

Производительность ЭЛИТ-процесса можно оценить временем формирования проводящего канала (временем разгонки примеси вдоль канала, имплантируемой через одну из поверхностей подложки). Из приведенных оценок для кремния видно, что время проплавления подложки (толщина ~ 300 мкм) составляет 3 мс, а время электродиффузии области расплава, легированной примесью, равно 3 мкс, то есть процесс электродиффузии происходит в 10^3 раз быстрее, чем процесс расплавления. Следовательно, при полном проплавлении подложки она практически на всю толщину равномерно легируется за счет электродиффузии, и при этом формируется проводящий канал или система проводящих каналов (рис. 5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М. Инженерия знаний при разработке интеллектуальных машин, технологий и систем. Мн., БИТА, 1998, 60 с.
2. Колешко В.М., Польшкова Е.В. ЭЛИТ-процесс сенсорных микросистем. //Машиностроение. Мн., 2003, вып. 19, с. 666-671.
3. Польшкова Е.В., Примако А.Ф. Нейросетевая технология сенсорных систем обоняния. //Машиностроение. Мн., 2002, вып. 18, с. 580-587.
4. Колешко В.М. Способ изготовления полупроводниковых приборов и программных микросхем. Авт. свид. СССР № 1227052, 1984.
5. Колешко В.М., Евсеев Б.С. Способ обработки полупроводниковых структур. Авт. свид. СССР № 1127705, 1983.
6. Колешко В.М., Сергейченко А.В. Микропрофилирование кремния при создании сенсорных микросистем. //Машиностроение. Мн., 2003, вып. 19, с. 679-689.
7. Колешко В.М. Способ обработки полупроводниковых структур. Авт. свид. СССР № 1144562, 1983.
8. Колешко В.М. Способ создания ионнолегированных слоев. Авт. свид. СССР № 843632, 1982.

УДК 621.382.049.77

Колешко В.М., Гулай А.В.

ИНВАРИАНТНОСТЬ МИКРОТЕХНОЛОГИЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Создание интеллектуальных систем научного поиска [1] для такой предметной области как микротехнология требует при построении баз знаний решения проблем структурирования, систематизации, классификации основных признаков и особенностей технологических процессов. В связи с этим представляется необходимым выявление определенных групп или классов

наиболее общих свойств микротехнологий, которые были бы эффективно использованы интеллектуальной системой при поиске оригинальных научных или оптимальных технических решений. Одним из таких свойств, по нашему мнению, является **инвариантность микротехнологий** в условиях проявления дестабилизирующих факторов. В понятие «инвариантность» [фр. *invariant* — букв. неизменяющийся] будем вкладывать смысл независимости каких-либо параметров рассматриваемого объекта (технологического процесса) от изменения других его параметров или случайных внешних воздействий.

Вообще говоря, такой метод улучшения показателей качества получаемых изделий как создание условий проявления инвариантности технологии может быть использован в любом технологическом процессе. Однако наиболее привлекательно применение его в групповых технологиях обработки, например, при изготовлении многокристальных модулей, когда стабильность и повторяемость параметров приборов на отдельных кристаллах определяет процент выхода годных многокристальных модулей. В подобных случаях использование принципа инвариантности позволяет не только повысить стабильность качества отдельного технологического процесса, но и, как следствие, увеличить процент выхода годных интегральных микросистем. Введение данного приема особенно эффективно, когда рассматриваемый параметр, характеризующий качество технологического процесса, приближается к своему физическому пределу, и дальнейшее увеличение процента выхода годных микросистем на определенном технологическом этапе может быть достигнуто только за счет повышения стабильности процесса.

Итак, представляет научный и практический интерес введение принципа инвариантности при создании технологий изготовления интегральных микроприборов, то есть групповых технологий производства микросистем. Под микросистемами понимаются микроэлектронные приборы, а также микромеханические (микроэлектромеханические, микроакустоэлектромеханические, микрооптоэлектромеханические и микрооптоакустоэлектромеханические) системы. Термин «микротехнология» (в общем случае — «технология») определяет технологический процесс как сложную динамическую систему (технологическую систему), в которой в единый комплекс объединены все ее технические элементы (значимые для нашего рассмотрения), вовлеченные в процесс изготовления микроприборов. При таком условии система «микротехнология» содержит совокупность следующих подсистем:

- объект обработки или изготовления — микроэлектронный или микромеханический прибор (или его элементы);
- технологическую среду и воздействующие физические факторы, с использованием которых производится обработка;
- оборудование (устройство, установку, прибор) для проведения технологического процесса обработки.

Микротехнология, рассматриваемая с позиций системного подхода, характеризуется следующими признаками: наличием иерархической структуры и сложной системой связей различной физической природы между элементами и подсистемами (в виде потоков вещества, энергии, информации), а также функционированием в условиях действия на технологический процесс разного рода внутренних и внешних возмущений. Случайными отрицательно действующими на технологию факторами могут быть:

- нестабильность характеристик оборудования и параметров участвующих в обработке материалов и веществ;
- модификация объекта обработки и образование обратных связей с другими технологическими подсистемами;
- влияние внешней среды (изменение температуры, давления, влажности, внесение загрязняющих примесей).

Для создания условий инвариантности свойства (характеристики) вышеуказанных подсистем микротехнологии выбираются таким образом, чтобы параметр, зависимый от дестабилизирующих факторов, маскировался специально используемым техническим приемом и в связи с этим оказывал минимально возможное дестабилизирующее влияние на характеристики получаемого изделия. Маскирующим, фоновым параметром выступает чаще всего характеристика свойства системы «технологический процесс» той же физической природы, того же иерархического уровня, то есть принадлежащая той же подсистеме, что и маскируемый параметр. Причем маскирующее поле — диапазон действия вводимого параметра выбирается гораздо шире пределов влияния дестабилизирующего фактора. Следует специально подчеркнуть, что при таком рассмотрении свойство инвариантности не предполагает стабилизации «расстроенного» параметра и, тем более, устранения непрогнозируемого и неконтролируемого действия возмущения.

В общем случае любой параметр W технологического процесса, характеризующий его качество, подвержен воздействию n различных дестабилизирующих факторов v_i ($i = 1, 2, \dots, n$) (рис. 1). Изменение ΔW можно рассматривать как совокупность n зависимостей $\Phi(v_i)$:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^{n-1} \Phi(v_i) + \Phi(v_n^{var}), \quad (1)$$

где v_n^{var} — изменяющийся, дестабилизирующий фактор, оказывающий определяющее отрицательное влияние на стабильность технологического процесса. Значимость данного возмущения для ΔW , как преобладание его над всеми остальными отрицательными факторами, можно выразить в виде неравенства:

$$\Phi(v_n^{var}) \gg \sum_{i=1}^{n-1} \Phi(v_i). \quad (2)$$

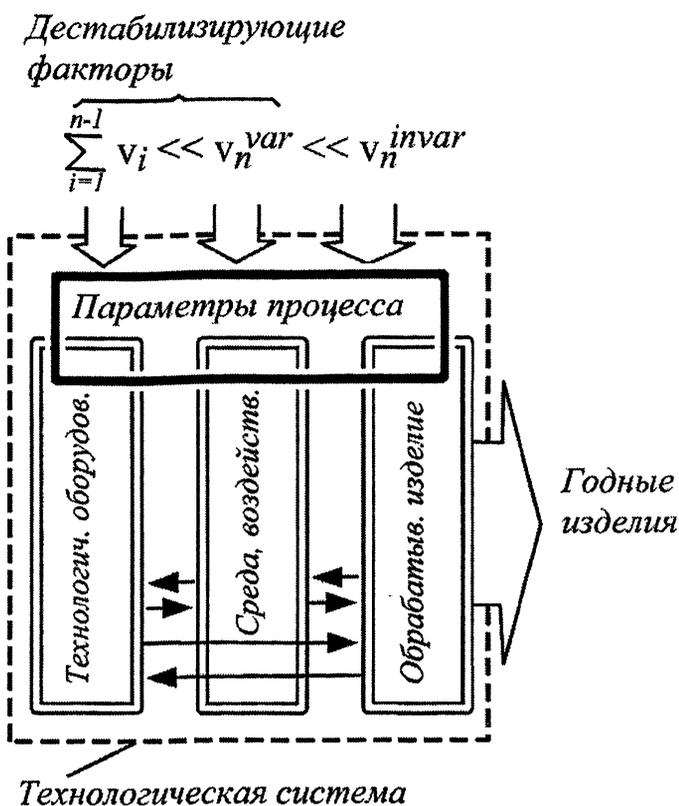


Рис. 1. Схема реализации свойства инвариантности технологической системы

Реализация свойства инвариантности технологического процесса заключается в осуществлении специальных операций, создающих некоторое а priori заданное значение фона v_n^{invar} , на котором «теряется» существенно значимый дестабилизирующий фактор:

$$v_n^{invar} \gg v_n^{var}, \quad (3)$$

что позволяет не только получить

$$\Delta W \approx \Phi(v_n^{var}, v_n^{invar}) \approx \Phi(v_n^{invar}) = \text{const}, \quad (4)$$

но и при соответствующем выборе фоновое технологического воздействия минимизировать изменение параметра или направить это изменение в сторону повышения качества изделия.

По нашему мнению, инвариантность является одним из механизмов и принципов интеллектуализации микротехнологий за счет их внутренних свойств (в отличие от принципа управления технологическими процессами с

помощью интеллектуальных систем, основу которых составляют нейронные сети). Рассматривая инвариантность как направление интеллектуализации технологии микросистем, мы исходим из того, что этот прием характеризуется следующими признаками:

- инвариантность достигается на основании использования электрофизических, физико-механических, физико-химических процессов и выбора конструктивных, (схемотехнических, топологических) решений «второго плана», более глубоких уровней, чем основные физические явления и технические решения, определяющие сущность рассматриваемого технологического процесса получения микросистем;

- этот прием не присущ технологическому процессу изначально, а вводится разработчиками в технологический цикл, конструкцию оборудования и получаемого изделия целенаправленно;

- выполняется, главным образом, (а иногда — исключительно) с целью «отстройки» от дестабилизирующего фактора, минимизации его влияния, частичного или полного его «экранирования»;

- основной ожидаемый положительный эффект заключается в повышении стабильности параметров технологического процесса и характеристик получаемого изделия;

- возможно параллельное улучшение других параметров качества изготавливаемого изделия за счет дополнительно проявляющихся в процессе обработки физических эффектов;

- неизбежно проявляющиеся отрицательные стороны используемого подхода не касаются главных, существенных характеристик технологического процесса.

В соответствии с принятой в данной работе структурой технологической системы методы реализации свойства инвариантности (маскирования отрицательно действующего фактора) будут соответствовать ее основным подсистемам:

- конструктивно-технологический:

- * за счет выбора определенных конструктивных решений изготавливаемого прибора, например, его схемы, структуры, топологии;

- * за счет выбора нетрадиционных информативных параметров прибора, менее подверженных влиянию или маскирующих влияние возмущений;

- физико-технологический:

- * путем использования новых физико-химических явлений при дополнительном энергетическом воздействии различной физической природы (акустическом, оптическом, плазменном, микроволновом);

- * путем дополнительного вовлечения в физико-химические процессы в зоне обработки нового материала или вещества в виде поверхностной пленки, газовой среды, слоя жидкости, легирующей добавки;

- инструментально-технологический:

- * за счет модификации, реконструкции или модернизации технологического оборудования на схемном или конструктивном уровне;

- * за счет выбора определенного технологического инструментария (методов обработки и режимов функционирования оборудования).

Интеллектуализация технологической системы за счет достижения инвариантности в данном случае может рассматриваться как процесс ее внутренней самоподстройки (однократной, статической или непрерывной, динамической) путем привлечения внутренних возможностей, ресурсов системы, заложенных (предусмотренных) на этапе ее проектирования, разработки. Поиск таких ресурсов, внутренних механизмов и создание инвариантности при разработке технологий микроэлектроники и микромеханики может проводиться, например, на следующих уровнях: элементном, структурном, функциональном, параметрическом, генетическом.

Инвариантность может касаться только одного отрицательно влияющего фактора или группы таких возмущений (например, температуры внешней среды, введения случайных примесей), а также может носить комплексный характер, то есть касаться такого параметра, который «аккумулирует», объединяет, суммирует все дестабилизирующие воздействия как со стороны внешней среды, так и при изменении характеристик объекта обработки (например, рассогласование элементов ультразвуковой колебательной системы). Однократная, статическая «настройка» технологической системы с целью реализации инвариантности происходит, например, путем установления определенных параметров изготавливаемого прибора (конструктивных, схмотехнических, топологических). Динамическая, непрерывная самоподстройка системы реализуется в течение всей технологической операции за счет изменения соответствующих параметров процесса и, можно сказать, основана на проявлении технологической системой свойства постоянной адаптации к непрерывно изменяющимся условиям проведения операции обработки (например, в процессе возбуждения ультразвуковых колебаний широкого спектра частот).

Признак инвариантности может в разной степени использоваться при создании конкретных перспективных микротехнологий (или их отдельных подсистем). В частности, он может являться основополагающим в разрабатываемой технологии, и на его введении будет базироваться достижение и основной цели, и других положительных качеств технологического процесса, как, например, в случае применения акустических колебаний широкого спектра частот для ультразвуковой микросварки. С другой стороны, свойство инвариантности может быть вторичным признаком, проявляющимся при решении основной задачи и придающим технологическому процессу дополнительные достоинства (например, как при введении в материал металлизации добавок редкоземельных элементов).

Приведенные выше примеры инвариантности микротехнологий взяты из ряда разработанных нами технологических процессов изготовления микросистем. Краткий анализ технических проблем, связанных с введением данного признака на разных уровнях решения технологических задач, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Использование принципа инвариантности в разработанных технологических процессах изготовления микросистем

Методы создания инвариантности	Уровень решения	Инвариантность технологического процесса (сущность процесса; дестабилизирующий фактор; управляющее действие)	Лит.
1	2	3	4
Конструктивно-технологический	Новое конструктивное и схемное решение	<p>Датчик давления на поверхностных акустических волнах с компенсацией дестабилизирующего влияния температуры окружающей среды.</p> <p>Дестабилизирующий фактор — зависимость параметров пьезоэлектрического материала подложки датчика от температуры.</p> <p>Достижение инвариантности — за счет использования пироэлектрического эффекта в пьезоэлектрической подложке датчика для компенсации влияния температуры</p>	[2]
Физико-технологический	Дополнительное энергетическое воздействие	<p>Формирование ободка на боковой поверхности полупроводниковой пластины путем снятия фаски и ее локального отжига с помощью лазерного или электронного луча.</p> <p>Дестабилизирующий фактор — повышенная плотность макродефектов (трещин, сколов) как источников дислокаций у края пластины.</p> <p>Достижение инвариантности — за счет удаления дефектной части материала пластины и лучевого отжига полупроводника в области максимальной плотности дислокаций</p>	[3]

1	2	3	4
	Дополнительное привлечение новых веществ	<p>Новый материал для получения металлизации микроприборов и микропровода для их сборки на основе алюминия с добавками редкоземельных элементов, переходных d-металлов 4—6 периодов IV—VII групп периодической системы, никеля и железа в количестве 0,01—7,0 % по массе.</p> <p>Дестабилизирующий фактор — непрогнозируемое введение случайных примесей в материал металлизации микроприборов и микропровода для их сборки.</p> <p>Достижение инвариантности — за счет получения стабильного и контролируемого содержания основных компонентов в материалах контактных пар тонкая пленка — микропровода</p>	[4, 5]
Инструментально-технологический	Новая технология и оборудование (ультразвук, генераторы и электроакуст. преобразователи)	<p>Ультразвуковая микросварка элементов микроприборов с использованием акустических колебаний широкого спектра частот.</p> <p>Дестабилизирующий фактор — непрерывное изменение резонансной частоты элементов электроакустической системы в процессе микросварки.</p> <p>Достижение инвариантности — за счет постоянного наличия в спектре электрических колебаний ультразвукового генератора в любой момент процесса микросварки частотных составляющих в полосе пропускания электроакустической системы</p>	[6, 7]

Предлагаемый подход к созданию микротехнологий с точки зрения их инвариантности в условиях действия внутренних и внешних возмущений является новым направлением в разработке технологических процессов изготовления интегральных микросистем. Принцип инвариантности может учитываться разработчиками на всех этапах исследования, проектирования и реализации перспективных микротехнологий:

- при расчете и моделировании изготавливаемых микросистем;
- в процессе выбора материалов, сред и физических воздействий;
- при конструировании технологического оборудования.

Кроме того, комплексный подход к анализу микротехнологий с учетом инвариантности их параметров позволяет структурировать сведения, что особенно важно, в виде баз знаний для интеллектуальных систем научного поиска.

Дело в том, что современные интеллектуальные системы работают в основном с поверхностными сведениями, представляющими собой знания всего лишь о видимых (или очевидных) взаимосвязях и взаимозависимостях между отдельными событиями и фактами в предметной области. Это обусловлено отсутствием на данный момент универсальных методик, позволяющих выявить коренные, глубинные структуры знаний, под которыми понимаются схемы, аналогии, абстракции, отображающие структуру и природу процессов, происходящих в предметной области. При систематизации и классификации технологий с учетом их инвариантности выявляются знания глубокого уровня, относящиеся к разряду тех, которые объясняют изучаемые явления и могут использоваться для прогнозирования поведения исследуемых объектов. Поэтому приведенная классификация методов инвариантности технологических процессов изготовления микросистем может быть положена в основу создания алгоритмов решения творческих инженерных, технологических задач в интеллектуальных поисковых системах [1].

Таким образом, проведен анализ свойства инвариантности технологий микроэлектроники и микромеханики в условиях проявления отрицательно действующих факторов. Определены основные классы методов реализации инвариантных микротехнологий (конструктивные, физические, инструментальные) и представлены характерные примеры разработанных микротехнологий каждого класса инвариантности. Обоснована возможность создания нового направления интеллектуализации микротехнологий — изучение и разработка методов обеспечения их инвариантности в условиях действия внутренних и внешних возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М., Гулай А.В. Интеллектуальная система поиска научных открытий. — Сб. «Теоретическая и прикладная механика» — 2005. — № 18. — С. 241—248.
2. Колешко В.М., Гулай А.В. и др. Авт. свид. СССР № 1291829.
3. Колешко В.М., Гулай А.В. и др. Авт. свид. СССР №№ 950110, 1122160, 1182939.
4. Колешко В.М., Белицкий В.Ф. Массоперенос в тонких пленках. — Мн.: «Наука и техника», 1980. — 296 с.
5. Колешко В.М., Гулай А.В. и др. Авт. свид. СССР №№ 1233779, 1250424, 1293923, 1306399, 1424636, 1531351.
6. Колешко В.М. Ультразвуковая микросварка. — Мн.: «Наука и техника», 1977. — 328 с.
7. Колешко В.М., Гулай А.В. и др. Авт. свид. СССР №№ 1058743, 1232436, 1276369, 1276465, 1538382.