

УДК 621.793.06, 621.793.162, 621.793:621.315.595

Т.В. Семикина, канд. техн. наук, В.Н. Комащенко, д-р физ.-мат. наук, Л.Н. Шмырева, канд. техн. наук

## Оксидная электроника как одно из направлений прозрачной электроники

**В обзорной работе рассматриваются тенденции развития прозрачной электроники. Акцент делается на свойствах и применении прозрачных проводящих оксидных материалов, которые используются при изготовлении жидкокристаллических дисплеев, органических светодиодов и дисплеев, солнечных элементов и тонко-пленочных транзисторов. В работе приведены также оригинальные данные по получению и электрическим свойствам наноразмерных пленок оксида цинка.**

**In this review we cover the main tendencies in the development of the transparent electronics. The special attention is devoted to the transparent conductive oxide materials that are used for liquid crystal displays, organic light emitted diodes and displays, solar cells and thin-films transistors. We also present our original results for zinc oxide thin films electrical characteristics.**

### Введение

Рассматривая тенденции развития электроники, чаще всего говорят о развитии кремниевой наноэлектроники в связи с достижением 45 нанометровой производственной технологии и, соответственно, о нанотехнологиях. В данной работе дается краткая характеристика новому направлению развития электроники не на основе кремния, а именно прозрачной электронике.

Датой рождения термина прозрачная электроника считается 1997 год, когда в журнале *Nature* вышла статья японского исследователя Кавазоэ (Kawazoe) с соавторами, в которой говорилось о получении прозрачной, высоко проводящей оксидной пленки  $\text{CuAlO}_2$  с проводимостью  $p$  – типа. В том же номере *Nature* была напечатана работа Сомаса (Thomas), в которой на основе результатов работ Кавазоэ обсуждалась перспектива создания так называемых невидимых электронных цепей, дающих новое применение проводящим оксидным материалам, которые до этого использовались только в качестве пассивных элементов электронных схем [1, 2].

Понятие прозрачная электроника, в первую очередь, базируется на использовании прозрачных в видимом диапазоне излучения под-

ложек: стекла, кварца, полимеров. Поэтому составной частью прозрачной электроники является полимерная электроника. В полимерной электронике используют нелегированные или слаболегированные полупроводниковые полимеры. На данный момент считается, что преимуществом полимерных материалов, по сравнению с неорганическими полупроводниками, является дешевизна получения полимерных пленок, их гибкость в сочетании, например, с высокой фоточувствительностью, характерной для поливинилкарбозола, полистерена, поликарбоната и их производных.

Основными областями применения прозрачной электроники являются сенсорные дисплеи, гибкие дисплеи, органические светодиоды (OLED), электролюминисцентные излучатели, тонкопленочная фотовольтаика, различные электронные и оптические покрытия [3].

В настоящее время на основе полимерных устройств уже разработаны светящиеся дорожные знаки, плоские дисплеи в различных приборах. В ближайшее время, по-видимому, станут реальностью плоские телевизионные экраны на основе полимерных светодиодов, внутренние стены помещений, светящиеся белым светом, и многое другое.

Причины большого коммерческого потенциала органических светодиодов (как молекулярных, так и полимерных) следующие: они могут быть произведены быстро, дешево и в больших количествах; с помощью добавления красителей могут работать во всех областях спектра; имеют низкие рабочие напряжения – до 10 В; широкий угол обзора (по сравнению с ЖК мониторами); обладают быстрым фотоотчетом; легкостью конструкции; высокой эффективностью излучения [4]. Получены полимерные светодиоды с эффективностью преобразования от 4 до 20% (что сравнимо с соответствующими параметрами кристаллических светодиодов), которые излучают во всем видимом диапазоне. Смеси полимеров могут излучать белый свет.

Успехи в области полимерной электроники ведут к созданию молекулярной электроники. В отличие от классической твердотельной электроники, где рассматриваются свойства кристаллического тела и активные структуры фор-

мируются на основе тонких и/или толстых кристаллических либо аморфных пленок неорганических материалов, а также формирование структур происходит в результате процессов диффузии и/или имплантации в объеме кристаллической подложки, в случае применения полимеров необходимо уже учитывать свойства молекул. Один из вариантов перехода к молекулярной электронике – "гибридная" технология, когда используются "молекулярные элементы" с применением методов классической электроники. Пример такой комбинированной технологии – предложенное фирмой IBM конструктивное применение углеродных нанотрубок для создания транзисторов, размеры которых в 500 раз меньше, чем у современных кремниевых приборов. К тому же в отсутствие кислорода они способны выдерживать нагрев до 1000°C [5]. Углеродные нанотрубки как нельзя лучше подходят для изготовления гибких электронных устройств. Они обладают необходимыми механическими свойствами, характеризуются большой подвижностью носителей и в тонком слое совершенно прозрачны [6].

Таким образом, понятие прозрачная электроника включает в себя как развитие полимерной технологии, позволяющей создавать электронные устройства на одних полимерах, так и развитие гибридных технологий с использованием проводящих прозрачных материалов на основе углеродных нанотрубок, либо прозрачных проводящих оксидных материалов, являющихся неорганическими полупроводниками. В данной работе мы концентрируем внимание именно на прозрачных проводящих оксидных материалах. Будет сделан краткий обзор основных свойств, технологий получения и областей применения прозрачных проводящих оксидных материалов. Кроме того, мы приведем некоторые собственные оригинальные данные для ZnO, полученного методом атомного послойного осаждения.

### 1. Анализ рынка изделий прозрачной электроники

Рынок прозрачных проводящих оксидов, используемых в дисплеях, фотовольтаике и осветительных устройствах, достигнет примерно \$9.4 биллиона долларов к 2015 году по оценке компании NanoMarkets, занимающейся аналитическим изучением мирового рынка в области энергетики, материаловедения и устройств [7].

Оксид индия легированный оловом (ITO) является наиболее широко используемым оксидным материалом. Несмотря на высокую цену (около 10000 долларов за 1кг) он будет со-

хранять свои лидирующие позиции даже в случае увеличения цены [3].

По оценке компании NanoMarket к 2015 году рынок подложек с ITO покрытием достигнет \$8.0 биллионов долларов, а продажа чернил и пасты с ITO достигнет \$600 миллионов долларов [7]. В связи с этим актуальной является задача получения материала, который по проводимости и прозрачности приближался бы к ITO, но был существенно ниже в цене. Особенно критичной ситуация является для производителей чувствительных дисплеев. Рынок чувствительных дисплеев уже является большим и оценивается в \$400 миллионов долларов к 2015 году. Существенно то, что требования к оксидным покрытиям для этих дисплеев несколько другие. Они не столь высоки относительно таких характеристик как проводимость и прозрачность, но очень важной становится устойчивость и упругость материала. Относительно органических светодиодов и гибких дисплеев, при производстве которых сейчас используется ITO, нужно отметить, что необходимость замены ITO на другой материал вызвана также и особенностями технологического процесса. Осаждение ITO проходит при высоких температурах, которые повреждают гибкие подложки дисплеев. Поэтому в данной статье дается характеристика оксида цинка, как одного из возможных кандидатов по замене ITO.

### 2. Основные физические и электрические свойства прозрачных проводящих оксидных материалов

Наиболее широко изучаемыми и используемыми в электронике прозрачными проводящими оксидными материалами (ППО) являются оксид индия, оксид индия легированный оловом (ITO), оксид цинка и оксид олова. Электрические свойства этих материалов приведены в табл.1. Стоит отметить, что все три материала, включенных в таблицу, имеют *n*-тип проводимости и являются сильно вырожденными полупроводниками, т.е. концентрация электронов в них существенно превышает эффективную плотность состояний в зоне проводимости [1]. Кроме того, все хорошо известные и коммерчески используемые ППО также имеют *n*-тип проводимости. Поэтому, с точки зрения создания работающих структур (диодов, транзисторов), необходимо научиться выращивать пленки с дырочным типом проводимости. ППО *p*-типа являются относительно новым феноменом и их проводимость значительно хуже по сравнению с ППО *n*-типа проводимости. В дополнение к низкой проводимости ППО *p*-типа характеризуются также очень

низкой подвижностью носителей заряда, обычно ниже чем  $\sim 1 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , в то время как подвижность носителей для ППО *n*-типа находится в диапазоне  $\sim 10 - 40 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ .

ZnO является одним из наиболее популярных материалов в последнее десятилетие. Это прямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 3,37 эВ при комнатной температуре. Энергия связи экситона составляет 60 мэВ, биекситона 15 эВ. Это делает ZnO интересным с точки зрения создания лазерной структуры, работающей на экситонной рекомбинации при комнатной температуре и выше. Кроме того, ZnO обладает ферромагнетизмом при комнатной температуре и стабильностью физических свойств при высоких температурах. Оксид цинка является также химически стабильным и нетоксичным материалом. Говоря о применении в электронике, мы будем делать акценты на проводимости материала, концентрации носителей и их подвижности. Оксид цинка имеет *n*-тип проводимости. Существует значительное количество публикаций о получении ZnO *p*-типа проводимости путем легирования азотом, литием, железом и другими материалами [1-2, 8]. Однако до сих пор нет сообщения о создании стабильно работающей структуры на основе пленок ZnO *n*- и *p*-типа проводимости. Это говорит о том, что не удастся достигнуть воспроизводимости свойств получаемых пленок, либо материал быстро деградирует. Поэтому задача получения пленок *p*-типа проводимости для ZnO остается актуальной. Проводимость и прозрачность ZnO можно менять путем легирования. Для увеличения проводимости обычно ис-

пользуются материалы группы III (B, Al, Ga, In) или группы IV (Pb, Sn) элементов периодической таблицы. В табл. 2 приведены данные по пропусканию и сопротивлению для легированных пленок ZnO, полученных разными технологическими методами [8]. Из нее видно, как путем легирования удастся изменить проводимость пленок.

Легирование различными химическими элементами (алюминием, галлием, фтором и т.д.), ведущее к улучшению электрофизических свойств напыляемых пленок, используется и для других оксидов металлов. Наибольшее распространение получило легирование оксида цинка алюминием либо галлием, а оксида олова – фтором. Результаты экспериментальных работ, представленных в работе [9], показали, что оксид цинка, легированный алюминием (ZnO:Al) или галлием (ZnO:Ga), обладает меньшим удельным сопротивлением и лучшими оптическими свойствами, по сравнению с оксидом олова, легированным фтором (SnO:F) и является одним из самых перспективных тонкопленочных покрытий.

Однако, разработанные к настоящему времени способы магнетронного распыления обеспечивают получение ППО на основе ZnO с низким удельным сопротивлением только при температуре выше 200 °С, что ограничивает область их возможного применения. Например, напыление проводящих покрытий на полимерные подложки возможно при температурах, не превышающих температуру размягчения материала, которая для лавсана составляет 110 °С.

**Таблица 1. Электрические характеристики прозрачных проводящих оксидов. Значения проводимости взяты для случая поликристаллических пленок**

Материал	Ширина запрещенной зоны (эВ)	Проводимость (См см <sup>-1</sup> )	Концентрация электронов (см <sup>-3</sup> )	Подвижность (см <sup>2</sup> В <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup> )
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.75	10000	$> 10^{21}$	35
ZnO	3.35	8000	$> 10^{21}$	20
SnO <sub>2</sub>	3.6	5000	$> 10^{20}$	15

**Таблица 2. Технологические методы получения и свойства легированных пленок ZnO**

Примесь	Прозрачность в видимой области	Минимальное удельное сопротивление	Методы получения
Al	~ 90%	~ 10-4 Ом·см	- Импульсное лазерное осаждение; - В.ч. магнетронное распыление; - мокрая химия
Ga	~ 85%	~ 10-3 Ом·см	- импульсное лазерное осаждение; - мокрая химия
In	~ 80%	~ 20 Ом·см	Мокрая химия
N	~ 80%	~ 10-2 Ом·см	- активированная плазмой молекулярно-лучевая эпитаксия; - в.ч. магнетронное распыление; - мокрая химия

Задача получения покрытий с высокой проводимостью при низких температурах подложки (до 100 – 110 °С) и без последующей операции отжига является актуальной, например, при изготовлении многослойных покрытий солнечных батарей (так как при низкой температуре замедляются процессы взаимной диффузии слоев. Известно, что нежелательная диффузия снижает эффективность работы батарей), или при напылении проводящих покрытий на полимерные подложки при температурах, не превышающих температуру размягчения материала. На данный момент одной из наиболее перспективных технологий, обеспечивающих получение ZnO как чистого, так и легированного при низких температурах, является метод атомного послойного осаждения [10].

### 3. Применение в электронике

Безусловно, наиболее важным вопросом на текущий момент является получение ZnO *p*-типа проводимости. Без этого невозможно говорить о расширении перечня электронных прозрачных устройств, обеспечивающих развитие прозрачной электроники в направлениях, параллельных кремниевой электронике. Но даже, если материал *p*-типа с характеристиками, необходимыми для применения в электронных устройствах, не будет получен, ZnO остается материалом для электроники со значительным перечнем применений [11].

На основе оксида цинка делают лазерные диоды и светоизлучающие диоды (голубые/ультрафиолетовые), детекторы. Он используется в тонкопленочных солнечных элементах; жидкокристаллических дисплеях и плоскпанельных дисплеях; в качестве прозрачных электродов; в спинтронике; как активный слой при изготовлении полевых транзисторов; в сенсорике.

#### 3.1. Применение оксидов металлов в конструкции жидкокристаллических дисплеев (LCD)

С точки зрения научных направлений, успешно развиваемых на Украине, мы начнем рассмотрение применения ППО в жидкокристаллических (ЖК) дисплеях. В институте физики Национальной академии наук Украины (Киев) успешно проводятся исследования, связанные с изучением и разработками ячеек для ЖК дисплеев. В связи с этим является целесообразным развитие направления, основанного на использовании оксида цинка вместо ITO. На рис.1. приведена послойная конструкция ЖК дисплея [12].

Так слой 1 – это вертикальный поляризатор, слой 2 – стеклянная подложка с ITO электродами, слой 3 – закрученный нематический жидкий кристалл, слой 4 – стеклянная подложка с ITO электродами, 5 – горизонтальная фильтрующая пленка для блокировки/пропускания света, 6 – отражающая поверхность.

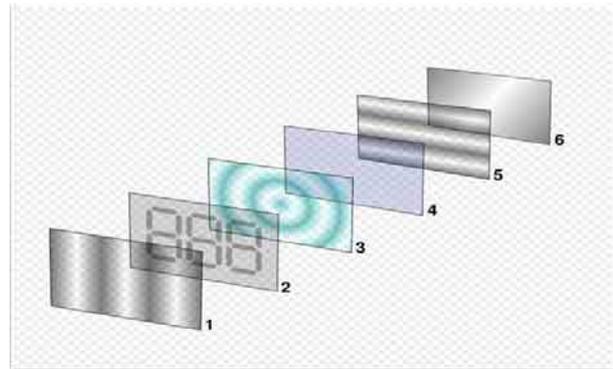


Рис.1. Конструкция жидкокристаллического дисплея с использованием скрученного нематика

На данный момент имеется лишь несколько публикаций, где авторы приводят результаты исследований характеристик ЖК ячеек при замене ITO пленки на ZnO. Так, в работе [13] говорится даже об улучшении электрооптических характеристик ЖК дисплея на основе закрученного нематика при замене ITO электродов на ZnO, легированный алюминием. Полученный результат объясняется уменьшением ловушечных центров на границе раздела полиимид/электрод.

Безусловно, для адекватной замены ITO электродов необходимо найти технологию и режимы, обеспечивающие получение материала с высокой прозрачностью и проводимостью. Большой экспериментальный опыт получения прозрачных проводящих пленок Al:ZnO методом атомного послойного осаждения (АПО) накоплен финской компанией Veeco Oy, предоставившей нам свои пленки для проведения исследований, а также исследовательской группой Марека Годлевского (институт физики польской академии наук, Варшава), где мы проводили осаждение пленок ZnO методом АПО на стеклянные и полимерные подложки, используя технологические режимы, предварительно показавшие получение пленок с высокой проводимостью. Технологические режимы отличались температурой нанесения, временем последовательного напуска химических реагентов и временем откачки/очистки камеры. Измерения подвижности носителей заряда, их концентрации, величины и типа проводимости были проведены методом Холла для пленок Al:ZnO компании Veeco Oy, пленок ZnO, наносимых нами при разных технологических режимах на под-

ложки из стекла и полимера, а также пленок ИТО, используемых при производстве ЖК дисплеев. Из результатов, приведенных в табл.3., видно, что концентрацию электронов на уровне  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  удается достигнуть даже для нелегированных пленок ZnO. Подвижность носителей заряда сопоставима для пленок на основе ZnO и ИТО. Однако проводимость пленок ZnO на порядок ниже по сравнению с ИТО. Можно предположить, что с точки зрения применения исследуемых пленок в качестве электродов для ЖК-дисплеев, уменьшение проводимости не будет существенно ухудшать рабочие характеристики ячейки.

### 3.2. Применение в фотовольтаике

Развитие нетрадиционных источников энергии является актуальной задачей и входит в национальные программы практически всех стран мира. Объем производства солнечных элементов (СЭ) на основе кристаллического и поликристаллического кремния составляет 83 %. Во всех конструкциях остальных типов солнечных элементов, имеющих соответственно 17 % промышленного производства, присутствуют пленки проводящих оксидов металлов (рис.2). В эту

группу входят солнечные элементы на основе пленок аморфного кремния (a-Si:H), теллурида кадмия, на основе соединений  $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2(\text{S})$ , красителей и органики. Слои прозрачных проводящих оксидов (ZnO,  $\text{SnO}_2$ , ИТО,  $\text{TiO}_2$ ) наносятся как для улучшения токосяема, так и для изменения оптических свойств (например, для согласования коэффициентов преломления), а также в качестве диффузионного барьера [14]. Следует добавить, что на сегодняшний момент разработка прозрачных проводящих оксидов с определенными электрическими и оптическими свойствами наряду с оптимизацией текстуры поверхности являются наиболее важными вопросами также в области тонкопленочных кремниевых солнечных элементов [14].

Оксидные материалы используются и в конструкциях солнечных элементов на основе моно- и поликристаллического кремния. В табл.4 приведены требования, которым должны удовлетворять прозрачные проводящие оксиды, используемые в качестве тыльных и лицевых контактов, а также отражающих слоев в случае поликристаллической Si подложки конфигурации *p-i-n* и *n-i-p*-типа [14].

Таблица 3. Электрические характеристики пленок ZnO, полученных при разных технологических режимах методом атомного послойного осаждения

Материал	Толщина, нм	Температура роста, °C	Подвижность, $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	Концентрация, $\text{см}^{-3}$	Проводимость, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$
ZnO/стекло(S270a)	270	240	28.2	$6.01 \times 10^{19}$	$3.69 \times 10^3$
ZnO/стекло(S270b)	270	240	21.1	$2.79 \times 10^{19}$	$1.06 \times 10^2$
ZnO/стекло(S312-2)	220	200	23.3	$7.35 \times 10^{19}$	$3.65 \times 10^2$
ZnO/стекло(24.04.09)	716.4	200	25.7	$4.33 \times 10^{19}$	$5.6 \times 10^3$
ZnO/стекло(S312-1)	220	200	24	$1.5 \times 10^{20}$	$1.73 \times 10^3$
ZnO на полимер	89.7	100	52.3	$8.2 \times 10^{14}$	$1.45 \times 10^{-3}$
ZnO:Al (Veneg)	100	100	46.6	$3.28 \times 10^{19}$	$4.08 \times 10^2$
ИТО (Корея)	100		32.8	$2.19 \times 10^{20}$	$8.68 \times 10^4$

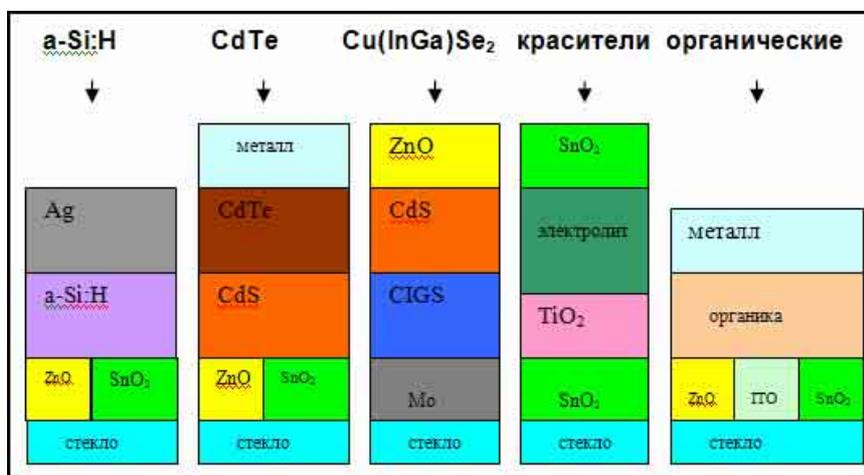


Рис. 2. Схематические конструкции солнечных элементов с прозрачными оксидными материалами

**Таблица 4. Требования к проводящим прозрачным оксидам, используемым в солнечных элементах**

Конфигурация СЭ	Лицевой ППО	Тыльный ППО
<i>p-i-n</i> типа	- низкое удельное поверхностное сопротивление (< 10 Ом/□); - высокое оптическое пропускание в диапазоне 350-1100 нм; - большая поверхностная шероховатость (5-200 нм).	- низкое удельное поверхностное сопротивление, если отражатель непроводящий; - удельное поверхностное сопротивление без ограничений, если отражатель проводящий; - высокое оптическое пропускание (> 80 %) в диапазоне 650-1100 нм для однопереходного СЭ, в диапазоне 650-1100 нм для tandemного микроморфного СЭ.
<i>n-i-p</i> типа	- низкое удельное поверхностное сопротивление (< 10 Ом/□); - высокое оптическое пропускание (> 80%) в диапазоне 350-1100 нм; - поверхностная шероховатость: не имеет ограничений (шероховатость частично задается поликристаллическим слоем Si.	- низкое удельное поверхностное сопротивление (< 10 Ом/□), если отражатель непроводящий; - удельное поверхностное сопротивление без ограничений, если отражатель проводящий; - высокое оптическое пропускание (> 80 %) в диапазоне 650-1100 нм для однопереходного СЭ, в диапазоне 650-1100 нм для tandemного микроморфного СЭ; - поверхностная шероховатость неограничена: она задается текстурой тыльного отражателя или подложки.

**Таблица 5. Сравнение характеристик материалов ZnO и GaN, и излучателей на их основе**

Характеристики	GaN	ZnO
Ширина запрещенной зоны, эВ	3.43	3.37
Энергия связи экситона, мэВ	26	60
Постоянная решетки: - <i>a</i> -ось (Å) - <i>c</i> -ось (Å)	3.19 5.19	3.25 5.20
Рассогласование с постоянной решетки подложки	большое	нет
Проводимость подложки	нет	существует
Электроды	С одной стороны	С двух сторон
Коэффициент отражения	2.5	2.2
Конструкция	Мостового типа	Проволочное крепление

В дополнение к требованиям высокой прозрачности и низкому удельному поверхностному сопротивлению, ППО должны быть широкозонными полупроводниками как для электродов, так и окон СЭ.

### 3.3. Применение в ультрафиолетовых светодиодах и лазерных диодах

Ультрафиолетовые лазерные диоды используются для оптической записи высокой плотности на DVD дисках. Эти лазеры имеют длительный срок службы (около нескольких десятков лет), обеспечивают излучение высокой яркости. В медицине ультрафиолетовые (УФ) источники света используются для выявления раковых клеток за счет разделения клеток по цвету, а также для стерилизации. В экологии операции по очистке воды, автомобильных вы-

хлопов также проводят с использованием источников УФ, которые стимулируют быструю диссоциацию загрязняющих материалов [15].

В настоящее время наиболее популярными материалами, используемыми при изготовлении УФ излучателей, являются нитрид галлия (GaN) и карбид кремния (SiC) [11]. Однако большое внимание уделяется ZnO как потенциальной альтернативе для GaN. Хотя излучатели на основе GaN имеют высокую яркость и другие значительные преимущества по сравнению с известными источниками света, развитие рынка этих источников света приостановлено из-за их высокой авансовой стоимости (доллар/люмен). Поэтому на разработку излучателей на основе ZnO сейчас выделяются значительные средства. Так в работе [15] представлены результаты разработки и получения светодиода на основе MgZnO и ZnO слоев *p*- и *n*-типа проводимости,

полученных методом газозольных реакций с использованием металлоорганики (MOCVD). В табл. 5 приведены характеристики светодиода на основе GaN и разработанного на основе ZnO.

Стоит отметить, что характеристики обоих светодиодов близки. Основная проблема создания излучателей на основе ZnO связана в первую очередь со сложностью получения *p*-слоя.

### 3.4. Органические светодиоды (OLED)

Органические светодиоды – ОСД (organic light emitted diode, OLED) появились относительно недавно, но уже достигли эффективности преобразования, сравнимой с лучшими неорганическими светодиодами (СД) [16]. К недостаткам неорганических СД относятся цвет их излучения и цена. Для освещения нужен белый свет, а смесь голубых и оранжевых СД не дает чисто белого света. Сейчас цена каждого люмена освещения для красных СД – 0.06\$ и 0.2\$ – для белых СД. Отметим, что цена освещения флуоресцентными лампами составляет 0.01\$ за люмен. Преимуществом ОСД является их способность излучать белый свет (подбирается соответствующая смесь молекул, излучающих в разных областях спектра), а также низкая цена и возможность получать большие поверхности, покрытые ОСД (светящиеся панели и стены). Кроме того, развитие ОСД связано с их возможным применением в плоских цветных дисплеях. В частности, фирмой Кодак сообщается о разработке дисплеев с активной матрицей, состоящей из тонкопленочных транзисторов (поли-Si) и ОСД. Эти дисплеи оказываются тоньше и экономичнее, чем жидкокристаллические. ОСД используются наиболее интенсивно компаниями Motorola и Samsung при производстве цветных мобильных телефонов, а также компанией Sony Ericsson (модель телефона Z610i). Возможные варианты использования тонких и гибких устройств на основе органических светоизлучающих диодов (OLED) следующие:

- Эмиссионные плоские дисплеи следующего поколения.
- Прозрачные окна. В течение дня это обычное окно, но ночью оно превращается в высокоэффективный источник освещения.
- Одежда, которая меняет цвет по желанию владельца.
- Одежда, позволяющая показывать обновляемые текстовые сообщения. Она может быть полезна для полицейских или скорой помощи.
- Упаковка продуктов, которая сможет показывать предупреждения о вреде для здоровья, рецепты или просто светиться.

- Солнечные батареи в дополнение к аккумуляторам мобильных телефонов.
- Лёгкие солнечные батареи, которые можно сворачивать для хранения. Они могут пригодиться людям, нуждающимся в электроэнергии в удалённых местах, - исследователям.

В октябре 2007 г. компания Sony продемонстрировала телевизор с использованием ОСД, фотография которого представлена на рис.3.



**Рис.3. Телевизор с использованием органических светодиодов компании Sony**

Задача сегодняшнего дня сводится к созданию приборов с высокой яркостью свечения [5]. Многочисленные исследования в этой области различными путями привели к оптимальному конструктивно-технологическому варианту светодиода, конструкция которого представлена на рис. 5 [4]. Принцип работы его предельно прост и заключается в генерации излучения молекулами полимера под действием электрического поля в результате рекомбинации носителей в электролюминесцентном слое. Конструктивно СД должен быть выполнен так, чтобы прозрачный электрод, слой переноса дырок, электролюминесцентный слой и волновод были максимально прозрачны, а слой переноса электронов и отрицательный электрод обеспечивали максимальное интерференционное и зеркальное отражение излучения. Следует отметить, что в конструкции ОСД присутствуют пленки прозрачных проводящих оксидов.

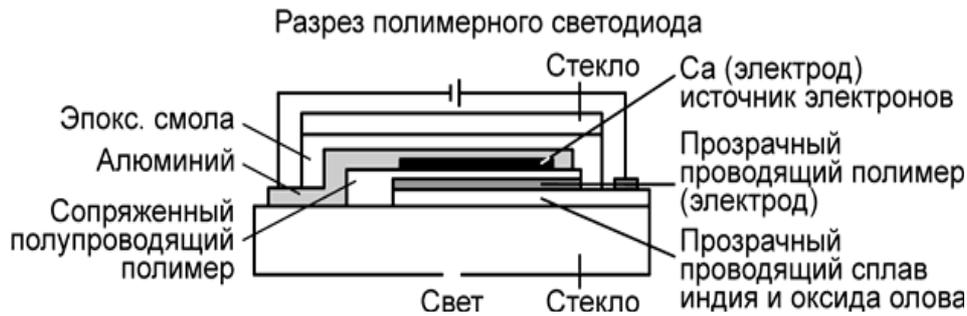


Рис. 4. Поперечное сечение полимерного светодиода

### 3.5. Органические тонкопленочные транзисторы

При изготовлении дисплеев совместное формирование тонкопленочных транзисторов (ТПТ) по традиционной технологии и органических СД затруднено из-за высокотемпературных процессов, вызывающих деградацию свойств органических материалов. Необходимо найти материалы и технологии, обеспечивающие изготовление ТПТ на органических материалах при меньших температурах и при этом использовать вместо дорогих стеклянных дешевые пластиковые подложки, что позволит значительно снизить стоимость всего изделия. Развитие технологии органических ТПТ открывает широкие возможности для создания сверхлегких и сверхплоских дисплеев, обладающих высокими гибкостью и прочностью. Решение технологических вопросов получения ТПТ на основе органических материалов позволит изготавливать все элементы дисплеев по сходным технологическим процессам, что снизит издержки производства и уменьшит разнородность используемого оборудования. По своим характеристикам современные органические ТПТ не уступают стандартным на пленках аморфного кремния [4]. Прозрачные транзисторы объединены с активной матрицей органических светоизлучающих диодов (active-matrix organic light-emitting diodes – AMOLED), которые хорошо зарекомендовали себя в качестве прозрачных пикселей. Роль транзистора в прозрачном гибком дисплее заключается в управлении отдельным пикселем. Затвор, исток и сток выполнены из прозрачных проводящих оксидов. В работе [5] сообщается о создании опытного образца ТПТ на пентацене с длиной и шириной затвора 5 и 500 мкм, соответственно, и толщиной подзатворного диэлектрика 140 нм. ТПТ имел пороговое напряжение 10 В. Для снижения тока утечки между отдельными ТПТ используется специфическая топология  $Co\beta no$ , в которой электрод истока формирует вокруг активной области ТПТ замкнутое кольцо, в центре которого располагается электрод стока. При такой конструкции за-

твор управляет всем током, текущим от стока к истоку, что обеспечивает высокое отношение токов во включенном и выключенном состоянии, а также малые токи утечки (ток в выключенном состоянии близок к уровню шумов).

Простой низкотемпературный метод (например, метод атомного послойного осаждения) изготовления новых транзисторов позволит интегрировать их на пластмассовые устройства любых размеров, что является важным для коммерциализации этой технологии. Дальнейшие исследования учёные планируют посвятить созданию аналоговых и цифровых схем, основанных на новых транзисторах.

### Выводы

Таким образом, показано, что электроника развивается не только по пути развития кремниевой технологии, но и по таким новым направлениям как прозрачная электроника и оксидная электроника. Разработка прозрачных проводящих оксидных материалов является одним из наиболее популярных направлений в последние годы. Продолжает оставаться актуальной задача получения материала  $p$ -типа проводимости.

Новые изделия электроники на базе полимерных материалов в сочетании с неорганическими материалами, которые появятся в ближайшем десятилетии, революционным образом изменят условия эксплуатации электронного оборудования, расширят возможности информационных технологий, создадут предпосылки перехода на новые принципы организации, обучения, быта и развлечений. Задача украинской науки - "не прозевать" этот рывок и достойным образом включиться в развитие прозрачной электроники.

### Благодарность

Автор Семикина Т.В. благодарит Кассу Миановского и польский нефтяной концерн «Орлен» за финансирование стажировки в институте фи-

зики (Варшава, Польша), а также профессора М. Годлевского за предоставленную возможность работать на установках атомного послойного осаждения в институте физики Польской Академии Наук (Варшава).

### Литература

1. *Jogh F. Wagner*, Douglas A. Keszler, Rick E. Presley "Transparent electronics" / Springer Science+Business Media, LLC. -2008, - 217 p.
2. Satischara B. Ogale "Thin films and heterostructures for oxide electronics" / Springer Science+Business Media, Inc. – 2005, - 416 p.
3. *Режим* доступа: [www.nanomarkets.net/resources/ITO\\_2009Ch1.pdf](http://www.nanomarkets.net/resources/ITO_2009Ch1.pdf). заголовок з екрану.
4. *Режим* доступа: <http://edu.ioffe.ru/edu/agrinskaaya/Chapter05.pdf>.- заголовок з екрану.
5. *Режим* доступа: <http://www.electronics.ru/371.html>. - заголовок з екрану.
6. *Режим* доступа: [http://www.nanometer.ru/2008/12/24/gibkaa\\_elektronika\\_55077.html/](http://www.nanometer.ru/2008/12/24/gibkaa_elektronika_55077.html/) - заголовок з екрану.
7. *Режим* доступа: <http://www.energyvortex.com/pages/headlinedetails.cfm?id=3434>. – заголовок з екрану.
8. Lukasz Shmidt-Mende and Judith L. MacManus –Driscoll ZnO – nanostructures, defects, and devices // *Journal MaterialsToday*, - 2007, - v.10, -N5, - P. 40-48.
9. *Режим* доступа: <http://www.hcei.tsc.ru/images/dissertations/Rabotkin.pdf>. - заголовок з екрану.
10. *Семикина Т.В.*, Комащенко В.Н., Шмырева Л.Н. Нанотехнологии: основы метода атомного послойного осаждения, оборудование, применение в электронике // *Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии»*, - 2009. - том 1, - С.60-67.
11. *Режим* доступа: <http://www.nanotopblog.com/index.cfm/2009/2/5/Why-Zinc-Oxide-ZnO-Electronics-May-be-Commercialized-Quickly> NanoMarkets TOP Blog. - заголовок з екрану.
12. *Режим* доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid\\_crystal](http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal). - заголовок з екрану.
13. *Byeong-Yun Oh*, Min-Chang Jeong, Tae-Hyoung Moon, Woong Lee, Jae-Min Myoung, Jeoung-Yeon Hwang and Dae-Shik Seo, Transparent conductive Al-doped ZnO films liquid crystal displays // *Journal of Applied Physics*, 2006, -N. 99, - P.124505-1 – 124505-4.
14. *Thin film solar cells: fabrication, characterization, and application* // edited by Jef Poortmans and Vladimir Archipov, - John Wiley and Sons Inc., - 2007, - 504 p.
15. *Wide band gap semiconductors: Fundamental properties and modern photonics and electronic devices* // Kyoshi Takahashi, Akihito Yoshikava, and Adarsh Sandhu (Eds), -Springer, - 2007, - 480 p.
16. *Режим* доступа: [http://www.nanometer.ru/2007/07/30/flexible\\_display\\_3875.html](http://www.nanometer.ru/2007/07/30/flexible_display_3875.html). - заголовок з екрану.