Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы № 4 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения

Воронеж 2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы № 4 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения

Воронеж 2022

УДК 721:53(073) ББК 38.113я7-5

Составитель А. И. Сукачев

Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах комплексах: методические указания И К выполнению лабораторной работы № 4 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А. И. Сукачев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022.– 32 с.

В методических указаниях рассматриваются физические свойства ЦМД: основные параметры ЦМД и характеристики ЦМД-материалов, принципы действия основных составных частей ЦМД-микросхемы. Тематика лабораторной работы соответствует рабочей программе дисциплины «Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах».

Предназначены для студентов 4 курса специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле УФЭвРЭСиК_УМД_ЛР4.pdf.

Ил. 16. Табл. 3. Библиогр.: 2 назв.

УДК 721:53(073) ББК 38.113я7-5

Рецензент – А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор кафедры радиотехники ВГТУ

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

введение

Данные методические указания к выполнению лабораторной работы составлены в соответствии с программой курса «Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах» для специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

За годы своего развития физика и техника цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) прошли путь от открытия физического явления в одноосных ортоферритах до промышленного выпуска запоминающих устройств (ЗУ) с плотностью записи $10^6 - 10^7$ бит/см² на ЦМД в эпитаксиальных ферритгранатовых пленках.

ЦМД в микросхемах памяти выполняют роль физических носителей информации. Присутствие ЦМД означает запись «1», отсутствие – запись «0». Основное применение в качестве внешней памяти ЗУ на ЦМД нашло в системах, работающих в сложных условиях эксплуатации.

Для функционирования ЗУ нужно реализовать различные операции над доменами – генерацию, перенос, деление, аннигиляцию, считывание. Однако успех элементной базы (элементов управления доменами) определяется, в первую очередь, ее способностью осуществлять основные функции – хранение и перемещение массивов информации при минимальном энергопотреблении. Наиболее глубоко разработаны ЗУ с управляющими элементами или элементами продвижения (ЭП) в виде магнитомягких пленочных аппликаций из пермаллоя 80Ni – 20Fe, располагающихся над поверхностью ЦМД–содержащей эпитаксиальной пленки и управляемых вращающимся магнитным полем Н_{упр}.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ЗУ НА ЦМД 1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение работы ЗУ на ЦМД как устройства функциональной электроники, а также знакомство с его организацией и конструктивно-технологическим решением основных элементов и узлов.

1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦМД

ЦМД возникают при определенных внешних магнитных полях смещения в тонких монокристаллических пленках феррит-гранатов (МПФГ), H_{CM} обладающих сильной одноосной анизотропией. Единственная ось легкого намагничивания (ОЛН) направлена перпендикулярно поверхности континуальной среды. Диапазон значений H_{см} лежит в пределах 0.22...0.32 M, где М – намагниченность насыщения пленки. При достижении или превышении H_{см} верхней границы этого диапазона: H_{см} ≥ H₀=0.32M все ЦМД одновременно исчезают – коллапсируют. При уменьшении Н_{см} до нижней границы устойчивости: $H_{cm} \le H_2 = 0.22M$ ЦМД теряют цилиндрическую форму, превращаясь в полосовой до- мен, непригодный для управления. Диаметр ЦМД обычно составляет 0.4...3.0мкм, хотя существуют ЦМД с диаметром 0.08 мкм (в

пленках кобальта) и 300мкм (в пластинах ортоферритов). Наибольший диаметр d (H₂) имеют ЦМД в поле H_{см}, близком к H₂, а наименьший d(H₀) – в поле коллапса. Номинальное значение поля смещения соответствует середине диапазона устойчивости: H_{см ном} = 0.28 M. Диаметр ЦМД, соответствующий

 H_{cm} ном, называют номинальным диаметром d_{Hom} . На значение d_{Hom} ориентируются при выборе толщины МПФГ h, а также ЭП.

На рисунке 1.1 слева показана область существования устойчивых ЦМД $H_0 - H_2 = 0.1M$, ограниченная сверху полями коллапса H_0 , а снизу полями полосовых доменов H_2 . В пределах диапазона устойчивости можно осуществлять различные манипуляции с ЦМД, как с подвижным постоянным магнитомцилиндрической формы – отталкивать, притягивать, фиксировать.



Рис. 1.1. Область устойчивого существования ЦМД (слева) и егодвижение в поле постоянного градиента (справа)

ЦМД всегда сдвигается в сторону меньших значений H_{cm} . Каждому значению H_{cm} в диапазоне устойчивости соответствует только одно значение диаметра ЦМД. Поэтому если искусственно разделить ЦМД на две части (операция «репликации»), то последние немедленно восстанавливают свою форму и размер, соответствующий заданному H_{cm} .

ЦМД свободно перемещается в плоскости МПФГ под действием неоднородных полей H_{см}. При этом он всегда смещается в сторону меньших значений H_{см}. В однородных полях центр ЦМД всегда зафиксирован. На рисунке 1.1 справа показано поведение ЦМД при приложении к МПФГ неоднородного поля постоянного градиента.

Дипольное отталкивание двух ЦМД, подобно отталкиванию магнитов, заставляет «разносить» соседние ЭП в ЦМД – микросхеме на расстояние $\lambda \geq 4d$. Это расстояние называют пространственным периодом доменопродвигающей структуры. Значение λ реально ограничивает плотность записи информации в ЦМД микросхемах. Площадь ЭП не может быть меньше $\lambda^2 = 16d^2$; в то же время

дипольное взаимодействие ЦМД используют при выполнении логических операций.

Верхний и нижний торцы ЦМД, выходящие на обе поверхности МПФГ, являются источниками магнитостатического поля рассеяния, которое можно зарегистрировать пленочными магниторезисторами.

1.3. ЦМД-МАТЕРИАЛЫ

Для образования ЦМД необходимо, чтобы намагниченность пленки была ориентирована перпендикулярно ее плоскости. Однако при такой ориентации нормальная составляющая вектора намагниченности на поверхности пленки изменяется скачком, что приводит к возрастанию магнитной энергии по сравнению со случаем, когда намагниченность лежит в плоскости пленки. Дополнительная плотность энергии составляет величину µ₀M²/2 для материала с намагниченностью М (µ₀=4 π ·10⁻⁷ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума). Таким образом, энергетически выгодным является состояние, когда вектор М лежит в плоскости пленки. ЦМД – материалы должны поэтому обладать внутренним свойством, обеспечивающим некоторым предпочтительность нормальной ориентации вектора намагниченности. Таким свойством является одноосная магнитная анизотропия. Плотность энергии анизотропии Колн (константа одноосной анизотропии) определяется как выигрыш в энергии (на единицу объема), который получается при нормальной к пленке ориентации намагниченности по сравнению со случаем, когда намагниченность лежит в плоскости пленки. Отсюда следует, что ЦМД существуют только в том случае, когда $K_{0,\pi H} > \mu_0 M^2/2$. Отношение

$$Q = K_{ogH} / (\mu_0 M^2 / 2)$$
 (1.1)

называется фактором качества материала. Таким образом в ЦМД - материалах всегда Q>1.

На рисунке 1.2 показаны пределы, в которых могут изменяться основные параметры трех классов кристаллических ЦМД – материалов: гранатов, ортоферритов и гексаферритов.



Рис. 1.2. Параметры некоторых ЦМД-материалов

Жирная сплошная линия соответствует предельному значению Q=1. Параметр Q должен быть немного больше 1, при больших значениях ухудшается подвижность доменов. Величина Q зависит от размера домена.

Наиболее пригодная область параметров на рисунке 1.2 заштрихована. Видно, что наиболее широкие возможности предоставляют гранаты. Параметры М и К_{одн} в гранатах позволяют создавать ЦМД с диаметрами от 0.5 мкм вплоть до очень больших величин. Кроме того, гранаты используются наиболее

широко, поскольку их свойства соответствуют тем требованиям, которые предъявляет современная технология. Ортоферриты обладают большой анизотропией, однако в них можно создавать только большие ЦМД с диаметрами свыше 25 мкм. Гексаферриты позволяют создавать ЦМД с размерами меньше чем в гранатах, но пока плохо исследованы и имеют худшие динамические характеристики.

Таким образом, существуют кристаллические материалы, перекрывающие весь необходимый для практических целей интервал параметров ЦМД.

Анизотропия этих материалов связана с положением атомов в их кристаллической структуре, и поэтому способ получения таких материалов состоит в тщательно контролируемом выращивании монокристаллических пленок на монокристаллических подложках.

1.4. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ИЗОЛИРОВАННЫХ ЦМД

Как уже говорилось, ЦМД представляет собой цилиндрическую область обратной намагниченности в тонкой магнитной пленке, обладающей преимущественно одноосной анизотропией К_{одн} с ОЛН, ориентированной перпендикулярно поверхности пленки. Соответствующая магнитная конфигурация изображена схематически на рисунке 1.3.



Обменная энергия препятствует резкому изменению ориентации локальной намагниченности на границе домена, поэтому здесь имеется переходная область, в которой происходит плавный разворот намагниченности на 180°, так что углы между соседними спинами остаются малыми. Эта переходная область называется доменной стеной (границей) (ДГ)ЦМД и характеризуется некоторой шириной δ_w . Неограниченному уширению доменной границы, которое сопровождается уменьшением углов между соседними спинами и уменьшением обменной энергии, препятствует одноосная анизотропия, поскольку при таком уширении возрастает число спинов, отклоняющихся от ОЛН, и увеличивается энергия анизотропии. Таким образом имеется некоторая оптимальная ширина ДГ, минимизирующая полную энергию. Эта ширина, а также плотность энергии ДГ σ_w зависят от обменной константы A и константы анизотропии К_{олн}:

$$\delta_{\rm w} = (A / K_{\rm odh})^{1/2};$$

$$\sigma_{\rm w} = 4(A \cdot K_{\rm odh})^{1/2}.$$
(1.2)

В теории ЦМД часто пользуются вместо σ_w параметром

$$l = \sigma_w / \mu_0 M^2, \qquad (1.3)$$

называемым характеристической длиной материала.

Полная энергия ЦМД Е может быть представлена для пластины толщиной h в виде:

$$E = E_w + E_H + E_M = \int_{S_{IIM,I}} \sigma_w ds - \mu_0 \int_{V_{\phi}} MH dv - \mu_0 / 2 \int_{V_{\phi}} MH_M dv,$$

где E_w — энергия доменной границы; E_H — энергия взаимодействия намагниченности M с внешним магнитным полем H; E_M — магнитостатическая энергия; $S_{\text{ЦМД}}$ — площадь боковой поверхности ЦМД; V_{ϕ} — объем ферромагнитного материала; H_M — внутреннее размагничивающее поле.

Точное аналитическое решение этого уравнения является весьма сложным из за трудности определения зависимости E_{M} от размеров ЦМД, однако минимум полной энергии соответствует определенному диаметру ЦМД.

С изменением внешнего магнитного поля изменяется и диаметр ЦМД. Существует определенная область устойчивости ЦМД по магнитному полю, ограниченная максимально и минимально возможными значениями диаметра ЦМД для данной ферромагнитной пленки.

Размеры и форма ЦМД определяются двумя противодействующими факторами. С одной стороны, магнитостатическая энергия Е_м стремится увеличить площадь доменов, с другой стороны, энергия приложенного магнитного поля E_н и энергия ДГ E_w стремятся уменьшить объем домена и площадь границы. В результате ДГ принимает такую форму, при которой общая энергия Е оказывается минимальной. Домен с минимальной энергией имеет форму цилиндра. В качественном виде эти рассуждения представлены на рисунках 1.4, 1.5.



Рис. 1.4. Зависимость полной энергии ЦМД $E'_{T} = E'_{M} + E'_{W} + E'_{H}$ от d/h



Рис. 1.5. Зависимость полной энергии ЦМД Е'_т от d/h при различных полях смещения H_B

Чтобы найти количественные соотношения между оптимальным диаметром ЦМД d, толщиной пленки h, параметрами материала и величиной поля смещения H, рассмотрим уравнение равновесия круглого ЦМД, определяемоеиз условия обращения в нуль вариации полной энергии $\delta E=0$. Это уравнениеимеет вид:

$$F_{W} + (d/h)(H/M) - F(d/h) = 0,$$

где $F_w = (\partial E_w / \partial d)(\pi \mu_0 M^2 h^2)^{-1}$ – обобщенная сила поверхностного натяжения; F(d/h) – обобщенная магнитостатическая сила, называемая также силовой функцией. Хорошей аппроксимацией для силовой функции является выражение F(x) $\cong x(1+0,75x)^{-1}$.

Для ЦМД с простой блоховской ДГ уравнение устойчивости сводится к виду

$$1/h + (d/h)(H/M) - F(d/h) = 0,$$
 (1.4)

где l – характеристическая длина материала.

Состояние равновесия круглого ЦМД с диаметром d устойчивое, если вторая вариация полной энергии положительна: $\delta^2 E > 0$. Это условие выполняется, если удовлетворяется система неравенств: $1/h - S_0(d/h) < 0$; $1/h - S_n(d/h) > 0$; (при n=2,3...), где $S_n(x) - \phi$ ункция устойчивости.

Поскольку $S_0(x)>S_2(x)>S_n(x)$ при n>2, область устойчивости круглого ЦМД определяется системой неравенств

$$S_0(d/h) > 1/h > S_2(d/h)$$
 (1.5)

Функции эти называются соответственно функциями радиальной и эллиптической неустойчивости. Графики функций F(d/h), $S_0(d/h)$, $S_2(d/h)$ приведены на рисунке 1.6, а численные значения – в таблице 1.1.



Таблица 1.1

Значения функций F, S_0 и S_2

d/n	F	S ₀	S_2
0,0	0,0000	0,0000	0,0000
0,1	0,0939	0,0059	0,0007
0,2	0,1765	0,0215	0,0028
0,3	0,2493	0,0442	0,0063
0,4	0,3137	0,0716	0,0111
0,5	0,3708	0,1017	0,0172
0,6	0,4216	0,1332	0,0243
0,7	0,4672	0,1648	0,0323
0,8	0,5083	0,1960	0,0411
0,9	0,5455	0,2262	0,0505
1,0	0,5794	0,2552	0,0603
1,1	0,6104	0,2829	0,0705
1,2	0,6390	0,3093	0,0809
1,3	0,6655	0,3343	0,0914

Продолжение табл. 1.1

d/n	F	S_0	\mathbf{S}_2
1,4	0,6901	0,3579	0,1020
1,5	0,7130	0,3804	0,1126
1,6	0,7345	0,4016	0,1231
1,7	0,7547	0,4218	0,1336
1,8	0,7737	0,4410	0,1439
1,9	0,7917	0,4592	0,1541
2,0	0,8087	0,4765	0,1642
2,1	0,8249	0,4931	0,1741
2,2	0,8404	0,5089	0,1838
2,3	0,8551	0,5240	0,1933
2,4	0,8692	0,5385	0,2027
2,5	0,8827	0,5524	0,2119
2,6	0,8956	0,5657	0,2209
2,7	0,9081	0,5786	0,2297
2,8	0,9200	0,5909	0,2383
2,9	0,9316	0,6028	0,2468
3,0	0,9427	0,6143	0,2551
3,2	0,9639	0,6362	0,2712
3,4	0,9837	0,6566	0,2866
3,6	1,0024	0,6759	0,3015
3,8	1,0201	0,6940	0,3158
4,0	1,0368	0,7112	0,3295
4,2	1,0526	0,7275	0,3428
4,4	1,0678	0,7430	0,3556
4,6	1,0822	0,7578	0,3679
4,8	1,0960	0,7720	0,3799
5,0	1,1092	0,7855	0,3914
5,2	1,1219	0,7985	0,4026
5,4	1,1341	0,8109	0,4134

Окончание табл. 1.1

d/n	F	S ₀	S_2
5,6	1,1458	0,8229	0,4239
5,8	1,1572	0,8345	0,4341
6,0	1,1681	0,8456	0,4439
6,2	1,1787	0,8564	0,4536
6,4	1,1889	0,8668	0,4629
6,6	1,1988	0,8769	0,4720
6,8	1,2084	0,8866	0,4808
7,0	1,2177	0,8961	0,4894
7,2	1,2268	0,9053	0,4978
7,4	1,2356	0,9142	0,5060
7,6	1,2442	0,9229	0,5140
7,8	1,2525	0,9314	0,5218
8,0	1,2606	0,9396	0,5295

Равновесный диаметр и интервал устойчивости изолированного ЦМД можно определить графически с помощью рисунка 1.7.



Рис. 1.7. Графическое определение диаметра ЦМД d и критических параметров d₀, d₂, H₀, H₂ при различных полях H_B

Диаметры устойчивых ЦМД, заключенных внутри отрезка, который образуется при пересечении горизонтальной прямой y = 1/h с кривыми S₀(d/h) и S₂(d/h). Равновесный диаметр ЦМД определяется правой точкой пересечения прямой y = 1/h + (d/h)(H/M) с кривой F(d/h) (левая точка пересечения соответствует неустойчивому решению). Нижняя граница интервала устойчивости кругового ЦМД по полю подмагничивания определяется эллиптической неустойчивостью (H = H₂), верхняя граница соответствует коллапсу (H = H₀). Напряженности H₀, H₂ при определенном M определяются из уравнения (1.4).

1.5. ЗАПИСЬ, СТИРАНИЕ И СЧИТЫВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ В ЦМД – МИКРОСХЕМАХ

ЦМД кристалл включает нанесенную на немагнитную подложку пленку МПФГ с размещенными на ее поверхности или в приповерхностном слое функциональными узлами: генераторами, переключателями, детекторами, накопительными регистрами и др. ЦМД кристалл является главным компонентом ЦМД-микросхемы.

Как отмечалось выше (рис 1.1), в магнитном поле с постоянным градиентом управлять ЦМД невозможно, поскольку длина его пробега до превращения в полосовой домен обычно не превышает 100 мкм. Это мало по сравнению с линейным размером ЦМД–кристалла порядка 1 см.

Поэтому управление ЦМД осуществляют посредством магнитостатических ловушек (МСЛ), позволяющих сохранять форму ЦМД при перемещении его по всей площади кристалла.

Под МСЛ понимают пониженную по сравнения с H_{см ном} область локализованного неоднородного магнитного поля H_{мсл}(x, y), которое взаимодействует с ЦМД и фиксирует его в плоскости пленки. Размеры МСЛ обычно превышают размеры ЦМД в 1,3...1,5 раза и не могут быть меньше ЦМД.

На рисунке 1.8 показано образование МСЛ вблизи торца пермаллоевого элемента – аппликации толщиной t_a, расположено непосредственно над пленкой с ЦМД и отделенного от пленки небольшим (0,1...0,2 мкм) немагнитным технологическим зазором, предотвращающим повреждение поверхности МПФГ.



Рис. 1.8. Формирование магнитостатической ловушки вблизи торца пермаллоевой аппликации, намагниченной полем H_{упp}: а – магнитное поле рассеяния аппликации; б – вертикальная компонента поля рассеяния

При приложении горизонтального управляющего поля H_{упр} аппликация намагничивается.

Горизонтальное внешнее поле не оказывает влияния на поведение ЦМД. Но намагниченность пермаллоевой аппликации M_a обусловливает появление положительного (+) и отрицательного (-) зарядов на концах аппликации, возбуждающих магнитное поле рассеяния, имеющее вертикальную H_z и горизонтальную H_x компоненты. Вертикальная компонента поля рассеяния вблизи правого торца противонаправлена полю смещения, образуя его локальное понижение – МСЛ. Вблизи левого торца, наоборот, поле смещения усиливается в ловушку, занимая всю ее площадь и сохраняя в ней свою форму круглого цилиндра. Переключением H_{ynp} можно «перебрасывать» ЦМД из одного крайнего положения в другое.

По существу, управление ЦМД, т.е. перемещение его по заданной траектории в плоскости кристалла, сводится к последовательной генерации(возбуждению) МСЛ на пути его следования. Максимальная скорость МСЛ

$$V_{\rm MCJ} = \lambda f_{\rm KD}$$

где λ - период ДПС; $f_{\kappa p}$ – критическая частота вращения $H_{\nu n p}$.

Предельная скорость ЦМД $v_{\text{цмд}}$ определяется максимальной глубиной ловушки $H_{\text{м}}$ и фактором демпфирования среды – подвижностью μ_{w} границы ЦМД и оценивается по формуле

$$v_{\text{IIMJ}} = \mu_{\text{W}} H_{\text{M}} / 2$$
.

Таким образом µ_w является одним из основных динамических параметров ЦМД-материалов, а, следовательно, и ЦМД устройств.

Пока ЦМД находятся в ловушке, v_{цмд =} V_{мсл.} Отсюда

$$\tilde{f}_{\rm kp} = \mu_{\rm w} H_{\rm M} / 2\lambda \,. \tag{1.6}$$

При достижении критической частоты ЦМД уже не успевает следовать за МСЛ из-за «вязкости» среды, определяемой μ_w , и выпадает из синхронизма, обусловливая тем самым сбои в работе ЦМД – микросхемы.

На рисунке 1.9 показан фрагмент основного типа доменопродвигающих схем (ДПС), состоящих из пермаллоевых аппликаций (ЭП), форма которых создает наилучшее условие для продвижения ЦМД.



Рис. 1.9. Фрагменты доменопродвигающих структур, используемых в ЦМДмикросхемах и движение в них ЦМД при вращающемся Н_{упр} (точками показаны позиции ЦМД при четырех направлениях Н_{упр}): а – замкнутый ЦМД-регистр; б – относительные размеры аппликаций

Движение МСЛ по аппликации вызывается вращением поля H_{упр}, четыре позиции МСЛ показаны на рисунке. За один оборот H_{упр} ЦМД перемещается в соседний ЭП. Совокупность последовательно расположенных пермаллоевых аппликаций, создающих под действием внешнего управляющего магнитного поля МСЛ, передвигающие ЦМД по замкнутому или разомкнутому информационному каналу, называют ЦМД – регистром. Каждая пермаллоевая аппликация разомкнутого ЦМД – регистра является ЭП. В замкнутом ЦМД –

регистре сопрягающие аппликации могут содержать два ЭП (см. рис. 1.9). Замкнутые ЦМД регистры в ЦМД – микросхемах, называемые накопительными или информационными регистрами, предназначены для хранения информации, а разомкнутые ЦМД регистры, снабженные генератором и детектором ЦМД, применяют для ввода – вывода информации.

В пермалоевых ДПС «узкими» местами являются горизонтальные зазоры между аппликациями $\delta = d/2$ (d – диаметр ЦМД).

Отсюда минимальный топологический размер (МТР) для таких структур, иными словами, требуемая разрешающая способность литографического оборудования R также равна d/2. Для примера положим R = 1 мкм (предельное значение для фотолитографии). Тогда минимальный номинальный диаметр ЦМД d_{ном} = 2R= 2 мкм. Это, в свою очередь, означает, что и линейный размер ячейки $\lambda = 4d$ и ее площадь $S_{ay} = \lambda^2 = 16d^2 = 64R^2$ также заранее определены. случая предельная емкость микросхемы С Для рассматриваемого при $1 \text{ cm}^2 = 10^8$ кристалла S_{KD} мкм² стандартной площади = равна: $C = S_{_{KD}} / S_{_{SY}} = 10^8 / 64 \approx 1,5 \cdot 10^6$ (около 1 Мбит).

Таким образом для работы с малыми (субмикронными) ЦМД пермаллоевые аппликации мало пригодны. Для этого необходимо либо переходить на субмикронную литографию, либо использовать другие виды ДПС.

Для записи и стирания информации в ЦМД – микросхемах применяют соответственно генераторы и аннигиляторы ЦМД. Генератор ЦМД, изображенный на рисунке 1.10, а, в упрощенном виде, представляет собой проводниковую шину в виде петли с радиусом закругления r_{ген}. При возбуждении импульсным током I_{ген} внутри петли возникает магнитное поле быть направлено Н_{ген} = $I_{reh}/2r_{reh}$ которое должно против вектора намагниченности кристалла М и иметь значение, превышающее поле анизотропии H_a. Снизить ток генерации (в серийных ЦМД микросхемах $I_{2eH} =$ 100...200 ма) удается конструктивным совмещением токовой петли генератора и пермаллоевых аппликаций в соответствии с рисунком 1.10, б. Генератор ЦМД, изображенный на рисунке 1.10, а, может служить аннигилятором ЦМД, полярность возбуждающего импульса. На если сменить практике как дополнительные узлы аннигиляторы используются редко, предпочтение отдается косвенным методам стирания информации.



Рис. 1.10. Генератор ЦМД (а) и совмещение проводника с пермаллоевыми аппликациями, увеличивающими МСЛ генератора (б)

Для переключения ЦМД из канала ввода в накопительный регистр или из накопительного регистра в канал вывода используются переключатели ЦМД. Для достижения неразрушающего считывания служат ЦМД репликаторы, осуществляющие деление информационного ЦМД на два: «оригинал» и «реплику» (копию). Последняя переключается в канал вывода и считывается, при этом «оригинал» остается в регистре.

Типовая конструкция переключателя – репликатора изображена на рисунке 1.11.



Рис. 1.11. Переключатель-репликатор ЦМД: а – типовая конструкция; б – импульс тока управления переключателем-репликатором

Считывание информации в применяемых на практике ЦМД – микросхемах происходит в четыре этапа:

- увеличение площади ЦМД до значений, удовлетворяющих пороговой чувствительности магниторезисторного детектора (10⁻¹⁰ Вб);
- физическое преобразование магнитного потока с поверхности растянутого ЦМД в изменение электрического сопротивления Δρ тонкопленочного пермаллоевого детектора (магниторезисторный эффект);
- преобразование Δρ в электрический сигнал посредством мостовой схемы;
- 4) усиление сигнала с уровня 3 ... 20 мВ до стандартного уровня 5В.

На рисунке 1.12 представлена типовая структурная схема ЦМД микросхемы, в которой обозначены: Ген – генератор ЦМД; ПВ - переключатель ввода; П/Р – переключатель-репликатор; Д1 и Д2 – детекторы ЦМД; Ан – аннигиляторы; НР – накопительные регистры. При записи информации кодовая последовательность ЦМД из генератора поступает в канал ввода. Длина кодовой

последовательности (информационной страницы) равна общему числу регистров.



Рис. 1.12. Типовая информационная структура ЦМД-микросхемы

Путем подачи импульса тока (20...40 ма) в шину переключателя тока ЦМД из канала ввода переключаются в НР, где перемещаются при вращении Н_{упр} или останавливаются при его выключении. Совокупность ЦМД в одноименных ЭП (аппликациях) НР образует страницу данных. Общее число страниц в ЦМД микросхемах равно разрядности НР. Вывод страницы данных в канал вывода осуществляется переключателем – репликатором (П/Р).

Типовая конструкция ЦМД микросхемы, являющейся основным компонентом ЗУ на ЦМД, представлена на рисунке 1.13.



Рис. 1.13. Типовая конструкция ЦМД-микросхемы: 1 – пермаллоевый корпус; 2 – постоянный магнит с полюсным наконечником; 3 – опорная плата; 4 – ЦМД-кристалл; 5 – управляющие катушки

1.6. ОБЛАСТЬ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ И РАБОЧИЙ ДИАПАЗОН ДПС

Областью устойчивой работы (ОУР) называют область в фазовом пространстве параметров ЦМД-схемы, в которой обеспечивается ее нормальное функционирование. В качестве фазовых параметров чаще всего выбирают: напряженности магнитных полей смещения И управления, амплитуды управляющих тактовую частоту, геометрические характеристики токов, управляющих элементов, параметры ЦМД пленок, температуру и др.

Суммарная ОУР ЦМД – схемы представляет собой пересечение ОУР входящих в ее состав функциональных узлов: ДПС, генераторов, детекторов, переключателей, репликаторов. Эта область является важнейшей количественной характеристикой ЦМД–схем.

Для ДПС на ферромагнитных аппликациях, в которых увеличение Н_{упр} приводит к увеличению МСЛ, характерна разомкнутая ОУР.

На рисунке 1.14 а приведено семейство ОУР, снятых для трех различных тактовых час тот ДПС на несимметричных «шевронах» с $\lambda = 8$ мкм.





Верхняя и нижняя границы ОУР определяются коллапсом и эллиптической неустойчивостью ЦМД, тогда как левая граница, отвечающая минимальному полю H_{упр} – минимальной глубиной МСЛ, достаточной для продвижения ЦМД в схеме. Характерно, что верхняя граница ОУР проходит выше H₀, что обусловлено эффектом экранирования ЦМД ферромагнитными аппликациями.

Все ДПС помимо режима непрерывного продвижения ЦМД на практике имеют и старт-стопный режим. Верхняя граница ОУР в старт-стопном режиме опускается по отношению к верхней границе в непрерывном режиме. Во избежание этого в плоскости ЦМД-пленки прикладывают удерживающее магнитное поле H_{va}, напряженность которого обычно не превышает 10 А/см.

Существует эмпирическое соотношение, связывающее H_{упр} с намагниченностью

$$H_{viidhom} = 0,06M + 10A / cm$$
(1.7)

Рабочим диапазоном (РД) называют ширину ОУР по полю H_{cm} при заданном H_{ynp} .

Суммарный РД определяется как область полей смешения, в которой обеспечено нормальное функционирование всех отдельных элементов, входящих в состав устройства. На рисунке 1.14, б показаны рабочие диапазоны

детектора (1), накопительных регистров в старт-стопном режиме (2), обменного переключателя (3) и репликатора (4), а также суммарный РД (5) для двух значений H_{упр}: 30 А/см (непрерывная линия) и 40 А/см (штриховая). Суммарный РД составляет соответственно 12 и 15 % от H_{см ном}.

1.7. ВЫБОР МАТЕРИАЛА-НОСИТЕЛЯ ЦМД

Основными статическими параметрами ЦМД – материала являются постоянная обменного взаимодействия А, постоянная одноосной анизотропии К_{одн}, фактор качества Q, намагниченность насыщения M и характеристическая длинна l, а основным динамическим параметром – подвижность доменной стенки µ_w.

Постоянная А определяет энергию обменного взаимодействия соседних магнитных ионов при относительной разориентации их магнитных моментов (спинов). Постоянная К_{олн} равна разности энергий, затрачиваемых на намагничивание единичного объема безграничного ферромагнетика вдоль осей трудного и легкого намагничивания (в данном случае в плоскости пленки и в перпендикулярной ей плоскости соответственно). Эта величина определяет порог спонтанного зарождения ЦМД. Значение Q равно отношению поля анизотропии H_a к намагниченности насыщения М. Параметр I, имеющий размерность длины, пропорционален отношению поверхностной плотности энергии доменной стенки к объемной плотности энергии размагничивающих полей (магнитостатической энергии) в пленке, намагниченной до насыщения вдоль ОЛН, и определяет размер ЦМД в данном материале. Эти параметры связанымежду собой отношениями (1.1, 1.3).

При выборе ЦМД – материала независимыми обычно являются параметры A, l, Q. Комбинируя вышеприведенные соотношения, получим:

$$K_{\rm odh} = 4Q^2 A / l^2$$
 (1.8)

$$M = (8AQ / \mu_0 l^2)^{1/2}$$
(1.9)

Постоянная А слабо зависит от типа материала. В частности, для ферритгранатов ее значение обычно находится в пределах 1,5...3,7 пДж/м, оптимальное значение А = 2пДж/м. Уменьшение А приводит к снижению термостабильности, а ее повышение к росту М, H₀, H_{упр}.

Параметр 1 определяет размер ЦМД в данном материале, связанный в свою очередь с разрешающей способностью литографии, применяющейся в процессе изготовления ЗУ на ЦМД.

Значение фактора качества Q лежит в пределах Q = 2...6, выбирают его значение из компромиссных соображений: с увеличением Q повышается устойчивость, но снижается подвижность ЦМД. Минимально допустимое значение Q определяется эмпирическим соотношением

$$Q_{\rm MHH} = M^{-0.6} \tag{1.10}$$

Толщина МПФГ обычно лежит в пределах h = 31...91. Минимальный диаметр ЦМД в центре ОУР достигается при толщине пленки h = 41, но при h = 91 увеличивается считывающий сигнал и расширяется ОУР ЦМД.

Из (1.8, 1.9) вытекают два соотношения, позволяющих разделить влияние К (в кДж/м³) и М(в кА/м) на параметры ЦМД:

$$Q/1 = 16(K/A)^{1/2}$$
 (1.11)

$$Q/l^2 = 0.158M^2 / A \tag{1.12}$$

Эти зависимости представлены на рисунках 1.15, 1.16.



Рис. 1.15. Зависимость Q/l от КоднА



Рис. 1.16. Зависимость Q/l^2 от М и А

Одновременно оптимизировать все параметры пленок невозможно. Наиболее известные составы и параметры МПФГ, выращенных на подложках ГГГ (гадолиний – галлиевый гранат) с ориентацией (III) приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Состав	1,MKM	М, кА/м	А, пДж/м	К _{одн} , кДж/б	Ø	T _H , K	һ,мкм	Н₀, кА/М
1.(Sm, Lu, Gd, Ca) ₃ (Ge, Ga, Sc, Fe) ₅ O ₁₂	0,030	191.4	1.98	7.3	1.39	393		
2. $(Sm,Lu)_3(Sc,Fe)_5O_{12}$	0.042	157	3.9	26.8	1.74		0.33	
3. Sm _{0,85} Tm _{2,15} Fe ₅ O ₁₂	0.047	121	3.7	19	2.5	545	0.87	
4. Sm1,2Lu1,6Fe5O12	0,05	140	3.7	30.4	2.46		4.2	
5. Sm0,85Lu0,27Tm1,02Y0,82Gd0,24Al0,2F4,6O12	0.057	102.8			1.61		0.75	
6. (Bi,Sm,Lu,Gd,Pb) ₃ (Al,Sc,Fe) ₅ O ₁₂	0.061	85.0	2.2	9.75	2.15	479	0.28	2
7. Sm0,41Lu2,07La0,52Ga0,58Fe4,42O12	0.07	76.4	2.0	6.68	1.8	456	0.54	3
8. Sm0,35Tm1,30Y0,90Gd0,45Al0,3Fe4,7O12	0,078	76,9			1,90		0,90	
9. Sm1,4Lu1,6Y0,6Al0,75Sc0,14Fe4,11O12	0.08	61.4	1.4	6,73	2,85	413	0,71	3
10. (Bi, Tm, Y) ₃ (Ge, Fe) ₅ O ₁₂	0.088	65.3		4,36			1,16	
11. Sm0,3Tm0,75Y1,2Ga0,75Fe4,25O12	0.094	40.1		3,12	3,1	497	1,09	
12. Sm1,4Y1,6Al0,75 Fe4,25O12	0.10	52.5	2.0	4,10	2,36	453	0,87	2
13.Sm _{0,45} Lu _{2,10} La _{0,15} Ga _{0,55} Fe _{4,25} O ₁₂	0.10	60.2	2.1	5,34	2,35	462	1,27	3
14. Sm0,12Tm1,30Y0,90Gd0,60Ga0,40Fe4,60O12	0.103	52.2			1,75		0,95	
15. (Sm,Lu,Ca) ₃ (Si,V,Fe) ₅ O ₁₂	0.104	54.9	2.2		2,1	514	1,15	3
16. Sm0,92Y1,76Gd0,32Al0,62Fe4,38O12	0.11	52.9		4,23	2,41	466	0,97	2
17. (Bi, Y, Lu) ₃ (Ga,Fe) ₅ O ₁₂	0.11	48			3,6	411		
18. Sm _{0,30} Tm ^{1,30} Y _{0,80} Gd _{0,60} (Ga, Al) _{0,36} Fe _{4,65} O ₁₂	0.111	61.6	2,9		2,24		0,85	
19. Sm0,6Lu1,6La0,2Ga0,6Ge0,6Fe4,4O12	0.12	62.4		7,1	2,9			
20. Sm0,30Yb1,36Y0,81Gd0,55Ga0,41Fe4,59O12	0.122	50.4	1,92	2,93	1,83	480	1,86	3
21. (Sm, LU, GD, CA) ₃ (Ge, Ga, $Fe_{)5}O_{12}$	1.123	51.1		5,3	3,24	457	1,0	2
22. (Bi, Lu, Y) ₃ (Ga, Fe) ₅ O ₁₂	0.124	36.1			5,70		2,73	

Параметры МПФГ, выращенных на подложках с ориентацией (III)

Продолжение табл. 1.2

Состав	1,мкм	М, кА/м	А, пДж/м	К _{одн} , кДж/ь	δ	T _H , K	ћ,мкм	$H_0, \kappa A/M$
23.Eu0,85Tm2,15Ga0,55Fe4,45O12	0.13	55.7	3,91	5,35	2,8		0,7	
24. Sm _{0,34} Tm _{1,16} Y _{0,95} Gd _{0,55} Ga _{0,22} Fe _{4,86} O ₁₂	0.132	54.2			2,03	490		
25. (Bi, Sm, Tm, Pb) ₃ (Ga,Fe) ₅ O ₁₂	0.136	50.1			3,27	483		2
26. Eu _{0,8} Tm _{2,2} Ga _{0,5} Fe _{4,5} O ₁₂	0.138	56.3	2,0	6,0	3		1,0	
27. Sm _{0,3} Lu _{2,1} La _{0,6} Ga _{0,9} Fe _{4,1} O ₁₂	0.14	40.7		2,7	2,6			
28. Sm0,59Lu0,33Y1,43Ca0,77Ge0,75Fe4,12O12	0.16	37.9			1,52	486	4,7	2
29. (Bi,Lu) ₃ (Ga, Fe) ₅ 0 ₁₂	0.17	34.1			3,49		1,98	
30. Sm0,4Lu0,7Y1,1Ga0,8Ge0,3Fe4,2O12	0.17	43.0			3,5	495	1,5	2
31. Sm _{0,6} Lu _{1,1} Y _{1,1} Gd _{0,2} Ga _{0,9} Fe _{4,1} O ₁₂	0.17	42.2	2,2		3,6	447	1,5	2
32.Sm0,37Lu0,54Er0,48Y0,49Gd0,10Ca0,72Ge0,72Fe4,2 6O12	0.171	44.2			4,1		2,00	2
33.Bi0,31Sm0,46Lu1,77Pb0,01Ca0,62Ge0,63Fe4,20O12	0.18	44.2	2,7	5,56	4,5	486	2,02	2
34. (Sm, Lu,Ca) ₃ (Si,V,Fe) ₅ O ₁₂	0.185	38.8	2,8	2,91	3,1	495	1,74	2
35. Sm0,5Lu0,7Y1,0Ca0,8Ge0,8Fe4,2O12	0.19	40.6	2,6	3,6	3,5		1,7	
36. Sm _{0,32} Lu _{1,94} Y _{0,67} Ca _{0,77} Ge _{0,77} Fe _{4,22} O ₁₂	0.19	42.2		3,92	3,5	487	2,0	
37. Eu0,63Tm1,90Y1,37Ga0,78Fe4,32O12	0.19	41.9		4,21	3,8	458		
38. Sm0,59Lu0,35Y1,46Ca0,73Ge0,88Fe4,00O12	0.19	27.9	2,2		3,2	480	2,2	1
39. (Sm,Lu,Ca) ₃ (Si,V,Fe) ₅ O ₁₂	0.196	38.8	2,6	3,18	3,4	509	1,97	2
40. Bi _{0,27} Lu _{1,94} Y _{0,85} Pb _{0,02} Ca _{0,068} Ge _{0,75} Fe _{4,20} O12	0.20	35.3		2,84	3,6	478	1,92	1
41. Sm _{0,6} (Lu,Y,Ca) _{2,4} (Ge,Fe) ₅ O ₁₂	0.20	34.2			3,6	496	1,8	1
42. Sm0,67Lu0,79Y1,06Ca0,90Ge0,76Fe3,35O12	0.20	38.4			2,55	469	2,1	2
43. Eu1Tm ₂ Ga _{0,7} Fe _{4,3} O ₁₂	0.202	35.2	3,4	7,8	10		1,66	
$\overline{44.(\text{Sm},\text{Lu},\text{Ca})_3(\text{Si},\text{V},\text{Fe})_5\text{O}_{12}}$	0.208	44.2	2,96	5,84	4,8	512	1,90	2
45. Sm _{0,53} Tm _{1,54} Y _{0,27} Ca _{0,66} Ge _{0,66} Fe _{4,34} O ₁₂	0.21	44.8		5,73	4,6	503	2,0	

Окончание табл. 1.2

Состав	1,мкм	М, кА/м	А, пДж/м	К _{олн} , кДж/ь	δ	T _H , K	һ,мкм	$H_0, kA/M$
46.Sm0,39Lu0,43Y1,41Pb0,02Ca0,75Ge0,75Fe4,25O12	0.215	34.5	2,98	2,17	2,91	487	1,40	1
47. Sm _{0,62} Lu _{0,38} Y _{1,35} Ca _{0,83} Ge _{0,75} Fe _{4,06} O ₁₂	0.22	25.6	1,2		3,62	477	2,4	1
48.Sm0,39Lu0,43Tm0,14Y1,27Pb0,02Ca0,75Ge0,75Fe4, 25O12	0.224	34.8	2,52	2,43	3,19	488	1,38	1
49.(Eu,Tm,Y,Ca) ₃ (Ge,Fe) ₅ O ₁₂	0.23	24.0		1,48	4,1	490	1,93	1
50. Sm0,40Lu0,57Y1,22Ca0,83Ge0,83Fe4,15O12	0.239	35.5		3,55	4,5	485	2,01	1
51. Sm0,69Lu0,33Y0,65Ca0,82Ge0,82Fe4,18O12	0.25	35.0			4,8	477	2,5	1
52. (Sm,Lu,Y,Ca) ₃ (Ge,Ga,Fe) ₅ O ₁₂	0.33	21.5		1,2	•••		2,8	1
53. (Sm,Lu,Y,Ca) ₃ (Ge,Ga,Fe) ₅ O ₁₂	0.345	21.5		1,2	4,13		2,8	1
54. (Sm, Lu, Y, Ca) ₃ (Ge,Fe) ₅ O ₁₂	0.353	25.1			6,9	482	1,59	
55.(Bi,Tm,Y) ₃ (Ge,Fe) ₃ O ₁₂	0.36	26.9			4,65		2,60	
56. (Eu, Tm, Y) ₃ (Ge,Fe) ₅ O ₁₂	0.38	24.3		2,22	6,0		2,0	9
57.(Sm,Lu,Y,Ca) ₃ (Ge,Fe) ₅ O ₁₂	0.38	26.2		2,3	5,0		2,0	1
58. (Sm,Lu,Y,Ca) ₃ (Ge,Fe) ₅ O ₁₂	0.395	21.6		2,0	6,8	477	3,1	1
59. Eu _{0,3} Tm _{0,3} Y _{1,52} Ca _{0,58} Ge _{0,88} Fe _{4,12} O ₁₂	0.53	17.4		0,77	4,1	470	4,6	
60. $(Sm, Lu, Y, Ca)_3(Ge, Fe)_5O_{12}$	0.54	18.3		1,04	5,0	469	5,4	1

1.8. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

Задание предусматривает знакомство с условиями образования И физическими свойствами ЦМД; ЦМД основными параметрами И характеристиками ЦМД-материалов; принципом действия основных ЦМД-микросхемы. составных частей Расчетная часть предполагает определение диапазона значений и номинальной величины диаметра ЦМД; расчет параметров и выбор конкретного материала для устройства на ЦМД. Исходной величиной для расчета является отношение 1/h, выбираемое в соответствии с таблицей 1.3.

Таблица 1.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
l/h	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25

Варианты задания

Отчет должен содержать соответствующие расчеты, подтвержденные иллюстрациями, обоснованный выбор необходимых величин, а также выводы с оценкой полученных результатов.

4.9. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

1. Выбрать в соответствии с таблицей 1.3 значение l/h.

2. Пользуясь таблицей 1.1, построить графики функций F(d/h), $S_0(d/h)$, $S_2(d/h)$ аналогично рисункам 1.6, 1.7. При построении графиков масштаб величин по осям x, y должен быть одинаковым.

3. По графикам определить диапазон значений d/h, проведя горизонтальную прямую из точки с заданным значением l/h до пересечения с кривыми $S_0(d/h)$ и $S_2(d/h)$, соответственно d_0/h и d_2/h (см. рис. 1.7).

4. Восстановить перпендикуляр из точек d_0/h и d_2/h до пересечения с кривой F(d/h), определить значения F(d_0/h) F(d_2/h). То же можно сделать более точно, воспользовавшись таблицей 1.1.

5. По найденным значениям, используя уравнение (1.4), найти значение критических полей H_0/M и H_2/M , а затем среднее (номинальное) значение H_6/M . На построенном графике провес ти прямые из точки, соответствующей величине l/h через полученные в п. 4 точки аналогично построениям на рисунке

6. Тангенс угла наклона m этих прямых равен H_0/M и H_2/M .

7. По номинальному значению $H_{\rm b}/M$ определить номинальное значение d/h. Для этого провести до пересечения с функцией F(d/h) прямую с наклоном arctgH_b/M.

8. Выбрать конкретное значение h (h = 0,25...5 мкм). По значению h определить необходимые значения l, d (определяется диапазон значений и номинальная величина d).

9. Выбрать оптимальные значения A, Q и далее по формулам (1.8, 1.9) и, ориентировочно, по графикам рисунков 1.15, 1.16 определить значение K, M. Сравнить результаты. Определить необходимые значения поля смещения $H_{\rm 5}$ и поля управления $H_{\rm ynp.}$ (1.7).

10. Выбрать конкретный материал для МПФГ, пользуясь таблицей 1.2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные методические указания направлены на изучение физических свойств ЦМД; основных параметров ЦМД и характеристик ЦМД-материалов, принципа действия основных составных частей ЦМД-микросхемы. Также описана методика расчета устройства на ЦМД. При необходимости углубить теоретические знания по рассмотренным темам следует обратиться к библиографическому списку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник / ред. Н. Н. Евтихиев, Б.Н. Наумов. М.: Радио и связь, 1987.
- 2. Эшенфельдер А. Физика и техника цилиндрических магнитных доменов.
- / А. Эшенфельдер пер. с англ. М.: Мир, 1983.

ПРИЛОЖЕНИЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦМД-УСТРОЙСТВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАБОТЕ

Наименование	Обозначение	Определяющая формула	Единица измерения
1. Намагниченность	М		А/м
2.Проницаемость вакуума	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$		Вб/(А∙м)
3.Энергия анизотропии	К		Дж/м ³
4.Гиромагнитное отношение	γ		(с · А/м) ⁻¹
5.Обменная энергия	А		Дж/м
6.Параметр Гильберта	α		-
7.Напряженность маг- нитного поля	Н	∫H∙dl=NJ	А/м
8.Магнитная индукция	В	B=μ ₀ (H+M)	Вб/м ²
9.Поле анизотропии	Н _к	$H_{\kappa}=2K/\mu_0M$	А/м
10.Фактор качества	Q	$Q=H_{\kappa}/M$	-
11.Плотность энергии стенки	σ	$\sigma = 4\sqrt{AK}$	Дж/м ²
12.Характеристическая длина	1	$l = \sigma/\mu_0 \cdot M^2$	М
13.Подвижность стенки	μ_{ω}	$\mu_{\omega} = \frac{\gamma}{a} \sqrt{\frac{A}{K}}$	$M^2/(c \cdot A)$

оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Лабораторная работа №4. Анализ конструкции ЗУ на ЦМД	3
1.1. Цель работы	3
1.2. Физические свойства ЦМД	3
1.3. ЦМД-материалы	5
1.4. Статическая устойчивость изолированных ЦМД	7
1.5. Запись, стирание и считывание информации ЦМД – микросхемах	в 13
1.6. Область устойчивой работы и рабочий диапазон ДПС	20
1.7. Выбор материала-носителя ЦМД	22
1.8. Лабораторное задание	28
1.9. Порядок выполнения расчетной части работы	28
Заключение	29
Библиографический список	30
Приложение. Единицы измерения параметров ЦМД-устройств, используемь	ле в
работе	31

Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы № 4 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения

> Составитель Сукачев Александр Игоревич

> > В авторской редакции

Подписано к изданию 19.09.2022. Уч.-изд. л. 1,7.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» 394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84