

## ПЕРСПЕКТИВА МЕТОДА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ИОННОГО ИМПЛАНТИРОВАНИЯ МИКРОКОМПОНЕНТОВ

Г.М. Антропов

Antropovg@mail.ru

SPIN-код: 4877-5722

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация*

Сегодня при производстве полупроводников для изготовления имплантатов используется почти вся таблица Менделеева. Наиболее часто в кремниевом производстве применяют следующие легирующие примеси: мышьяк, фосфор, бор, дифторид бора, индий, сурьма, германий, кремний, азот, водород, и другие. Существует целая хронология создания, слияния и закрытия крупных зарубежных компаний — поставщиков оборудования для ионного имплантирования. С каждым годом в России растет существующая потребность в микропроцессорах как простого, так и сложного исполнения. Научно-исследовательские институты и конструкторские бюро предлагают различные решения установок с ионными имплантаторами. В данной статье представлены планы и предложены идеи по оптимизации работы установки для ионного имплантирования.

**Ключевые слова:** многокритериальная оптимизация, методы напыления, ионное имплантирование, VIAT, парето-оптимальные решения, статистическая модель

**Введение.** На данный момент известно множество методов получения микросхем, основанных на физических и химических процессах, которые строго определены соответствующими стандартами. В методе ионного напыления положение обрабатываемой пластины строго определено, изменение положения в плоскостях приводит к тому, что поток ионов падает не в назначенную область, тем самым технологическая процедура нарушается. Также весь процесс — от помещения заготовки в транспортную камеру до выемки оттуда заготовки с напыленным покрытием — выполняется согласно алгоритмам, которые с помощью исполнительных элементов приводят манипуляторы установки в различные положения.

Манипуляторы, электродвигатели и другие элементы входят в механическую систему установки. Согласно представленной нами гипотезе, применение многокритериальной оптимизации может улучшить показатели работы установки в целом. Суть метода многокритериальной оптимизации заключается в том, что при незначительном ухудшении одного из выбранных параметров другие выбранные параметры улучшаются. Непосредственно в данной

работе рассмотрен метод многокритериальной оптимизации для улучшения механической системы установки, в которой применен метод напыления, основанный на ионном имплантировании.

**Перспектива развития ионного имплантирования.** Ионное имплантирование используется при изготовлении современных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на основе комплементарных металлооксидных полупроводниковых структур как основной метод создания сверхбольших интегральных схем с субмикронными уровнями технологии [1].

Процесс ионного имплантирования позволяет точно управлять профилем концентрации и пространственным разрешением легирующих примесей, соответствующих современным уровням технологии производства интегральных микросхем [2]. Ионное имплантирование позволяет легко менять дозы и энергии легирования на несколько порядков, что превосходит все другие методы легирования интегральных микросхем. Процесс также можно адаптировать к техническим требованиям производства полупроводниковых интегральных микросхем не только на основе кремния, но и на основе других материалов ( $A_3B_5$ ,  $A_2B_6$ , SiC и др.). Метод ионного имплантирования обеспечивает множество степеней свободы при обработке, что позволяет быстро внедрять новые интегрированные технологии, которые применяются при масштабировании интегральных микросхем [3].

**Общий принцип напыления ионов на подготовленную пластину.** Установку можно подразделить на две составляющие: механическую (манипулятор, камера дегазации и др.) и исполнительную (ионный имплантер и его элементы). Схема имплантера показана на рис. 1. Изменения внутри имплантера и оптимизация его функционирования будут рассмотрены в следующих работах [4].

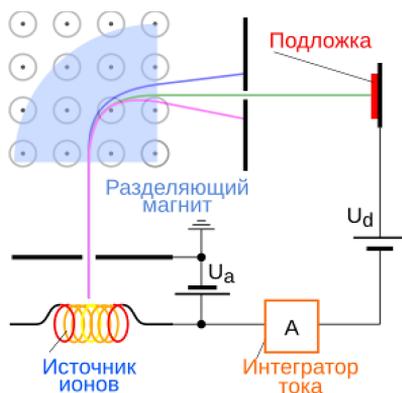


Рис. 1. Схема установки ионного имплантера

Основными составными частями ионно-лучевой установки служат источник ионов, ионный ускоритель, магнитный сепаратор, работающий по принципу масс-спектрографа, система сканирования пучком ионов и камера, в которой находится облучаемый образец.

Ионы имплантируемого материала разгоняются в ускорителе электростатическом полем и бомбардируют образец [5].

Ионы ускоряются до энергий 10...5000 кэВ. Глубина проникновения ионов в толщу образца зависит от их энергии и составляет от нескольких нанометров до нескольких микрометров.

Ионы с энергией 1...10 кэВ не вызывают изменений в структуре образца, тогда как потоки ионов с большей энергией могут значительно нарушить кристаллическую структуру вплоть до полного нарушения кристаллической структуры и перехода в аморфное состояние.

Технология ионного имплантирования обеспечивает внедрение заданного количества практически любого химического элемента на заданную небольшую глубину, позволяя таким образом создавать сплав металлов, которые в расплавленном состоянии не смешиваются, или легировать одно вещество другим с концентрацией, которую невозможно достичь даже при использовании высоких температур [6].

**Новизна и предполагаемое решение.** Различные решения метода многокритериальной оптимизации можно отразить с помощью визуальных представлений. Мы предлагаем использовать метод VIAM (Visual Interactive Analysis Method — визуальный интерактивный метод анализа) и разработать прикладную программу VIAT (Visual Interactive Analysis Tool — визуальный интерактивный инструмент анализа) для поддержки процесса принятия решений при многокритериальном проектировании. Метод многокритериальной оптимизации предусматривает выбор ряда критериев, над которыми будет вестись работа. В данной программе эти критерии указываются в виде математических зависимостей или численных последовательностей. Лицо, принимающее решение, видит визуализацию решений. Общий случай визуализации показан на рис. 2. Изначально графики выглядят куда более рассеянными. Однако на всем протяжении графика обязательно существуют места скопления пересечений, именно его и предполагается рассматривать. На графиках оптимальные решения расположены от минимально (MIN) до максимального (MAX) возможного. Одним из таких критериев в процессе ионного имплантирования служит количество годных элементов — элементов, которые готовы к эксплуатации. Это число получают после выемок заготовок в результате тестирования — например, когда из 100 % запланированных микросхем годных получилось 85 % [7].

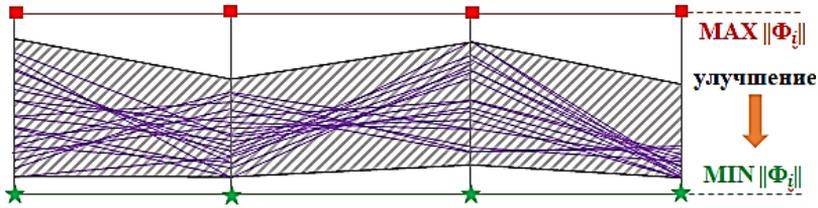


Рис. 2. Интерактивная диаграмма парето-оптимальных решений

По имеющимся статистическим данным, количество годных элементов за рубежом составляет 90 %. Разработанная в России установка сейчас имеет результат 85 %. Диссертационная работа, написанная на эту тему, прогнозируемо должна увеличить текущий процент.

Также необходимо понимать, что анализ всех доступных решений возможен, но есть смысл упростить обработку статистической модели. Поиск парето-оптимальных решений приводит к отбрасыванию нежелательных вариантов. Оператору остается лишь сделать выбор среди доступных парето-оптимальных решений, которые удовлетворят его условиям. Статистическая модель парето-оптимальных решений имеет соответствующее визуальное представление (рис. 3). Буквой «Ф» с индексом на рисунке обозначено значение того или иного выбранного критерия.

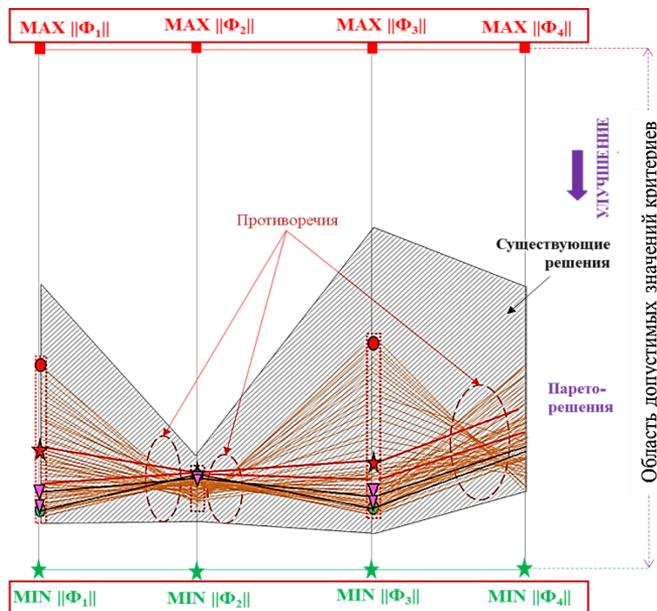


Рис. 3. Выделенные парето-оптимальные решения



**Рис. 4.** Общая схема необходимых этапов для достижения цели работы

Шаги к достижению цели в общих чертах изображены на рис. 4.

**Заключение.** В данной работе предложен метод многокритериальной оптимизации, рассмотрено графическое представление метода, предложен примерный план действий для достижения поставленных целей.

### Литература

- [1] Давыдов А.Н. *Автоматизация машиностроительного предприятия на основе технологий компьютерной поддержки жизненного цикла изделий.* Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2001, 156 с.

- [2] Григорьев С.Н., Кутин А.А., Долгов В.А. Принципы построения цифровых производств в машиностроении. *Вестник МГТУ Станкин*, 2014, № 4, с. 10–15.
- [3] Соснин П.И. *Вопросно-ответное моделирование в разработке автоматизированных систем*. Ульяновск, УлГТУ, 2007, 333 с.
- [4] Красников Г.Я. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов*. Москва, Техносфера, 2011, 800 с.
- [5] [5] Current M., Rubin L., Sinclair F. *Commercial Ion Implantation Systems*. Ion Implantation Science and Technology-2018, Ion Implant Technology Co. Publ., 2018.
- [6] Симонов В.В., Корнилов Л.А., Шашелев А.В., Шокин Е.В. *Оборудование для ионной имплантации*. Москва, Радио и связь, 1988, 184 с.
- [7] Буй В.Ф., Гаврюшин С.С., Фунг В.Б., Данг Х.М., Прокопов В.С. Динамический и прочностной анализ системы главного привода при проектировании моечной машины нового типа для овощей и фруктов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, № 4.  
<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-4-1970>

**Поступила в редакцию 20.02.2025**

**Антропов Георгий Михайлович** — аспирант кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Антропов Г.М. Перспектива метода многокритериальной оптимизации в процессе ионного имплантирования микрокомпонентов. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 04 (99). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/idme/1056.html>

---

## THE PERSPECTIVE OF THE MULTICRITERIA OPTIMIZATION METHOD IN THE PROCESS OF ION IMPLANTATION OF MICROCOMPONENTS

**G.M. Antropov**

Antropovg@mail.ru  
SPIN-code: 4877-5722

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

Today, semiconductor manufacturing uses almost the entire periodic table for implantation. The following alloying impurities are most often used in silicon production: arsenic, phosphorus, boron, boron difluoride, indium, antimony, germanium, silicon, nitrogen, hydrogen, and others. There is a whole chronology of the creation, merger and closure of large foreign companies supplying equipment for ion implantation. Russia has its own milestone in this area. In this article, plans will be discussed to solve the optimization problem in the operation of the ion implantation unit.

**Keywords:** optimization, ion implantation, VIAT, Pareto-optimal solutions, installation, manipulator

---

*Received 20.02.2025*

**Antropov G.M.** — Postgraduate Student at the Department of Computer Systems of Industrial Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

### **Please cite this article in English as:**

Antropov G.M. The perspective of the multicriteria optimization method in the process of ion implantation of microcomponents. *Politekhnikeskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 04 (99). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/idme/1056.html>