Статья поступила в редакцию 30.09.15. Ред. рег. № 2365

The article has entered in publishing office 30.09.15. Ed. reg. No. 2365

УДК 629.9:004.657

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ ФОТОСЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК

В.С. Аbruков, А.В. Смирнов

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова
РФ 428015, Чувашская Республика, Чебоксары Московский пр., 15
тел.: 8(8352)45-56-00; e-mail: abrukov@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.008

Заключение совета рецензентов: 07.10.15 Заключение совета экспертов: 14.10.15 Принято к публикации: 23.10.15

С помощью искусственных нейронных сетей созданы многофакторные вычислительные модели, обобщающие результаты экспериментов по получению фотосенсоров на основе тонких пленок металлов и нанопленок линейно-цепочечного углерода. Полученные модели позволяют решать прямые и обратные задачи создания фотосенсоров с заданными характеристиками, а также прогнозировать новые технологии их создания.

Ключевые слова: фотосенсоры, тонкие пленки, металлы, линейно-цепочечный углерод, искусственные нейронные сети, многофакторные вычислительные модели.

NEURAL NETWORK MODELS OF PHOTSENSORS BASED ON THIN FILMS

V.S. Abrukov, V.A. Smirnov

Chuvash State University named after I.N. Ulyanov
15 Moskovsky ave., Cheboksary, Chuvash Republic, 428015 Russian Federation
ph.: 8(8352) 45-56-00, e-mail: abrukov@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.008

Referred 7 October 2015 Received in revised form 14 October 2015 Accepted 23 October 2015

The paper deals with the multifactor computing models, summarizing the results of experiments on the development of photosensors based on thin films of metals and nanofilms of linear-chain carbon, which are created by using artificial neural networks. These models allow engineers to solve the direct and inverse problems of creating of photosensors with desired characteristics, as well as to predict the new technology to create ones.

Keywords: photoelectric sensors, thin films, metals, linear-chain carbon, artificial neural networks, multifactor computational models.

Абруков Виктор Сергеевич
Victor S. Abrukov

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой прикладной физики и нанотехнологий Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова.

Образование: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова.

Область научных интересов: солнечная энергетика, интеллектуальный анализ данных.

Публикации: 150.

Information about the author: DSc (physics and mathematics), Head of Applied Physics and Nanotechnology department, Chuvash State University named after I.N. Ulyanova.

Education: Chuvash State University named after I.N. Ulyanov.

Research area: solar energy, data mining.

Publications: 150.

Смирнов Александр
Вячеславович
Alexander V. Smirnov

Сведения об авторе: инженер ЧГУ им. И.Н. Ульянова, председатель Ассоциации молодых физиков Чувашии.

Образование: Чувашский государственный университет.

Область научных интересов: углеродные нанотехнологии, солнечные энергоустановки, пленки серебра.

Публикации: 35.

Information about the author: engineer in CSU named after I.N. Ulyanova, chairman of the Association of Young Physicists of Chuvashia.

Education: Chuvash State University named after I.N. Ulyanov.

Research area: carbon nanotechnology, solar power, silver films.

Publications: 35.

Введение

В настоящее время тонкопленочные технологии относятся к одному из перспективных направлений научных исследований в области электроники и энергетики.

В Чувашском университете проводятся исследования по разработке технологий получения фотосенсоров на основе тонких пленок металлов и нанопленок линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) [1, 2].

Фотосенсоры производят методом терморезистивного испарения путём напыления пленок металлов на подложку из монокристаллического кремния с последующим напылением на пленки металлов пленок ЛЦУ, легированных и не легированных азотом. Эксперименты проводились в вакууме (установка УВР-3М и «УРМ Алмаз») при давлении 10^{-4} Па.

Методика создания нейросетевых моделей и обсуждение результатов моделирования

Для всех полученных систем были измерены вольтамперные характеристики при освещении естественным светом и без освещения.

Эксперимент был многофакторным. Поэтому, с целью выявления закономерностей электрофизических характеристик с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС), были созданы многофакторные вычислительные модели, способные обобщать все закономерности вольтамперных характеристик.

Следует отметить, что ИНС являются уникальным инструментом аппроксимации функций нескольких переменных и построения многофакторных вычислительных моделей экспериментальных данных. Примеры и технологии ИНС описаны в [3–5].

Для создания ИНС-моделей применялась отечественная аналитическая платформа «Deductor» производства BasegroupLab, г. Рязань (www.basegroup.ru).

Пример экспериментальных данных при построении ИНС-моделей приведен в табл. 1. В целом при моделировании использовались следующие данные: названия металлов (Cd, Ag, Ni) и сплава Ag-Ni; значения полной электронной энергии атомов этих металлов, энергии ионизации, сродства к электрону, электроотрицательности по Полингу; наличие или отсутствие пленок ЛЦУ; значения темнового тока, фототока и напряжения, а также отношения k фототока к темновому току.

Таблица 1

Пример экспериментальных данных по характеристикам фотосенсоров и параметрам технологии, использованных при создании ИНС-моделей (часть данных)

Table 1

An example of the experimental data on the characteristics and parameters of photosensor technologies used to create ANN-models (a part of the data)

Полная электронная энергия, а.е.э	ЛЦУ	ЛЦУ лег.N	Термообработка	U, В	$k = I_{\text{фото}} / I_{\text{темн}}$
-6707,54	нет	нет	нет	0,50	0,95
-6707,54	нет	нет	нет	3,13	6,80
-6707,54	нет	нет	нет	4,54	8,45
-6707,54	нет	нет	нет	5,56	9,68
-6707,54	нет	нет	нет	6,36	10,49
-6707,54	нет	нет	нет	6,97	10,62
-6707,54	нет	нет	нет	7,78	9,13
-6707,54	нет	нет	нет	8,18	8,57
-6707,54	нет	нет	нет	8,38	8,47
-6707,54	нет	нет	нет	8,99	8,38
-6707,54	нет	нет	нет	10,00	8,46
-6707,54	нет	нет	да	4,54	1,54
...	...	...	...	...	...
-6707,54	нет	нет	да	10,00	280,66
-5466,94	нет	да	да	0,20	0,63
...	...	...	...	...	...
-5466,94	нет	да	да	20,00	386,15
-5199,47	нет	да	да	0,20	0,76
...	...	...	...	...	...
-5199,47	нет	да	да	20,00	46,25
-1507,96	нет	да	нет	0,61	0,31
...	...	...	...	...	...
-1507,96	нет	да	нет	20,00	1,76
-1507,96	нет	да	да	0,30	0,07
...	...	...	...	...	...
-1507,96	нет	да	да	10,00	3,65
-5466,94	нет	нет	да	3,02	1,04
...	...	...	...	...	...
-5466,94	нет	нет	да	20,00	5,71
-5466,94	да	нет	да	1,52	1,39
...	...	...	...	...	...
-5466,94	да	нет	да	10,00	23,04
-5199,47	нет	да	нет	1,01	95,59
...	...	...	...	...	...
-5199,47	нет	да	нет	20,00	2,69
-5199,47	да	нет	да	0,30	3,41
...	...	...	...	...	...
-5199,47	да	нет	да	10,00	66,98

В табл. 2 приведены результаты корреляционного анализа экспериментальных данных. Оценивалась корреляция между отношением фототока к темновому току и рядом других характеристик и параметров («Входные поля»). Анализ полученных результатов позволяет сделать важный вывод – значения корреляции показывают, что линейной связи k с входными

факторами нет (кроме темнового тока $I_{\text{темн.}}$, для которого некоторая линейная связь имеется), и, следовательно, задача является существенно нелинейной. Для выявления этой связи не подходят классические математические, статистические и графические методы анализа данных.

Таблица 2

Результаты корреляционного анализа экспериментальных данных

Table 2

The results of correlation analysis of experimental data

Входные поля		Корреляция с выходными полями
№	Поле	$k = I_{\text{фото}} / I_{\text{темн}}$
1	Полная электронная энергия, а.е.э	0,426
2	Энергия ионизации, kcal/mol	-0,373
3	Сродство к электрону, kcal/mol	0,43
4	Электроотр. по Полингу	0,414
5	$I_{\text{темн.}}$	0,649
6	$I_{\text{фото}}$	0,309
7	U , В	0,383

Для моделирования были выбраны структуры ИНС, соответствующие характеру и количеству собранных данных. Было получено несколько ИНС-моделей, решающих как прямые, так и обратные задачи выявления закономерностей, содержащихся в экспериментальных данных.

Ниже приведена методика решения прямой задачи – выявление закономерностей зависимости k от напряжения U и технологических параметров создания фотосенсоров.

На рис. 1 приведена архитектура ИНС, использованная для создания модели прямой задачи.

Рис. 1. Архитектура ИНС-модели зависимости отношения k фототока к темновому току от напряжения U и технологических параметров создания фотосенсоров.

Fig. 1. Architecture of ANN-model of the ratio k of the photocurrent to the dark current on the voltage U and technological parameters of a creation of photosensors. On a black background on the left – the factors that determine the value of k

Обучение ИНС заключалось в том, что различные наборы значений первых пяти столбцов табл. 1 подавались на входной слой ИНС, а соответствующие значения k устанавливались в выходном слое ИНС, и с помощью известного метода обучения ИНС-метода «обратного распространения ошибки» создавалась многофакторная вычислительная ИНС-модель, выявляющая зависимости k от входных факторов.

Примеры, иллюстрирующие выявленные моделью закономерности зависимости k от напряжения и технологических параметров создания фотосенсоров (сорта металла в виде значения полной электронной энергии атомов металла, наличия пленок ЛЦУ или ЛЦУ легированной азотом; наличия термообработки), представлены на рис. 2–5 и 7 с краткими комментариями.

Приведена только малая часть (не более 5 %) отличающихся друг от друга графиков, отражающих

выявленные закономерности экспериментальной функции пяти переменных k .

На всех рисунках, в таблице над графиками, приведены значения входных факторов. В нижней строчке таблицы – значение k для вышеприведенных значений факторов. На графике значения k отмечены на оси ординат. Над левой частью графика галочкой отмечен аргумент функции k , а на графике его значения отмечены на оси абсцисс.

Полученный комплекс ИНС-моделей можно рассматривать как базу знаний характеристик фотосенсоров и технологий их создания на основе тонких пленок металлов и нанопленок линейно-цепочечного углерода. Эта база знаний может решать задачи интерполяции и экстраполяции выявленных закономерностей, и тем самым решать различные научные и технологические задачи разработки новых типов фотосенсоров.

Рис. 2. Экран ИНС-модели для задачи интерполяции зависимости отношения k фототока к темновому току от полной электронной энергии металла или его сплава при $U = 10$ В. Остальные технологические параметры: ЛЦУ легированная азотом – «да», термообработка – «да». При увеличении U до 20 В график смещается вправо, а при уменьшении U до 2 В влево

Fig. 2. Screen of ANN-model for the interpolation of the ratio k of the photocurrent to the dark current on the total electronic energy of a metal or an alloy when $U = 10$ V. The other technological parameters are as follows: LCC doped with nitrogen – "yes", thermal treatment – "yes." When U increases to 20 V the graph is shifted to the right, and when U decreases to 2 V the graph is shifted to the left

На рисунке 3, в отличие от рис. 2, в качестве технологического параметра появляется «термообработка» – «нет». Анализ показывает, что отсутствие «термообработки» существенно меняет закономерности зависимости k как качественно (график имеет

ярко выраженный экстремум), так и количественно (максимальное значение k на порядок меньше, чем при «термообработке»).

Рис. 3. Экран ИНС-модели для задачи интерполяции зависимости отношения k фототока к темновому току от полной электронной энергии металла или его сплава при $U = 2$ В

Fig. 3. Screen of ANN-model for the interpolation of the ratio k of the photocurrent to the dark current on the total electronic energy metal or alloy when $U=2$ В

Рис. 4. Экран ИНС-модели для задачи интерполяции зависимости отношения k фототока к темновому току от напряжения U . Остальные технологические параметры: полная электронная энергия = -5200, ЛЦУ легированная азотом – «да», термообработка – «да»

Fig. 4. Screen of ANN-model for the interpolation of the ratio k of the photocurrent to the dark current on the voltage U . The other technological parameters are as follows: the total electron energy = -5200, LCC doped with nitrogen – "yes", thermal treatment – "yes"

На рис. 5, в отличие от случая, изображённого на рис. 4, приведена зависимость k от U , когда на металлическую пленку напылялась пленка ЛЦУ, не

легированная азотом. Диапазон изменения k увеличился в этом случае в три раза.

Рис. 5. Экран ИНС-модели для задачи интерполяции зависимости отношения k фототока к темновому току от напряжения U .

Остальные технологические параметры: полная электронная энергия = -6200, термообработка – «да»
 Fig. 5. Screen of ANN-model for the interpolation of the ratio of the photocurrent to the dark current k on voltage U .
 The other technological parameters are as follows: the total electronic energy = -6200, heat treatment - "yes"

На рис. 6 представлена архитектура одного из вариантов ИНС-модели решения обратной задачи – определение того, какой металл необходимо использовать (какая должна быть полная электронная энергия атомов металла), чтобы при заданных технологических параметрах (наличие нелегированной ЛЦУ,

ЛЦУ, легированной азотом, и термообработки) и заданном напряжении получить требуемое значение k . При создании этой ИНС-модели использовалась та же табл. 1, но целевыми функциями были полная электронная энергия металла и значение k .

Рис. 6. Архитектура ИНС-модели решения обратной задачи
 Fig. 6. Architecture of ANN-model of solving the inverse problem

На рис. 7 приведена иллюстрация решения данной обратной задачи.

Рис. 7. Экран ИНС-модели решения обратной задачи. Над графиками указаны значения технологических параметров. «Входные» данные: ЛЦУ – «да», ЛЦУ, легированная азотом – «нет», термообработка – «да» и значение напряжения.

Нижне «Выходные» данные: полная электронная энергия и значение k

Fig. 7. Screen of ANN-model for solving of an inverse problem. Above graphs it is indicated the values of technological parameters. The "input" data: LCC – "yes," LCC doped with nitrogen – "no" heat treatment – "yes" and the voltage. The following are the "output" data: the total electron energy and the values of k

Результаты вычисления показывают, что если фотосенсор создается с помощью ЛЦУ и термообработки, и его рабочее напряжение равно 5 В, то для того чтобы k было равно примерно 27, числовое значение полной электронной энергии металла должно быть примерно 5 600. Графики показывают, как в зависимости от напряжения меняются значения k и обеспечивающие эти значения k требуемые значения полной электронной энергии.

Заключение

В статье представлена только малая часть созданных ИНС-моделей. В целом полученный комплекс ИНС-моделей является базой знаний характеристик и технологий создания фотосенсоров на основе тонких пленок металлов и нанопленок линейно-цепочечного углерода, которая способна решать различные научные и технологические задачи разработки новых типов фотодатчиков.

Цель дальнейших работ – создание базы знаний характеристик и технологий новых перспективных наноматериалов различной структуры и назначения.

Мы приглашаем всех, кто считает необходимым обобщить имеющиеся экспериментальные результаты в области нанотехнологий на принципиально новом уровне, к совместной работе в этом направлении.

Список литературы:

1. Патент на изобретение RUS 2360036 C23C26/00. Способ получения углеродного наноматериала, содержащего металл / Кочаков В.Д., Новиков Н.Д. // 22.10.2007.
2. Кочаков В.Д., Новиков Н.Д., Васильев А.И., Смирнов А.В. Элементы электроники на основе пленок линейно-цепочечного углерода // Вестник Чувашского университета. 2011. № 3. С. 194–197.
3. Аbruков В.С., Аbruков С.В., Смирнов А.В., Карлович Е.В. Методы интеллектуального анализа данных при создании баз знаний // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 140–146.
4. Аbruков С.В., Смирнов А.В. Создание базы знаний – новое направление исследований наноматериалов и нанотехнологий // Вестник Чувашского университета. Чебоксары, 2013. Вып. 3. С. 52–56.
5. Abruков V.S., Karlovich E.V., Afanasyev V.N., Semenov Yu.V., Abruков S.V. Creation of propellant combustion models by means of data mining tools // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. 2010. № 9(5). P. 385–396.

References

1. Kochakov V.D., Novikov N.D. Sposob polucheniya uglerodnogo nanomateriala, soderzhashego metall Patent

na izobretenie RUS 2360036 C23C26/00 // 22.10.2007 (in Russ.).

2. Kochakov V.D., Novikov N.D., Vasil'ev A.I., Smirnov A.V. Elementy elektroniki na osnove plenok linejno-cepochecnogo ugleroda. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2011, no. 3, pp. 194–197 (in Russ.).

3. Abrukov V.S., Abrukov S.V., Smirnov A.V., Karlovich E.V. Metody intellektual'nogo analiza dannyh pri sozdanii baz znanij. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 140–146 (in Russ.).

4. Abrukov S.V., Smirnov A.V. Sozdanie bazy znanij – novoe napravlenie issledovanij nanomaterialov i nanotekhnologii. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, Cheboksary, 2013, issue 3, pp. 52–56 (in Russ.).

5. Abrukov V.S., Karlovich E.V., Afanasyev V.N., Semenov Yu.V., Abrukov S.V. Sreation of propellant combustion models by means of data mining tools. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2010, no. 9(5), pp. 385–396 (in Eng.).

Транслитерация по ISO 9:1995

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

- Large and varied exhibition space ■
- Strong representation of the solar industry ■
- Poland's largest exhibition of the RES ■
- Attractive events program ■
- Diverse group of professionals visitors ■

**GreenPower as a meeting
of representatives of all
sectors of RES:**

solar energy

wind energy

hydropower

geothermal energy

biomass, biofuels

energy-saving technologies

greenpower.mtp.pl/en/