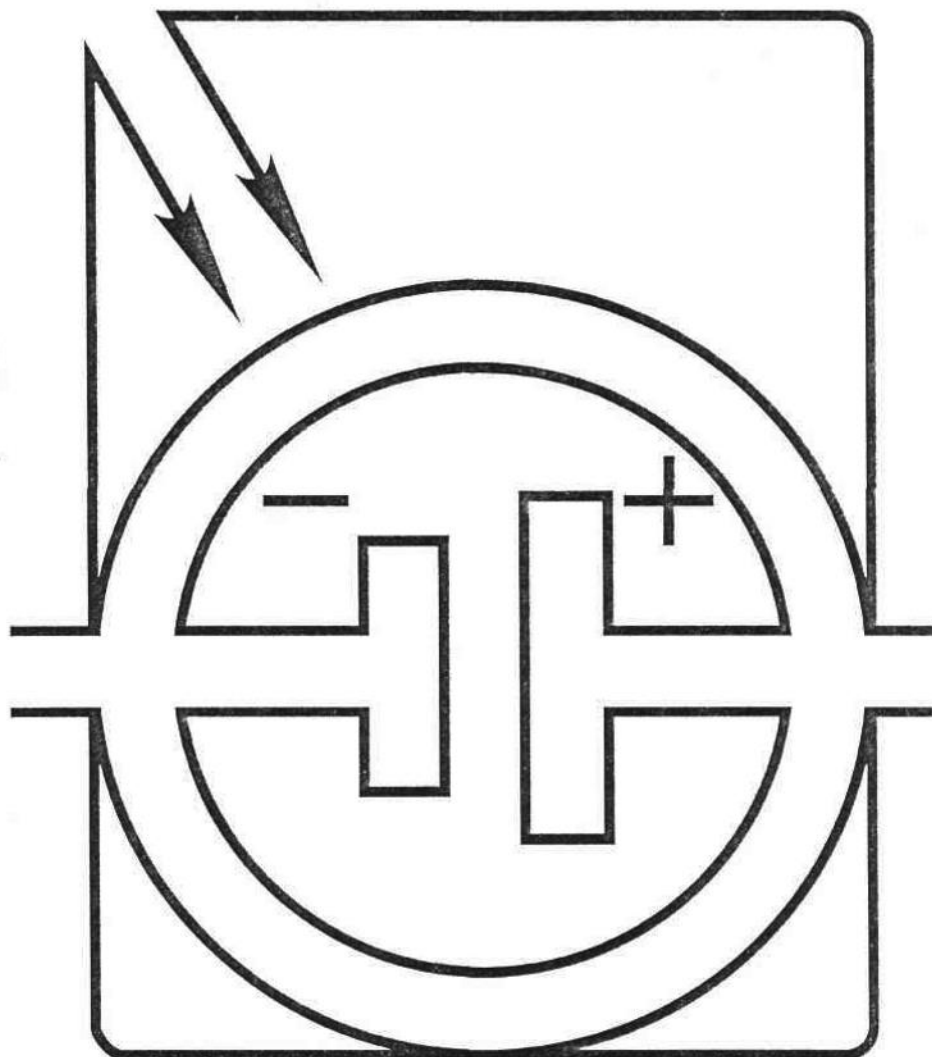


**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ЯВЛЕНИЯ  
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ  
И ДИЭЛЕКТРИКАХ  
ИССЛЕДУЮТСЯ  
В ЛАБОРАТОРИЯХ  
МНОГИХ СТРАН.  
В РЕЗУЛЬТАТЕ  
ЭТИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
СТАЛ ПОНЯТЕН МЕХАНИЗМ  
ПРОЦЕССОВ  
ВОЗБУЖДЕНИЯ  
НЕРАВНОВЕСНЫХ  
НОСИТЕЛЕЙ ТОКА,  
ИХ МИГРАЦИИ  
И РЕКОМБИНАЦИИ  
В КРИСТАЛЛЕ.  
ЗНАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
И ПАРАМЕТРОВ  
ЭТИХ ПРОЦЕССОВ  
ПОЗВОЛЯЕТ СДЕЛАТЬ  
ВЫВОД О ХИМИЧЕСКОЙ  
ПРИРОДЕ  
И ЗАРЯДОВОМ  
СОСТОЯНИИ ДЕФЕКТОВ,  
ОТВЕТСТВЕННЫХ  
ЗА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ЯВЛЕНИЯ  
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ.**



# ФОТО ЭЛЕКТРОНИКА

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
Одесский государственный университет им. И. И. Мечникова

# ФОТО ЭЛЕКТРОНИКА

МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ СБОРНИК

*Основан в 1986 г.*

*ВЫПУСК 9*

Одесса  
"АстроПринт"  
2000

В сборнике приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по вопросам оптоэлектроники, солнечной энергетики и полупроводникового материаловедения фотопроводящих материалов. Рассмотрены перспективные направления развития фотозлектроники.

Для преподавателей, научных работников, аспирантов, студентов.

У збірнику наведені результати теоретичних і експериментальних досліджень з питань оптоелектроніки, сонячної енергетики і напівпровідникового матеріалознавства фотопровідних матеріалів. Розглянуто перспективні напрямки розвитку фотозелектроніки.

Для викладачів, наукових працівників, аспірантів, студентів.

Редакционная коллегия:

**В. А. СМЫНТЫНА** (отв. редактор) — академик ВШ Украины; **М. И. КУТАЛОВА** (отв. секр.); **В. Т. МАК** — д-р физ.-мат. наук; **И. М. ВЙКУЛИН** — д-р физ.-мат. наук, проф.; **А. Е. КИВ** — д-р физ.-мат. наук, проф.; **Г. Г. ЧЕМЕРЕСЮК** — проф.; **М. К. ШЕЙНКМАН** — член-корреспондент АН Украины.

Адрес редакционной коллегии:

65100, Одесса, ул. Пастера, 42,  
Одесский государственный университет, тел. 23-34-61.

---

Здано до набору 29.03.2000. Підп. до друку 30.06.2000. Формат 60×84/8.  
Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 16,74.  
Тираж 100 прим. Зам. № 286.

Видавництво і друкарня "Астропринт"  
65026, м. Одеса, вул. Преображенська, 24.  
Тел.: (0482) 26-98-82, 26-96-82, 68-77-33.  
[www.astroprint.odessa.ua](http://www.astroprint.odessa.ua)

## ПОЛИХРОМНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ИНДИКАТОРЫ

Целью настоящей работы является поиск и изучение новых материалов для создания многоцветных индикаторов. Образцы на основе  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2\text{:Nd}_2\text{O}_3\text{-ZnS:HoF}_3\text{-HfO}_2\text{:Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}$  получены электронно-лучевым испарением. Исследованы температурные и частотные зависимости спектра, яркости и эффективности тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов ТПЭЛИ. Показано, что увеличение концентрации активатора от 1 до 15 мас. % изменяет цвет свечения ТПЭЛС от зеленого до красного. Вольт-яркостная и вольт-зарядовая характеристики тонкопленочной структуры имеют пороговый характер. Использование в качестве диэлектрика пленок твердого раствора  $\text{HfO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$  позволяет получить пороговое напряжение не более 115 В. Частотная зависимость яркости излучения описывается степенной функцией с показателем степени  $\alpha = 1,18$ . Показано, что яркостью излучения можно управлять, изменяя как величину напряжения, так и частоту. Установлено, что оптимальная концентрация, обеспечивающая лучшие параметры излучения ТПЭЛИ, лежит в интервале значений 5—10 мас. %. Анализируются возможные причины роста яркости ТПЭЛИ при высоких температурах.

В течение последнего десятилетия рядом исследовательских групп разрабатывались тонкопленочные электролюминесцентные индикаторы (ТПЭЛИ) переменного тока желто-оранжевого цвета свечения на основе  $\text{ZnS:Mn}$  с двумя изолирующими слоями. Интерес к таким структурам обусловлен высокой яркостью излучения электролюминофора, хорошей изученностью его кинетических характеристик. Однако сегодня возрастает потребность в ярких ТПЭЛИ разного цвета свечения, обеспечивающих возможность создания многоцветной панели. На сегодняшний день уже известен ряд люминофоров, дающих излучение в разных областях спектра. Однако слабо изучены их светотехнические характеристики и происходящие в них физические процессы.

В связи с этим целью настоящей работы является поиск и изучение новых материалов для создания разно- и полноцветных индикаторов. В качестве основного объекта для исследований выбраны экспериментальные образцы на основе  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2\text{:Nd}_2\text{O}_3\text{-ZnS:HoF}_3\text{-HfO}_2\text{:Nd}_2\text{O}_3\text{-Al}$ , полученные электронно-лучевым напылением пленок люминофора и диэлектрика на стеклянные подложки. Толщина слоя  $\text{ZnS:HoF}_3 \sim 0,6 \mu\text{m}$ , концентрация активатора  $\text{HoF}_3$  от 1 до 15 вес.%. Толщина верхнего и нижнего слоев диэлектриков были порядка  $0,3 \mu\text{m}$ . Нанесение люминесцентного и диэлектрических слоев производилось в одном технологическом цикле.

Были исследованы спектры, яркость и эффективность электролюминесценции, а также их за-

висимость от состава материалов, температуры и частоты напряжения возбуждения. Спектры электролюминесценции регистрировались с помощью комплекса КСВУ-23, вольт-яркостные характеристики измерялись по стандартной методике. Возбуждение электролюминесценции образцов производилось синусоидальным напряжением.

Исследования показали, что за излучение ТПЭЛИ на основе  $\text{ZnS:HoF}_3$  ответственны переходы электронов на внутренних оболочках атомов гольмия:  $^5F_1 \rightarrow ^5I_8$  ( $\lambda = 462 \text{ nm}$ ),  $^5F_3 \rightarrow ^5I_8$  ( $\lambda = 490 \text{ nm}$ ),  $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$  ( $\lambda = 550 \text{ nm}$ ) и  $^5F_3 \rightarrow ^5I_7$ ,  $^5F_5 \rightarrow ^5I_8$  ( $\lambda = 645 \text{ nm}$ ). Вероятность излучательной релаксации с уровня  $^5S_2$  наиболее высока, так как основной максимум на 550 нм (зеленое излучение) соответствует именно ему. Показано, что увеличение концентрации активатора от 1 до 15 мас. % изменяет спектр излучения ТПЭЛС. Это проявляется в уменьшении величины основного максимума ( $\lambda = 550 \text{ nm}$ ), соответствующего переходу  $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$ , в то время как интенсивность красного излучения (переходы  $^5F_3 \rightarrow ^5I_7$ ,  $^5F_5 \rightarrow ^5I_8$ ) растёт. Возможная причина такого поведения заключается в том, что при увеличении концентрации активатора возрастает вероятность образования комплексов Ho-Ho. В таком случае становятся возможными безызлучательные переходы с возбужденного энергетического состояния одного центра на возбужденное состояние другого, а затем — излучательный переход на основной уровень. Происходит процесс, так называемый, перекрестной релаксации. Дальнейшее увеличение концентрации  $\text{HoF}_3$  приводит

к преобладанию излучения в красной области спектра.

Вольт-яркостная и вольт-зарядовая характеристики тонкопленочной структуры с концентрацией активатора  $\text{HoF}_3$  5 мас. % приведены на рис. 1. Они имеют пороговый характер, типичный для ТПЭЛС.

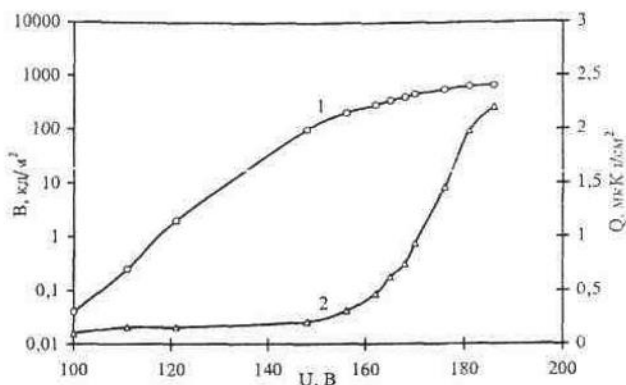


Рис. 1. Вольт-яркостная и вольт-зарядовая характеристики ТПЭЛС: на основе  $\text{ZnS}:\text{HoF}_3$  (5 мас. %); 1 —  $B-U$ -характеристика; 2 —  $Q-U$ -характеристика

В данной работе показано, что использование в качестве диэлектрика пленок твердого раствора  $\text{HfO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$  позволяет получить пороговое напряжение не более 115 В. Это в 1,3—1,8 раз меньше по сравнению с известными ТПЭЛИ, в которых традиционно используются  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  или  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Вольт-яркостная характеристика ТПЭЛИ имеет три участка (рис. 1). На первом её крутизна, характеризуемая показателем степени  $n$  функции  $B \sim U^n$ , постепенно возрастает (здесь  $n = 10-15$ ); на втором она максимальна ( $n \geq 30$ ), а на третьем участке яркость  $B$  слабо зависит от  $U$ . Выход вольт-яркостной характеристики на участок насыщения может быть вызван:

- насыщением зависимости порогового напряжения  $U_0$  от  $U$  в той области структуры, где происходит возбуждение электролюминесценции;
- истощением источника электронов, попадающих в область сильного поля в  $\text{ZnS}$ ;
- увеличением доли безызлучательных переходов в слое люминофора.

Исследования зависимости яркости излучения ТПЭЛС на основе  $\text{ZnS}:\text{HoF}_3$  (5 мас. %) от частоты возбуждающего напряжения проводились при возбуждении структуры синусоидальным напряжением 170 В в диапазоне 200—10 000 Гц. Установлено, что повышение частоты  $f$  приводит к увеличению яркости. При переходе к высоким частотам возбуждения скорость роста яркости ТПЭЛС начинает уменьшаться, т. е. особое значение приобретает перераспределение напряженности электрического поля между слоем люминофора и диэлектрическими пленками [1]. Аппроксимирующая степенная функция, описывающая частотную зависи-

мость яркости излучения, выглядит следующим образом [2]:

$$B = B_0 \cdot f^\alpha,$$

где  $B_0$  — константа,  $\alpha$  — усредненное значение показателя степени.

В исследованных образцах  $\alpha = 1,18$ .

Следует отметить, что яркостью излучения ТПЭЛС на основе сульфида цинка, легированного фторидом гольмия, можно управлять, изменяя как величину напряжения, так и частоту. Так, например, получить  $B = 1000$  кд/м<sup>2</sup> можно при  $U = 170$  В и  $f = 1$  кГц или при  $U = 130$  В и  $f = 3$  кГц. Это существенно увеличивает возможности конструирования систем отображения информации (СОИ) на основе ТПЭЛИ.

По результатам измерений яркости и заряда была рассчитана световая эффективность  $\eta$  по формуле:

$$\eta = \frac{50\pi B}{U_{th} f Q},$$

где  $B$  — яркость ТПЭЛС, кд/м<sup>2</sup>;  $U_{th}$  — пороговое напряжение, В;  $f$  — частота напряжения возбуждения, Гц;  $Q$  — перенесенный через структуру заряд, мкКл/см<sup>2</sup>.

Зависимость световой эффективности ТПЭЛИ на основе от напряжения возбуждения показана на рис. 2. При малых напряжениях световая эффективность возрастает. При выходе яркости излучения на участок насыщения (160 В) световая эффективность достигает максимального значения 0,22 лм/Вт, после чего происходит её спад.

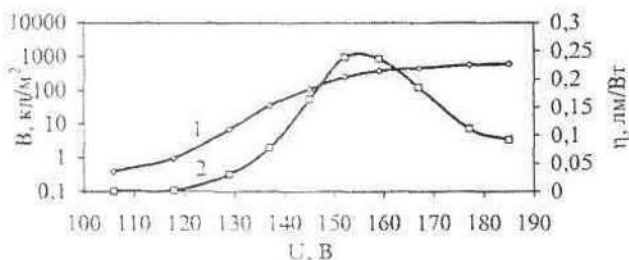


Рис. 2. Вольт-яркостная характеристика и зависимость световой эффективности от напряжения ТПЭЛС на основе  $\text{ZnS}:\text{HoF}_3$  (10 мас. %): 1 —  $B(U)$ ; 2 —  $\eta(U)$

Максимальная эффективность ТПЭЛИ достигается при некоторой оптимальной концентрации активатора в полупроводниковом слое. С целью ее определения нами исследованы основные характеристики ТПЭЛИ на основе  $\text{ZnS}:\text{HoF}_3$  с различной концентрацией  $\text{HoF}_3$ . Показано, что оптимальная концентрация, обеспечивающая лучшие параметры излучения ТПЭЛИ этого типа, лежит в интервале значений 5—10 мас. %.

Интересными и важными для практических целей являются исследования зависимости основных светотехнических параметров ТПЭЛИ от темпе-

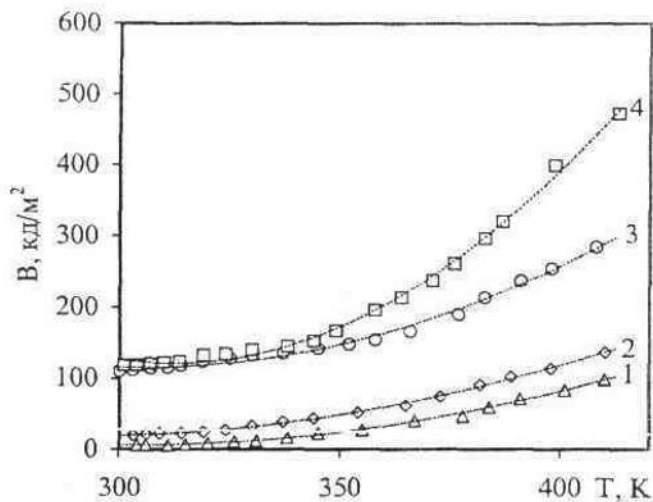


Рис. 3. Температурная зависимость яркости излучения ТПЭЛС на основе  $ZnS:HoF_3$  (10 мас.%): 1 —  $U = 131$  В; 2 —  $U = 136$  В; 3 —  $U = 141$  В; 4 —  $U = 157$  В

ратуры окружающей среды. Температурные зависимости яркости излучения тонкопленочных электролюминесцентных структур на основе  $ZnS:HoF_3$  (10 мас. %) при различных значениях напряжения возбуждения представлены на рис. 3. Известно, что яркость электролюминесценции в общем случае определяется несколькими процессами: генерацией первичных электронов; ускорением их в области сильного поля до энергий, достаточных для воз-

буждения излучающих центров; излучательными переходами возбужденных центров свечения. Увеличение яркости электролюминесценции ТПЭЛИ в высокотемпературной области в наших условиях вероятнее всего можно объяснить увеличением скорости генерации свободных электронов глубокими центрами.

#### Заключение

1. Предлагаемый активатор  $HoF_3$  в люминофоре  $ZnS$  обеспечивает:

- зеленый цвет свечения, эффективный для применения в оптоэлектронных элементах СВИ;
- яркость свечения  $800$  кд/м<sup>2</sup>;
- световую эффективность  $0,22$  лм/Вт — в 2–10 раз большую, чем у тонкопленочных индикаторов, работающих на постоянном токе.

2. Оптимальным является содержание  $HoF_3$  в слое люминофора 5–10 мас. %. Полученные при этом ТПЭЛИ обладают  $U_{пр} = 115$  В,  $\eta = 0,22$  лм/Вт,  $B = 800$  кд/м<sup>2</sup>.

#### Литература

1. Верещагин И. К., Ковалев Б. А., Косяченко Л. А., Кокки С. М. Электролюминесцентные источники света / Под ред. И. К. Верещагина. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 168 с.
2. Лямичев И. Я. Устройства отображения информации с плоскими экранами. — М.: Радио и связь, 1983.