

УДК 621.793.1:538

СРАВНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ НАВЕДЕНИЯ КРУГОВОГО НАПРАВЛЕНИЯ ОСИ ЛЕГКОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ В ПЛОСКИХ КОЛЬЦЕВЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ

Ю.Д. Бедрин, Ю.Д. Данилевский, Б.П. Малых

В настоящей работе рассматриваются некоторые способы наведения круговой анизотропии в плоских кольцевых ферромагнитных пленках, получаемых термическим испарением в вакууме; приводится описание внутренних устройств вакуумной камеры, использованных для получения подобных пленок; производится сравнение примененных способов по степени сложности внутреннего устройства и равномерности распределения толщины осаждающегося на подложке вещества; дается оценка технологичности каждого из описанных способов применительно к массовому производству плоских кольцевых пленок с круговой анизотропией.

Отличительной особенностью технологии получения плоских кольцевых пленок с круговым направлением оси легкого намагничивания является то, что магнитный отжиг должен осуществляться в циркулярном магнитном поле [1,2]. В данном случае источником циркулярного магнитного поля может быть только электрический ток, проходящий по осевому проводнику через центральное отверстие в подложке. Поэтому при разработке конструкции внутреннего устройства вакуумной камеры необходимо выполнить сле-

дующие условия:

1) обеспечить точное коаксиальное расположение центра отверстия в стеклянной подложке, осевого токопровода для создания циркулярного магнитного поля и кольцевых масок, обеспечивающих необходимые геометрические размеры пленки;

2) выбрать конструкцию испарителя и его расположение таким образом, чтобы обеспечить равномерность толщины пленки вдоль кольца и по радиусу.

К этим особым требованиям необходимо добавить общие, предъявляемые к технологии напыления ферромагнитных пленок, такие как: поддержание необходимой степени вакуума и температуры подложки в процессе напыления (в пределах $200-350^{\circ}\text{C}$); обеспечение необходимой величины магнитного поля в несколько десятков эрстед на внешнем крае пленки и обеспечение соответствия составов пленки и испаряемого вещества; контроль и автоматизация при управлении процессом испарения и регистрации технологических параметров (напряжения, токов, температур).

Для получения плоских кольцевых пленок с круговой анизотропией была использована вакуумная установка, изготовленная из стандартных откачных средств. Применение двух азотных ловушек позволило получать в рабочем объеме 23 дм^3 вакуум 10^{-7} мм рт. ст. перед напылением пленок.

На рис. 1 схематически показано внутреннее устройство вакуумной камеры для одновременного напыления за один технологический цикл четырех кольцевых пленок. Цифрами обозначены: 1 - корпус паромасляного насоса; 2 - азотные ловушки; 3 - базовая плита установки; 4 - колпак; 5 - вакуумный затвор. На базовой плите установлены две полые, охлаждаемые водой, медные несущие стойки 6, на которых крепятся охлаждаемая водой нижняя несущая плита 7 и верхняя несущая плита 8, выполненные из нержавеющей стали. На плите 7 установлены (рис. 1,2) центральная стойка 9 испарителей II, состоящая из двух электрически изолированных половинок, в каждой из которых закрепляются внутренние концы двух испарителей (I, II и III, IV). Наружные концы испарителей II закрепляются в стойках 10, которые свободно поставлены на следя-

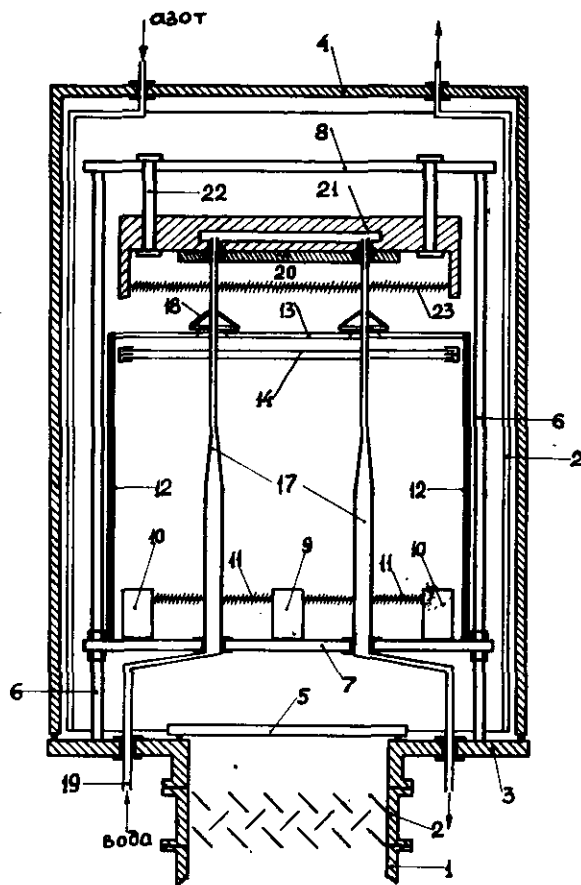


Рис. 1.

ные прокладки, позволяющие этим стойкам перемещаться под действием силы, создаваемой испарителем при термическом расширении. Подвод тока к испарителям и последовательное электрическое соединение всех испарителей выполнены гибким многожильным проводом.

Для обеспечения равномерного углового распределения осаж-

дающегося вещества в плоскости подложки из соображений симметрии выбрана кольцевая форма испарителей. Каждый испаритель со-

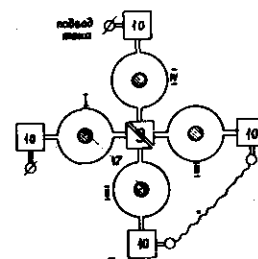


Рис. 2.

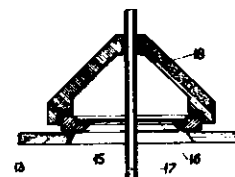


Рис. 3.

как показали результаты измерений толщины пленок и их магнитных свойств, это явление заметно не сказывается на толщине получаемых пленок. Расстояние от испарителей до подложек может регулироваться стойками 9 и 10 различной высоты.

На нижней несущей плите 7 установлены четыре вертикальные стойки 12, на которых крепятся узел маскодержателя 13 и заслонка 14. В маскодержателе имеется пять отверстий: четыре для подложек и пятое, центральное, для установки в нем контрольной подложки с термопарой. Хромель-алюмелевая термопара была сварена из проволок диаметром 60 микрон и вплавлена в тело контрольной подложки с нижней ее стороны.

Маскодержатель 13 представляет пластину, на четыре отверстия которой накладываются сверху четыре маски 15, формирующие внешний край пленки на кольцевой подложке 16 (рис. 3). Через отверстие в каждой подложке проходит осевой токопровод 17, обеспечивающий создание циркулярного магнитного поля при пропускании по нему электрического тока. Для обеспечения соосности то-

копровода, центрального отверстия в подложке и маски 15 исполь-

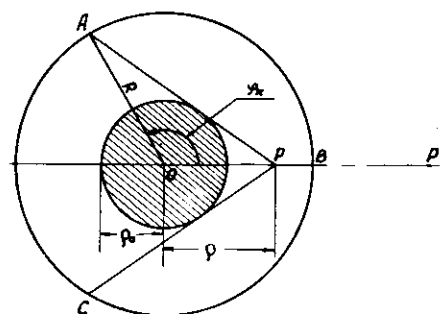


Рис. 4.

зуется специальная шатровая маска 18. Она представляет собой конус, в основание которого вставляется маска 15, а через вершину проходит с минимальными допусками токопровод 17. Боковая поверхность конуса 18 удалена почти полностью (оставлено лишь несколько ребер) для того, чтобы обеспечить передачу тепла к подложке от печи, находящейся над маскодержателем. Так как диаметр отверстий в маскодержателе сделан меньше внешнего диаметра маски 15, то при небольших смещениях осевого токопровода 17 по горизонтали маски 15 и 18 могут свободно перемещаться по маскодержателю, образуя единую "плавающую" маску. Это предохраняет хрупкую подложку от разрушения, которое происходит очень часто при попытках жесткого закрепления подложки, маски и токопровода. Для того чтобы избежать электрического контакта токопроводов 17 через маску 18 и маску 15 с маскодержателем 13, между маской 15 и маскодержателем помещается тонкая слюдяная прокладка с отверстием.

Заслонка 14, расположенная непосредственно под маскодержателем, состоит из двух щитков, которые перемещаются по горизонтальным направляющим и в закрытом состоянии плотно охватывают все четыре токопровода 17. Открывается заслонка рычажным механизмом с помощью пружины, которая удерживается в растянутом положении тонкой проволокой. После прогрева подложек и испарителя, а также заливки азота в обе ловушки, перед самым испарением удерживающая пружину проволока пережигается электрическим током, пружина сжимается и приводит в действие рычажный механизм, раздвигающий заслонку.

Токопроводы 17 выполнены из медных трубок; по трубкам про-

пускается вода для охлаждения центральной части токопровода, на которую нанизываются плавающие маски с подложками и которая представляет собой тонкую (диаметром до 1 мм и меньше) трубку нержавеющей стали, сваренную с основной более толстой, медной трубкой через переходный конус. При необходимости в этот конус могут ввариваться трубки разного диаметра, в зависимости от диаметра отверстия в подложке. Так как напряженность циркулярного магнитного поля тока обратно пропорциональна расстоянию от оси токопровода, то при работе с подложками, имеющими большее отверстие и больший внешний диаметр, желательно пользоваться и более толстым токопроводом, чтобы обеспечить большую величину тока. По этой же причине токопроводы конструктивно выполнены в виде трубок: чтобы обеспечить протекание по ним больших токов без заметного перегрева, приходится охлаждать токопроводы проточной водой. Токопроводы механически закреплены в нижней несущей плите 7 через фторопластовые уплотнения, обеспечивающие электрическую изоляцию от плиты и протекание воды при вакуумном уплотнении через соединение непосредственно токопроводов с подводными трубками 19. Токопроводы проходят через центры колец испарителей 11, заслонку 14, маскодержатель 13; на их верхние свободные концы нанизываются плавающие маски с подложками; после этого на концы опускается верхний узел уплотнения 20. Последний выполнен из двух одинаковых частей, каждая из которых обеспечивает электрический контакт пары токопроводов и вакуумное уплотнение для проточной воды, которая протекает из одного токопровода в другой через полость, имеющуюся внутри переходной пластины 21. Узел уплотнения 20 поднимается и опускается по специальным направляющим 22, скользящим в отверстиях верхней несущей плиты 8. Под каждой половиной переходной пластины 21 смонтирована печь 23 подогрева подложек, которая представляет собой открытую вольфрамовую спираль, одетую на керамические стержни, концы которых закреплены в изолированных втулках. Печь потребляет мощность 200-300 ватт при нагреве подложек до 300°C.

Кольцевые подложки имеют внешний диаметр от 9 до 18 мм и внутренний от 1 до 7 мм и изготовлены механической обработкой

листвого стекла. Материалом обычно служили покровные стекла для микропрепаратов толщиной 0,1–0,3 мм. Механическая обработка обеспечивает, как правило, соосность внутреннего и внешнего диаметров с точностью $\pm 0,1$ мм.

Контроль толщины осаждаемой пленки в процессе напыления осуществляется по измерению электрического сопротивления пленки испаряемого материала, оседающей между золотыми пленочными контактами датчика. Регистрирующее устройство, автоматически переходящее с одного предела измерения сопротивления на другой, обеспечивает достаточную точность оценки толщины пленки [3]. Отжиг пленки в магнитном поле ведется от начала напыления до полного остывания подложки после напыления.

Описанная конструкция внутреннего устройства вакуумной камеры позволяет получать кольцевые магнитные пленки с круговой анизотропией толщиной от нескольких сотен до нескольких тысяч ангстрем при различном отношении радиусов внешней и внутренней окружностей кольца. Однако наличие осевого токопровода, необходимость жесткой центровки основных узлов, ограничения на форму испарителя – все это усложняет технологию получения магнитных кольцевых пленок с круговой анизотропией по сравнению с технологией получения одноосных пленок.

Особенностью конденсации паров на подложке в данном случае является неравномерность толщины пленки из-за осаждения части испаряемого материала на осевой токопровод. Экранирующее действие токопровода поясняет рис. 4, на котором наружное кольцо является проекцией кольцевого испарителя радиуса R на горизонтальную плоскость, заштрихованный круг в центре – проекция осевого токопровода радиуса ρ_0 . Точка P – проекция точки наблюдения на подложке, а точка O – проекция оси симметрии. Из-за экранирующего действия стержня в точку P осаждается испаряемый материал только с дуги ABC , у которой конические точки A и C получаются от пересечения проекции испарителя с прямыми, проведенными из точки P касательно к проекции осевого токопровода.

Предполагая, что испаритель представляет собой кольцо из

бесконечно маленьких поверхностных источников, параллельных плоскости подложки (следуя Холлэнду [4]), толщину покрытия в точке P можно рассчитать по формуле:

$$t = \frac{m h^2}{\gamma \pi^2} \int_0^{\varphi_k} \frac{d\varphi}{(\rho^2 + R^2 - 2\rho R \cos \varphi + h^2)^2}, \quad (1)$$

где ρ – расстояние от оси O до точки P ;
 h – расстояние от испарителя до плоскости подложки;
 m – масса испаряемого вещества;
 γ – его плотность;
 φ_k – угол между прямыми OP и OA .

На рис. 5, а, б представлены экспериментальные (1) и рассчитанные (2 и 3) кривые распределения толщины пленки по радиусу для двух различных значений h (60 мм и 120 мм, соответственно) при одинаковых $\rho_0 = 1,5$ мм и $R = 22,5$ мм. Кривые 2 построены по формуле (1), а кривые 3 рассчитаны для кольцевого поверхностного испарителя [4] без учета экранирующего действия центрального стержня. По оси ординат отложена измеренная толщина пленок (для кривых 1); кривые 2 и 3 построены в относительных единицах таким образом, чтобы на больших расстояниях от оси ординат они совпадали с кривыми 1.

Из расчетных графиков видно, что на расстояниях порядка нескольких ρ_0 экранирующее действие стержня значительно уменьшает толщину пленки (до половины при $\rho = \rho_0$); затем толщина пленки становится максимальной и остается практически постоянной до расстояний $\rho \approx R$, и после этого на больших расстояниях происходит постепенное уменьшение толщины пленки. Расчетные и экспериментальные кривые достаточно хорошо совпадают друг с другом. Значительный разброс экспериментальных точек на кривой 1 рис. 5, б объясняется большой абсолютной ошибкой прибора МИИ-4, на котором производилось измерение толщины пленки.

С целью упрощения рассмотренной выше конструкции было предложено использовать один токопровод одновременно для создания циркулярного магнитного поля и испарения ферромагнитного материала.

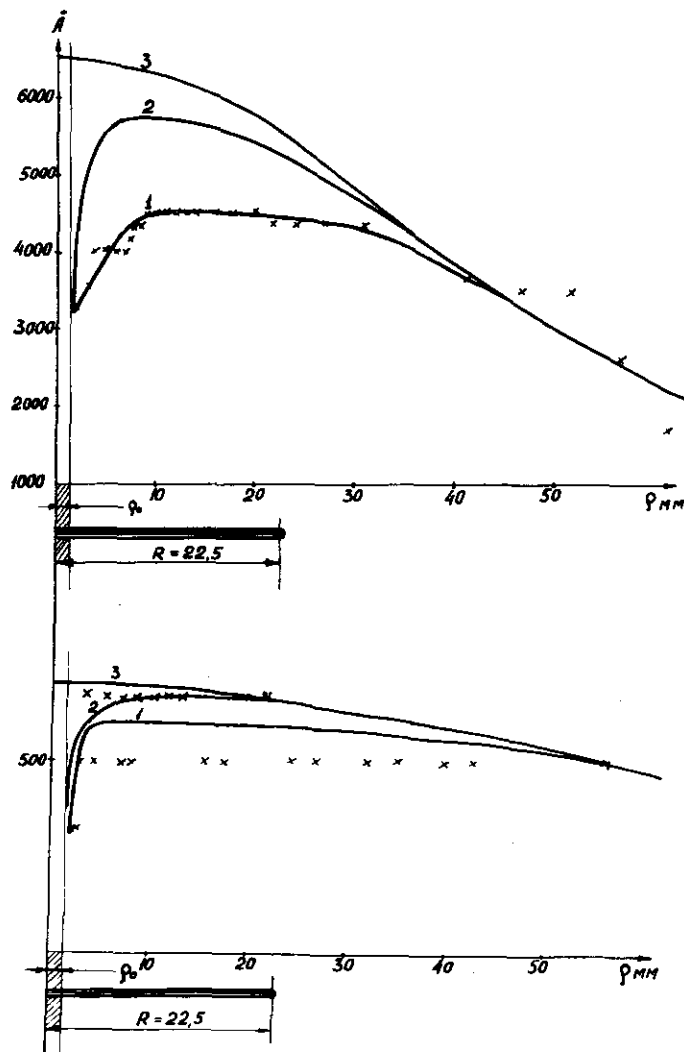


Рис. 5 а , б .

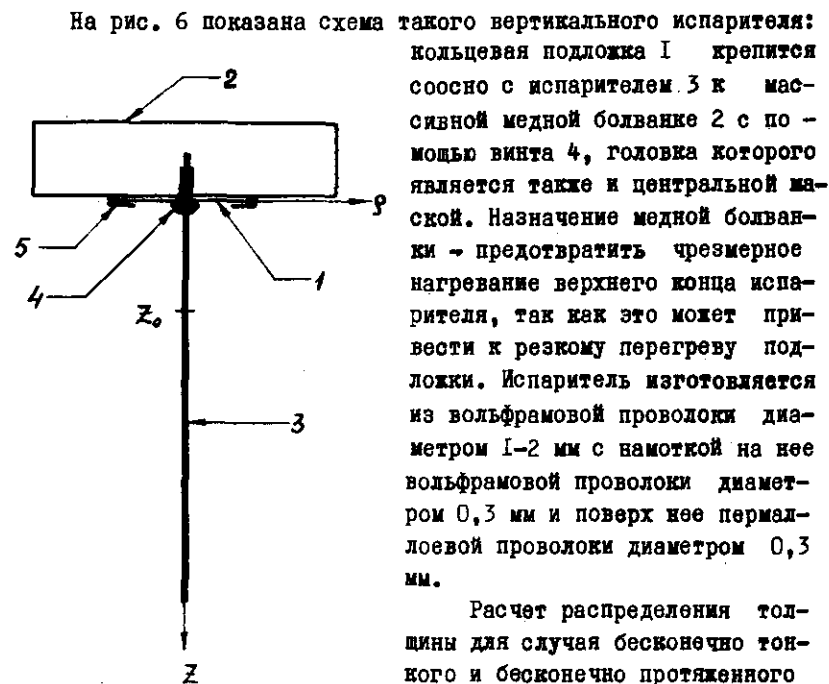


Рис. 6

На рис. 6 показана схема такого вертикального испарителя: кольцевая подложка 1 крепится соосно с испарителем 3 к массивной медной болванке 2 с помощью винта 4, головка которого является также и центральной маской. Назначение медной болванки - предотвратить чрезмерное нагревание верхнего конца испарителя, так как это может привести к резкому перегреву подложки. Испаритель изготавливается из вольфрамовой проволоки диаметром 1-2 мм с намоткой на нее вольфрамовой проволоки диаметром 0,3 мм и поверх нее пермаллоевой проволоки диаметром 0,3 мм.

Расчет распределения толщины для случая бесконечно тонкого и бесконечно протяженного вниз вертикального испарителя с равномерно распределенным на нем испаряемым материалом с линейной

плотностью μ_0 , удельной плотностью γ , начиная с некоторой точки z_0 вниз, дает:

$$\delta = - \frac{\mu_0 \rho}{8\pi} \int_{z_0}^{\infty} \frac{z dz}{(z^2 + \rho^2)^2} = \frac{\mu_0 \rho}{2\pi \gamma (z_0^2 + \rho^2)} \quad (2)$$

где ρ - расстояние от оси испарителя до точки наблюдения. Из формулы видно, что вблизи центра ($\rho \approx 0$) толщина пленки мала, затем растет, достигая максимума, и вновь уменьшается.

Экспериментально полученное распределение толщины пленки показано на рис. 7 (кривая 1), из которого видно, что совпадение с теоретическим расчетом (кривая 2) удовлетворительно.

Кольцевые пленки с круговой анизотропией получались таким способом на постоянном и переменном токе как при постепенном уменьшении величины тока после испарения (для сохранения маг-

нитного поля при остывании), так и при выключении тока сразу же после испарения.

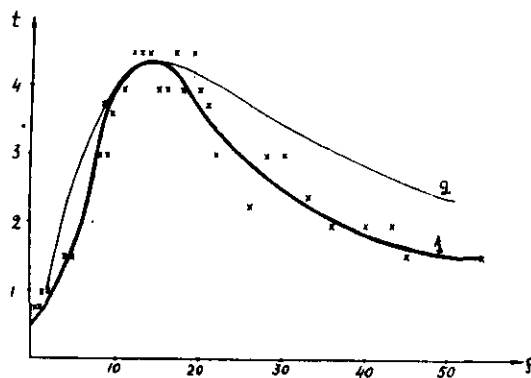


Рис. 7

Одной из особенностей данной конструкции испарителя является то, что косое (наклонное) падение пучка паров на подложку способствует созданию круговой анизотропии (наклонное падение пучка паров на подложку приводит к появлению оси легкого намагничивания в направлении,

перпендикулярном к плоскости падения [5]).

К достоинствам метода следует отнести и его экономичность как в энергетическом отношении (создание магнитного поля и испарение вещества производится одним и тем же током), так и по количеству испаряемого вещества (около 0,1 грамма пермаллоя на пленку по сравнению с примерно 1 граммом на пленку в ранее рассмотренном методе с кольцевым испарителем).

Вертикальный испаритель упрощает конструкцию внутреннего устройства вакуумной камеры; однако он, как и кольцевой испаритель с центральным стержнем, не позволяет получить равномерное распределение по толщине осаждаемого материала. По-видимому, этот недостаток может быть устранен, если плотность распределения вещества по испарителю будет не постоянной, а некоторой функцией координаты x , которую можно рассчитать. Однако практическая реализация такого распределения вряд ли осуществима.

Кроме описанных способов, были исследованы возможности использования любого испарителя, обеспечивающего на достаточном пространстве однородность толщины пленки. В одном из таких ме-

тодов использовался механострикционный эффект, и осаждение пленки велось на предварительно деформированную подложку [6]. Рис. 8 представляет схему используемого внутреннего устройства рабочей камеры. Над обычным стержневым испарителем (И) помещались

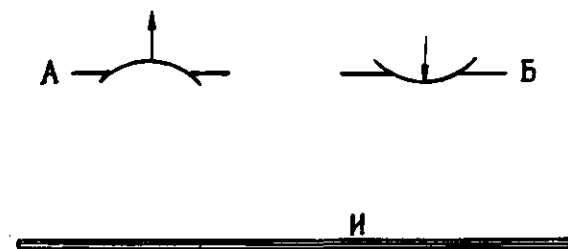


Рис. 8

две подложки, которые в пределах упругой деформации изгибались с помощью винтов: одна (А) - вверх, другая (Б) - вниз. После напыления и остывания подложки вынимались из держателей, и на установке Керра наблюдалась доменная структура пленок после многократного перемагничивания в циркулярном или радиальном полях. На рис. 9, а, б видны сфотографированные кольцевые и радиальные (соответственно) домены в пленках, полученных таким способом. Были проведены спектральные и спектрофотометрические определения химического состава пленок. На пленках с 79% никеля и 76% никеля (остальное железо) были получены после снятия напряжений с подложек: круговая анизотропия в случае А и радиальная анизотропия в случае Б. При испарении чистого железа (примесей меньше 0,003%) круговая анизотропия получилась в случае Б. Эти результаты свидетельствуют о влиянии химического состава на формирование анизотропии в магнитной структуре пленок.

Рассмотренный способ получения пленок с круговой анизотропией позволяет использовать то же внутреннее устройство вакуумной камеры, которое применяется для получения пленок с од-

носной анизотропией, с добавлением лишь приспособления для изгиба подложек. Кроме того, при желании можно избавиться от необходимости иметь центральное отверстие в подложках; на рис. 9, в показаны радиальные домены, полученные в геометрическом центре круглой пленки на подложке без отверстия.

Рассмотренные до сих пор способы, несмотря на различия между ними, имеют ту общую черту, что пленки с наведенной круговой анизотропией получают за один непрерывный технологический цикл.

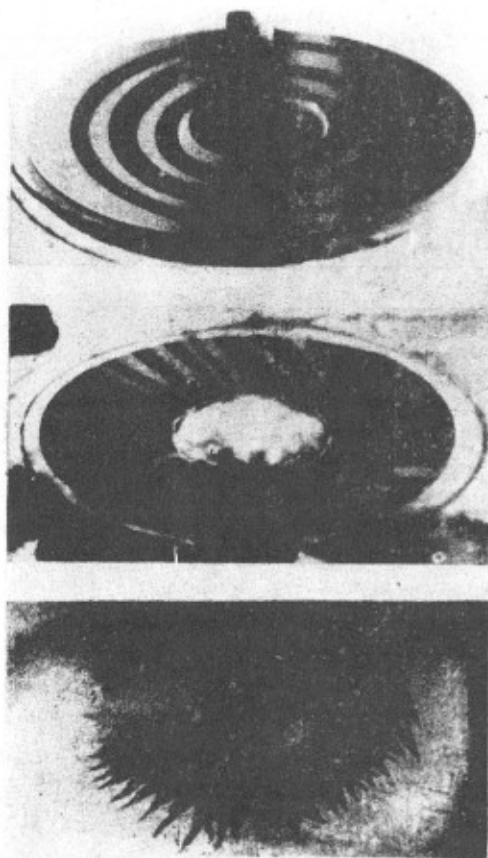
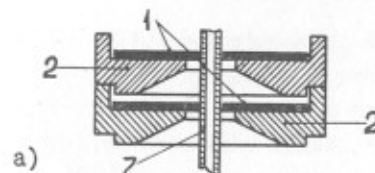


Рис. 9

Однако весьма перспективным в массовом производстве может оказаться такой способ, при котором технологический процесс разделен на две части: сначала на стандартном устройстве напыляются ферромагнитные пленки кольцевой формы на круглых подложках с отверстием, а затем в специальной печи в вакууме производится отжиг этих пленок в циркулярном магнитном поле. Отсутствие осевого токопровода при напылении позволяет получать высокую однородность пленок по толщине. Очевидна также возможность получать за одно напыление большое количество пленок, огра-

ниченное только размерами вакуумной камеры. Отсутствие каких бы то ни было дополнительных приспособлений в рабочем объеме еще более облегчает задачу.

Подложки с напыленными пленками 1 (рис. 10, а) вынимаются из камеры и помещаются в кассеты 2 из нержавеющей стали, кото-



рые устанавливаются друг на друга в необходимом количестве. Набор кассет помещается в цилиндрическую печь, обеспечивающую прогрев подложек до температуры 400°C и выше. Конструкция печи показана на рис. 10, б; ее корпус 3 и тепловые экраны 4 изготовлены из титановой ленты толщиной 0,3 мм. К основаниям корпуса приварены точечной сваркой два кольца 5, несущие нагревательные элементы 6 в виде трех рядов терморезистивных керамических трубочек, через отверстия которых пропущена вольфрамовая проволока диаметром 0,3 мм. Намотка выполнена бифилярной, поэтому паразитные магнитные поля от нагревательной спирали отсутствуют. Осе- вой токопровод 7 прохо- дит через основание 8

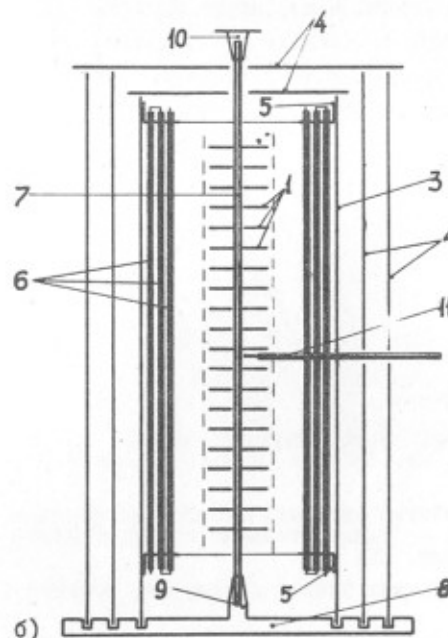


Рис. 10 а, б

резок медной проволоки подходящего диаметра, который укрепляется в цанговых зажимах. Один из этих зажимов 9 находится на

заземленном основании 8 печи, а другой 10 жестко укреплен непосредственно над центром верхнего экрана 4. Термопара 9 медь-константан из сваренных проволочек в керамической термопарной трубке через отверстия в экранах и корпусе печи и через отверстия в кассетах 2 вводится непосредственно внутрь объема, занимаемого подложками в кассетах.

Вся описанная конструкция печи устанавливается под вакуумным колпаком, и камера откачивается до давлений 10^{-5} мм рт.ст. Размеры корпуса печи: высота 145 мм и диаметр 53 мм - позволяют за один цикл производить отжиг двадцати пленок. Описанная конструкция печи оказалась удобной в работе, маломнерционной и способной нагреть подложки до температуры 400°C за 15-20 минут. Наблюдение на установке Керра доменной структуры пленок, прошедших термомагнитную обработку, отделенную от напыления, показало, что пленки имеют явно выраженную круговую анизотропию.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Д.П. Шипиловой и В.И. Христенковой за проведение анализа химического состава пленок и Н.С. Кормилицыну за помощь при автоматизации измерений.

Л и т е р а т у р а

1. ЛИСКЕР И.С., ДАНИЛЕВСКИЙ Ю.А. Тонкие плоские ферромагнитные пленки и индуктивные элементы тороидального типа. "Вычислительные системы", Новосибирск, "Наука" СО, 1966, вып. 20.

2. SNYDER Richard L. High speed memory elements Hughes Aircraft Co. Патент США, кл. 340-174, № 3148358, заявл. 30.10.61, опублик. 8.09.64.

3. КОРМИЛИЦЫН Н.С. Устройство автоматического переключения диапазонов прибора Ф116. - "Вычислительные системы", Новосибирск, "Наука", СО, 1969, вып. 35.

4. ХОЛЛЭНД Л. Нанесение тонких пленок в вакууме, Госэнергомиздат, 1965.

5. ГУДИНАФ Дж., СМИТ Д. Магнитные свойства тонких пленок. - "Магнитные свойства металлов и сплавов", ИЛ., М., 1961.

6. КУРОЕДОВ К.А. О свойствах пленок, осажденных на предварительно деформированные подложки. - "Изв. АН СССР. Сер. физич.", т. 31, № 5, 1967.

Поступила в редакцию
10.1.1969 г.