
磁泡技術

存貯器及其應用專輯

四川省四機局情報站

过去、现在和未来的小泡径 存贮器材料

为与现在及未来计划中的大型存贮器相竞争,磁泡器件将需要比目前所用材料容量更大的磁性膜。本文描述了在改善小泡径材料时所必须了解及控制的重要器参数,对小泡径材料的成分作了简略的评述,重点是小泡径材料的状况。只有通过考虑许多参数的相互关系才能获得小泡径液相外延材料的最佳成分。本文还详细讨论了影响件性能的各个变量的相互关系,对未来的小泡径石榴石材料以及可能的取代成分也作了一些探讨。

引 言

磁泡存贮器技术已经从实验室模型经过样机发展到可以成批出售的250千位磁泡芯片的阶段。尽管这些进展是相当显著的成就,但磁泡存贮器技术的进展仍未能像早先所予料的那么迅速。在磁泡存贮器中,达到高容量、高速据率及低成本的主要限制之一是磁性材料。因此,本文专门讨论要得到一种高能性小泡径材料所必须解决的磁性材料问题。

材 料 要 求

当泡径越来越少时对材料要求的限制就越来越多,下面讨论一下这些限制及其对器件性能的影响。

静态参数

通常用于表达泡材料静态特性的有五个参数,即特征长度 l ,磁化强度 $4\pi M$,泡稳定性因子 q ,单轴各向导异性常数 Ku 和交换常数 A 。这些参数并非独立变量,它们之间的关系如下⁽¹⁾:

$$q = Ku/2\pi M^2 \quad (1)$$

$$l = \sqrt{AKu/\pi M^2} \quad (2)$$

由于这五个变量由两个方程表示,所以器件设计者至多需独立地选择三个参数。实际上,把 A 、 l 和 q 作为独立参数较为方便。当我们介绍怎样获得这三个参数值的方法后,取这种选择的理由就很明显了。对于一个专门器件的应用,在选择石榴石成份时,首先是确定 A 值。更确切地说,我们采用了自然所赋予的值,这是因为居里温度范围符合磁泡器件应用的所有石榴石的 A 近似相等($\sim 2 \times 10^{-7}$ ergs/cm)^(2-5, 6)。下一个该选择的参数显然是 l ,因为它将确定泡径。在这一变量的选择中,一条有用的经验规律是: l 必须近似为所探求泡径的 $1/9$ ⁽⁶⁾。(这一规律适用于泡径接近于膜厚的情况,这正是

常见的情况)。

最后一个独立变量是 q ，对于稳定的泡， q 必须大于1，为保证电路工作时具有合理误差余量， q 通常必须大于3^(7,8)。虽然还可超过这最小值，但如下面将讨论的那样，为使磁泡速度最大，通常要工作在接近于此最小值。

一旦 Δ 、 q 及 l 被确定，我们便能容易地用方程(1)和(2)计算出这种选择所确定的 $4\pi Ms$ 和 Ku 值。如不直接用方程(1)和(2)，而用图1可方便地得到近似结果，图1是由这两个方程画出的，这个图不仅给出了任一泡石榴石(假设 $A=2.8 \times 10^{-7}$ ergs/cm)的 Ku 、 q 、 $4\pi Ms$ 及 l ，而且在观察这些参数的内在关系方面也很有用。该图说明了以下两个很重要的关系：如果 q 保持常数，在泡器件中，小 d 时将使 $4\pi Ms$ 与 d^{-1} 成比例地增加，而 Ku 与 d^{-2} 成比例地增加。这样，减小泡径必然导致磁化强度的提高，它意味着在正常磁泡线路中需要一个较大的驱动场。此外，减小泡径还会使所需的各向异性上升到高于一般容易得到的数值，这里指出的两点将在下面进一步讨论。

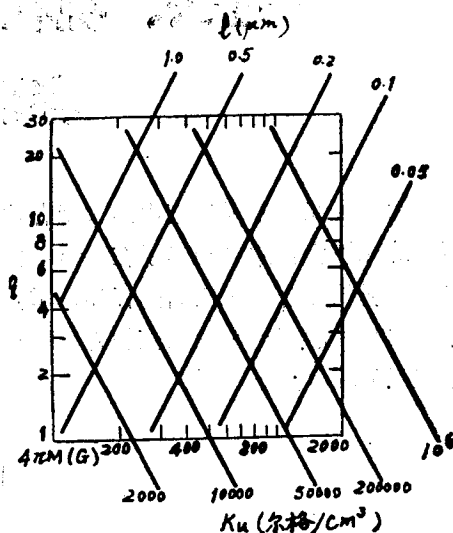


图1 磁泡材料中 q 、 $4\pi M$ 、 Ku 和 l 的关系(作此图时，取 $A=2.8 \times 10^{-7}$ 尔格/厘米，该图适用于不管 A 为何值的磁泡材料)

动态参数

上面讨论了与存储器材料的静态特性有关的材料要求材料，动态特性同样也是重要的，我们将会看到动态特性将进一步限制石榴石成分，材料的动态特性依赖于四个参数：迁移率、矫顽力、临界速度及饱和速度，矫顽力 H_c 决定泡移动时在磁泡两侧所需要的最小场差 ΔH 。迁移率 μ 代表一旦移动开始后，磁泡速度依赖与 ΔH 的线性关系。速度随 ΔH 线性增加直至达到临界值 V_p ，然后下降到一个较低的通常称为饱和速度 V_s 的值。

表面上，似乎四个参数在确定器件速度时都很重要，然而，事实上在优质稀土铁石榴石膜中， H_c 通常是非常小的($\leq 10e$)因而它对泡速的影响极小甚至毫无影响。 V_p 和 V_s 对材料参数有类似的关系，区别仅在于一常数因子⁽⁹⁾，因而问题可进一步简化。因此，在下面的讨论中，我们仅认为 V_s 和 μ 为关键的动态特性变量。

μ 与上述已讨论过的静态参数的关系由下式给出⁽¹⁰⁾：

$$\mu = \frac{\gamma}{\alpha} \sqrt{\frac{A}{Ku}} \quad (3)$$

这里

γ ：是旋磁比

α ：是阻尼因子

(3)式中出现的 Ku 更证实上面的说法：要使 μ 最大就希望 q 尽可能小。

在文献[9, 11]中, V_s 有两个不同的表达式:

$$V_s = 8.25\gamma\sqrt{A l/hq} \quad (4)$$

$$V_s = 0.5\gamma\sqrt{A/q} \quad (5)$$

遗憾的是, 这两个表达式不相一致也与实验不完全符合⁽¹¹⁾。但应注意到, 方程(4)和(5)都指出 q 应保持一个最小值。

基本知识概要

基本参数

小泡径材料的目前状况可以用表的形式清晰地说明。

表 I 已发表的有关小径泡石榴石膜的常温数据。除另有说明外, 所有膜均生长在(111)取向的3G基片上, 这些数据来源, 请参考目录($b=19, j=14, l=15, m=16, q=35, r=18, s=48$)或下列一览表:

成份	$l(\mu m)$	q	$Ku \times 10^{-4}$ ($erg cm^{-3}$)	$4\pi M_s(G)$	$h(\mu)$	$\mu(cm sec^{-1}$ oe)	参考文献
$Eu_{0.9}Tm_{2.1}Ca_{0.6}$	0.15		(7.7)	702	1.95		c
$Eu_{0.5}Tm_{2.15}Ga_{0.55}$	0.13	2.8	5.35	700	0.7		d
$Eu_{11}Tm_2Ga_{0.2}$	0.1	2.5	"	1060			f
$Eu_{11}Tm_2Ga_{0.4}$	0.14	4	9	809			f
$Eu_{11}Tm_2Ga_{0.7}$	0.202	10	7.8	442	1.66	1.84	g
$Eu_{0.8}Tm_{2.2}Ga_{0.5}$	0.138	3	6.0	706	1.0	1000	g, p
$Eu_{1.2}Lu_{1.8}Fe_5$	0.043				0.65		e
$Eu_{1.2}Lu_{1.8}Ga_{0.5}$	0.12	4	9.4	769	1.09	704	g
$Eu_{1.0}Yb_{2.0}Ga_{0.4}$	0.14	4	7.0	663	2.01	428	g
$Eu_{0.9}Yb_{2.1}Fe_5$	0.04				2.15		e
$Eu_{1.7}Yb_{1.3}Fe_5$	0.062	2.1	18	1450	2.8	404	g
$Eu_{1.5}Yb_1Al_{0.17}$	0.17		(2.1)	475			h
$Eu_2Y_1Fe(100SmGaG)$	0.069	3.4	3.0	1490	0.78		K
$Eu_{1.8}Lu_{1.2}Fe_5$ ($100SmGaG$)		2.2	1.9	1430			q
Eu_3Fe_5 ($NbGaG$)		1.8	11	1231			q
$(SmYLu)_3Ga$	0.13	2.3	3.3	600	3.1	400	r
$(SmYLu)_3Ge$	0.16	1.5	1.4	490	1.8	1000	s
$Sm_{0.4}Y_{1.2}Lu_{0.5}$ $Ga_{0.75}Ge_{0.756}$	0.101	3	2.25	434	0.63		1a
$(SmYLuGa)_3Ge$	0.12	3.2	3.4	518	2.32	600	1
$(SmYLuCa)_3Ge$	0.10	1.6	3.0	680	3.2	360	1
$Sm_{0.4}Y_{1.1}Tm_{1.0}$ $Ca_{0.5}Ge_{0.5}$	0.065	2.3	6.53	850			a

$\text{Sm}_{0.3}\text{Y}_{0.20}\text{Tm}_{0.75}$ $\text{Ca}_{0.75}\text{Ge}_{0.75}$	0.094	3.1	3.12	504	1.09	800	a
$(\text{SmYTmCa})_3\text{Ga}$	0.13	3.6	3.9	524	1.62	800	1
	0.11	2.4	2.1	470	0.85		1
$(\text{SmYTm})_3\text{Ga}$	0.18	3.8	2.3	390	2.83	660	1
$\text{Eu}_{0.5}\text{Y}_{2.0}\text{Tm}_{0.5}$ $\text{Ga}_{0.5}$	0.18		(2.5)	484		$\frac{10\text{m/sec}}{H=40\text{e}}$	m
$\text{Eu}_{0.3}\text{Y}_{1.98}\text{Ga}_{0.72}$ $\text{Fe}_{4.28}\text{Ge}_{0.52}\text{Si}_{0.20}$	1.5	5	3.5	420			n
$\text{Sm}_{0.85}\text{Tm}_{2.15}\text{Fe}_5$	0.047	2.52	19.1	1378	0.87		n
$\text{Sm}_{1.0}\text{Tm}_{2.0}\text{Ga}_{0.5}$	0.20	6.8	11.0	635	2.55	140	b
$\text{Sm}_{1.2}\text{Lu}_{1.8}\text{Fe}_5$	0.05	2.5	30.4	1750	4.2		i
$(\text{SmLu})_3\text{Ga}_x \quad x=0.2$	0.06	2.2	15	1300	2.1		"
$\text{SmLu}-x=0.68$	0.14	5.7	11	700	3.5		"
$\text{Sm}_{1.6}\text{Lu}_{1.4}\text{Fe}_5$ (SmGaG)		1.7	30	2053			p
$\text{Sm}_{2.6}\text{Lu}_{0.4}\text{Fe}_5$ (NdGaG)		1.6	23	1902			p
$\text{Sm}_{0.75}\text{Yb}_{2.25}\text{FeFe}_5$	0.046				0.9		e

- a. K. Yamaguehi, H. Inone and K. Asama, AIP Conf. Proc. 34, 160 (1976).
- c. J. E. Davies, E. A. Giess and J. D. Kuptsis, Mat. Res. Bell, 10, 65 (1975).
- d. E. A. Giess, J. E. Davies, C. F. Guerci, H. L. Hu, J. D. Kuptsis and J. M. Shaw, AIP Conf. Proc. 24, 582 (1974)
- e. E. A. Giess, C. F. Guerci, J. D. Kuptsis and H. L. Hu, Mat. Res. Bell, 8, 106, (1973)
- f. E. A. Giess, J. E. Davies and C. F. Guerci, Mat. Res. Bell, 10, 355 (1975).
- g. H. L. Hu and E. A. Giess, AIP Conf. Proc. 24, 605 (1974).
- h. W. A. Bonner, J. E. Geusic, D. H. Smith, F. C. Rossol, L. G. Van Viter and G. P. Vella-Coleiro, JAP, 43, 3226 (1972).
- i. D. C. Bullock, J. T. Carlo, D. W. Meuller and T. L. Brewer, AIP Conf. Proc. 24, 647 (1974).
- k. T. S. Plaskett, E. Klokholm, H. L. Hu and D. F. O'kame, AIP Conf. Proc. 10, 319 (1972)
- n. W. A. Bonner, Mat. Res. Bell, 10, 15 (1975)
- p. H. L. Hu and E. A. Giess, IEEE Trans. MAG-11, 1085 (1975)

用这种方法, 便于待选材料互相比较, 比较省事。因此, 我们制备了表 1, 该表汇编了目前所知的小泡径材料。在表 1 中, 我们仅列入了 λ 值小于 $0.2\mu\text{m}$ 的材料, 尽量收集了有关每种材料的数据, 在许多情况下, 也算出了原文中未给出的 Ku 值。在某些情况下, 我们假设 A 为某一值去进行计算, 对类似的材料, 根据发表的数据^[2, 13]选取

$A = 2.8 \times 10^7 \text{ ergs/cm}$, 该值对于A或许是不完全正确, 故括号内Ku值应当作为近似值。

温度关系

除在表1给出的数据外, 对器件应用另一非常重要的特性是泡参数的温度关系。虽然, 可得到的温度关系数据还不太多, 但我们对列于表1的某些成份确实已有了这方面的数据。这些材料(也许对于在表1中的其他材料也如此)由于 $4\pi M$ 的温度关系的相互作用, 使得泡径明显的与温度无关。图2a可视为一例, 表明在很宽的温度范围内 l 都是一个常数, 足以制成一个能超过 150°C 温度范围工作的器件。然而如同在所有的石榴石中一样, 要使 l 和 $4\pi M$ 都与温度无关系是不可能的^[20]。因之, 如图2b所示, 破灭场 H_{co1} 有一个非常确定的温度关系。用这种材料的器件需要一个在所期望的整个工作温度范围内都能跟踪破灭场 H_{co1} 的偏场。应注意到, 为达到这样宽温度范围的跟踪, 需要一种比常用于 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 器件, 复盖 $0 \sim 70^\circ\text{C}$ 温度范围的简单钡铁氧体结构更为精致的偏场^[21]。而且, 甚至对 $0 \sim 70^\circ\text{C}$ 范围, 发表的数据^[19]也表明, 或许还要求温度系数稍大于钡铁氧体之最大值 $-0.21\%/^\circ\text{C}$ ^[20]。

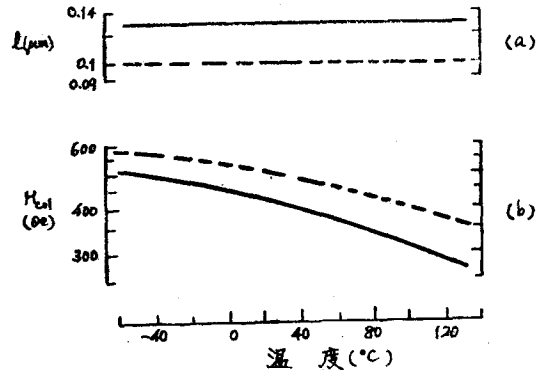


图2 在 $(\text{YSmLu})_3(\text{GaFe})_5\text{O}_{12}$ (实线) 及 $(\text{YSmLuGa})_3(\text{GeFe})_5\text{O}_{12}$ (点划线) 中:
a) 特征长度 l 和
b) 破灭场 H_{co1} 与温度的关系 (参照18)

离子注入

另一个在表中无法引入的重要特性是磁泡材料是否适合作离子注入。在打算用于器件的磁膜中进行这样一种离子注入通常是必要的。当石榴石用于普通器件时, 注入层起抑制硬泡的作用^[22]。在衔接园盘器件中它形成驱动层, 而在点阵器件中它控制可能的畴壁状态^[24]。在各种情况下, 离子注入的功能都是形成这样一种层, 在其中磁矩宁愿平行于膜面, 而不是象正常磁泡材料那样垂直于膜面排列。离子注入使材料内形成应力, 从而产生一种很强的应力感生各向异性^[26, 38], 它足以克服正常的生长感生各向异性^[27, 28], 强制磁矩平行于膜面从而改变了磁矩的方向。

要使这一过程在 $\langle 111 \rangle$ 取向获得了成功, 磁致伸缩常数 λ_{111} 必须为负值使应力感生各向异性和生长一感应各向异性符号相反而不是相同。由于多数希土元素对该参数作出了负的贡献, 所以多数泡石榴石具有负 λ_{111} 。然而, 将离子注入用于小泡径材料中有一个势能的问题, 由于小泡径材料的各向异性很大, 所以注入感生各向异性也许还不能克服它。关于衔接园盘器件的文章^[23, 30]中, 对这种作用已作了研究。结论是: 在小泡径材料中单有离子注入并不能形成一种满意的驱动层, 而必须要一种沉积在膜上的附加层。制作此附加层要使之具有较低的各向异性, 从而离子注入能成功地强制磁矩平行

于膜面。

在平常的小泡径器件中,像这样的附加层也常用于抑制硬泡,该附加层也可以作得使磁矩平行于膜面,甚至无需离子注入^[31]。然而,硬泡抑制实际上也许并不需要这样两层膜。文献中小泡径材料离子注入方面没有很多资料,但是,在两篇关于小泡径材料的文章^[19, 32]中已报导,甚至在磁矩没有被拉到注入层平面的条件下,硬泡也被成功地抑制了。显然,在注入层中 q 降低到了足以产生所期望的抑制。

上述讨论中,我们假设所有膜均生长在 $\langle 111 \rangle$ 取向的基片上,因为这一取向几乎是常用的取向。然而膜也有生长 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ 基片上的^[33]。 $\langle 110 \rangle$ 取向具有这样引人注目的特点:即可以产生抑制硬泡的平面内各向异性而无需离子注入。然而,遗憾的是,多数膜成分当按 $\langle 110 \rangle$ 取向生长时, K_u 的符号不对,虽然在文献中也报导了两个明显的例外情况^[45, 46]。

与器件的关系

在评价包含在表 I 中的数据时,应当记住这些结果与器件的关系。特别要注意这里指出的 $4\pi M$ 值,这些值比大泡径材料的 $4\pi M$ 值高。因为如上所述,材料的磁化强度反比于泡的大小。文献^[33]已指出,一般磁泡电路所需驱动场与磁化强度成正比例增长。因此,旋转场的大小反比于泡尺寸。由于 $3\mu\text{m}$ 左右的泡需要 40Oe (奥)左右的旋转场,因此, $1\mu\text{m}$ 的泡几乎应需要 $\sim 120\text{Oe}$ (奥)的旋转场。对于实际器件,该值很可能是太高了,因此,必须用其他一些泡传输的方法用来代替目前的坡莫合金电路。业已证明^[23]无需大驱动即能传输小泡的衔接园盘器件是一种很有前途的选择对象。

讨 论

基片

至今已报导的所有磁性石榴石 LPE (液相外延) 膜均生长在钐石榴石 (3G) 基片上,许多产生稳定的小直径泡的成份很容易调整到使其晶格参数与 3G 相匹配。这种材料现在市场上已能买到抛光的了,直径两英吋的园片,大约一年内,3 英吋园片有望供应市场。对于磁泡技术应用,必须控制的基片特性包括:结晶学取向,错位及缺陷密度;平行度及抛光质量。基片用于 LPE 之前,小心地清洗以除去由处理及抛光引起的污染是十分关键的。经清洗处理后它们必须在无尘环境中存放和送到生长炉中。

将来,如果小直径泡材料发展,其成分将不能与 3G 的晶格匹配,通过引入附加元素部分地取代钐和 (或) 镱可由生长出一些或小一些晶格参数的基片。例如,在我们实验室中已生长出钐石榴石,钕石榴石,钐钕石榴石及钐钕钙石榴石^[34],新近, Giese^[35]已报导利用了含钐-钕的基片。然而,必须强调指出的是:达到质量符合器件要求,抛光过的 3G 园片能大批供应市场的阶段;几乎经历了十年发展过程。如果需要其他成分基片,至少又要若干年的时间去建立最佳的提拉法生长及表面处理工艺。

液相外延过程

现在液相外延生产过程在同行的不同工作者中已完全标准化了。我们的典型工艺如

下：在等温的条件下，膜生长在抛光的3G基片〈111〉面上。用一个三叉的白金架支持园片，把基片引进炉膛并放低到正好就在溶液的表面上进行预热。一串挡板和反射器置于坩埚之上以获得最佳温度分布。生长期间采用了水平浸渍工艺每秒60转，每三秒钟反转一次。在LPE沉积过程中精确地控制一些条件是必不可少的，毫无疑问：原材料和坩埚纯净等等是重要的。其它的重要条件还有适当的温度分布，等温条件（特别是在生长周期内）以及过饱和溶液。在浸入前为避免自发成核（冷）或过多的浸蚀（热）必须把基片予热到和溶液只差几度的温度。此外，还应注意使铅的混入与不均匀膜的生长减至最少。轻微的氧化气氛环境可以减少坩埚的腐蚀以及使稀土及铁离子稳定在+3价的氧化状态从而得到较高质量的LPE膜。

新成分的设计

在选择稀土元素作为新的石榴石成份时，必须考虑许多因素。首先，被选的稀土元素必须能形成一种与现有的基片（通常是3G）的晶格参数非常接近的石榴石。为达到这种晶格匹配，发表在图3的数据可予利用。这个图是用各文献中的数据为端点并按维加德定律用一直线把这些端点连接起来构成的。在满足晶格参数匹配这一基本前提下，适当地设计成分能使许多其他参数最佳化：平常选择稀土元素是为形成最大的生长感生各向异性，最合适的泡参数的温度关系以及最高的迁移率。除主要考虑这些参数外，稀土量也影响 γ 和 $4\pi M$ 。不可能使所有参数同时最佳化，每种泡成分都代表着一种在竞争目标间的不同拆表方案。

虽然稀土元素也影响磁化强度，但这一参数的调整主要是借助于改变铁含量来实现的。由于仅在四面体及八面体位置含有铁的稀土铁石榴石的磁化强度对于泡的应用常常是太大了，所以需利用取代四面体位置的离子降低磁化强度。然而任何非磁性阳离子进入八面体都具有相反的作用，也就是，提高了磁矩。因此，诸如 Ge^{4+} 及 S^{4+} 似乎是可取的，因为这些阳离子对四面体位置有很强的优选性。但是 Al^{3+} ， Ga^{3+} 及 Sc^{3+} 等三价离子也广泛地用于降低磁化强度，尽管这些离子也有相当的数量进入了八面体位置。采用三价阳离子的原因在于它们的加入是简单的，而用 Si^{4+} 或 Ge^{4+} 离子时还需要同时加入为电荷补偿的两价阳离子。其结果是一种更复杂的材料成分并且会发生伴随膜的沉积问题^(3°)。对于要求泡径大于 $\sim 2\mu m$ 器件，用这些四价离子可产生较高的居里温度，因之，具有更符合需要的泡参数的温度关系。但是在小泡径材料中，由于仅需要少量的非磁性阳离子，所以用 Si^{4+} 和 Ge^{4+} 就没有多少优点，而用 Ga^{3+} 取代就越来越有吸引力。

关于磁膜

要全面地表征小泡径石榴石膜，必须测量化学成分，晶格匹配，膜厚以及通需的磁参

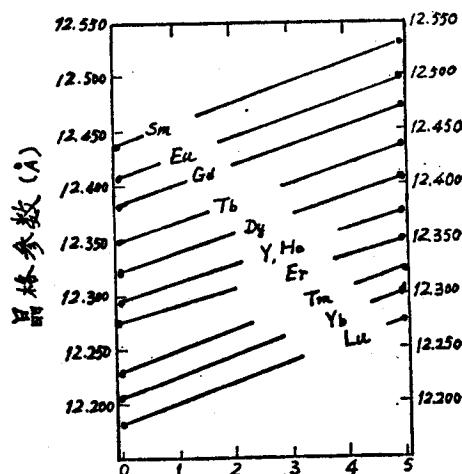


图3 $RE_3Ga_{5-x}Fe_xO_{12}$ 系列中的晶格参数

数。膜的成分可以用磁化强度值推断⁽³⁷⁾以及利用图3,从晶格参数加以考察。这种方法仅适用于在12面体位置中不多于两种稀土阳离子的成分。利用标准参考溶液的原子吸收、微探针分析X—射线光谱法可以得到稀土阳离子的相对浓度。

在LPE膜中,为避免龟裂及消除应力感生各向异性,需要调节晶格参数使其与它在其上生长的3G基片一致。LPE膜与基片晶格参数之差是用X—射线衍射来测量的。记录下膜和基片(888)的反射,它们的角度差就是衡量 Δa 的尺度。 Δa 是膜/基片之失配。用这种技术可测的 a 之最低值大约 $0.005\text{\AA}$,低于该值膜和基片的反射无法分辨。这个值实际是垂直于膜表面测得的 $\Delta a_{\perp}$,它近似于实际晶格失配的两倍⁽³⁸⁾,而计算应力时用的是后者。这样,如果总能保证LPE膜 $\Delta a_{\perp} < 0.005\text{\AA}$,那么真正的 Δa 将应小于 $0.0025\text{\AA}$,它已小到足以使应力感生各向异性忽略不计。

膜厚可用近红外($1.0\sim 3.0\mu\text{m}$)干涉图方便而又无破坏地测出。这种干涉图能从工作于那些波长范围的分光镜上得到,反射或透射式均可使用,然而,要用透射式很精确地测量则要求能将膜从基片一边取下来。对这种技术还需要知道所研究的特定的膜折射系数的色散关系。用一种独立的方法,即布鲁斯特角测量法⁽³⁹⁾能够获取这方面的知识。近来,San又提出了另一种方法⁽⁴⁰⁾。

小泡径材料的磁性参数的测定,由于直径的减小出现了特殊的问题。常用的泡参数的直观测定法变成不可能了。具有电图象放大设备的特殊的电视系统能测量出比在没有这种设备情况下稍小一些的泡径,但是,最终,如接近 $1\mu\text{m}$ 直径,直观的方法就不可能了。解决这个问题的另一种方法是从谐振⁽³⁵⁾和磁强计测量去推断泡参数。另外一种方法是显示条畴区域的衍射特性的非直观的光学技术^(41,42)。

结 论

如图1所示,若泡径至 $\sim 0.5\mu\text{m}$,要求具有大各向异性的材料。有关人员对一个目标已进行一般时间的研究。结果,表I所列的材料中至少有一种材料的 K_u 高达 $30 \times 10^4 \text{ ergs/cm}^3$,这种成分能形成 $\sim 0.6\mu\text{m}$ 直径,稳定因子 q 稍大于3的泡。然而,表I中大部分材料 K_u 还非常低。人们会问还有什么可能的方法可以提高各向异性呢? Callen⁽²⁷⁾曾指出石榴石膜中两种不同半径的稀土阳离子浓度相等时, K_u 最大。这一想法已经过较长时间的研究,而列于表I中的许多成分都包含着浓度几乎相等的两种不同稀土阳离子它就可以作为例证。但是,这些成分的 K_u 值又表明仅用这种方法未必肯定能形成所要求的高各向异性。

由于仅有很少百分比的十二面体阳离子参予择优排列,利用最佳化晶座选择方法能获得较高的 K_u 值,有人已经对通过改变LPE的生长来加强晶位选择性的问题作了研究,然而,迄今这些办法引起 K_u 的变化还是相当小,今后也许还会有人提出高度专门化或特殊的生长条件来取得较高的各向异性。

表I中数据表明,大多数小泡径LPE石榴石材料都含有Sm(或Eu)作为重要成分,这些稀土材料由于贡献出相当高的各向异性⁽⁴⁷⁾及窄微波线宽而具有优异的磁特性。通过利用其它稀土元素也有可能增高 K_u 。然而,研究者回避用某些会产生出高各向异性的稀土阳离子(即Tb、Dy及Ho),因为它们会同时引起高微波线宽⁽⁴⁸⁾并且有可能产生

低的迁移率。

了解当泡径减小(从而 l 也减小)时对器件的速度有何影响。这对器件设计者来说是很重要的。假设 q 保持不变则按方程(4)和(5)饱和速度就与直径无关(如果 $h \propto$)，对于迁移率方程(3)也没有直接给出与直径的关系。为了说明泡径与该方程的关系，我们必须首先注意到， g 为常数时， $1/\sqrt{Ku} \propto l$ [根据方程(1)，(2)]，这样如果 α 是常数，则肯定有 $\mu \propto l$ 。但是，如减小泡径而改变成分时， Ku 的必要的增高是用改变稀土元素含量的方法实现的，而这种方法又会使 α 增加。因此， μ 以更快的速度下降，而不是 $\mu \propto \frac{1}{\sqrt{Ku}} \propto l$ (原文为 $\propto \sqrt{Ku} \propto l$ ，有误——校者注)，图4中给出了用一种材料实验观察到 μ 与 Ku 的关系。尽管曲线下降相当陡但应注意到，由于a) 磁泡传输线路周期正比于 l ，b) 常用的最大驱动场 $\propto 4\pi M \alpha l^{1/2}$ ，所以器件速度仍将近似地为常数。

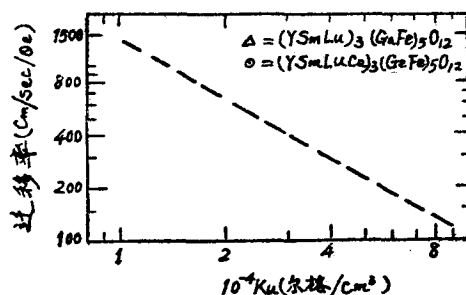


图4 $(YSmLu)_3(GaFe)_5O_{12}$ 和 $(YSSmLuCa)_3(GeFe)_5O_{12}$ 中迁移率 μ 和单轴各向异常数 Ku 的关系(依参考文献⁽¹⁸⁾)

上述讨论的对高 Ku 的需要不是限制达到小泡的唯一因素，它还要求高的 $4\pi M$ 值。如图1所示，即使 $4\pi M$ 高达1700 Oe (奥)也仅能得到 $q \sim 2$ (0.5 μm 的泡径)。由于1700 Oe (奥)是YIG的磁化强度，而有掺杂的石榴石还要从铁离子的净磁矩中减去大部分稀土离子所贡献的磁矩，所以可以认为1700 (Oe)应是磁泡石榴石的磁化强度上限。若采用在八面体位置取代的方法也许能获得较高的 $4\pi M$ 值。

虽然已进行了大量工作以期发现更好的泡材料，但没有一种优于磁性LPE石榴石。这种外延材料能从过饱和溶液中沉积，这种相当偶然的条件产生常温全LPE膜的沉积。如果希望从一种溶液生产的磁泡薄膜得到一致的磁性参数，那么任何一新材料就必须在等温条件下制备。结论是，如果发现了一种性能优异的小泡径材料，那么这些材料就应具有比石榴石更低的结晶学对称性，换句话说，也即是它们呈现出大得多的各向异性。这使人想起结晶石榴石之前，曾研究过诸如六角晶系铁氧体⁽⁴³⁾及正铁氧体⁽⁴⁹⁾等非立方晶系的材料作磁泡器件情况很可能是这样：一种六角或正铁氧体或其他的非立方材料将具有高的各向异性，这就无需再像磁泡石榴石那样利用生长感生各向异性了。过去的经验告诉我们，材料科学家在受到启发，碰到机会之后，最终将能解决仍然存在的问题并制出能用于实际磁泡器件的泡径最小的材料。

衔接圆盘磁泡器件的制作*

摘要 研究了一种用于 $1\mu\text{m}$ 泡的衔接圆盘磁泡器件的完整制造工艺。外延生长的双层石榴石膜显示出超过单层结构的显著优点。自对准结构的最近进展放松了对具有 $1\mu\text{m}$ 对准公差的一次掩膜的光刻要求。通过采用导体注入图形的附加工艺和检测器的简化工艺实现了功能元件的金属化和刻图。发现钝化蒸发的检测器对小条畴矫顽力是必要的。已经确定了离子注入的最佳条件为 H^+ 离子, 3×10^{15} 原子/ cm^2 , 接着进行退火处理。两次注入产生了好的传输容限而不需要退火。

1. 引言:

衔接圆盘磁泡器件与通常的场存取坡莫合金棒器件^(1,2)相比, 提供了更高的位密度。最近已报导了⁽³⁾具有好的搭接容限的 $1\mu\text{m}$ 器件的操作。新的设计包括了自对准结构。为此以前报导和注入图形所需要的两次掩膜(导体图形和注入图形)被合并为一次掩膜。因此消除了一步苛刻对准。对于完整芯片的制造, 掩膜的总次数减为三, 1) 检测器; 2) 连接洞; 3) 其它功能, 包括主/次环, 发生器, 缩灭器, 转移门和导体。图1概括地表示了这种设计的典型布局。与以前的设计相反, 在以前的设计中, 转移门需要一个单独的导体, 在自动对准结构中, 主环变成转移门的一部分。在GGG基片上依次生长了下面为“存贮”层、上面为“驱动”层的双层石榴石膜, 关键的一步工艺顺序列于表1。

本文中, 我们描述了双层石榴石的材料要求和生长条件; 光刻情况; 导体和注入图形的金属化工艺; 磁阻检测器的制造和离子注入参数。

2. 石榴石材料

正如以前讨论过的那样⁽¹⁾, 衔接圆盘器件的操作要求器件的注入部分有两种性质不同的磁化结构存在。过去用单层石榴石膜, 并且用离子注入改变石榴石膜表面层的性质, 已作到了这一点。为了这一工作, 我们选用了两种分立的石榴石膜, 从制造的观点出发, 只用一层石榴石膜的器件具有廉值和高产量的优点。然而两种分立层结构的优点是能够使每层的磁特性分别达到最佳。也证明了存贮和驱动层之间的交界层可能有不利的影响, 但两层独立层附加的灵活性却启发我们努力去追求双层结构。

用液相外延技术从 $\text{pbo-B}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 助熔剂熔体中在(111)方向的GGG基片上生长了磁泡存贮层。在存贮层上用液相外延技术也生长了驱动层。外延膜的厚度取决于生长率和生长时间, 适当地调整熔体就可降低生长率并改进膜厚的重复性⁽⁴⁾。用光学磁强

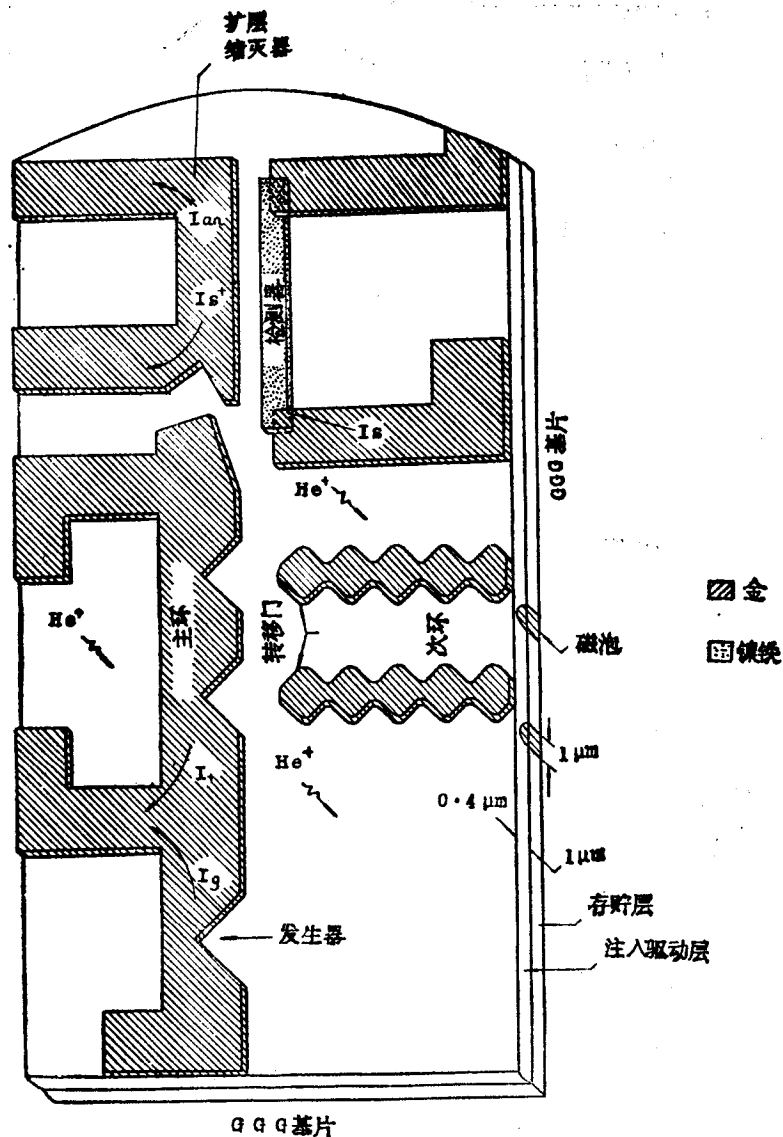


图 1 衔接园盘器件的典型布局

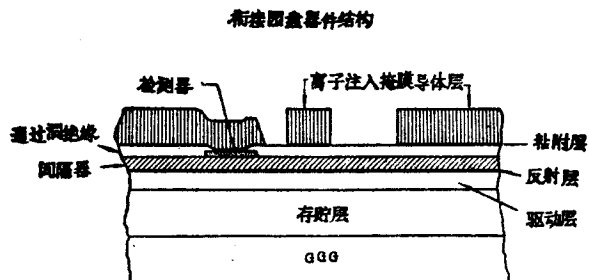


图 2 衔接园盘器件的断面结构

表1 关键的工艺步骤

工艺目的	材 料	工 艺	厚 度
A. 存贮层生长	Eu Tm YIG	LPE	1.0 μ m
B. 驱动层生长	Gd Tm YIG	LPE	0.4 μ m
C. 掩膜1. 反射层,	AZ-1350J		~1.5 μ m
反射层沉积	Cr	蒸发	500埃
剥离过厚的Cr			
D. 间隔沉积	SiO ₂	溅射	0.2 μ m
E. 检测沉积	NiFe+si	蒸发	300埃+70埃
掩膜2. 检测器	AZ-1350J		~1.5 μ m
确定检测器	离子刻蚀	离子刻蚀	300 $\text{\AA}$ +70埃
F. 掩膜3, 联结洞	AZ-1350J		~1.5 μ m
绝缘沉积	SiO ₂	蒸发	
剥离多余的SiO ₂			
G. 镀基沉积	Nb/Au	蒸发	100埃/600埃
掩膜4. 导体	AZ-1350J		~2 μ m
导体	BDT-510Au	镀	0.9 μ m
除去镀基	Nb/Au	离子刻蚀	100埃/600埃
H. 离子注入	He		
(退火、任意)			

计和铁磁共振技术来鉴定膜, 并从这些测量数据计算其它一些特性⁽⁵⁻⁸⁾。

研究了用于存贮层的Ga取代的Eu-Tm-Y和S-Tm-Y石榴石系中的不同组分⁽⁹⁾这两种系列都可产生0.5~5.0 μ m的泡并具有宽的Q值范围, 对于1 μ m的泡, Q可以从2变到4。发现, 对于存贮层 ($W_s=1\mu$ m) 最佳成分为Eu_{0.8}Tm_{0.1}Y_{1.1}Ga_{0.5}Fe_{4.5}O₁₂。相应的驱动层的成分为: Gd_{0.1}Tm_{1.1}Y_{1.0}Ga_{0.45}Fe_{4.55}O₁₂, 这些石榴石膜典型的室温特性列于表2, 然而, 应该注意, 这个表中所列的特性都是关于分离层的而不是关于合成结构的。而且, 在这一层上的驱动层具有垂直的各向异性, 而不是形成充磁壁所需要的平面各向异性。离子注入会在驱动层中产生显著的宏观压应力, 这平面压应力的大小几乎与石榴石的成分无关。它引起的各向异性性能的改变 $\Delta K_u \approx 1.5\sigma_s \lambda_m$, 这里平面应力 σ_s 可以高达 $2-3 \times 10^{10}$ 达因/cm²⁽¹⁾, 因此石榴石材料的“可注入性”基本上取决于磁致伸缩系数 λ_{111} 的大小。对于驱动层, λ_{111} 应该大; 而对于存贮层, λ_{111} 应该小。从表2可以看到存贮层室温的饱和磁化强度稍高于驱动层, 然而, 随着温度的增加, 存贮层的饱和磁化强度稍微减小, 而驱动层的稍微增加, 结果在整个操作温度范围内它们彼此接近。

表2 LPE生长的 $(\text{EaTmY})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ 存储层和 $(\text{GdTmY})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ 驱动层典型的室温特性

性能	存储层	驱动层
厚度 h (μm)	1.00	0.4
条宽 W_s (μm)	1.00	—
泡破灭场 H_0 (Oe)	340	—
特性长度 l (μm)	0.114	~ 0.11
饱和磁化强度 $4\pi M_s$ (G)	680	860
各向异性场 H_k (Oe)	1750	800
品质因数 Q	2.6	1.2
磁致伸缩系数 λ_{111} ($\times 10^{-6}$)	-1.6	-2.9
单轴各向异性性能 K_u (10^4 尔格/ cm^3)	4.7	2.1
磁晶各向异性性能 K_1 ($\times 10^3$ 尔格/ cm^3)	-9.5	-4.9
矫顽力 H_c (oe)	< 0.5	< 0.5
宏观交换刚度 A ($\times 10^{-7}$ 尔格/ cm)	2.35	~ 2.5
旋磁系数 g	1.64	1.78
吉尔伯特阻尼系数 α	0.020	0.019
居里温度 T_c ($^{\circ}\text{C}$)	225	232

3. 光刻

衔接圆盘器件一个主要优点是能够用通常的光学制版制作磁路来操作小泡 ($1\mu\text{m}$ 泡径) 而不是用更遥远的电子束或 X-射线技术。对于完整结构的制造需要三个基本步骤: 首先要印制检测器图形, 这一步不需要对准; 第二步是开上一个联结洞, 把检测器与导体互相联结起来。由于联结洞的尺寸相当大 ($5\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$), 所以对准公差 $\pm 1\mu\text{m}$ 是合适的; 第三步是导体和注入图形的结合。检测器附近的严格的对准, 要求 $\pm 1\mu\text{m}$ 的公差。

表 1 中列出的第一步光刻是为了制造一个光学镜面以便很容易用视觉来观察泡, 仅仅是为了判断的目的, 为避免芯片之间的电子短路。在实际生产的过程中这一步可以省去。

为达到更高的分辨率和更快的往返时间, 借助电子束系统制造掩膜。用离子刻蚀制造离子注入/导体层掩膜, 因为必须要解决小至 $0.2\mu\text{m}$ 或更小的分辨率。图 3 比较了化学刻蚀和离子刻蚀的同样的移位寄存器掩膜。化学刻蚀明显地引起了整个图形的膨胀或放大, 大概是因为侧刻蚀之故。

对准和曝光是在一个 Karl Seuss MJB₃ 对准器上进行的。它有几个特点。在高至两个大气压的压力下样品一掩膜紧密地接触可把衍射和反射对抗蚀剂象的影响减至最小。1 微米的分辨率就是可行的了。其次, 非常好的扫描光学显微镜 (620x) 和严密的 X-y 以及角微动台的结合, 允许对准位置至少为 $0.25\mu\text{m}$ 。

4. 磁阻检测器的制造

沉积一层膜，接着刻成图形，就制出了图 1 所示的条形检测器。用蒸发法，在石榴石上沉积光学反射层Cr(500埃)和用RF溅射法沉积第一间隔层SiO₂ (2000埃) (表 1 中的步骤C和D) 以后，蒸发NiFe膜，接着立刻蒸发纯化层Si(~70埃) (步骤E) 后面将讨论纯化层的作用。用光致抗蚀剂(AZ—1350J)作掩膜，用离子刻蚀制出检测器图形(步E)。第二步光刻确定了条状检测器两端的联结洞(步骤F)。为简化绝缘层的剥离操作，需要光致抗蚀剂适当的外伸。把可以蒸发的材料，例如SiO₂，Schott玻璃，SiO₂等用作绝缘层(2000埃)。剥离了过剩的材料及抗蚀剂以后，几乎为平面的表面已扩展到联结洞，以便连接要制造的导体。

在这个研究过程中，通过实验确定，窄条状检测器典型尺寸为50μm×100μm×0.03μm，其高矫顽力是由NiFe薄膜的氧化和腐蚀引起的。没有纯化的2—3μm宽的条，常

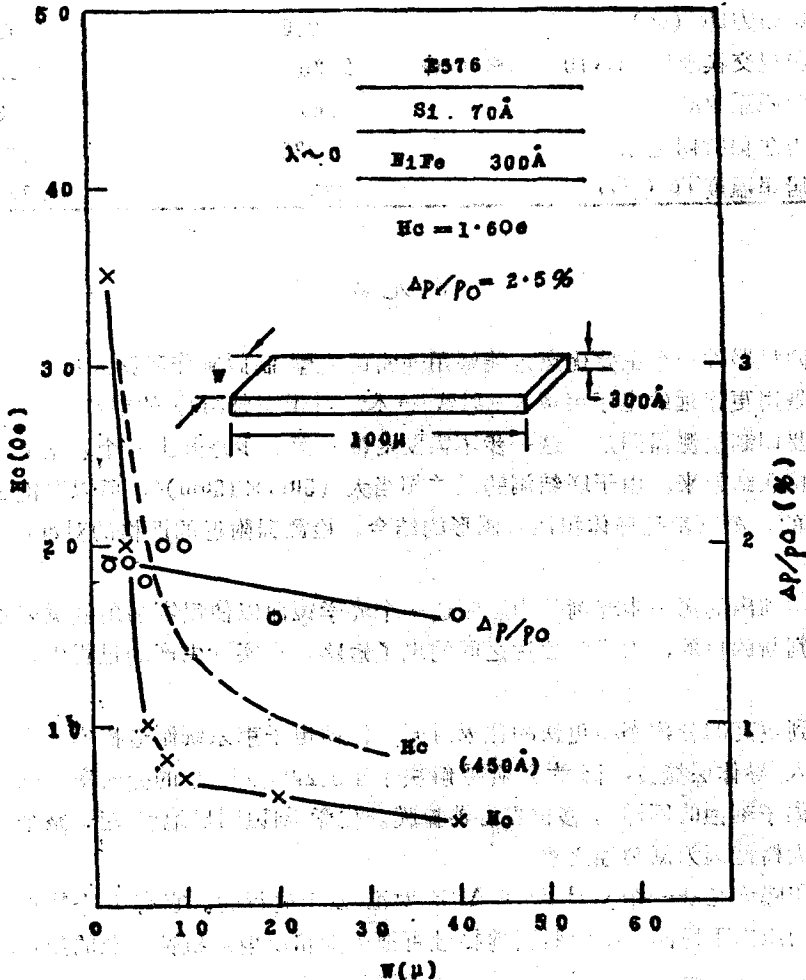


图 4 条宽对NiFe膜矫顽力的影响以及用Si纯化的条和片膜的磁电阻系数

常看到Hc高达80Oe, (对应的操作需50Oe的平面驱动场)对于 零磁致伸缩成分81%Ni—19%Fe, 钝化和条宽对矫顽力的影响, 连同以前的工作¹⁵ 一并 归纳在图4中。膜的特性也列于该图中。

因为检测器最终要联接于金导体, 所以这个钝化层不能是绝缘体。同时也不能是良导体, 因为导电性会降低NiFe膜的磁阻效应。这样就需要半导体材料。因此沉积这种材料同NiFe膜是一致的。并且最好在NiFe膜沉积之后立即沉积这种材料。基于这些考虑, 选择了电子束沉积NiFe和Si。在芯片制造的整个过程中, 也许需要几天, 已发现Si的厚度在70~100埃范围内是合适的。

NiFe其它方面的特性是离子注入和以后的退火处理的联合影响, 因为所有的样品都要经历这种处理。表3归纳了这种影响的一个例子

表3A **A. 注入*离子和退火**对Hc的联合影响**

样品	厚度 (Å°)	Hc (oe)	Hc (oe)	Hc (oe)
		沉积	注入	退火
E-483	330	1.4	1.6	1.9
E-486	310	1.5	1.5	2.1

*He⁺, 100kev, 3×10^{15} /cm², 偏离轴7°,

**在He气中, 350°C下, 退火30分钟。

表3B **B. 离子注入和退火对磁阻效应的共同影响**

样品	$\Delta P/P$ (%)	$\Delta P/P$ (%)	$\Delta P/P$ (%)
	沉积	注入	退火
E-483	2.5	2.5	2.6
E-486	2.4	2.3	2.9

好像离子注入的效果是很小的。像由其它实验确定的那样, 热退火引起很多变化, 尤其是Hc的增加。

5. 导体—注入图形的金属化

在自对准结构中, 导体和离子注入图形同时用金来金属化, 首先选择金基的合金是因为它能阻止高电流密度下的电子迁移、(特别是对于图1中的泡发生器)。具有检测器、联接洞, 和SiO₂的晶片Nb-Au镀基覆盖, 接着镀上厚的金。由于检测器和导体层间有一绝缘层, 所以检测器和扩展器之间的对准公差可以大到 $\pm 1\mu\text{m}$, 制造这一层用的电镀方法是图5所示的圆筒电镀法的一种变种。在我们的装置中, 筒是固定不变的, 而且是阳极。夹于同步马达轴上的样品可以反转, 也是一个搅拌机械。马达的罩和轴, 以及样品就作为阴极。用一磁性搅拌器提供了附加的搅拌槽。

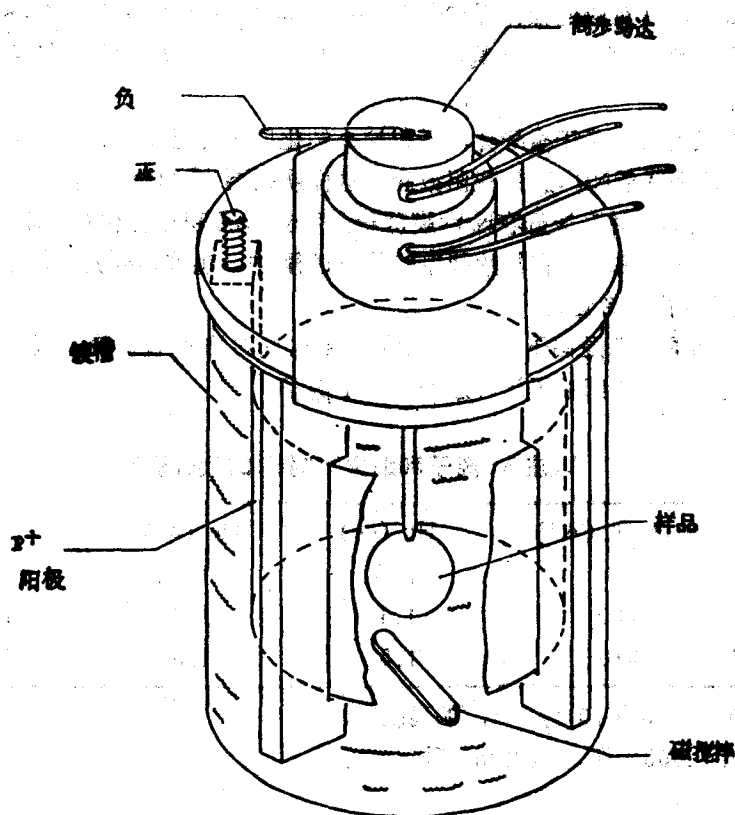


图5 用于制造衔接圆盘器件的电镀槽的草图

所有金的电镀都是在SeL—Rex公司制造的槽中进行的。基于对金图形的应力,导电性和结构上的完整性考虑,我们选择Puca401和1 BDT510槽作为大量镀金之用,后面的槽已被证明是更实用的,而且在很宽的金浓度范围内都有均匀平滑的沉积物。PH值仅稍微呈碱性(8.5),并在电镀操作期间不影响AZ抗蚀剂图形。Pura401产生的金沉积物具有更低的应力,如在片状膜上测出的那样,然而,沉积物的颗粒尺寸是很粗糙的,且这种槽不如BDT510那样稳定。

表4 350°C下退火半小时,电镀金膜中应力和电阻率的变化

金 型	应力 (10^3 达因/厘米 ²)		电阻率 $\pi \Omega \text{cm}$	
	前	后	前	后
BDT-200	-6	-2	5.2	4.1
BDT-200 (用比较亮的)	+12	+25	6	4.8
Pura401	≈ 2	≈ 2	5.25	3.5
R-88	10	26	—	3.8
BDT510	2.5	14	4	2.6