

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СОЗДАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

© 2008 г. А.С. ВИШНЕВСКИЙ, Е.Н. ИВАШОВ, П.А. ЛУЧНИКОВ\*

Московский государственный институт электроники и математики  
(технический университет)

\* Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики  
(технический университет)

Предложенные алгоритмы выбора слоистых композиционных структур магнитных носителей информации базируются на использовании модифицированного дискриминационного метода в сочетании с методом упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением и позволяют производить многокритериальный (многоцелевой) выбор наилучшего материала рабочего слоя, учитывая требования, предъявляемые к ферромагнитному тонкопленочному объекту современного накопителя на жестких магнитных дисках.

### Введение

При производстве пластин накопителей магнитных жестких дисков (НМЖД) широко применяются слоистые композиционные структуры, позволяющие получать ферромагнитные системы с улучшенными магнитными свойствами, необходимыми для увеличения плотности записи информации при использовании как продольной, так и перпендикулярной технологии [1].

Рассматривая подложку НМЖД через призму композиционных материалов, следует отметить, что она, как для продольной, так и для перпендикулярной технологии записи информации, представляет собой достаточно сложную систему, состоящую не менее чем из 6 слоев [2].

На Рис. 1 показан характерный пример слоистой композиционной структуры, использующей в качестве рабочего слоя так называемый антиферромагнитно-сопряженный (antiferromagnetically-coupled или AFC) носитель – систему из двух слоев ферромагнетика, разделенных тонкой прослойкой рутения, немагнитного материала, заставляющего смежные слои приобретать противоположную магнитную ориентацию [3]. Использование такого слоистого композита позволяет одновременно повысить и плотность и надежность записи информации, так как намагниченность рабочего слоя остается стабильной при меньших размерах магнитных частиц благодаря увеличению общей толщины структуры. Антиферромагнитно-сопряженные системы сравнительно давно внедрены в технологию производства НМЖД с продольной намагниченностью и позволяют достичь плотности записи порядка 150 Гбит/дюйм<sup>2</sup> (размер ячейки ~ 70 нм). Это ограничение обусловлено существованием суперпарамагнитного эффекта, кото-

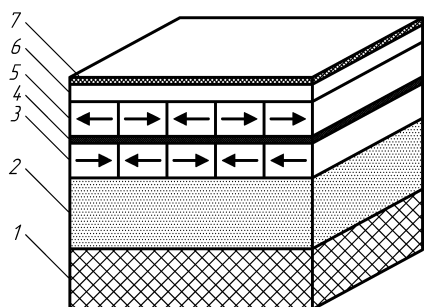


Рис. 1. Схема подложки НМЖД с продольной намагниченностью:

- 1 – основание,
- 2 – несущий подслой,
- 3 – первый антиферромагнитно-сопряженный слой,
- 4 – слой рутения,
- 5 – второй антиферромагнитно-сопряженный слой,
- 6 – защитный слой,
- 7 – слой смазки.

рый заключается в том, что ферромагнитные домены, составляющие плоскость магнитных дисков, из-за чрезмерного уменьшения, не в состоянии стабильно удерживать направление магнитного момента в течение длительного времени (Рис. 2.) [4].

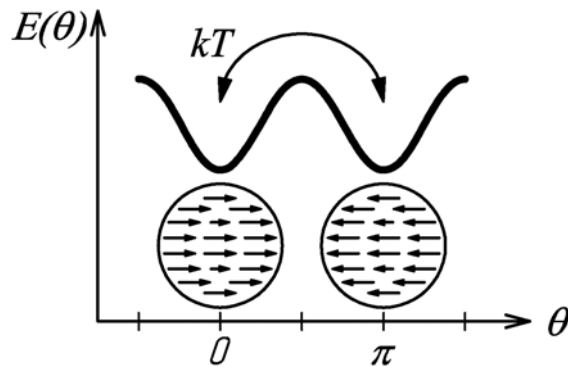


Рис. 2. Графическое представление природы возникновения суперпарамагнетизма, т.е. самопроизвольного изменения намагниченности частицы во времени при условии, что общая энергия анизотропии  $E(\theta) = KV$  частицы будет порядка температурной энергии  $kT$ .

Ясно, что инженерная мысль не остановилась на достижимой в ближайшем времени цифре в 150 Гбит/дюйм<sup>2</sup>, предпринимаются различные попытки удовлетворить современную потребность в хранении все большего количества информации, что, однако, требует значительных временных затрат. Такая ситуация заставляет разработчиков злоупотреблять простым способом увеличения емкости НМЖД – уменьшением толщины ферромагнитного рабочего слоя  $\delta_{\text{раб}}$ , что приводит к появлению неявно выраженных границ  $\Delta_{\text{гр1}}$  и  $\Delta_{\text{гр2}}$  между соседними слоями (Рис. 3.).

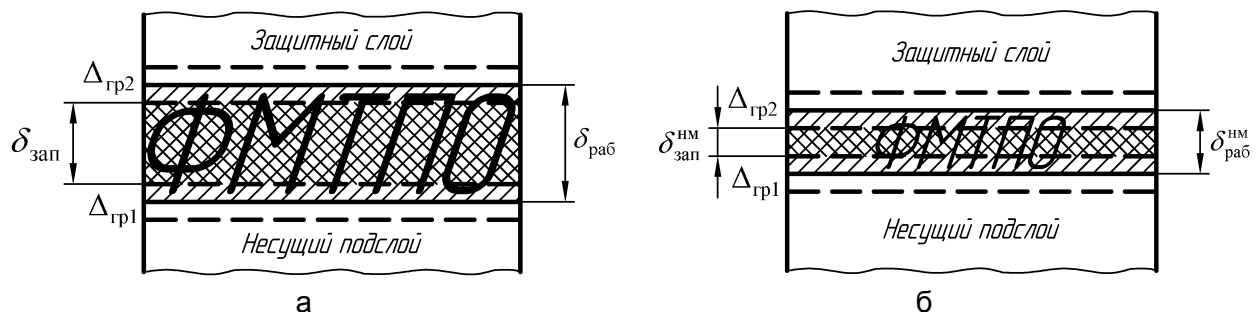


Рис. 3. Изменение размытости границ рабочего слоя  $\delta_{\text{раб}}$  при уменьшении его толщины  $\delta_{\text{раб}}^{\text{НМ}}$ .

Таким образом, параллельно с суперпарамагнетизмом, тенденция к уменьшению толщины  $\delta_{\text{раб}}$  может существенно повлиять на качество рабочего слоя, толщина записываемой части  $\delta_{\text{зап}} = \delta_{\text{раб}} - (\Delta_{\text{гр1}} + \Delta_{\text{гр2}}) / 2$  которого, в результате чрезмерной размытости границ, окажется меньше критической величины, что, в свою очередь, приведет к значительному увеличению вероятности возникновения ошибок записи-чтения.

### Возникновение нечетких границ между слоями

Главной причиной возникновения нечетких границ между слоями является диффузия примесных веществ, которая обусловлена не столько газами, присутствующими в объеме вакуумной камеры, сколько технологическим процессом формирования тонкопленочных объектов, проходящем, как правило, в условиях резко неоднородного

распределения концентрации и высоких температурах, возникающих практически при любом способе формирования слоистой системы [5].

Рассмотрим несущий подслой, на который, одним из способов формирования, наносится ферромагнитный рабочий слой. Хорошо известно, что массообмен происходит лишь на периферийных частях смежных слоев, общая толщина которых  $\Delta_{гр1}$  значительно меньше толщины формируемого рабочего слоя  $\Delta_{гр1} \ll \delta_{раб}$  (Рис. 3а.). Однако при переходе от микрометровой к нанометровой технологии производства подложек НМЖД рассматриваемая выше общая толщина периферийных частей  $\Delta_{гр1}$  рабочего слоя становится соизмеримой с его общей толщиной (Рис. 3б.):

$$\Delta_{гр1} \approx \delta_{раб}^{HM} \quad (1)$$

Аналогичная ситуация:

$$\Delta_{гр2} \approx \delta_{раб}^{HM} \quad (2)$$

наблюдается и при нанесении защитного слоя на сформированный рабочий слой.

При внедрении примесей в кристаллическую решетку или границы зерен магнитные характеристики периферийных частей рабочего слоя существенно ухудшаются и, исходя из (1) и (2) можно видеть, что записывающая часть рабочего слоя стремится к нулю:

$$\delta_{зап}^{HM} = \delta_{раб}^{HM} - (\Delta_{гр1} + \Delta_{гр2}) / 2 \rightarrow 0 \quad (3)$$

Таким образом, для того, чтобы эффективность рабочего слоя не сводилась на нет ввиду диффузии, уже сегодня стоит задуматься о способах ее уменьшения.

### **Алгоритмы поиска технологических решений процесса формирования ФМТПО**

Для уменьшения массопотоков диффундирующих веществ между соседними слоями нами были разработаны алгоритмы поиска технологических решений процесса формирования ФМТПО, которые являются ключевыми элементами системы автоматизированного проектирования всего процесса формирования и позволяют повысить качество получаемых ФМТПО, а также сократить время, затрачиваемое на их проектирование.

Обобщенный алгоритм выбора технологических решений процесса формирования ФМТПО представлен на Рис. 4.

На первом этапе, путем поиска в морфологической таблице, осуществляется выбор допустимых вариантов формирования ФМТПО, удовлетворяющих разработанному техническому заданию (ТЗ). При этом возможны три ситуации:

- 1) техническому заданию соответствует один вариант формирования ФМТПО;
- 2) техническому заданию соответствует несколько вариантов формирования ФМТПО;
- 3) техническому заданию не удовлетворяет ни один вариант формирования ФМТПО.

В первой ситуации задачу можно считать решенной, во второй – следует перейти к следующему этапу поиска, в третьей ситуации происходит выбор варианта формирования ФМТПО через поиск ближайшего прототипа для ФМТПО, определенного в ТЗ с последующей его модернизацией и добавлением в морфологическую таблицу. В случае если этот выбор не приносит положительного результата, необходимо разработать новое технологическое решение процесса формирования ФМТПО, продукт которого соответствовал бы ТЗ. В некоторых случаях, если это допустимо, возможен пересмотр ТЗ с тем, чтобы снизить финансовые и временные затраты на проектирование.

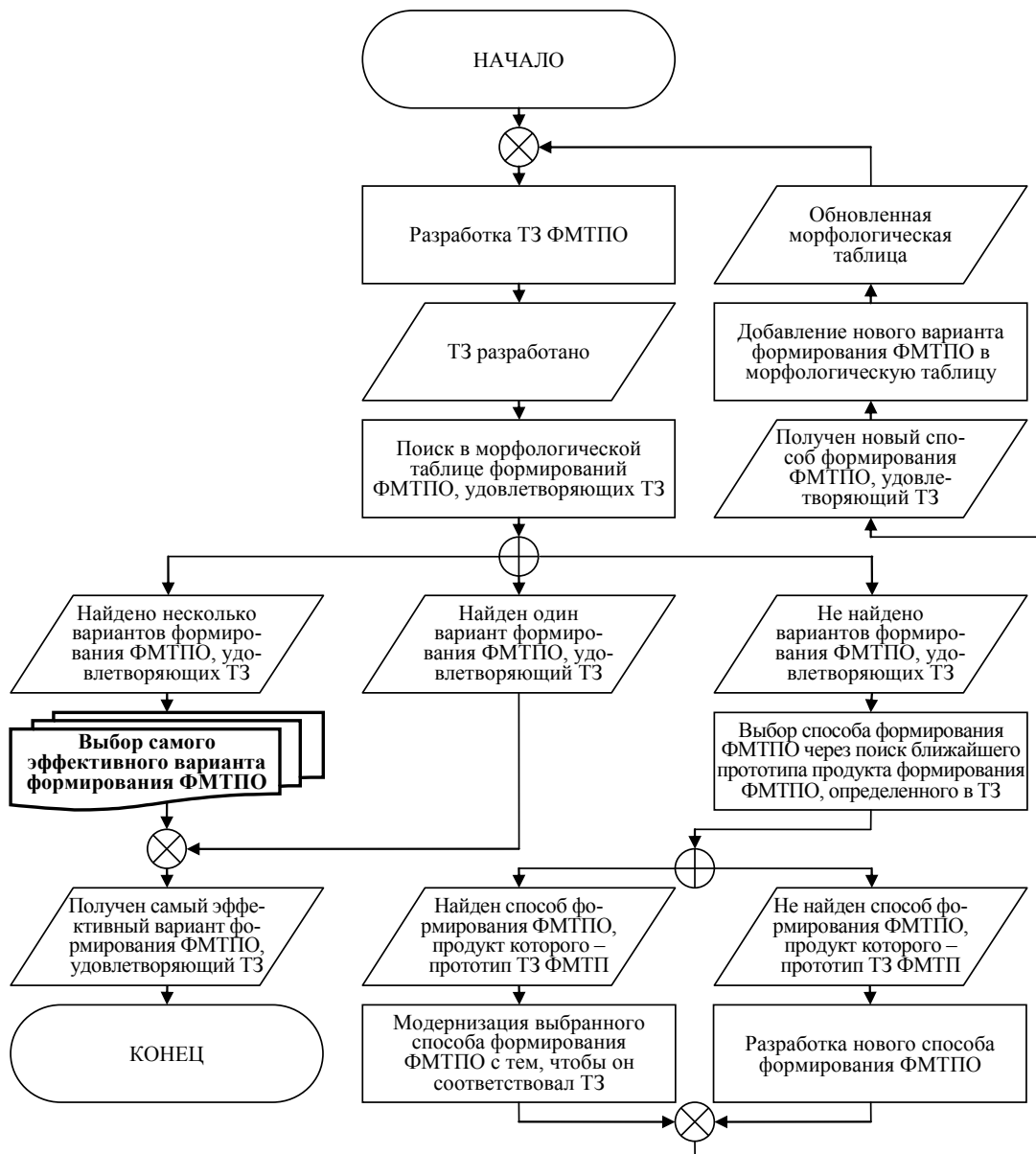


Рис. 4. Обобщенный алгоритм выбора технологических решений процесса формирования ФМТПО, удовлетворяющих ТЗ.

Описание дальнейших алгоритмов выбора самого эффективного варианта формирования ФМТПО целесообразно начать с изображения организационной диаграммы, показывающей элементы автоматизированной системы проектирования и включающей ветви возможных альтернатив внутри этих элементов.

Как видно из диаграммы, главенствующим элементом автоматизированной системы поиска технологических решений процесса формирования ФМТПО является многокритериальный выбор материала рабочего слоя. Это связано с тем, что слой, хранящий данные, представляет собой очень тонкую пленку высококачественного ферромагнетика и выбор материала для его формирования очень важен.

Вторым элементом является многокритериальный выбор материалов, примыкающий к ФМТПО. Это связано с тем, что выбранный ферромагнитный материал непременно будет являться определяющим фактором применения химически нейтральных видов материалов, удовлетворяющих требованию минимальности коэффициентов взаимопроникновения.

Выбор способа нанесения материала ФМТПО и примыкающих к нему слоев является следующим элементом автоматизированной системы поиска технологических решений процесса формирования ФМТПО. Это обусловлено тем, что выбранные ранее материалы могут наложить определенные ограничения на возможность применения некоторых альтернативных способов нанесения ферромагнитных тонкопленочных объектов.

Рассматривая второй этап поиска технологических решений процесса формирования ФМТПО, остановимся подробнее на многокритериальном выборе ферромагнитного материала (Рис. 5.).

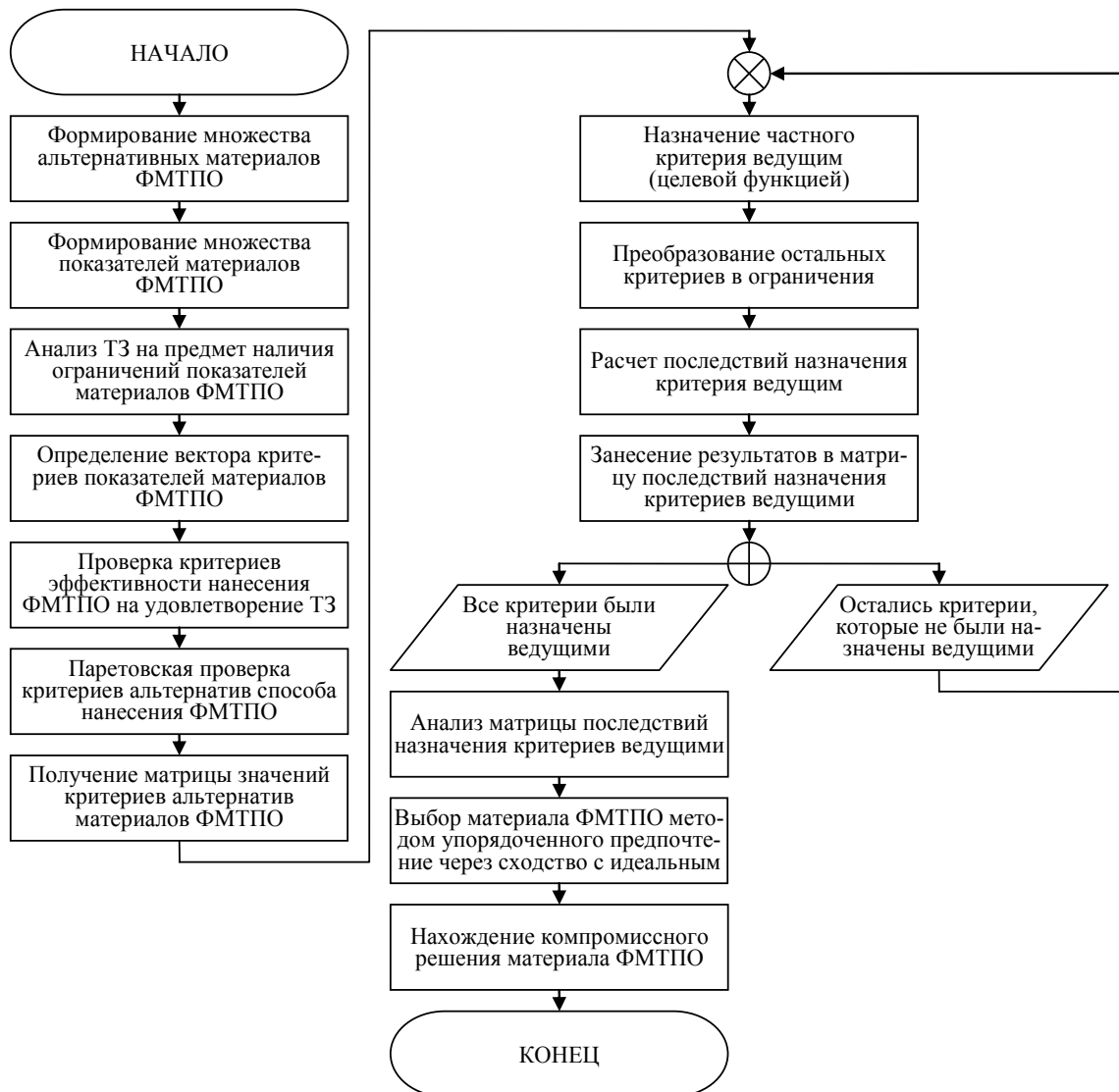


Рис. 5. Алгоритм выбора лучшего материала для формирования ФМТПО.

Существует достаточно много разновидностей ферромагнитных материалов и сплавов. Критериев для ФМТПО тоже немало. Можно выделить две группы: функциональные (коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, стабильность, химическая активность, диффузионные дефекты, теплостойкость, твердость, адгезия) и экономические (стоимость и окупаемость).

Выбор лучшего материала для формирования ФМТПО из множества альтернатив, удовлетворяющих ТЗ и принадлежащих множеству Парето, осуществляется с помощью сведения многокритериальной (многоцелевой) задачи оптимизации к нескольким задачам однокритериальной оптимизации. Для этого в алгоритме используется модифицированный дискриминационный метод, который заключается в том, что про-

изводится последовательное назначение главным каждого из критериев, обуславливающих выбор материала для ферромагнитного тонкопленочного рабочего слоя.

В нашем случае дискриминационный подход используется для сокращения количества частных критериев путем назначения какого-либо критерия ведущим (целевой функцией) с одновременным преобразованием остальных критериев в ограничения по отношению к их минимумам:

$$\begin{cases} f_i(X) \rightarrow \min; \\ \quad \quad \quad x \in D, \\ f_j(X) \leq \Delta_j, \end{cases} \quad (4)$$

где  $j = 1, 2, \dots, K$  и  $j \neq i$  [6].

Как видно из алгоритма, модифицированный дискриминационный метод работает многократно, генерируя множество точек Парето и регистрируя результаты в матрицу с тем, чтобы в дальнейшем можно было выполнить оценку последствий назначения каждого из критериев ведущим с занесением результатов в матрицу последствий такого назначения.

После того как все критерии побывали в роли главного, и матрица последствий заполнена, производится ее анализ, который позволяет определить относительную важность  $w_i$  каждой из  $k$  целевых функций. Далее следует определение компромиссного решения исходной  $k$ -целевой задачи выбора материала ФМТПО методом упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением [7].

Результатом использования представленного алгоритма является выбор наилучшего ферромагнитного материала, что позволяет перейти к следующим элементам автоматизированной системы поиска технологических решений процесса формирования ФМТПО, описанных выше.

### Выводы

Таким образом, разработаны элементы автоматизированной системы поиска технологических решений процесса формирования ФМТПО, позволяющие сократить время проектных работ и повысить качество получаемых ФМТПО, к которым предъявляются жесткие требования по минимальности примесей в рабочем слое.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенков С.Х. Тонкопленочные накопители информации. – М.: Радио и связь, 1993. – 504 с.
2. Вишневский А.С., Ивашов Е.Н. Формирование магнитоориентированных нанообъектов для перспективных накопителей информации // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC – 2007): Матер. VI Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23-27 окт. 2007 г.* – М.: МИРЭА, 2007. – Ч. 1, – С. 74-80.
3. Левин В. И. Носители информации в цифровом веке. – М.: КомпьютерПресс, 2000. – 255 с.
4. Вишневский А.С., Ивашов Е.Н. Влияние суперпарамагнетизма на разупорядочение магнитного момента наноструктур // *Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Тр. IX междунар. конф., Ульяновск, 24-30 сент. 2007 г.* – Ульяновск: УлГУ, 2007. – С. 121.
5. Боровский И.Б., Гуров К.П., Марчукова И.Д., Угасте П.Э. Процессы взаимной диффузии в сплавах. – М.: Наука, 1973. – 237с.
6. Семенкин Е.С., Семенкина О. Э., Терсков В. А. Методы оптимизации в управлении сложными системами. – Красноярск : [б. и.], 2000. – 254 с.
7. Слободин М.Ю., Царев Р.Ю. Компьютерная поддержка многоатрибутивных методов выбора и принятия решения при проектировании корпоративных информационно-управляющих систем. – СПб.: Инфо-да, 2004. – 222 с.