

УДК 621.315.592

**ПРОЗРАЧНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ**  
**TRANSPARENT SEMICONDUCTOR STRUCTURES**

Е.И. Индюкова, Е.В.Таранко

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

[zukovskya@bntu.by](mailto:zukovskya@bntu.by)

E. Indukova, E. Taranko

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** в данной статье представлен обзор новейших технологий в области применения полупроводников. Рассматривается возможность внедрения технологии прозрачных тонкопленочных фотоактивных материалов в солнечной энергетике. Проанализирован потенциал практического применения современных разработок.

**Abstract:** this article provides an overview of the latest technologies connected with the application of semiconductors. The possibility of introducing the technology of transparent thin-film photoactive materials in solar energy is considered. The potential of practical usage of modern developments is analyzed.

**Ключевые слова:** полупроводник, фотоэлемент, тонкопленочное устройство, кремниевые фотоэлементы, солнечная панель.

**Key words:** semiconductor, photoelectric cell, thin-film device, silicon photovoltaic cells, solar panel.

**Введение**

Современный мир трудно представить без электронных устройств, сегодня они используются во всех сферах жизни общества: промышленное производство, энергетика, связь, здравоохранение, наука, образование. В оборудовании разной конфигурации применяются микросхемы, изготовленные из полупроводниковых материалов. Именно полупроводники (кремний, германий, селен, оксид никеля, двуокись титана и др.), занимающие по своей способности проводить ток промежуточное положение между проводниками и диэлектриками, позволяют качественно и практически мгновенно осуществлять нужные операции. Во многих странах постоянно проводятся новые исследования в области полупроводниковых материалов, каждое из которых вносит вклад в будущее электроники. Одно из передовых направлений – тонкопленочные технологии, когда разными способами получают и обрабатывают тонкие пленки проводников, диэлектриков и полупроводников при изготовлении всевозможных элементов интегральных схем. Сегодня прослеживается стремление создать электронные устройства всё меньшей толщины, меньшей массы, да и вовсе прозрачными, невидимыми. Существует большое количество исследований о прозрачных фотоэлементах. Такие технологии имеют потенциал для применения в гелиоэнергетике, ведь они расширяют область использования фотоэлементов.

### Основная часть

Сегодня актуальны разработки в области солнечной энергетики. Например, растёт коэффициент преобразования ультрафиолетового излучения в электричество. Но использование нынешних фотоэлементов несколько ограничено из-за их непрозрачности. Солнечные панели обычно устанавливают на крышах, в удаленных местах. Чтобы выработать большое количество электроэнергии, необходимы панели соответственно большой площади.

Недавнее исследование корейских ученых фокусировалось на создании эффективного и полностью прозрачного солнечного элемента [1]. Необычные свойства прозрачных фотоэлементов позволяют применять их в широком количестве мест, например, в окнах зданий или в смартфонах.

Прозрачный фотоэлемент в результате исследования был создан с помощью комбинации полупроводников из оксида никеля (NiO) и диоксида титана (TiO<sub>2</sub>). Оксид никеля имеет высокие характеристики оптической прозрачности. Он широко используется в керамической промышленности, в качестве зеленого пигмента для стекла. Диоксид титана сегодня используют в солнечных батареях, он нетоксичный и экологически чистый. Месторождения титана, 90% которого после добычи используется для создания диоксида, находятся в большом количестве в Австралии, США, Норвегии, России и других странах. Хотя потребление растёт и в лакокрасочной промышленности, и в производстве пластмасс, запасов титановой руды в мире пока достаточно. Следовательно, его хватит и для новых фотоэлементов. Сочетание описанных выше элементов позволит создавать прозрачные солнечные панели. К сожалению, эффективность преобразования энергии таких панелей составила всего лишь 2,1 %, что слишком мало для масштабного применения и получения прибыли.

Другая группа ученых из Южной Кореи предлагает использовать для прозрачных солнечных панелей другой полупроводник – кремний. Кристаллический кремний отлично подходит для разработки стекловидных, бесцветных солнечных элементов. Чтобы добиться прозрачности, в фотоэлементе пробиваются маленькие отверстия, расположенные в определенном порядке. Их невозможно заметить невооруженным глазом, но при этом они не ухудшают коэффициент полезного действия элемента [2].

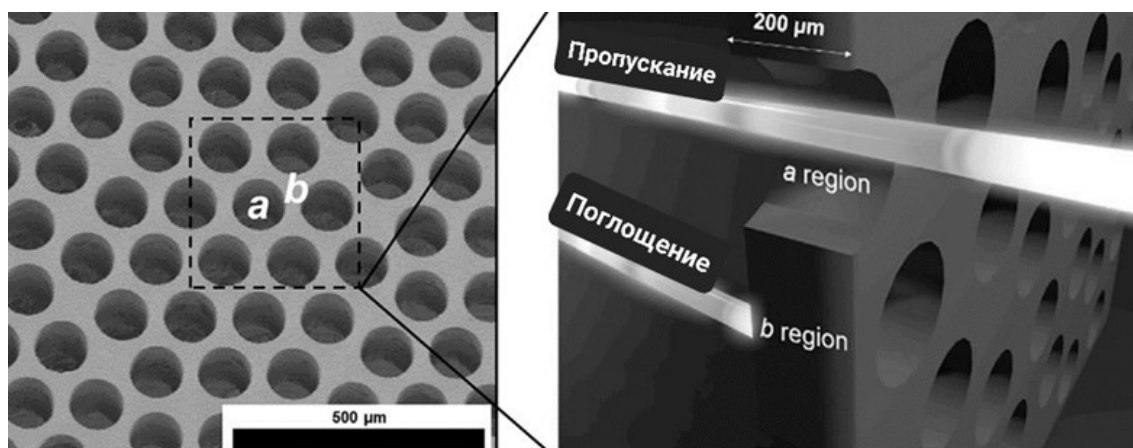


Рисунок 1 – Принцип работы фотоэлемента с отверстиями

На рисунке 1 изображено два случая падения луча: пропускание и поглощение. Один из продемонстрированных лучей, проходя через поверхность фотоэлемента толщиной 200 мкм, попадает в отверстие и проходит дальше. Именно это даёт прозрачность, и человеческий глаз видит предметы, находящиеся под панелью. Значит, можно использовать такие элементы в окнах и экранах. Второй луч поглощается, попадая на получившуюся решетку. Благодаря таким лучам солнечная энергия преобразуется в электричество.

Испытания свидетельствуют о том, что прозрачный фотоэлемент из кремния сохраняет производительность 12,2%. Хотя у непрозрачных элементов данный показатель составляет 20 — 25%, у прозрачных он ниже того, на что способны кремниевые. Кроме того, если подобные фотоэлементы ставить вертикально, то лучи света, падающие под пологим углом, приводят к снижению электрического тока примерно на 30%. В новых кремниевых элементах с отверстиями такой проблемы не обнаружено, в ходе испытания производительность снизилась на почти 4%.

Что касается эффективности стандартных кремниевых фотоэлементов, она обычно не превышает 29,1%. Это происходит потому, что каждый фотон может выбить только один электрон. Исследователи из Массачусетского технологического институт преодолели этот предел производительности кремниевых фотоэлементов. Они сделали так, чтобы один фотон смог выбить сразу два электрона, и это увеличило коэффициент полезного действия до 35%. Такого успеха удалось добиться благодаря материалов, содержащих возбужденные квазичастицы экситоны. Такая частица представляет собой электронное возбуждение в диэлектрике, полупроводнике или металле, которое мигрирует по кристаллу и не связано с переносом электрического заряда и массы. Под действием экситонов энергия одного фотона разделяется на две независимые единицы. Этот процесс известен как синглетное деление экситона, он изображен на рисунке 2 [3].

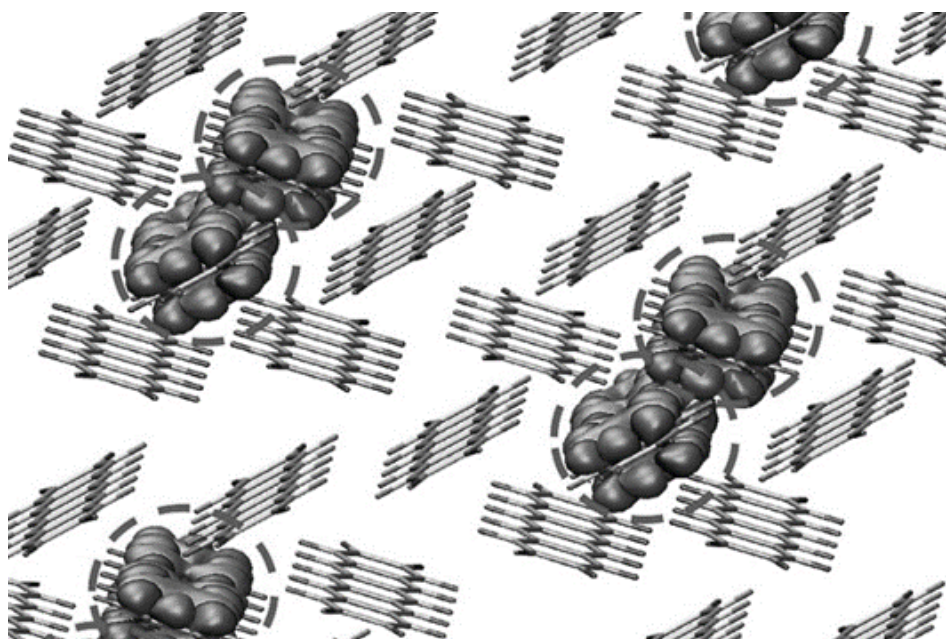


Рисунок 2 – Синглетное деление экситона

До этого исследования не получалось связать энергию экситонов с неэкситонным кремнием. В итоге за счет добавления очень тонкого слоя между поверхностным слоем из тетрацена и кремниевым солнечным элементом получилось добиться нужного эффекта. Этот переход толщиной всего несколько атомов состоит из оксинитрида гафния.

После объединения трех элементов количество энергии, производимой солнечным светом в сине-зеленой части спектра, увеличилось в два раза. Это означает увеличение теоретического максимума кремниевых фотоэлементов с 29,1% до 35%. Коммерческое использование разработки, очевидно, начнется нескоро. Необходимо оптимизировать используемые кремниевые элементы и протестировать полученные пластинки на прочность.

Другой путь получения экранов нового типа лежит в технологии нового материала, который сочетает высокую подвижность зарядов и способность к люминесценции. Так можно получить гибкий прозрачный источник света. Российские и немецкие ученые создали первый органический 2D-светотранзистор, изображенный на рисунке 3 [4].

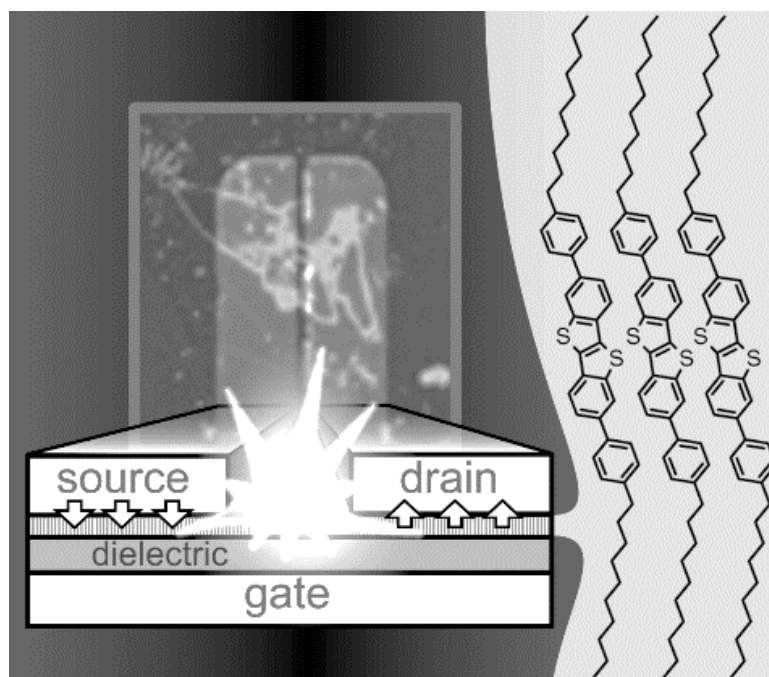


Рисунок 3 – Структура органического 2D-светотранзистора

Были синтезированы новые молекулы на основе жесткого центрального фрагмента, состоящего из ароматических колец и отвечающего за полупроводниковые и светоизлучающие свойства. Также его модифицировали длинными гибкими алкильными «хвостами» для увеличения растворимости. Такая молекулярная структура позволяет выращивать из раствора 2D-монокристаллы размерами до одного миллиметра. Полученный материал анализировали, используя методы оптической, атомно-силовой и фотолюминесцентной микроскопии, полученный материал. Полученные 2D-кристаллы обладали подвижностью носителей заряда намного выше, чем в аморфном кремнии. Также структуры выдерживают повышенные температуры



— свыше 200 °С, в то время как другие известные органические полупроводники, полимеры и низкомолекулярные соединения, которые используются в органических светодиодах и солнечных батареях, теряют свои кристаллические свойства при таком нагреве. Высокая подвижность носителей заряда и ярко выраженные люминесцентные свойства могут быть объединены в одном органическом 2D-кристалле и благодаря своим свойствам данный материал может быть использован для оптоэлектроники нового поколения. Также на его основе могут быть созданы ультратонкие источники света высокой яркости и разнообразные сенсорные устройства.

Органические 2D-материалы служат активными пикселями в экранах и элементами различных сенсоров, а также они могут быть платформой для управляемых током органических лазеров. Однако только недавно стало известно о 2D-монокристаллах органических полупроводников, сочетающих в себе оба полезных свойства. Благодаря свойствам этих материалов возможно создание гибкой, сверхтонкой, прозрачной и дешевой электроники. Полупроводники включают в себя один или несколько слоев органических молекул и, если их удастся упаковать в макроскопические монокристаллы, размером 1 см, то они становятся отличным материалом для транзисторов, которые являются базовым элементов любых электронных устройств, таких как датчики, сенсоры, пиксели дисплеев, источники света и другие.

### **Заключение**

Таким образом, прозрачные полупроводниковые материалы, хотя еще в зачаточной стадии разработки, имеют большой потенциал. Есть еще много проблем и вопросов, которые необходимо решить. Тем не менее, прозрачные фотоэлементы открывают новые возможности для расширения использования солнечной энергетики. Вероятно, что новые полупроводники скоро станут важной частью электроники.

### **Литература**

1. Transparent photovoltaic cells and self-powered photodetectors by TiO<sub>2</sub>/NiO heterojunction / Thanh TaiNguyen [et al.] – Journal of Power Sources – 2021. – Vol. 481.
2. Neutral-Colored Transparent Crystalline Silicon Photovoltaics [Электронный ресурс]/ Joule. – Режим доступа: [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(19\)30538-0#relatedArticles/](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(19)30538-0#relatedArticles/). – Дата доступа: 27.03.2022.
3. Experiments show dramatic increase in solar cell output [Электронный ресурс]/ Science Daily. – Режим доступа: <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/07/190703134054.htm/>. – Дата доступа: 05.04.2022.
4. Luminescent High-Mobility 2D Organic Semiconductor Single Crystals [Электронный ресурс]/ Wiley Online Library. – Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aelm.202101281/>. – Дата доступа: 12.04.2022.