

УДК 007.001.362

А. А. ДУДКИН

НЕЧЕТКАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СЛОЕВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» (ОИПИ НАН Беларуси)

Предложена новая структура нечеткой нейронной сети, которая представляет собой модификацию неокогнитрона для идентификации объектов топологии на полутоновых изображениях с искажениями яркости и смещения. Экспериментально показано, что разработанная нейронная сеть позволяет повысить точность идентификации.

Введение

Основной технологией изготовления сверхбольших интегральных схем является планарная технология, под которой понимают совокупность групповых технологических методов обработки участков монокристалла кремния, с помощью которых электронно-дырочные переходы получают локальной диффузией примесей с применением фотошаблонов. Как правило, большинство дефектов схем являются производственными и обусловлены технологией переноса рисунка топологии в поверхностный слой подложки методом фотолитографии.

Важной частью процесса производства интегральных микросхем являются процессы контроля качества формируемых топологических структур и соответствия топологии элементов проектной документации. Сложность процесса контроля связана с большим количеством очень маленьких элементов на фотошаблоне и нечетким изображением элементов, сформированном в системе автоматического контроля топологии [1]. Изображение представляет собой некоторое структурированное описание объекта (контактной площадки, контактного окна, диффузионного или металлизированного проводника и др.). Вследствие искажений объект имеет нечеткое описание как его яркостных характеристик, так и расположения. Поэтому перспективным направлением является разработка методов интеллектуального анализа дан-

ных (data mining) [2, 3]: нейронные сети, деревья решений, генетические алгоритмы, нечеткая логика и др. Среди нейронных сетей в настоящее время при анализе изображений топологии интегральных схем в data mining используются нейронные сети прямого распространения. При этом для их эффективного использования необходимо учитывать иерархию информационных признаков объектов. Наиболее подходящим для этой цели является неокогнитрон, который имеет иерархическую структуру слоев, ориентированную на моделирование зрительной системы человека [4].

В основе нечетких нейронных сетей лежит идея использования существующей выборки данных для определения параметров функций принадлежности, выводы делаются на основе аппарата нечеткой логики, а для нахождения параметров функций принадлежности используются алгоритмы обучения нейронных сетей. Основным достоинством использования нечеткой логики в разработке интеллектуальных систем является то, что решения нечеткой логики, как правило, просты для проверки и оптимизации.

В статье предложена модель нечеткой нейронной сети на основе неокогнитрона [5] для идентификации полутоновых изображений топологии интегральных микросхем, имеющих искажения формы и цвета. Для идентификации объекта весь набор информативных при-

знаков должен удовлетворять заданным условиям.

Разработка способа построения нечетких множеств дескрипторов топологических объектов

Рассмотрим две матрицы $W = (w_{i,j})$ и $A = (a_{i,j})$, где W – матрица пикселей эталонного изображения; A – образ матрицы W с искажениями. Вводятся два параметра B и R , которые задают диапазоны нечеткости объектов. Параметр B определяет максимально допустимое расстояние между двумя пикселями изображения, которые считаются эквивалентными. Параметр R определяет максимально допустимое смещение пикселей эталона на изображении (образе). Теперь функция нечеткого различия матриц A и W определяется следующим образом:

$$fd(A, W) = \frac{100}{XY} \sum_{x,y} d_{x,y},$$

где X, Y – размеры матрицы W . Нечеткость в неоконитроне [5] учитывалась при определении функции путем вычисления введения дополнительных параметров нейрона, задающих для каждого пикселя минимальные и максимальные значения яркости в интервале изменения значения сдвига.

Для нечеткого представления яркости пикселей полутонового изображения введем три параметра B_{min} , B_{mid} и B_{max} , которые соответствуют значению пикселей минимальной, средней и максимальной яркости. Таким образом, яркости пикселей можно разделить на две категории – светлые и темные. Функции принадлежности пикселей определяются следующим образом:

$$f_{min} = e^{-\frac{(x-B_{min})^2}{2b^2}}, \quad f_{mid} = e^{-\frac{(x-B_{mid})^2}{2b^2}}, \quad (1)$$

$$f_{max} = e^{-\frac{(x-B_{max})^2}{2b^2}},$$

где x – яркость заданного пикселя, b – некоторая задаваемая пользователем окрестность для каждого пикселя. Для примера, график функции f_{mid} представлен на рис. 1.

Параметры функции принадлежности могут варьироваться в зависимости от яркостных параметров исходного изображения. На рис. 2 изображен фрагмент топологии интегральной микросхемы. Как видно, разделение по диапазону яркости изображения позволяет выделить

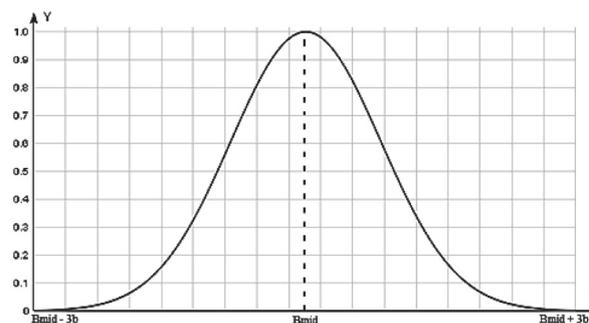


Рис. 1. Функция принадлежности пикселей со «средней» яркостью

(идентифицировать) структурные элементы топологического рисунка пластины (более светлые участки изображения соответствуют большему значению функции принадлежности).

Общая структура нечеткого нейрона представлена на рис. 3. В данной структуре выделено три блока, отвечающих за обработку исходного изображения с точки зрения «светлых», «средних», и «темных пикселей». За ними следует обобщающий блок, который анализирует результаты, полученные из предыдущих трех блоков. Таким образом, предложенная модель нейрона оперирует не яркостями пикселей, а значениями функций принадлежности пикселей к определенной группе яркости.

Нечеткая нейронная сеть (рис. 4) состоит из двух основных частей – блока нечетких правил, включающего слой F_1 фазификации и слой F_2 свертки функций принадлежности (T -нормирования), и многослойной сети типа неоконитрон.

На слой F_1 подается обрабатываемый образ, в результате получается три категории пикселей изображения – «светлые», «средние» и «темные». В слое F_2 реализованы основные нечеткие правила. Внутренние слои НС S_1, \dots, S_{n-1} производят последовательную обработку поступающей информации, а выходной слой сети O генерирует ответ, в виде максимальной активности одного из своих нейронов (по числу идентифицируемых объектов). Каждый S -слой преобразует яркости пикселей изображения в значения активностей нейронов. Нейроны, выделяющие одинаковый признак на изображении, объединяются в одну группу (выделены жирными линиями). При этом, каждая группа нейронов содержит три типа нейронов – для обработки трех категорий пикселей изо-

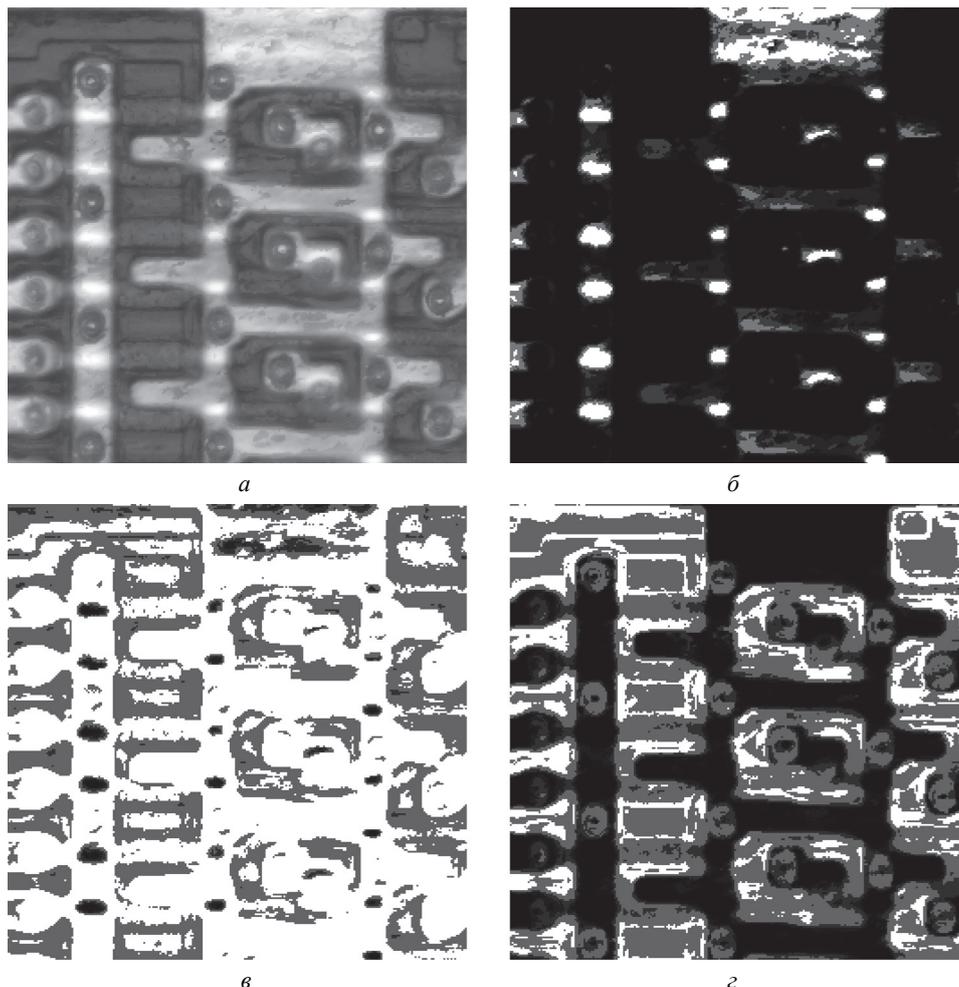


Рис. 2. – Нечеткое представление яркостей объектов: *a* – исходное изображение, *б* – изображение с выделенными светлыми участками, *в* – изображение с выделенными участками «средней» яркости, *г* – изображение с выделенными темными участками

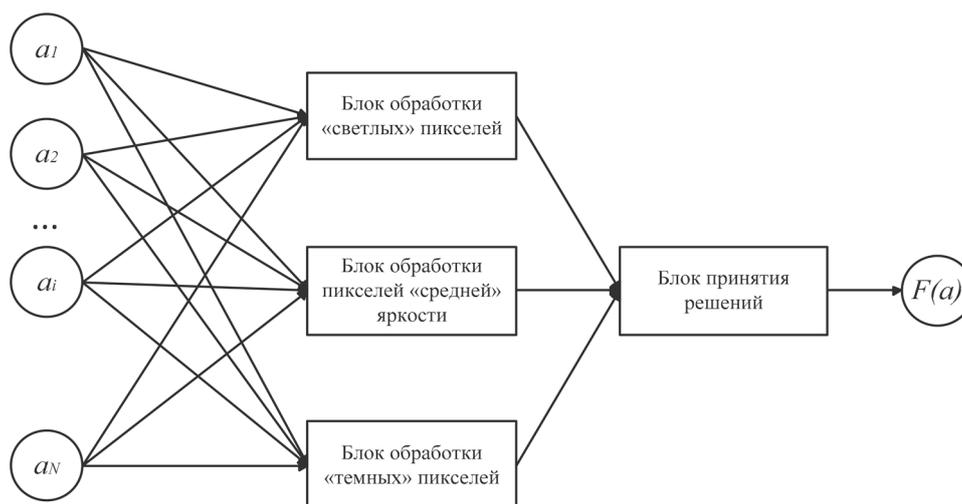


Рис. 3. – Обобщенная модель нечеткого нейрона

бражения – «светлых», «средних» и «темных». Исходными данными для активации каждого нейрона из отдельной группы является часть данных из предыдущего слоя с соответствующими

этому нейрону смещением. Смещение определяется в соответствии с положением нейрона внутри группы. Необходимо обратить внимание, что каждый нейрон имеет часть ре-

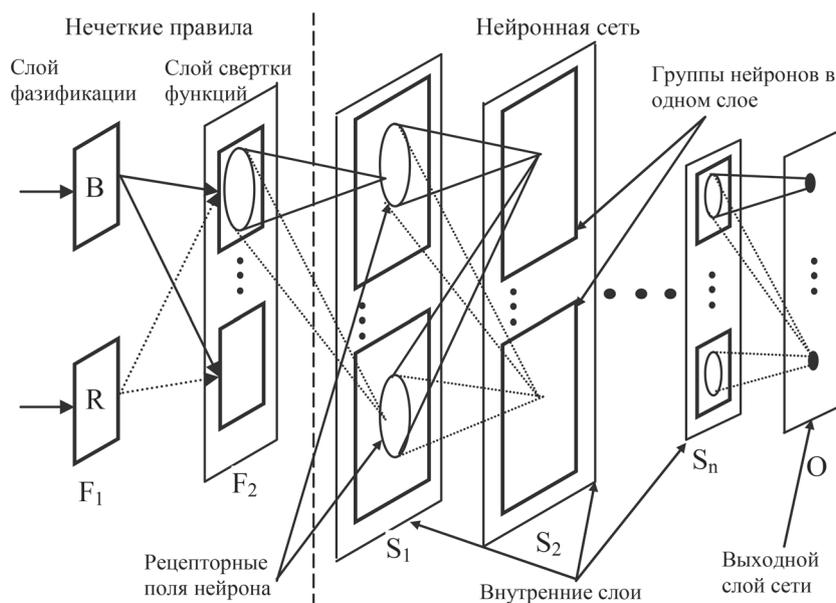


Рис. 4. – Структура нечеткой нейронной сети

цепторного поля в каждой из групп предыдущего слоя соответствующей категории.

Тестирование предложенной модели нечеткой нейронной сети выполнено при различной конфигурации сети (с различными значениями параметров яркостных и геометрических искажений B и R) на изображениях топологии интегральных микросхем, полученных на оборудовании «КБТЭМ-ОМО» [6]. В качестве обучающих данных использовалось 3 типа фрагментов топологии [7]. Предложенная сеть сравнивалась с нейронной сетью, реализующей стандартный корреляционный метод идентификации, и нейронной сетью на основе неоконгитрона [5] (табл. 1).

Таблица 1. Точность распознавания

Тип сети	Число объектов	Идентифицировано (%)	Не идентифицировано (%)
Корреляция	116	95 (81,9%)	21 (18,1%)
Сеть [5]		103 (88,8%)	13 (11,2%)
Нечеткая сеть		114 (98,3%)	2 (1,7%)

Как видно, нечеткая сеть показала лучшие результаты идентификации по сравнению

с другими представленными типами сетей. Таким образом, предложенная модель нечеткой нейронной сети может быть использована для контроля топологических структур интегральных микросхем, что позволит сделать систему контроля инвариантной к возможным геометрическим искажениям типа смещение и яркостным искажениям изображения топологии.

Выводы

В данной статье предложен способ вычисления функций принадлежности для идентификации топологических объектов на изображениях топологических слоев интегральных микросхем, что позволяет вычислить нечеткие параметры и сделать анализ топологии инвариантным к яркостным искажениям и геометрическим искажениям типа смещения.

Использование предложенной модели нечеткой нейронной сети дает возможность повысить эффективность комплексов бездефектного изготовления фотошаблонов для интегральных микросхем субмикронной технологии.

Литература

1. **Точицкий, Я. И.** Оптические технологии микро- и нанозлектроники / Я. И. Точицкий. – Минск: РИВШ, 2010. – 298 с.
2. **Lughofer, E.** Evolving Fuzzy Systems – Methodologies, Advanced Concepts and Applications / E. Lughofer. – Berlin: Physica-Verlag, 2011. – 439 p.
3. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

4. Шульговский, В. В. Основы нейрофизиологии. Учебное пособие для студентов вузов / В. В. Шульговский. – М.: Аспект Пресс, 2000. – 277 с.
5. Дудкин, А. А. Неокогнитрон для распознавания объектов топологии интегральных микросхем // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 339–347.
6. Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм / С. М. Аваков [и др.] // Фотоника (прил. к журн. «Электроника НТБ»). – 2007. – № 6. – С. 35–39.
7. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2008. – 1103 с.

Поступила 15.09.15

A. A. Doudkin

FUZZY NEURAL NETWORK FOR OBJECT IDENTIFICATION ON INTEGRATED CIRCUIT LAYOUTS

Fuzzy neural network model based on neocognitron is proposed to identify layout objects on images of topological layers of integrated circuits. Testing of the model on images of real chip layouts was showed a higher degree of identification of the proposed neural network in comparison to base neocognitron.