

К. т. н. Ю. Н. БОБРЕНКО, Г. И. ШЕРЕМЕТОВА,  
к. т. н. Т. В. СЕМИКИНА, Н. В. ЯРОШЕНКО

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва  
E-mail: sheremet@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
24.05 2007 г.

Оппонент А. Г. СТЕПАНУШКИН  
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

## ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ СЕНСОРОВ ПЛАМЕНИ

*Изучены спектральные, вольт-фарадные и частотные характеристики поверхностно-барьерных структур на основе соединений  $A^2B^6$ , перспективных для использования в ультрафиолетовых сенсорах пламени.*

Многие тепловые электростанции, использующие природный газ, уголь, мазут, имеют системы слежения за факелами пламени. В основу методов слежения за топками котлов положены различные физические принципы: спектральный анализ пламени, пирометрический контроль температуры, частотные характеристики пламени и др. При этом наиболее надежным будет сенсор, имеющий два и более канала связи, включенных в обратную цепь следящей системы.

Перспективными системами слежения за факелами пламени являются системы с ультрафиолетовыми (УФ) сенсорами, слепыми к видимому излучению (максимальная длина волны 0,38 мкм), т. е. именно они дают однозначный ответ на присутствие пламени. Данная работа посвящена исследованию УФ-фотоприемников (ФП) с целью использования их в сенсорах пламени.

УФ ФП были изготовлены на основе поверхностно-барьерной структуры типа  $p-Cu_xS/n-ZnS(Zn_xCd_{1-x}S_ySe_{1-y})/CdSe$  толщиной 4—6 мкм. Структура была получена в квазизамкнутом объеме при давлении  $P=10^{-6}$  Торр сублимацией ZnS и CdSe на нагретые до 180—200°C ситалловые подложки. С целью уменьшения рекомбинационных потерь неосновных носителей заряда, а также снятия температурных и механических напряжений, на границе раздела базовых слоев ZnS и CdSe встраивались варизонные слои нанометровой толщины ( $\approx 10$  нм). Гетеропереход формировался нанесением в вакууме сильно вырожденного сульфида меди  $Cu_xS$  толщиной 30 нм. Толщина слоя ZnS определялась его сопротивлением и оптимальной длиной поглощения УФ-излучения ( $\alpha \approx 10^{-6} \dots 10^{-5}$  см) и составляла 300 нм. Образцы площадью 4,25 мм<sup>2</sup> помещались в коваровые корпуса и заваривались лазером в среде аргона.

Исследованы температурные спектральные характеристики гетероперехода. На рис. 1 показаны спектральные характеристики образцов, снятые при выдержке ФП в течение 4 ч при различных темпера-

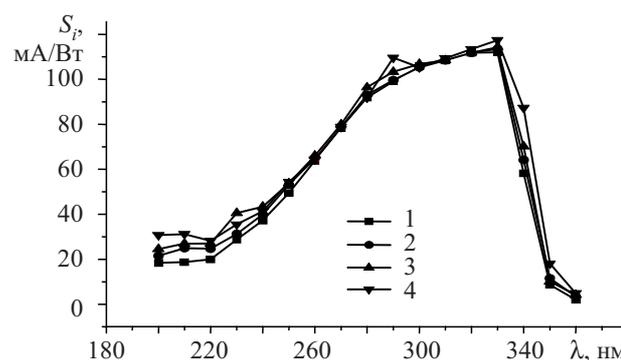


Рис. 1. Спектральные характеристики ФП, измеренные при различных температурах:

1 — 30°C; 2 — 60°C; 3 — 85°C; 4 — 130°C

турах. Значительных изменений спектральной чувствительности при нагревании вплоть до 130°C не обнаружено.

Следует отметить небольшое увеличение чувствительности  $S_i$  в области от 0,2 до 0,25 мкм, что обусловлено термическим выбросом электронов с поверхностных электронных состояний и глубоких уровней, ростом электрического тянущего поля у поверхности и лучшим разделением неосновных носителей заряда, а также возможным забросом фотогенерированных электронов из верхнего слоя сульфида меди гетероперехода в базовый слой ZnS.

Меньшая, чем у монокристаллов ( $E_g = 3,6$  эВ для ZnS), ширина запрещенной зоны  $E_g$  у поликристаллических пленок ZnS (3,45 эВ) указывает на сильное электрическое поле вблизи границы гетероперехода этой структуры (эффект Франца-Келдыша), обусловленное контактной разностью потенциалов  $\phi$  и полем внутри кристаллитов. Увеличение температуры при нагревании образцов слабо влияет на изменение  $E_g$  ZnS, что видно по краю собственного поглощения спектральных характеристик.

$S_{i\max}$  отличается по величине от  $S_i$  при  $\lambda \geq 400$  нм на 2—3 порядка [1]. С целью изучения влияния зазвенок в видимой области (мерцание пламени, переключение факела) на кинетику чувствительности изучался отклик на световые прямоугольные импульсы голубого, зеленого, инфракрасного светодиодов, а также лазерного излучения с длиной волны 625 нм.

Исследуемые ФП подключались к осциллографу с входным сопротивлением 1 МОм и емкостью 30 пФ [2, с. 432—446]. Фотоотклик на световые прямо-

угольные импульсы лазерного диода, а также голубого светодиода, имел форму игольчатого положительного импульса после включения импульса излучения и отрицательного — после выключения импульса, т. е. происходила перезарядка глубоких уровней при переходе от одних равновесных условий к другим. Формы спада импульсов фотооткликов имели одинаковую экспоненциальную зависимость с различным временем релаксации (для голубого светодиода  $\tau=5,6$  мс, для лазера  $\tau=6,4$  мс).

Реакция на импульсы лазерного излучения (плотность излучения  $P=100$  мВт/см<sup>2</sup>) объясняется, с одной стороны, собственным поглощением в слое CdSe и туннелированием по глубоким уровням дырок в слой ZnS, где происходит частично их захват и переход в Cu<sub>x</sub>S. Захватенные дырки уменьшают туннельную составляющую, что приводит к падению фототока. С другой стороны, под действием света происходит генерация электронов в этих слоях, которые начинают рекомбинировать с дырками. Оба процесса имеют разные времена релаксации, причем нарастание первого идет быстрее. Зеленый и красный светодиоды давали очень слабые импульсы фотооткликов, инфракрасный — не давал вовсе. Голубой светодиод (плотность излучения  $P=10$  мВт/см<sup>2</sup>) порождал импульсы, обусловленные, возможно, двойными оптическими переходами в ZnS, а также перезарядкой глубоких акцепторных уровней в слое ZnS.

Таким образом, определена реакция ФП на изменение спектра видимого излучения. Фотоответ вызывает лишь кинетика изменения пространственного заряда, вызванная голубой областью спектра с большим временем релаксации ( $\tau=5,6$  мс).

Можно сделать вывод, что перепады яркости пламени горелки в видимой области не вызовут заметных изменений в чувствительности  $S_i$ . Чувствительность к пламени будет определяться только УФ-частью спектра.

Для выяснения работы в двух режимах — фотодиодном и вентильном — были исследованы вольт-фарадные характеристики. Емкостные измерения проводились на величине тестирующего сигнала 0,04 В измерителем иммитанса Е7-20. На рис. 2 показана темновая и световая зависимость емкости ФП от частоты. Низкочастотная емкость вызвана медленными состояниями на границе раздела гетероперехода и в глубине слоя ZnS и зависит от освещенности.

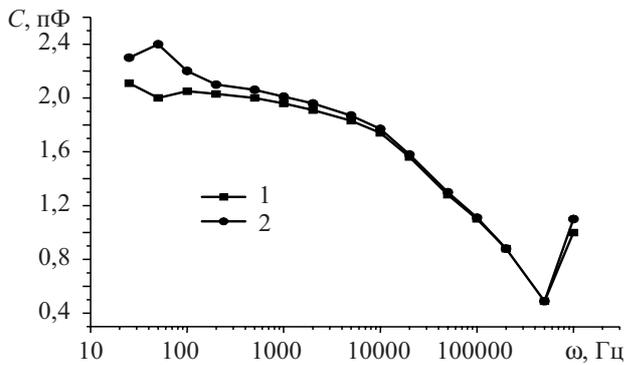


Рис. 2. Зависимость емкости от частоты:

1 — в темноте; 2 — при освещении люминесцентной лампы

При выполнении условия  $\omega\tau_m \geq 1$ , где  $\tau_m$  — время релаксации медленных состояний, емкость медленно уменьшается с частотой. Емкость в интервале частот  $10$  кГц  $< \omega < 1$  МГц, вызванную быстрыми состояниями и зарядом в базе, можно описать выражением

$$C_B = C_0 - k(\omega) \log \omega,$$

где  $C_0$  — емкость области пространственного заряда и быстрых состояний;

$k$  — слабо зависящая от частоты константа.

При облучении фотодиода источниками с различными спектральными характеристиками увеличивается только низкочастотная емкость. При облучении лазером с  $\lambda=625$  нм и голубым светодиодом происходит генерация носителей в слое CdSe и перезарядка глубоких уровней в ZnS.

На рис. 3 показана зависимость квадрата обратной величины емкости  $1/C^2$  при обратном смещении.

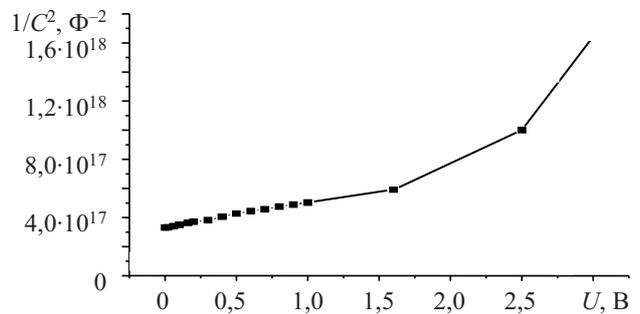


Рис. 3. Зависимость  $1/C^2$  от обратного смещения

При смещениях  $U < 2$  В зависимость носит линейный характер. Малый наклон прямой обусловлен низкой концентрацией доноров  $N_d \approx 8 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> в слое, а величина отсечки на оси напряжений  $U_d \approx 2$  В — встроенным зарядом на границе раздела гетероперехода в слое ZnS [3, с. 247—252], величина которого зависит от квазиуровня Ферми. Напряжение  $U > 2$  В вызывает ступенчатое туннелирование дырок по глубоким уровням из валентной зоны Cu<sub>x</sub>S в зону проводимости CdSe через слой ZnS, что приводит к увеличению емкости. То есть при отрицательных напряжениях барьерная емкость ограничена туннельной компонентой тока, а при положительных — диффузионной.

Таким образом, показана возможность использования полученных фотоприемников в качестве сенсоров пламени. Низкочастотные изменения яркости горелки в видимой области не вызывают заметных изменений в фототоковой чувствительности, слабые импульсы устраняются аппаратными средствами.

Фотоприемники могут быть использованы также для определения УФ-излучения искусственных источников света, пожарной сигнализации, в медико-биологических исследованиях.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Комащенко В. Н., Колежук К. В., Ярошенко Н. В. и др. Спектральная чувствительность гетероструктур  $p\text{-Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-Al}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  // Физика и техника полупроводников.— 2006.— Т. 40, вып. 3.— С. 332—335.
2. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.— М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1963.
3. Чопра К., Дас С. Тонкопленочные солнечные элементы.— М.: Мир, 1986.