Изготовление прозрачных пленочных контактов (катод и анод) с омическими характеристиками для OLED-экранов предъявляет ряд требований, связанных с их функциональностью и эффективностью. Вот основные требования к таким контактам:

1. **Прозрачность**: Контакты должны быть высоко прозрачными для эффективного прохождения света через них. Это особенно важно для OLED-экранов, где каждый пиксель должен иметь хорошую передачу света.
2. **Омические свойства**: Контакты должны иметь низкое сопротивление (низкую электрическую сопротивляемость) для обеспечения эффективной передачи электрического тока от электрода к органическому слою OLED. Это обеспечивает эффективную работу каждого пикселя. Здесь мы будем оценивать материалы с токи зрения их удельной проводимости.
3. **Устойчивость к окислению и коррозии**: Материалы, используемые для контактов, должны быть устойчивыми к окислению и коррозии, так как OLED-экраны могут эксплуатироваться в условиях, где могут быть изменения влажности и температуры. Кроме того, как известно, многие материалы быстро окисляются при взаимодействии с кислородом, что требует при их использовании нанесения дополнительных защитных слоёв.
4. **Устойчивость к физическим повреждениям**: Контакты должны быть достаточно прочными, чтобы выдерживать механические воздействия в процессе производства и эксплуатации OLED-экранов, также должна присутствовать некоторая гибкость.
5. **Плоскость и равномерность**: Пленочные контакты должны иметь плоскую поверхность с равномерной толщиной, чтобы обеспечить равномерное распределение электрического тока и минимизировать возможные неоднородности в работе OLED-экрана.
6. **Совместимость с другими слоями**: Материалы контактов должны быть совместимы с другими материалами, используемыми в структуре OLED, чтобы предотвратить реакции или деградацию в процессе производства и в эксплуатационных условиях.
7. **Технологическая совместимость**: Процесс изготовления контактов должен быть совместим с производственной линией OLED-экранов, что включает аспекты, такие как температурные условия, методы нанесения (в нашем случае аддитивные) и высокая скорость производства.

Для изготовления прозрачных пленочных электрических контактов с омическими характеристиками в OLED, обычно используют следующие материалы:

1. **Индиевое олово (ITO)**: это наиболее распространенный материал для создания прозрачных электродов в OLED. ITO обладает хорошей проводимостью и прозрачностью в видимом спектре света, что делает его идеальным для применения в дисплеях.
2. **Фольгированное серебро (Ag)**: используется в некоторых случаях как альтернатива ITO. Серебро обладает высокой электрической проводимостью и может быть использовано в виде тонких пленок для создания электродов.
3. **Транспортные слои органических полупроводников**: для соединения между слоями OLED часто используют органические материалы, которые обеспечивают необходимую омическую связь между электродами и слоями эмиттеров.
4. **Алюминий (Al)** или **кальций (Ca)**: используются для создания электродов с низким потенциалом работы, необходимых для электронных и дырочных впрыскающих слоев в OLED.
5. **Транспарентные проводники на основе полимеров**: например, поли(3,4-этилендиокситиофен)/полистиролсульфонат (PEDOT) может быть использован в качестве альтернативы ITO благодаря своей высокой прозрачности и относительно низкой стоимости.
6. **Графен:** как однослойный двумерный материал, представляет собой плоскую структуру углерода, которая обладает уникальными свойствами, делающими его прекрасным материалом для прозрачных электродов.
7. **Углеродные нанотрубки:** представляют собой цилиндрические структуры, и также имеют отличные электропроводные свойства.

Давайте рассмотрим перечисленные материалы с точки зрения требований к прозрачным пленочным контактам с омическими характеристиками для OLED-экранов, воспользуемся приведенными ранее требованиями, в конце каждого материала обобщим основные минусы.

Индиевое олово (ITO):

ITO имеет очень хорошие электрические проводимость () и оптическую прозрачность в видимом спектре света, что делает его идеальным материалом для применения в OLED. Это свойство особенно важно, так как электроды OLED должны быть прозрачными, чтобы свет с эмитирующих слоев мог без помех проходить через них.

* + **Прозрачность**: ITO обладает высокой прозрачностью в видимом спектре света, что делает его идеальным для применения в OLED-экранах.
  + **Омические свойства**: ITO имеет низкое сопротивление, что позволяет эффективно передавать электрический ток.
  + **Устойчивость к окислению и коррозии**: ITO устойчив к окислению, но может требовать защитных слоев в некоторых условиях эксплуатации.
  + **Устойчивость к физическим повреждениям**: достаточно прочен для большинства применений в OLED-технологиях.
  + **Плоскость и равномерность**: хорошо контролируемая толщина и плоскость.

**Минусы и сложности**:

* Высокая стоимость и относительная редкость индия как основного компонента.
* Хрупкость и чувствительность к механическим повреждениям.
* Ограниченная гибкость, что может быть проблемой для гибких OLED устройств.

Фольгированное серебро (Ag):

Серебро обладает очень высокой электрической проводимостью ( ), что позволяет создавать эффективные электрические контакты с низким сопротивлением. Используется в случаях, когда требуется высокая проводимость и когда важна стоимость или процесс изготовления.

* + **Прозрачность**: в зависимости от толщины и способа нанесения, серебряные пленки могут быть менее прозрачными, чем ITO.
  + **Омические свойства**: у серебра очень низкое сопротивление, что обеспечивает отличную проводимость.
  + **Устойчивость к окислению и коррозии**: менее стабильно в агрессивных окружающих условиях по сравнению с ITO.
  + **Устойчивость к физическим повреждениям**: мягкий материал, требующий защиты от механических повреждений.
  + **Плоскость и равномерность**: может быть сложно контролировать толщину и равномерность.

**Минусы и сложности**:

* Меньшая прозрачность по сравнению с ITO.
* Трудности с равномерным нанесением тонких пленок, что может влиять на качество и однородность контактов.
* Возможные проблемы с адгезией к подложкам или другим слоям в OLED структуре.

Транспортные слои органических полупроводников:

Эти материалы обеспечивают хорошую омическую связь между различными слоями OLED, что позволяет эффективно вводить и выводить электрический ток в OLED устройствах. Они также хорошо совместимы с другими органическими материалами, используемыми в OLED, такими как эмитирующие и транспортные слои. Примером таких материалов могут служить TPBi (трифенил-бензимидазол), TCTA (три(карбазоль-9-ил) трифениламин), BPhen (4,7-дифенил-1,10-фенилантролин) и BCP (батиодиниодфенилен).

* + **Прозрачность**: органические материалы могут обеспечивать высокую прозрачность, особенно тонкие слои.
  + **Омические свойства**: зависят от конкретного органического материала, но могут иметь хорошие омические характеристики.
  + **Устойчивость к окислению и коррозии**: органические материалы могут быть чувствительны к воздействию влаги и кислорода.
  + **Устойчивость к физическим повреждениям**: хрупкие в сравнении с металлами, требуют защиты в процессе обработки.
  + **Плоскость и равномерность**: равномерность и стабильность зависят от метода нанесения.

**Минусы и сложности**:

* Трудности с точностью контроля толщины слоев, что может привести к вариациям в электрических свойствах.
* Некоторые материалы могут быть чувствительны к влаге или кислороду, требуя особых условий производства и защиты.

Алюминий (Al) и кальций (Ca):

Эти металлы имеют низкий потенциал работы, что позволяет им эффективно вводить или выводить электроны или дырки в электронные и дырочные впрыскающие слои OLED. Алюминий и кальций могут быть нанесены в виде тонких пленок, что важно для минимизации влияния на оптические свойства OLED. Удельная проводимость алюминия порядка , а кальция -- .

* + **Прозрачность**: алюминий и кальций не являются прозрачными в видимом спектре света, что ограничивает их применение в OLED-экранах.
  + **Омические свойства**: алюминий имеет низкое сопротивление.
  + **Устойчивость к окислению и коррозии**: алюминий и кальций подвержены окислению в атмосферных условиях.
  + **Устойчивость к физическим повреждениям**: могут быть достаточно прочными, но требуют защиты.
  + **Плоскость и равномерность**: контроль толщины и равномерности важен для обеспечения равномерного контакта.

**Минусы и сложности**:

* Алюминий и кальций могут образовывать оксидные пленки, что может ухудшить их электрические свойства.
* Проблемы с адгезией или стабильностью в условиях высокой влажности или окислительной среды.
* Могут требоваться дополнительные меры по защите от окисления или деградации.

Полимерные транспарентные проводники (например, PEDOT):

PEDOT обеспечивает хорошую прозрачность в видимом спектре, а также гибкость, что может быть полезно для приложений, где требуется гибкий OLED дисплей. Этот материал легко обрабатывается и может быть нанесен на большие поверхности с использованием простых технологий печати. Электрическая проводимость транспарентных проводников на основе полимеров может варьироваться от .

* + **Прозрачность**: полимерные материалы могут обеспечивать хорошую прозрачность, особенно при оптимизации состава.
  + **Омические свойства**: зависят от типа полимера и добавленных проводящих добавок; могут быть менее эффективными по сравнению с ITO.
  + **Устойчивость к окислению и коррозии**: полимеры могут быть менее стойкими к воздействию окислительных сред.
  + **Устойчивость к физическим повреждениям**: могут быть менее прочными и требовать защиты.
  + **Плоскость и равномерность**: контроль толщины и равномерности слоя важен для эффективной работы.

**Минусы и сложности**:

* Может быть необходима предварительная обработка подложек для обеспечения хорошей адгезии.
* Устойчивость к долговременной стабильности и долговечности может быть проблемой в некоторых приложениях.
* Влияние на структурные и оптические свойства OLED дисплея из-за введения дополнительного слоя.

Графен и углеродные нанотрубки:

Графен и углеродные нанотрубки являются современными и перспективными материалами для использования в различных областях науки и техники, включая электронику и оптоэлектронику.

Графен и углеродные нанотрубки обладают высокой *электрической проводимостью*, что позволяет создавать электрические контакты с низким сопротивлением. Это способствует эффективной передаче электрического сигнала и минимизации потерь энергии. Графен и углеродные нанотрубки обладают высокой степенью *прозрачности* в широком спектре длин волн света, включая видимый диапазон. Это позволяет создавать прозрачные электроды, которые не влияют на видимость изображения на дисплее. Они также обладают *гибкостью*, что делает их идеальными для использования в гибких электронных устройствах, включая гибкие OLED-дисплеи. Это позволяет создавать устройства с улучшенной механической прочностью и возможностью изгиба, и высокой химической стабильностью, что позволяет им сохранять свои свойства при воздействии окружающей среды. Это важно для долговечности и надежности электрических контактов в OLED.

* + **Прозрачность**: обладают высокой прозрачностью в видимом спектре света.
  + **Омические свойства**: графен и углеродные нанотрубки могут иметь очень низкое сопротивление, обеспечивая отличную проводимость.
  + **Устойчивость к окислению и коррозии**: графен устойчив к окислению, углеродные нанотрубки могут требовать защиты.
  + **Устойчивость к физическим повреждениям**: графен и нанотрубки могут быть очень прочными, но требуют аккуратного обращения.
  + **Плоскость и равномерность**: требуют точного контроля толщины и равномерности в процессе нанесения.

**Минусы и сложности**:

* В настоящее время производство графена и углеродных нанотрубок является дорогостоящим процессом, что может снижать их конкурентоспособность на рынке и повышать общую стоимость производства устройств на их основе.
* Несмотря на то, что существуют методы производства графена и углеродных нанотрубок в лабораторных условиях, достижение высокой масштабируемости и промышленного производства этих материалов остается сложной задачей.
* Графен и углеродные нанотрубки могут быть чувствительны к механическим повреждениям и стиранию, что может привести к уменьшению их эффективности в качестве электрических контактов в OLED.
* Иногда возникают трудности с интеграцией графена и углеродных нанотрубок с другими материалами, что может потребовать дополнительных технологических усилий и ресурсов для достижения оптимальной работоспособности устройств.

Для удобства сравнения все материалы помещены в таблицу.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Материал | Плюсы | Минусы |
| Индиевое олово (ITO) | Хорошая электрическая проводимость, прозрачность | Высокая стоимость, хрупкость, ограниченная гибкость |
| Фольгированное серебро (Ag) | Высокая электрическая проводимость | Меньшая прозрачность, трудности с равномерным нанесением, проблемы с адгезией к подложке |
| Транспортные слои органических полупроводников | Хорошая омическая связь между различными слоями OLED, совместимость с другими органическими материалами | Трудности с точностью контроля толщины слоев, чувствительность к влаге или кислороду |
| Алюминий (Al) или кальций (Ca) | Возможно создание тонких пленок, низкий потенциал работы | Окисление, проблемы с адгезией и стабильностью |
| Транспарентные проводники на основе полимеров | Прозрачность, гибкость, легкая обработка, простые технологии печати для нанесения | Проблема со стабильностью и долговечностью, влияние на структурные и оптические свойства |
| Графен и углеродные нанотрубки | Электрическая проводимость, прозрачность, гибкость, химическая стабильность | Стоимость производства, трудности в масштабировании производства, проблемы с прочностью и долговечностью, трудности в интеграции с другими материалами |

**Список источников**

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/OLED>
2. <https://led-e.ru/led-manufacture/tehnologicheskie-materialy/>
3. R. Ikeda, J. Mizuno and T. Kasahara, "Fabrication and Evaluation of Microfluidic Organic-Light Emitting Diode Having a Fluorine-Doped Tin Oxide Cathode," 2023 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), Kumamoto, Japan, 2023, pp. 117-118, doi: 10.23919/ICEP58572.2023.10129647.
4. Y. Huang and D. Yang, "High-Performance Silver Nanowire Flexible Transparent Electrodes under Current Stress and the Application for Long Lifetime OLEDs," *2023 24th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Shihezi City, China, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEPT59018.2023.10492021.
5. S. Nabavi, H. Anabestani and S. Bhadra, "Low-Power Organic LED Fabricated by a Novel Solution-Based Process for Photoplethysmography Sensing," in *IEEE Journal on Flexible Electronics*, vol. 2, no. 1, pp. 34-42, Jan. 2023, doi: 10.1109/JFLEX.2023.3259384.
6. Жидик Ю.С. Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Троян Павел Ефимович; ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – Томск, 2019. - 159 с.