

ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTRONICS ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 681.883.7

О.В. Максимова, П.В. Николаев, М.К. Самохвалов

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ ИНДИКАТОРОВ

Максимова Оксана Вадимовна, кандидат технических наук, доцент, окончила Ульяновский государственный технический университет, заведующая кафедрой «Авиационная техника» Ульяновского института гражданской авиации им. Б.П. Бугаева. Имеет статьи, монографии, изобретения в области оптоэлектроники и СВЧ-техники. [e-mail: first32007@yandex.ru].

Николаев Пётр Валерьевич, аспирант кафедры «Проектирование и технология электронных средств» УлГТУ, окончил радиотехнический факультет УлГТУ. Имеет статьи, изобретения в области оптоэлектроники и вычислительной техники. [e-mail: nikollaew@mail.ru].

Самохвалов Михаил Константинович, доктор физико-математических наук, профессор УлГТУ, окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Имеет статьи, монографии в области оптоэлектроники. [e-mail: sam@ulstu.ru].

Аннотация

В данной статье были рассмотрены аспекты автоматизации измерения порогового напряжения и построения вольт-яркостной характеристики для алгоритма функционирования устройства автоматизированного тестирования. Реализация данного алгоритма ускоряет процесс контроля параметров при производстве известных и разработке новых образцов индикаторной техники на основе тонкоплёночных электролюминесцентных индикаторов (ТПЭЛИ). Были обозначены главные аспекты комплексного подхода к решению задач автоматизации процесса измерения значений параметров структур ТПЭЛИ, рассмотрены особенности функционирования ТПЭЛИ как основы формирования состава устройства автоматизированного тестирования, описана автоматизация обработки результатов эксперимента на уровне программного обеспечения. Определены основные параметры индикаторов, обозначены задачи автоматизации измерительных процессов, разработан алгоритм определения порогового напряжения и построения вольт-яркостной характеристики ТПЭЛИ в автоматизированном режиме. Изложенные в данной статье идеи позволяют сформулировать техническое задание на разработку устройства автоматизированного измерения параметров электролюминесцентных элементов, а также его составных частей и программного обеспечения.

Ключевые слова: тонкоплёночный индикатор, яркость, автоматизация, измерения, электролюминесценция, тонкие плёнки, алгоритм.

doi: 10.35752/1991-2927-2019-4-58-105-112

METHODS AND MEANS FOR AUTOMATED MONITORING OF THIN FILM INDICATORS

Oksana Vadimovna Maksimova, Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor; graduated from Ulyanovsk State Technical University; Head of the Department of Aviation Equipment of the Bugaev Ulyanovsk

State Institute of Civil Aviation; an author of articles, monographs, and inventions in the field of optoelectronics and microwave engineering. e-mail: first32007@yandex.ru.

Petr Valerevich Nikolaev, Postgraduate Student at the Department of Design and Technology of Electronic Devices of Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Radioengineering Faculty of USTU; an author of articles, inventions in the field of optoelectronics and computer engineering. e-mail: nikollaew@mail.ru.

Mikhail Konstantinovich Samokhvalov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor at Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Faculty of Physics of Chernyshevsky Saratov State University; an author of articles, monographs in the field of optoelectronics. e-mail: sam@ulstu.ru.

Abstract

The article deals with the algorithms, methods for measuring the structure parameters of thin-film electroluminescent indicators. An algorithm for determining threshold voltage and plotting current-brightness characteristics was created. The realization of this algorithm accelerates the parameters monitoring process when producing the known display equipment items and developing the new one based on thin-film electroluminescent indicators. The main aspects for a comprehensive approach to solve problems of measuring process automation of parameter values of thin-film electroluminescent indicator structures were identified. The features of the thin-film electroluminescent indicator performance were considered as a basis for building the structure of automated testers. The automation of experimental results processing at the software level was described. The key parameters of indicators were determined, automation problems of measuring processes were denoted. The algorithm for determining threshold voltage and plotting current-brightness characteristics of thin-film electroluminescent indicators in an automated mode was developed. The ideas explained in this article allow formulating the requirement specification on developing a device for automated measuring the thin-film electroluminescent element parameters as well as its components and software.

Key words: thin-film indicator, brightness, automation, measurements, electroluminescence, thin films, algorithm.

ВВЕДЕНИЕ

Тонкопленочные электролюминесцентные индикаторные (ТПЭЛИ) устройства в настоящее время могут быть одними из наиболее востребованных элементов для создания микроэлектронных средств отображения информации, особенно в области разработки специальной техники. К их достоинствам можно отнести: полностью твердотельную конструкцию, надёжность, высокую яркость и быстродействие, широкий угол обзора, стойкость к ионизирующему излучению, а также температурную стабильность.

К недостаткам данных ТПЭЛ-устройств относится необходимость применения переменного напряжения с достаточно большой амплитудой, но существуют современные высокоэффективные инверторы, позволяющие преобразовывать постоянное напряжение (от 2 В) в переменное с необходимыми параметрами [1].

На сегодняшний день разработаны средства автоматизации конструирования ТПЭЛИ, методики автоматизации проектирования технологических процессов производства данных устройств [2]. Также необходимо учитывать современные тенденции повышения скорости и качества процедур контроля средств отображения информации и их составляющих [3]. Следовательно, методы диагностики тонкопленочных индикаторов должны быть автоматизированы.

1 ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ТПЭЛИ

Для разработки алгоритма определения порогового напряжения и построения вольт-яркостной характери-

стики индикаторных устройств в автоматизированном режиме необходимо рассмотреть свойства ТПЭЛ-конденсаторов как элементов, входящих в состав электрической схемы, включающей в себя излучатель и систему контроля.

ТПЭЛ-структуры типа МДЛДМ (металл-диэлектрик-люминофор-диэлектрик-металл) обычно состоят из пяти последовательно нанесённых на стеклянную подложку слоёв с использованием методов тонкопленочной технологии.

Такая структура представлена на рисунке 1.

В качестве люминесцентных слоёв обычно используют сульфид цинка, легированный марганцем или фторидами редкоземельных элементов. Перспективными люминофорами показали себя сульфиды стронция и кальция, легированные фторидами редкоземельных металлов.

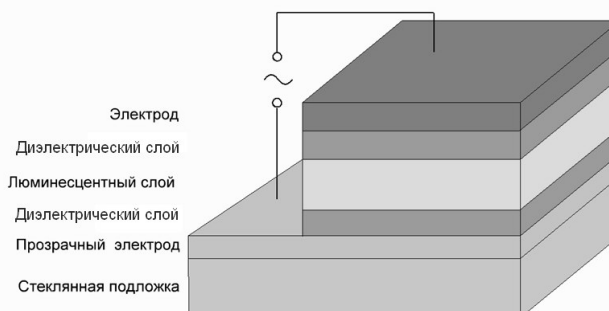


Рис. 1. Структура ТПЭЛИ

В качестве подложек при получении структур используются пластины бесщелочного термостойкого стекла толщиной 2–3 мм с нанесенным слоем прозрачного электрода, для создания которого применяют сильно легированные оксиды индия или олова, являющиеся вырожденными широкозонными полупроводниками. Для получения непрозрачных электродов используют алюминий, индий, олово, тугоплавкие металлы.

Для создания диэлектрических плёнок в электролюминесцентных структурах применяют оксиды кремния, алюминия, иттрия и редкоземельных металлов, нитрида кремния и др., их композиции, сегнетоэлектрические материалы [1].

Основная роль диэлектрических слоёв – это ограничение заряда, проходящего через люминофор в рабочих режимах. Необходимость применения таких слоёв обусловлена свойствами процесса переноса заряда в люминесцентной пленке. Электролюминесценция в тонких слоях сульфида цинка и других материалов связана с электрическим пробоем полупроводника.

Два диэлектрических слоя, отделяющие пленку люминофора от электродов, позволяют представить данное устройство как электролюминесцентный конденсатор, что заставляет использовать переменное напряжение для обеспечения электролюминесценции [4].

2 ОПИСАНИЕ ВОЛЬТ-ЯРКОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТПЭЛИ

Так как большую часть информации человек получает с помощью зрения, а ТПЭЛИ предназначены прежде всего для визуализации цифровых данных, следовательно, основной характеристикой данных индикаторов является вольт-яркостная.

На рисунке 2 представлена типичная вольт-яркостная характеристика ТПЭЛ-структуры на основе сульфида цинка, легированного марганцем.

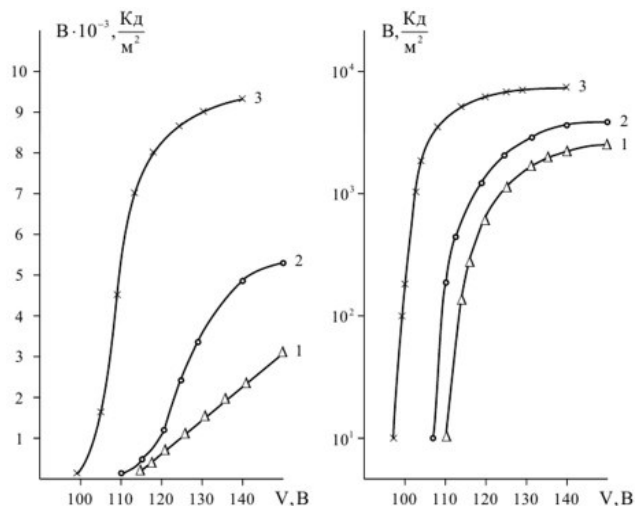


Рис. 2. Типичная вольт-яркостная характеристика ТПЭЛ-конденсатора в линейных и полулогарифмических координатах: $f = 1$ кГц (1); $f = 5$ кГц (2) и $f = 20$ кГц (3)

На рисунке 2 можно увидеть, что эта зависимость является линейной при малых напряжениях и частотах, с повышением этих параметров график зависимости является сублинейным. Принято изображать графики вольт-яркостных характеристик в полулогарифмическом масштабе, т. е. по оси абсцисс напряжение обозначают в линейном масштабе, а по оси ординат показывают яркость в логарифмических координатах.

Использование логарифмического масштаба для такого параметра, как яркость излучения, связано с субъективностью восприятия человеком её величины, увеличение яркости источника света на порядок человек воспринимает как увеличение в два раза.

Как видно из рисунка 2, вольт-яркостная характеристика имеет пороговый характер, т. е. резкий рост яркости происходит при приложении к ТПЭЛИ определённого напряжения.

Величина порогового напряжения определяется в первую очередь свойствами материала люминофора: пороговой напряженностью электрического поля, величиной и соотношением ёмкостей люминесцентного и диэлектрического слоев. Значение пороговой напряженности электрического поля в пленках люминофора, изолированных от электродов, определяется механизмом генерации свободных носителей заряда $10^5 \sim 10^6$ В/см [1].

3 ОСОБЕННОСТИ СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА

Основным видом используемого переменного сигнала является синусоидальный. Рассмотрим его параметры.

Действующим значением переменного тока или напряжения называют величину, которая принимается в расчётах выделяющейся теплоты или мощности. Для постоянного тока действующее значение равно амплитудному, среднему и мгновенному, для переменного сигнала – это всё различные величины.

Мгновенное значение переменного напряжения – абсолютный уровень напряжения в конкретный момент времени. Амплитудное значение – это наибольшее значение синусоиды (или другой кривой для несинусоидальной формы сигнала) за период. Амплитудное значение берётся по модулю. Среднее значение – это сумма всех мгновенных значений за период, делённая на количество отсчётов. Математически – это интеграл мгновенных значений за период. Очевидно, что для синусоидальной формы среднее за период значение будет нулевым. При искажении формы сигнала среднее значение за период может оказаться ненулевым – тогда оно получает название постоянной составляющей переменного напряжения. Действующее или эффективное значение напряжения – это величина, численно равная:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}, \tag{1}$$

где U – действующее значение, T – время одного периода, u – мгновенное значение напряжения.

Действующее и амплитудное (U_m) напряжения соотносятся следующим образом:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

Часто вместо эффективного измеряется другое значение переменного напряжения – средневыпрямленное (постоянную составляющую несглаженного пульсирующего напряжения на выходе двуполупериодного выпрямителя). Оно равно $2/\pi \approx 0,637$ амплитуды синусоиды, что в 1,11 раза меньше её эффективного значения. Подавляющее большинство универсальных низкочастотных измерительных приборов (авометров, мультиметров) показывают не эффективное, а средневыпрямленное значение переменного напряжения, умноженное на этот поправочный коэффициент [5].

4 АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ВОЛЬТ-ЯРКОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТПЭЛИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ РЕЖИМЕ

Для анализа электрических характеристик более корректным является определение порогового напряжения с помощью измерений заряда или мощности, но с точки зрения пользователя предпочтительнее производить определение порогового напряжения с помощью измерения яркости, т. е. фактически осуществлять построение вольт-яркостной характеристики.

В результате анализа современных систем измерений были сформулированы необходимые требования к данным системам и их алгоритмам:

- возможность проведения эксперимента на физическом уровне с использованием натуральных образцов ТПЭЛИ;
- высокая достоверность, наглядность и информативность полученных данных;
- возможность хранения и передачи измерительной информации на ПК;
- высокая скорость обработки данных и представления отчётов;
- простота в использовании;
- возможность модернизации системы, расширения её функциональных возможностей.

Исходя из всего вышеизложенного, основными параметрами, определяемыми с помощью алгоритма, являются яркость свечения ТПЭЛИ и действующее значение синусоидального напряжения, измеряемые в один момент времени. Реализуемый алгоритм должен определять пороговое напряжение ТПЭЛИ путём детектирования момента возрастания яркости фотодатчиком и измерения значения приложенного к ТПЭЛИ синусоидального напряжения в этот момент, затем прибор должен измерять значения яркости и напряжения, а также иметь возможность передавать данные в ПК.

На рисунке 3 приведена блок-схема алгоритма. Сначала происходит обнуление всех счётчиков и т. п. Далее система ждёт появления сигнала с фотодатчика, т. е. момента начала свечения ТПЭЛИ. Начало испускания излучения фиксируется системой путём считывания данных с фотодатчика, а также передачи информации о напряжении,

приложенном в этот момент к ТПЭЛИ. Таким образом, определяется пороговое напряжение индикатора. Далее происходит последовательное определение значения яркости и напряжения, передача этих данных на ПК с целью построения вольт-яркостной характеристики ТПЭЛИ и вывода её на монитор компьютера в удобной для пользователя форме (таблица, график, гистограмма и т. п.).

5 ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА, РЕАЛИЗУЮЩЕГО ДАННУЮ ПРОГРАММУ

Для реализации вышеописанных действий, а также для обработки результатов измерений и возможности взаимодействия разрабатываемого устройства измерения с персональным компьютером было решено использовать микроконтроллер (МК).

Соответственно цифровая часть должна включать в себя:

1. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для работы с датчиками яркости и напряжения;
2. Устройство для взаимодействия МК с USB;
3. Дисплей или индикатор для отображения результатов измерения и дешифратор для последнего;



Рис. 3. Блок-схема алгоритма

- 4. МК с достаточным количеством входов и выходов;
- 5. Разъём для загрузки программ в МК.

Для удовлетворения вышеописанных требований могут использоваться средства Arduino и их аналоги.

В качестве фотодатчика может использоваться фотодиод, фоторезистор и т. д., а также схемы с возможностью подавления световых помех.

Для контроля напряжения возможно использование выпрямителя с функцией деления напряжения.

Индикация может осуществляться с помощью трёх семисегментных индикаторов и соответствующих микросхем регистров. Обмен данными регистра и МК имеет смысл реализовать с помощью SPI-интерфейса.

Документация на семисегментные индикаторы содержит таблицу с информацией о том, какой логический уровень нужно подавать на вход, чтобы загорелась та или иная цифра. Для индикаторов с общим катодом таблица выглядит следующим образом:

Таблица индикации

| | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>E</i> | <i>F</i> | <i>G</i> | <i>DP</i> | <i>HEX</i> |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|------------|
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3F |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 06 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 5B |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4F |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 66 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 6D |
| 6 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 7D |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 07 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 7F |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 6F |

Крайний справа столбец с именем *HEX* – это представление цифры в байтовом виде для передачи её с помощью регистра.

Для работы с несколькими индикаторами необходимо использовать либо последовательное подключение устройств к шине, либо параллельное.

При параллельном подключении (рис. 4) несколько ведомых устройств используют общие провода *SCLK*,

MOSI и *MISO*, при этом каждый ведомый имеет свою линию *CS* (*SS*). Ведущий определяет устройство, с которым осуществляется обмен, путем формирования низкого сигнала на его *CS* (*SS*)-входе.

Для подключения *n* устройств требуется *n* линий *CS* (*SS*), то есть для функционирования SPI-среды с *n* ведомыми нужно выделить под это *n + 3* вывода МК.

При последовательном подключении (рис. 5) устройств они используют общие провода *SCLK* и *CS*, а выход одного подключаются к входу другого. *MOSI* ведущего подключается к первому устройству, а *MISO* – к последнему.

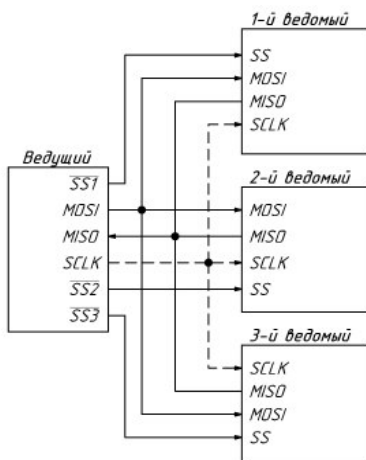


Рис. 4. Параллельное подключение

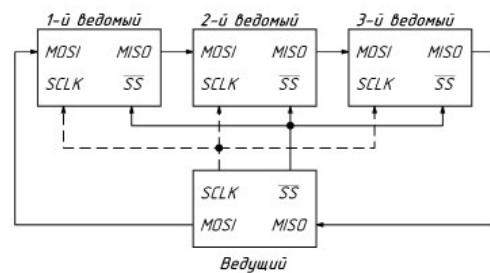


Рис. 5. Последовательное подключение

Такое подключение позволяет построить из двух 8-битных сдвиговых регистров один 16-битный.

Схемотехника устройства на индикаторах с общим катодом определяет следующий порядок передачи информации по SPI: первым передается байт, отвечающий за то, какая цифра будет показываться (анодный байт), а вторым передается байт, отвечающий за позицию цифры (катодный байт) [6].

Анодный байт передаётся во время сеанса SPI-передачи сквозь регистр DD2 в DD3. Катодный байт помещается в DD3 и остаётся там. В результате отображаются цифры на индикаторах:

```
// подключаем библиотеку SPI
#include <SPI.h>
// провод CS подсоединяем к 8-му выводу Arduino
enum { reg = 8 };
void setup()
{
  // Задаём опорное напряжение 2.56 В
  analogReference(INTERNAL);
  // инициализируем SPI
  SPI.begin();
  // определяем 8-й вывод Arduino как выход
  pinMode(reg, OUTPUT);
  // Открываем послед. порт и задаём скорость передачи
  // данных
  Serial.begin(9600);
}
```

Для отображения трёх цифр используется динамическая индикация, т. е. изображение каждой цифры включается на короткое время, потом выключается, и процедура повторяется для последующих цифр.

Опытным путём установлено, что при переключении цифры каждые 8 миллисекунд мерцание различимо, то при значении в 7 миллисекунд глаз уже не видит дискретизацию. Катодный байт рассчитывается так, чтобы 00011000 зажигало левый разряд, 00010100 – средний, 00001100 – правый. То есть единица в битах 2,3 и 4 ответственна за зажигание соответствующего разряда:

```
// Переменные для отображения сотен, десятков, единиц
int hundreds=0, tens=0, ones=0;
// время отображения каждой цифры
int delayTime=1;
// коды цифр на семисегментном индикаторе (0–9 и пустота)
static uint8_t digit[11] =
{0x3F,0x06,0x5B,0x4F,0x66,0x6D,0x7D,0x07,0x7F,0x6F,
0x00};
// коды позиций зажигаемого индикатора (левый, центр,
// правый)
static uint8_t pos[3]= {0x18,0x14,0x0C};
```

Необходимо разбить передаваемое число на составляющие. Пусть имеется число `int f`, которое в десятичной системе имеет число разрядов не более трёх, то есть число меньше 1000. Алгоритм:

1. Делится `f` на 100, оставаясь в рамках `int`, получаем количество сотен.
2. Отнимается от `f` число сотен, умноженное на 100, делится остаток на 10 – определяем количество десятков.
3. Отнимается от `f` число сотен, умноженное на 100, и число десятков, умноженное на 10 – получаем количество единиц.
4. Если число сотен равно нулю, то ничего не отображается в левом разряде.
5. Если количество сотен и десятков нулевое, то ничего не отображается в левом и среднем разрядах [6]:

```
void OutLED (int f)
{ int x=600;
  Serial.println(f);
  do{
    // выделяются сотни
    hundreds=f/100;
    // выделяются десятки
    tens=(f-hundreds*100)/10;
    // выделяются единицы
    ones=f-hundreds*100-tens*10;
    // если сотен нет, не отображается ничего в 3-м разряде
    if (hundreds==0) hundreds=10;
    // если сотен и десятков нет, не отображается ничего во
    // 2-м разряде
    if (hundreds==10 && tens==0)tens=10;
```

Затем осуществляется передача пары байт по SPI для каждого разряда нашего числа по очереди:

```
// старт передачи по SPI
digitalWrite(reg, LOW);
// передача кода цифры, соответствующей разряду сотен
SPI.transfer(digit[hundreds]);
// выбирается левый индикатор
SPI.transfer(pos[0]);
// конец передачи
digitalWrite(reg, HIGH);
// пауза, равная delayTime
delay(delayTime);
// передача кода цифры, соответствующей разряду десятков
digitalWrite(reg, LOW);
SPI.transfer(digit[tens]);
// выбор центрального индикатора
SPI.transfer(pos[1]);
digitalWrite(reg, HIGH);
delay(delayTime);
// передача кода цифры, соответствующей разряду единиц
digitalWrite(reg, LOW);
SPI.transfer(digit[ones]);
// выбор правого индикатора
SPI.transfer(pos[2]);
digitalWrite(reg, HIGH);
delay(delayTime);
x--;
} while (x>0);
}
```

Считывание сигнала с фотодатчика и определение значения питающего напряжения производится следующим образом:

```
void loop()
{ // Чтение информации с выхода люксметра
  float L= analogRead(A1);
  // Порог свет/темнота преодолён?
  if (L>10)
  // Преодолен
  { float f = analogRead(A0);
    f= f*142; // учитываем коэффициент деления и получаем
    амплитудное значение
    f= f*0.707; // перевод амплитудного в действующее зна-
    чение
    f= f*0.0025; // перевод из значений АЦП в вольты
    OutLED (f); }
  // Не преодолен
  else
  {float f;
  OutLED (f=0);}}
```

Программирование ведётся целиком через собственную программную оболочку (IDE), бесплатно доступную с сайта Arduino. В этой оболочке имеется текстовый редактор, менеджер проектов, препроцессор, интерфейс для передачи данных от ПК к МК и наоборот (благодаря этому данные о напряжении и яркости передаются на компьютер посредством USB в течение всего времени работы программы), компилятор и инструменты для загрузки программы в МК. Оболочка написана на Java на основе проекта Processing, работает под Windows, Mac OS X и Linux.

6 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве экземпляров индикаторов для проведения эксперимента использовались полученные в более ранних исследованиях стандартные структуры из пяти слоёв на стеклянном основании, которые изображены на рисунке 1. Подложками являлись пластины толщиной от 1,5 до 3 мм из бесщелочного стекла. Слой люминофора, толщиной от 0,5 до 1,5 микрона, формировался из сульфида цинка, легированного марганцем. В роли прозрачного электрода применялись оксиды олова и индия, толщиной 0,2 микрона. В качестве диэлектриков брался твёрдый раствор оксидов иттрия и циркония, его толщина 0,3 микрона. Слой алюминия толщиной до 2 микрон являлся непрозрачным электродом. ТПЭЛИ установлен в светонепроницаемом корпусе.

В качестве приёмника оптического излучения применялся фотоэлемент на основе сульфида кадмия, сигнал с которого через операционный усилитель и фильтры поступает на первый вход АЦП МК. Напряжение с генератора питания ТПЭЛ-элемента через выпрямитель с делителем подаётся на второй вход АЦП МК.

В ходе эксперимента осуществлялись измерения яркости ТПЭЛИ в зависимости от поданного на него си-

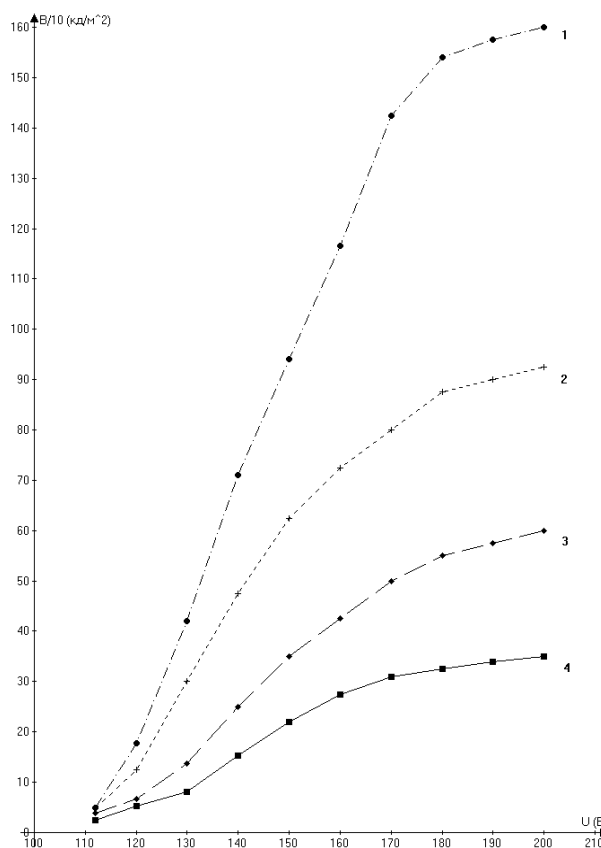


Рис. 6. Вольт-яркостная характеристика ТПЭЛИ: $f = 1$ кГц, $R = 30$ кОм (1); $f = 1$ кГц, $R = 68$ кОм (2); $f = 50$ Гц, $R = 30$ кОм (3); $f = 50$ Гц, $R = 68$ кОм (4)

нуoidalного сигнала. Представленные на рисунке 6 вольт-яркостные характеристики строились при частоте питающего напряжения 50 Гц и 1 кГц, значения последовательного сопротивления цепи (R) составляли 30 кОм и 68 кОм.

Можно заметить, что с возрастанием последовательного сопротивления цепи уменьшается яркость свечения индикаторов. Это объясняется тем, что при высоком сопротивлении длительность внутренних переходных процессов больше, чем при малом значении R [1, 7]. Также был определён рост яркости ТПЭЛИ, связанный с увеличением частоты питающего напряжения при неизменном сопротивлении R . Таким образом, полученные в результате эксперимента данные согласуются с результатами теоретического анализа [8, 9] и проведённых ранее измерений [1], что подтверждает состоятельность вышеописанного метода автоматизированного контроля ТПЭЛИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования в области автоматизации процессов измерения яркостных функциональных характеристик ТПЭЛИ позволили выделить следующие результаты:

- разработан алгоритм проведения измерений светотехнических параметров ТПЭЛИ;
- разработано программно-аппаратное решение реализации вышеописанного алгоритма.

Таким образом, на основе требований к устройствам и системам для определения значений параметров индикаторов реализована способность проведения операций измерения в автоматизированном режиме с возможностью управления данной системой и обработки результатов (в том числе формирование баз данных и обмен ими) с помощью персонального компьютера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.И., Самохвалов М.К. Электрические характеристики тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов. – Ульяновск : УлГТУ, 2006 – 125 с.
2. Николаев П.В., Максимова О.В., Евсевичев Д.А. Разработка методики автоматизации проектирования технологических процессов производства тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014 : матер. междунар. науч.-техн. конф. – 2014. – Т.2. – С. 63–65.
3. Беляев В.В., Мойсеенко С.В. Автоматизированный комплекс дифракционных измерений на пленках полимеров с периодическим микрорельефом // Информационные ресурсы России. – 2017. – № 5. – С. 35–40.
4. Гурин Н.Т., Сабитов О.Ю. Физика и техника пленочных электролюминесцентных излучателей переменного тока – М. : Лань, 2017 – 434 с.
5. Долгий А. Что показывает вольтметр переменного тока? // Радио. – 2006. – № 6. – С. 23–27.
6. Блог об Arduino, AVR, ARM, Linux и не только. – URL: <http://greenoakst.blogspot.ru/2012/01/arduino-7-spi.html> (дата обращения: 18.09.2019).
7. Сухарев Ю.Г., Андриянов А.В., Миронов В.С. Кинетика электрического поля, волны тока и яркости в тонкопленочных электролюминесцентных структурах // Журнал технической физики. – 1994. – Т. 64, № 8. – С. 48–54.
8. Гурин Н.Т. Анализ параметров ТПЭЛК с разными диэлектрическими слоями // Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1992. – № 3–4. – С. 74–77.
9. Гурин Н.Т., Сабитов О.Ю. Определение параметров и характеристик электролюминесценции в тонкопленочных излучателях на основе ZnS:Mn // Журнал технической физики – 2006. – Т. 76, № 8. – С. 50–62.

REFERENCES

1. Gusev A.I., Samokhvalov M.K. *Elektricheskie kharakteristiki tonkoplennochnykh elektroluminestsentnykh*

indikatorov [Electrical Characteristics of Thin-Film Electroluminescent Indicators]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2006. 125 p.

2. Nikolaev P.V., Maksimova O.V., Evsevichev D.A. *Razrabotka metodiki avtomatizatsii proektirovaniia tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva tonkoplennochnykh elektroluminestsentnykh indikatorov* [Developing of Computer-Aided Design Technique of Production Processes of Thin-Film Electroluminescent Indicators]. *Aktualnye problemy elektronnoego priborostroeniia APEP-2014. Mater. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of Int. Sci.- Tech. Conf. APEP-2014. Current Problems of Electronic Instrument-Making]. 2014, vol. 2, pp. 63–65.

3. Beliaev V.V., Moiseenko S.V. *Avtomatizirovannyi kompleks difraktsionnykh izmerenii na plenkakh polimerov s periodicheskim mikroreliefom* [Automated Complex of Diffraction Measurements on Polymeric Films with Periodic Microrelief]. *Informatsionnye resursy Rossii* [Information Resources of Russia], 2017, no. 5, pp. 35–40.

4. Gurin N.T., Sabitov O.Iu. *Fizika i tekhnika plennochnykh elektroluminestsentnykh izluchatelei peremennogo toka* [Physics and engineering of Alternating Current Electroluminescent Devices]. Moscow, Lan Publ., 2017. 434 p.

5. Dolgii A. *Chto pokazyvaet voltmetr peremennogo toka?* [What Does an Alternating Current Voltmeter Display?]. *Radio* [Radio], 2006, no. 6, pp. 23–27.

6. *Blog ob Arduino, AVR, ARM, Linux i ne tolko* [Weblog on Arduino, AVR, ARM, Linux etc.]. Available at: <http://greenoakst.blogspot.ru/2012/01/arduino-7-spi.html> (accessed: 18.09.2019).

7. Sukharev Iu.G., Andriianov A.V., Mironov V.S. *Kinetika elektricheskogo polia, volny toka i iarkosti v tonkoplennochnykh elektroluminestsentnykh strukturakh* [Kinetics of an Electrical Field, Current Wave, and Luminance in Thin-Film Electroluminescent Structures]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Technical Physics], 1994, vol. 64, no. 8, pp. 48–54.

8. Gurin N.T. *Analiz parametrov TPELK s raznymi dielektricheskimi sloiami* [TPELK Parameter Analysis with Different Dielectric Layers]. *Lazernaia tekhnika i optoelektronika* [Laser Technique and Optoelectronics], 1992, no. 3–4, pp. 74–77.

9. Gurin H.T., Sabitov O.Iu. *Opredelenie parametrov i kharakteristik elektroluminestsentsii v tonkoplennochnykh izluchateliakh na osnove ZnS:Mn* [Defining Parameters and Characteristics of Electroluminescence in Thin-Film Emitters Based on ZnS:Mn]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Technical Physics], 2006, vol. 76, no. 8, pp. 50–62.