

Системная онтология классов в задаче обнаружения негодных изделий в полупроводниковом производстве

Т. Л. Качанова¹, Б. Ф. Фомин²

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)

¹ kachanova-tamara@mail.ru, ²bfomin@mail.ru

К. А. Туральчук

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
kost.tk@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается метод естественной системной классификации, разработанный в рамках парадигмы физики открытых систем. Метод раскрывает системную онтологию классов по эмпирическому описанию предметной области. В статье рассмотрены конструктивные объекты метода, полученные по эмпирическим данным мониторинга процесса производства полупроводниковых изделий. Для классов годных и негодных изделий определены существенные признаки, архетипы, репрезентанты, построена морфология классов.

Ключевые слова: физика открытых систем; системная онтология; естественная классификация; обнаружение брака; полупроводниковое производство

I. ВВЕДЕНИЕ

В области производства полупроводниковых изделий (ППИ) важной задачей является оценка качества изделия и идентификация потенциально ненадежных изделий. Технологический процесс производства ППИ включает сотни этапов. Современные полупроводниковые производства оснащены оборудованием, позволяющим осуществлять мониторинг технологического процесса на разных этапах. Число измеряемых показателей может достигать сотен и тысяч. Задача своевременного обнаружения некачественных изделий связана с проблемой многомерности и гетерогенности данных.

Исследуются данные SECOM (semi-conductor manufacturing), представленные в статье McCann et al [1], находящиеся в открытом доступе. Система данных включает описание ППИ по набору показателей, измеряемых на разных технологических этапах. Описание показателей, специфики их измерения, а также особенностей производства отсутствует. Общее число изделий – 1567, из них 1463 – надлежащего качества (класс 1), 104 – ненадлежащего качества (класс 2). Число измеряемых показателей – 561 [2].

Задача заключается в выявлении характерных признаков, свойственных ППИ, отличающих изделия надлежащего качества от негодных изделий. Надежное решение задачи и построение процедуры идентификации

может быть осуществлено в опоре на естественные признаки и онтологию классов.

II. МЕТОД

A. Ключевые положения метода

Методологические основания построения системной онтологии классов разработаны в рамках физики открытых систем [3, 4]. На этой основе создан научный метод, нацеленный на решение задач естественной классификации [5, 6]. Метод базируется на трех принципах: естественности; системности; двойственности классификации. Согласно принципу естественности классы объединяют объекты, сходные по своей природе. Принцип системности утверждает, что классификационное поле (КП), охватывающее рассматриваемые классы, обладает единством целого, имеющего общее онтологическое основание. Принцип двойственности классификации полагает двухкомпонентную структуру КП – интенциональную (семантический компонент) и экстенциональную (денотативный компонент). Ключевые положения метода воплощены в его конструктивных объектах и отношениях между объектами метода (рис. 1).

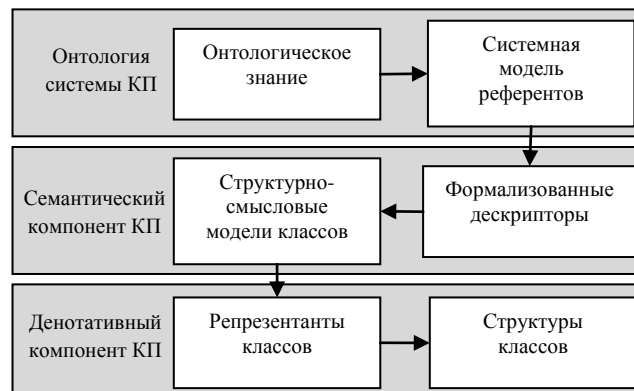


Рис. 1. Структурная схема метода

Решение задачи естественной классификации осуществляется поэтапно. На первом этапе производится онтологическое знание о системе, изначально заданной эмпирическим описанием объектов (референтов классов). Знание об онтологии КП содержится в онтологическом знании о системе. На втором этапе знание об онтологии системы эксплицируется в знание о классах и КП. Знание о системе и знание о КП разворачиваются на двух уровнях: смысловом (интенционал); объектно-эмпирическом (экстенционал).

В. Объекты метода

Объект «Системная модель референтов». Этот объект выявляет элементы онтологического знания о системе (показатели и эталоны), обладающие потенциалом к различению классов КП. Каждый эталон выступает системным гомологом состояния уникального качества системы и воплощается во множестве референтов КП. Метод устанавливает эталоны, распространяющие свойства состояний уникальных собственных качеств системы на конкретные группы референтов классов КП. В каждом эталоне выделяется его ядро – инвариант форм проявления изменчивости конкретного состояния собственного качества системы.

Объект «Формализованный дескриптор». В семантическом компоненте КП этот объект несет в себе знание о каком-то одном определенном характерном и значимом свойстве класса. Ядро эталона (далее – ядерность) становится формализованным дескриптором, если он отвечает идеям чистоты, частотности и референтной соотнесенности (дескриптор 1-го ранга) [3]. При неполной референтной соотнесенности полного множества дескрипторов 1-го ранга последовательно рассматриваются все возможные сочетания пар, троек и т.д. ядерностей с построением формализованных дескрипторов 2-го, 3-го и более высоких рангов.

Объект «Структурно-смысловая модель». В семантическом компоненте КП структурно-смысловая модель представляет собой организованное целое, части которого (формализованные дескрипторы) связаны отношениями тождества, антиномии, включения, наследования и подобия. В рамках каждого класса КП структурно-смысловая модель имеет иерархическую структуру. В ней выделяются центр, ядро и периферия. Данная модель раскрывает онтологию класса КП и выступает в качестве реконструкции интенционала класса.

Объект «Репрезентант». В денотативном компоненте КП репрезентант представляет образцовый объект класса, наделенный всеми существенными и отличительными признаками класса. Он задается набором характерных показателей класса с установленными для них уровнями значений, через которые на основании идеи прототипичности свойства класса передаются в предельном виде.

Объект «Структура класса». В денотативном компоненте КП пространства решений метода структура класса задает устройство каждого класса и КП в целом, выделяя в денотатах классов шесть областей: центр (Ц), ядерную область (Я), околядерную область (ОЯ),

ближнюю периферию (БП), дальнюю периферию (ДП), смежную область (С). Границы областей определяются на основе отношения сходства референтов КП с репрезентантами классов.

Объект «Оценки качества классификации». Этот объект дает представление о правильности и завершенности построенных реконструкций интенционалов и экстенционалов классов КП.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

А. КП как система

Сложность системы преодолена путем построения представительных наборов эталонов и моделей форм воплощения эталонов методами ФОС, табл. I.

ТАБЛИЦА I Оценки системного знания

Оценки	
Количество показателей	476
Количество системных моделей	363
Количество эталонов	1452
Количество моделей форм воплощения эталонов	1445
Среднее число эталонов на референт	109
Доля реконструированных референтов	1.0

Каждый эталон характеризует одно уникальное состояние одного определенного качества системы. Вместо эталона метод использует его ядерность, табл. II.

ТАБЛИЦА II УСТРОЕНИЕ ЯДЕРНОСТИ P26 L/L

Показатель	Системная роль	Уровень значения	Граница
P26	О	L	≤ 1.271
P106	Я1	L	≤ 0.001
P33	Я2	H	≥ 85.44
P500	Я2	H	> 0
Количество референтов 1-го класса: 95			
Количество референтов 2-го класса: 3			

Для каждого показателя указаны его системная роль (О – особая вершина; Я1 (Я2) – вершина в ядре фактора 1 (фактора 2)), уровень значения (L – низкий, H – высокий), граница значений. Каждому эталону соответствуют определенные референты классов.

В. Системная модель референтов

Возможность решения классификационной задачи на основе онтологического знания установлена путем построения системной модели референтов и выявления на ее основе элементов знания об онтологии системы – показателей и эталонов, обладающих реальным потенциалом к различению классов. Для каждого класса ППИ определены уникальные наборы доминантных показателей и доминантных ядерностей, табл. III.

ТАБЛИЦА III ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ РЕФЕРЕНТОВ КП

Оценки	Класс ППИ	
	1-ый	2-ой
Общее число показателей	476	
Доминантные показатели	103 (21%)	103 (21%)
Общее число моделей форм воплощения	1445	
Доминантные ядерности	130 (9%)	142 (10%)

Невысокое количество доминантных показателей и ядерностей указывает на отсутствие сильно выраженных различий классов.

С. Формализованные дескрипторы

Получены формализованные дескрипторы, выражающие характерные свойства классов и отвечающие идее соотнесенности с определенными группами референтов классов. В табл. IV представлены характеристики наборов формализованных дескрипторов.

ТАБЛИЦА IV ФОРМАЛИЗОВАННЫЕ ДЕСКРИПТОРЫ

Класс ППИ	Класс ППИ	
	1-ый	2-ой
Общее число формализованных дескрипторов	1165	1006
Распределение дескрипторов по рангам		
Ранг 1	4	0
Ранг 2	1161	1
Ранг 3	0	1005
Охват референтов	1393 (95%)	103 (99.3%)

Большинство дескрипторов первого класса относится ко второму рангу. Большинство дескрипторов второго класса относится к третьему рангу, то есть являются более сложными. Это свидетельствует о большей неоднородности второго класса.

Характерное различие классов проявляется в распределении референтной поддержки дескрипторов (рис. 2).

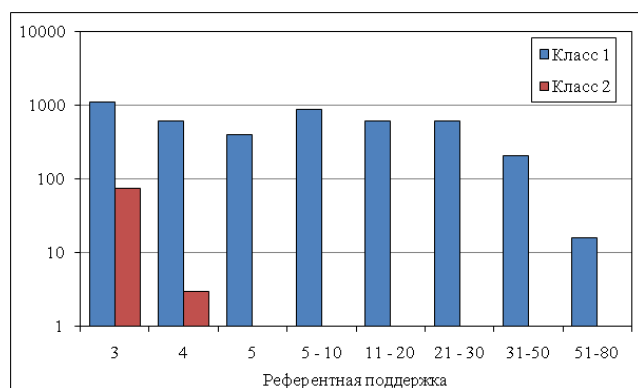


Рис. 2. Распределение дескрипторов по референтной поддержке

Для второго класса получены формализованные дескрипторы только с минимально допустимой поддержкой (3 и 4). Для первого класса величина средней поддержки составляет 11 референтов. Дескриптор «P29_2 & P460_4» первого класса имеет максимальную поддержку, равную 74 референтам.

Среднее число показателей, входящих в расширенную предикатную форму дескрипторов первого класса, составляет 9 показателей. Для дескрипторов второго класса среднее число показателей равно 15.

В табл. V представлены примеры дескрипторов для разных классов и рангов.

ТАБЛИЦА V ПРИМЕРЫ ФОРМАЛИЗОВАННЫХ ДЕСКРИПТОРОВ

Класс	Предикатная форма	Расширенная предикатная форма	Поддержка
1	P151 HL	P151↑ & P159↓ & P572↓ & P294↓	22
	P28 LL & P455 HL	P28↓ & P106↓ & P33↑ & P455↑ & P298↓ & P439↓ & P163↓	60
2	P337 HL & P585 LL	P337↑ & P239↑ & P445↓ & P546↓ & P79↓ & P585↓ & P57↑ & P294↑ & P97↑ & P67↓ & P61↓ & P71↓ & P546↓	3
	P220 HL & P412 LL & P554 HR	P220↑ & P11↑ & P551↑ & P412↓ & P278↑ & P143↑ & P554↑ & P96↑ & P364↑ & P226↑ & P498↑	5

Для каждого дескриптора указаны: класс КП; предикатная форма (имя эталона или комбинация имен эталонов); расширенная предикатная форма, состоящая из показателей ядерностей дескриптора и уровня значения для каждого показателя (символ «↓» («↑») – низкий (высокий) уровень); референтная поддержка.

D. Структурно-смысловая модель класса

Для каждого класса получена его иерархическая структурно-смысловая модель, в которой выделены: центр (набор конstituентов денотативного компонента КП); ядро (набор системно-обусловленных естественных свойств класса как целого); периферия (набор менее значимых системно-обусловленных свойств, характерных для отдельных групп референтов класса)

Центр структурно-смысловой модели каждого класса содержит значительно меньшее число дескрипторов по сравнению с полным множеством: для первого класса – 187, для второго класса – 39. При этом объем референтного покрытия сохраняется на прежнем уровне: 95% референтов первого класса, 99% референтов второго класса, табл. VI.

ТАБЛИЦА VI ОЦЕНКИ СТРУКТУРНО-СМЫСЛОВОЙ МОДЕЛИ

Оценки	Класс ППИ		Всего
	1-ый	2-ой	
Число дескрипторов в ядре	1065	601	1666
Компактность ядра	0.04	0.03	-
Охват референтов	1393	103	1496
Число дескрипторов в центре	187	39	226
Охват референтов	1392	103	1495

Неполный охват референтов дескрипторами свидетельствует о гетерогенности классов КП. Неохваченные референты не типичны, обладают выраженной индивидуальностью и не отвечают идее частотности. Переход от ядра к центру обеспечивает минимизацию числа дескрипторов, характеризующих классы КП.

Морфологические характеристики указывают на разрозненность, как первого, так и второго классов. Низкие оценки компактности указывают на то, что

дескрипторы ядра не пересекаются по референтам и соответствуют отдельным небольшим группам референтов.

Е. Репрезентанты

Репрезентанты классов, построенные на базе дескрипторов центра, состоят из 64 показателей для первого класса и 66 показателей второго класса. Число показателей, участвующих в репрезентантах обоих классов, составляет 46.

Ф. Структура класса

Распределение референтов по областям таксонов демонстрирует сильную неоднородность классов – к смежной области относятся 846 (57%) референтов первого класса и 21 (20%) референтов второго класса, табл. VII.

ТАБЛИЦА VII СТРУКТУРА КЛАССОВ

Класс ППИ	Область таксона				
	Я	ОЯ	БП	ДП	С
Класс 1	6	44	103	464	846
Класс 2	0	13	24	46	21

Большая часть референтов смежной области не проявляют сходства ни с репрезентантом первого класса, ни с репрезентантом второго класса, табл. VIII.

ТАБЛИЦА VIII СМЕЖНАЯ ОБЛАСТЬ

Смежная область	Класс ППИ	
	1-ый	2-ой
Отсутствие сходства с репрезентантами	747	19
Сходство с правильным и конкурирующим репрезентантами	4	0
Сходство с конкурирующим репрезентантом	95	2

Таким образом, единственный репрезентант класса не охватывает все референты класса. Это связано с изначальной нецельностью классов – среди референтов как первого, так и второго класса могут присутствовать разнотиповые ППИ.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты раскрывают интенциональный и экстенциональный аспекты классов полупроводниковых изделий.

Применение метода в этой задаче осложнено слабой проявленностью онтологии КП как системы в системных моделях референтов классов: малая доля (21%) доминантных показателей референтов КП; малая доля доминантных ядерностей (10%), участвующих в реконструкциях системно-обусловленных естественных признаков классов. Практически все формализованные дескрипторы получили 2-й и 3-й ранги. Тем не менее методом ФОС реконструированы все референты КП. Почти все референты охвачены ядрами (96%) и центрами (96%) структурно-смысловых моделей классов.

Полученные результаты составляют базу для решения задач идентификации негодных и потенциального ненадежных изделий и совершенствования мониторинга процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Michael McCann, Yuhua Li, Liam Maguire, Adrian Johnston. Causality Challenge: Benchmarking relevant signal components for effective monitoring and process control // JMLR: Workshop and Conference Proceedings, n.6, 2010, p. 277–288.
- [2] Качанова Т.Л., Туральчук К.А. Метод отбраковки негодных полупроводниковых изделий на базе технологий физики систем // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. Т. 7. С. 46–53
- [3] Fomin, B.F., Kachanova, T.L. Physics of Open Systems: Generation of System Knowledge // Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics. 2013. Vol. 11, № 2. Pp. 73–82.
- [4] Качанова, Т.Л., Фомин, Б.Ф. Методы и технологии генерации системного знания. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.
- [5] Качанова Т.Л., Фомин Б.Ф. Системная онтология классов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. №7. С. 25–36.
- [6] Качанова Т.Л., Фомин Б.Ф., Туральчук К.А., Агеев В.О. Естественная классификация острых отравлений фосфорорганическими веществами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. №8. С. 8–17.