и воспроизводимость фототока. Время отклика и восстановления составило 32,0 мс и 40,8 мс, соответственно. Анализ асимметричных ВАХ показывает, что время отклика устройства зависит от кинетики нескольких типов ионов на переходе электролит/ПН. В то же время, анализируя быстроедействие обеих рассмотренных конструкций, следует отметить замедленную реакцию гетероструктуры, основанной на контакте ионogелей. Вероятно, это связано со значительно более низкой подвижностью ионов в ионogеле в сравнении с аналогичными характеристиками для растворов электролитов и, тем более, подвижностью носителей заряда в ПН.

Заключение. Таким образом, комбинация ионogелей разного состава или водного раствора электролита и ПН обеспечивает создание фоточувствительной пары для имитации сетчатки в системе БЭГ. Данные материалы отвечают принципам простоты изготовления, доступности и воспроизводимости параметров. В ответ на свет фоточувствительная пара может действовать аналогично фоторецепторам человека, преобразуя попадающие на искусственную сетчатку фотоны в нейроэлектрические сигналы. Кроме того, использование матриц ПН позволяет решить задачу изготовления оптоэлектронных устройств на полусферических подложках с высокой плотностью упаковки и, следовательно, высокой разрешающей способностью и быстрымдействием. Эти наноматериалы формируют основу для дальнейшего изучения и совершенствования технологий, направленных на создание высокоэффективных систем искусственного зрения.

Список литературы

1. A biomimetic eye with a hemispherical perovskite nanowire array retina / Leilei Gu, Swapnadeep Poddar, Yuanjing Lin [et al.] // *Nature Supplementary information*. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2285-x>
2. A biomimetic eye with a hemispherical perovskite nanowire array retina / Leilei Gu, Swapnadeep Poddar, Yuanjing Lin [et al.] // *Nature*. 2020. Vol. 581. P. 278–284. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2285-x>
3. A neuromorphic bionic eye with filter-free color vision using hemispherical perovskite nanowire array retina / Zhenghao Long, Xiao Qiu, Chak Lam [et al.] // *Nature communications*. 2023. Vol. 14, No 1972. P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37581-y>
4. A bionic self-driven retinomorph eye with ionogel photosynaptic retina / Xu Luo, Chen Chen, Zixi He, [et al.] // *Nature communications*. 2024. Vol. 15, No 3086. P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47374-6>

UDC 621.383.8; 628.955.9

A BIONIC EYE BASED ON IONOGELE AND PEROVSKITE NANOMATERIALS

Krymskaya P.A., Ordo S.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Turavets U.Y. – Postgraduate, junior researcher at the research laboratory 4.6 of R&D department, Poznyak A.A. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ETT, senior researcher at the research laboratory 4.6 of R&D department,

Annotation. The paper reviews nanomaterials used as synaptic photoreceptors in bionic eye prostheses, as well as prototypes of devices formed using them. The main focus is on the discussion of ionogel materials and hemispherical matrices of perovskite nanowires, as well as key aspects of signal transmission processes, self-controlled operation, and related device characteristics.

Keywords: ionogel, perovskite nanowires, photocurrent, heterojunction.