

微波

Weibo

内部刊物
注意保存

微波固态源
技术交流会
(专 辑)

1974

第四机械部无线电测量仪器专业技术情报网微波组
工业部

26
41

目 录

YIG调谐微波固态信号源	1
1. 三厘米YIG调谐振荡器	1
2. 三厘米YIG电调固态源	54
3. X波段YIG调谐振荡器	73
4. 五厘米YIG电调谐铁氧体振荡器	92
5. YIG调谐微波晶体三极管振荡器	100
6. 关于YIG调谐晶体振荡器的工作报告	126
7. 2 ~ 3.1 GHz YIG调谐晶体三极管振荡实验总结	146
8. 2 ~ 3 GHz YIG振荡器的初步尝试	158
9. 变容二极管调谐微波固态信号源	164
9. 变容二极管调谐微波晶体振荡器的分析与设计	164
10. X波段变容二极管调谐微波晶体振荡器	176
11. 微带变容管调谐的电路	192
机械调谐电调带微波固态信号源	
12. 砷化镓二极管宽带同轴型振荡器	212
13. XB-5 微波固态信号源振荡腔体性能简介	282
14. 五厘米铁氧体振荡器	294
15. 三厘米同轴谐振腔铁氧体振荡器设计的点滴体会	307
稳定度较高的微波固态信号源	
16. 铁氧体振荡器和放大器的一些初步试验	315
17. 三厘米铁氧体振荡器的工作小结	330

微波固态信号源应用

19. 应用于 HL16 型雷达综合测试仪中倏灭振荡器性能简介 344

国外微波固态信号源动态

20. 国外固态源发展动态 351

附 录

21. 磁晶各向异性引起的 YIG 器件温度不稳定性的最佳补偿 378

22. 静磁模及其在 YIG 器件中的激发 402

23. 温度对 YIG 一类磁单晶小球谐振频率的影响及温度稳定

轴的确定 427

编 后 440

三厘米 YIG 调谐振荡器

前言

本文简单介绍了 2 千兆带宽的三公分带线 YIG 振荡器的研制，研制的主要目的是取代接收机中作本振的扫频振荡器——返波管。研制产品在输出功率、振荡频率范围、频率稳定度、主杂波比、线性度和调谐速度等主要指标满足了整机要求并且成功地经受了温度、冲击和振动等致热初步取代了返波管。随着整机一起作了飞行试验。

在研制过程中，除了协作单位上海 615 所大力协助外，还受到康华兄弟厂的大力支援，尤其是北京物理所、南字 823 部队、南字 827 部队、上海第六六厂、上海七六厂、上海磁性材料厂等，这里特向他们表示感谢，并向他们学习。

一、YIG 振荡器的工作原理

近年来，由于国防工业和尖端科学技术迅速发展，对军用微波系统的要求亦愈来愈高，要求它向小型化、自动化、宽频带化，以及更高的频段发展，在这点上体积庞大、手工操作的机械调谐振荡器不适合需要，就拿目前所用的返波管来讲，它显得体积笨重，成本昂贵。

随着无线电技术的发展，国内外广泛的研制和开始使用了变容管电调和 YIG 调谐的微波振荡器。下面的表格是

按照目前国内技术水平三种典型的电调振荡器的比较。

	调谐范围	调谐速度	频率	线性度	控制线路	体积	重量
YIG 调谐振荡器	宽	稍慢	纯	好	复杂	稍大	稍重
变容管调谐振荡器	窄	快	稍差	差	简单	小	轻
滤波管	宽	稍慢	差	差	复杂	大	重

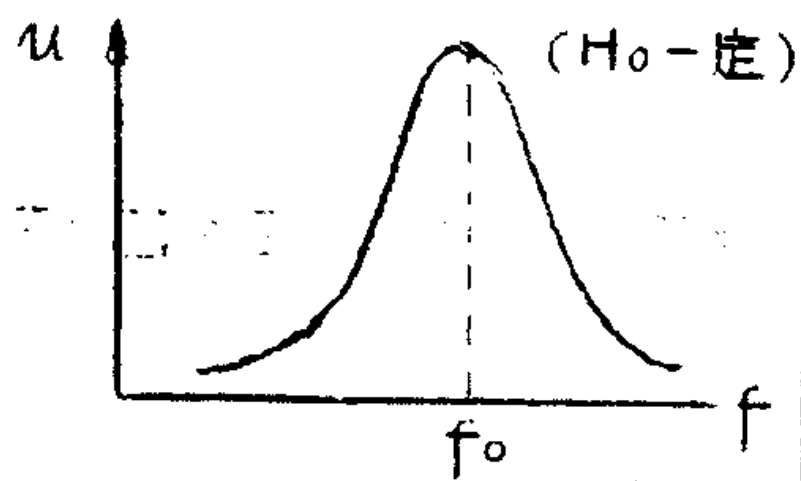
从以上的表中可看出 YIG 调谐振荡器最适用于电子对抗侦察设备以及宽带测试设备。

1. YIG 调谐振荡器的工作原理

YIG 器件的原理是相当复杂的，这里简单的介绍一下。在单晶铁氧体材料中，每个分子都含有一个不成对的电子，这些电子由于自旋产生磁矩，当外加一个偏置磁场就可以使这些磁矩围绕该磁场产生进动，其进动频率与外磁场强度和材料特性有关。由于损耗，磁矩进动的角逐渐缩小，直到与外磁场 H₀ 平行，进动停止，类似 LC 回路的阻尼振荡一样。

如果进动时加一个同频同相化高频磁场，其频率与进动频率一致，方向和 YIG 激起同频同相化高频场方向一致，这样能量不断输送给 YIG 补偿了损耗，进动将一直保持下去，从而周围将激发起同频同相化的高频磁场，类似 LC 电路在谐振频率上发生谐振时电容中建立起强磁场一样，于是单晶的 YIG 称为铁氧体振荡器其谐振频率为铁氧体谐振频率。

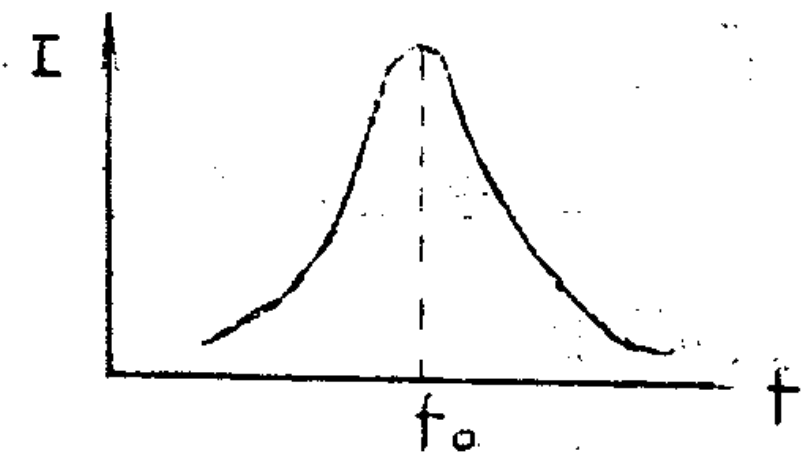
YIG 小球



铁磁谐振频率 $f_0 = \gamma H_0$

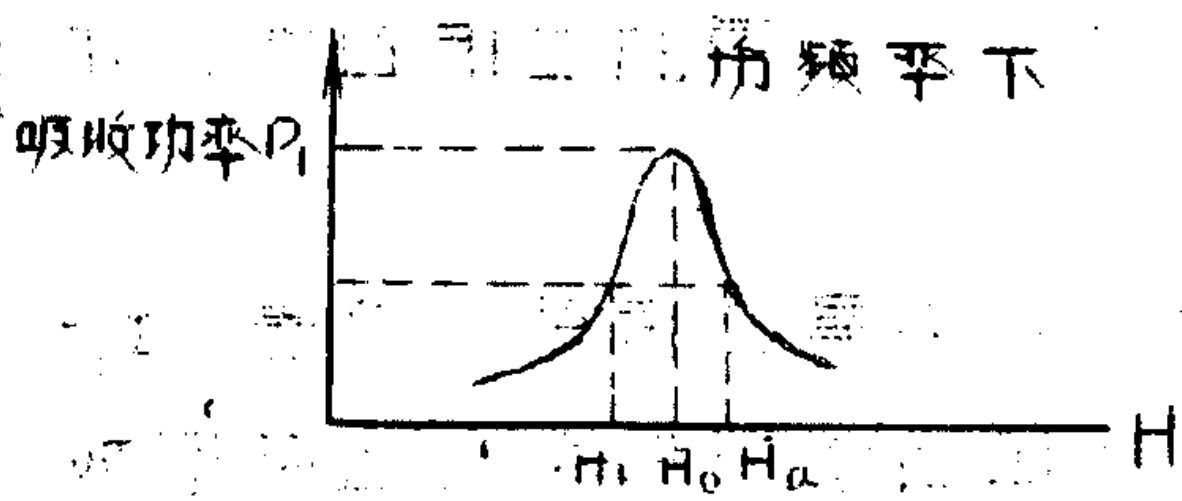
$\gamma = 2.8$ — 旋磁比 (忽略退磁场, 各向异性场及 $4\pi M_s$ 的影响)

串联谐振回路



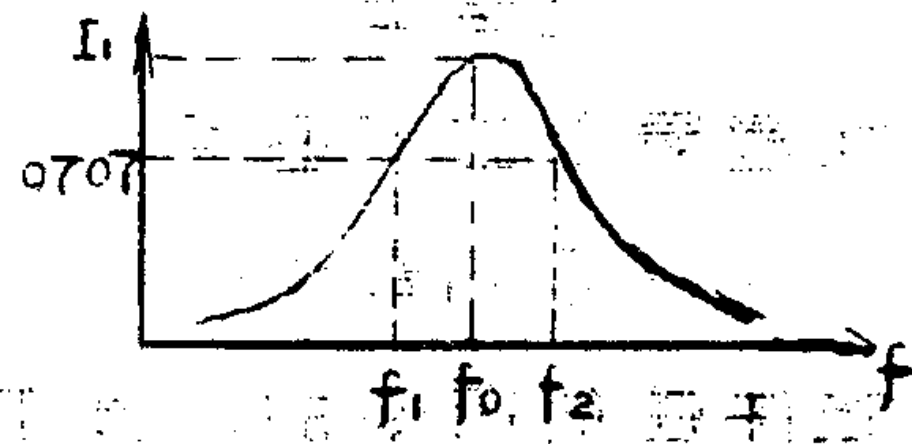
谐振频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}}$

功率共振曲线



ΔH 表示线宽 $\Delta H = H_2 - H_1$
由于 YIG 小球的材料的纯度、几何形状及光洁度决定

电流谐振曲线



Δf 表示带宽
 $\Delta f = f_2 - f_1$
由线圈、电容的品质因素决定

无载 Q 值

$$Q_u = \frac{f}{\Delta f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi M_s}{\Delta H} \approx \frac{H_0}{\Delta H}$$

ΔH 愈小, Q 值愈高

无载 Q 值

$$Q_u = \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)^{-1}$$

Δf 愈小, Q 值愈高

除了和 LC 谐振回路相类似的特性外，铁氧谐振器还有其固有特性

(1) 饱和磁化强度 $4\pi Ms$ 它是材料单位体积内由电子自旋磁矩之和 $4\pi Ms$ 愈大，谐振面与外电路的耦合愈紧。

(2) 当工作频率 $f < 2\pi N_T 4\pi Ms$ 时 YIG 器件会产生重台限幅

当工作频率 $f < \pi N_T 4\pi Ms$ 时，磁场不能使样品饱和磁化，从而损耗增加不能应用。

注：式中 N_T 为匝数因子，对于范围的小球

$$N_T = \frac{1}{3}$$

(3) 居里温度：饱和磁化强度下降到零的工作温度，亦即是最高工作温度。

(4) 各向异性场：YIG 器件有各向异性特点，随着 YIG 器件在磁场中的位置不一样，反应出谐振频率和温度系数不一样，仔细地调整小球的位置可以找到一个方向，在这个频率上，小球的谐振频率与温度无关，从实用观点来讲，这个方向是在 $(1, 0, 0)$ 面上并和 100° 轴成 $31^\circ 43'$ 的方向。

(5) 温度的影响：通常，温度升高（低于居里温度）线宽 ΔH 下降，温度升高 $4\pi Ms$ 下降， $4\pi Ms$ 的变化将引起谐振频率的变化，范围的小球由于去磁系数相等，将不影响频率，实际上使用的小球总是有点不圆的。

(6) 外加高频磁场的均匀和直流偏置磁场的均匀及磁畴梯度的存在，将引起线宽 ΔH 变坏和高次静磁场的出现。

(7) 外电路的涡流损耗将引起 ΔH 变坏

由于上述特性，可以得出以下结论：

(1) 小球必须精心选择

(2) 由于特性(6)，所以要求外加的直流磁场必须要均匀，不存在磁场梯度。

(3) 小球最好要定向，以保证最小的温度系数和同样的谐振频率。

(4) 恒温是保证 YIG 器件的频率稳定的有效措施。

(5) 高频磁场必须与偏置磁场垂直，并且在 YIG 谐振器周围有强而均匀的高频磁场（通常是短路端）

(6) 小球不能靠近金属壁

(7) 小球工作频率

$$f = \frac{2}{\gamma} \times 2.8 \times 10^{10} \text{ Hz}$$

II. 微波振荡器 —— 体效应管

要使 YIG 器件产生的振荡不断的继续下去，就要不断给它补充微波能量。这里应用了体效应管。

近年来，微波半导体发展很快，能作为微波振荡器的有微波三极管，三极管，限幅二极管，隧道二极管，比较起来作为小功率的振荡源选用体效应管有下列几个优点：

① 有一定的功率输出几十 mW 到几百 mW

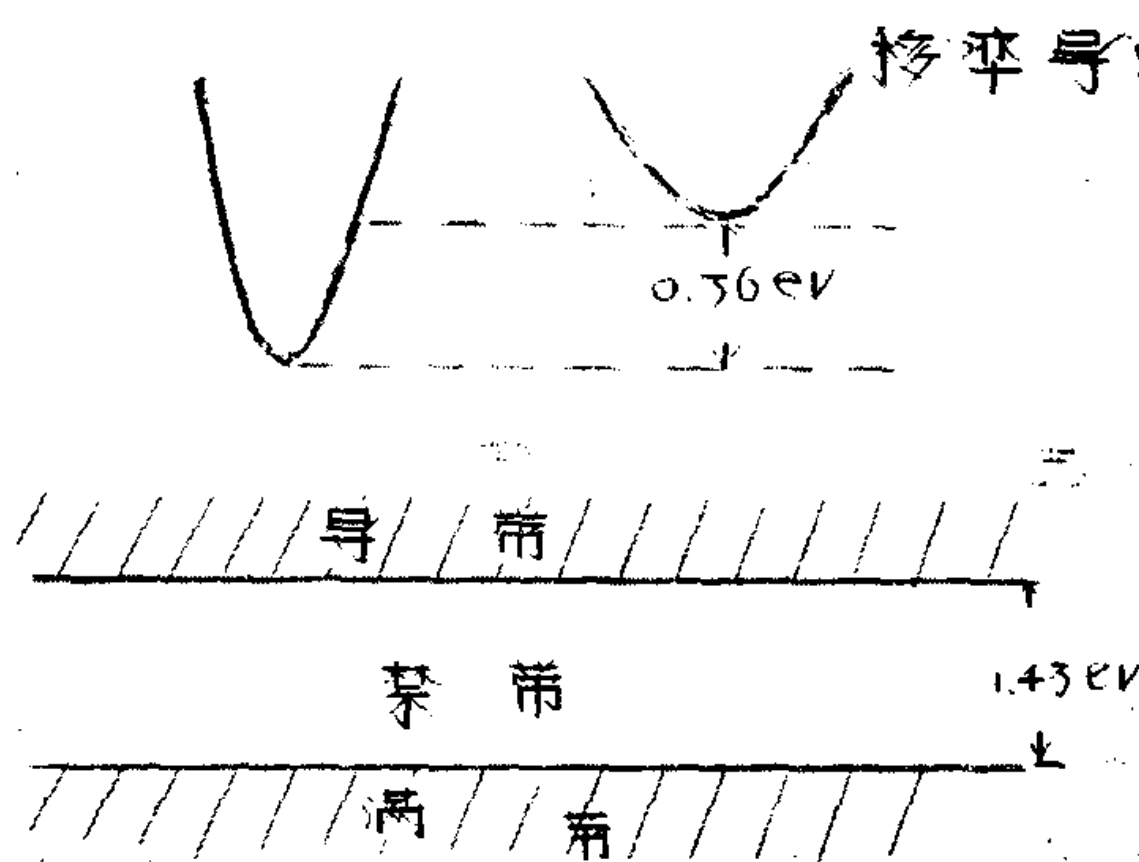
② 频率较单纯

③ 频率范围较宽

④ 能承受一定的电压冲击。国内生产技术已达到一定水平。体效应管的负阻是由于高迁移率状态的电子迁到低迁移率状态引起的。

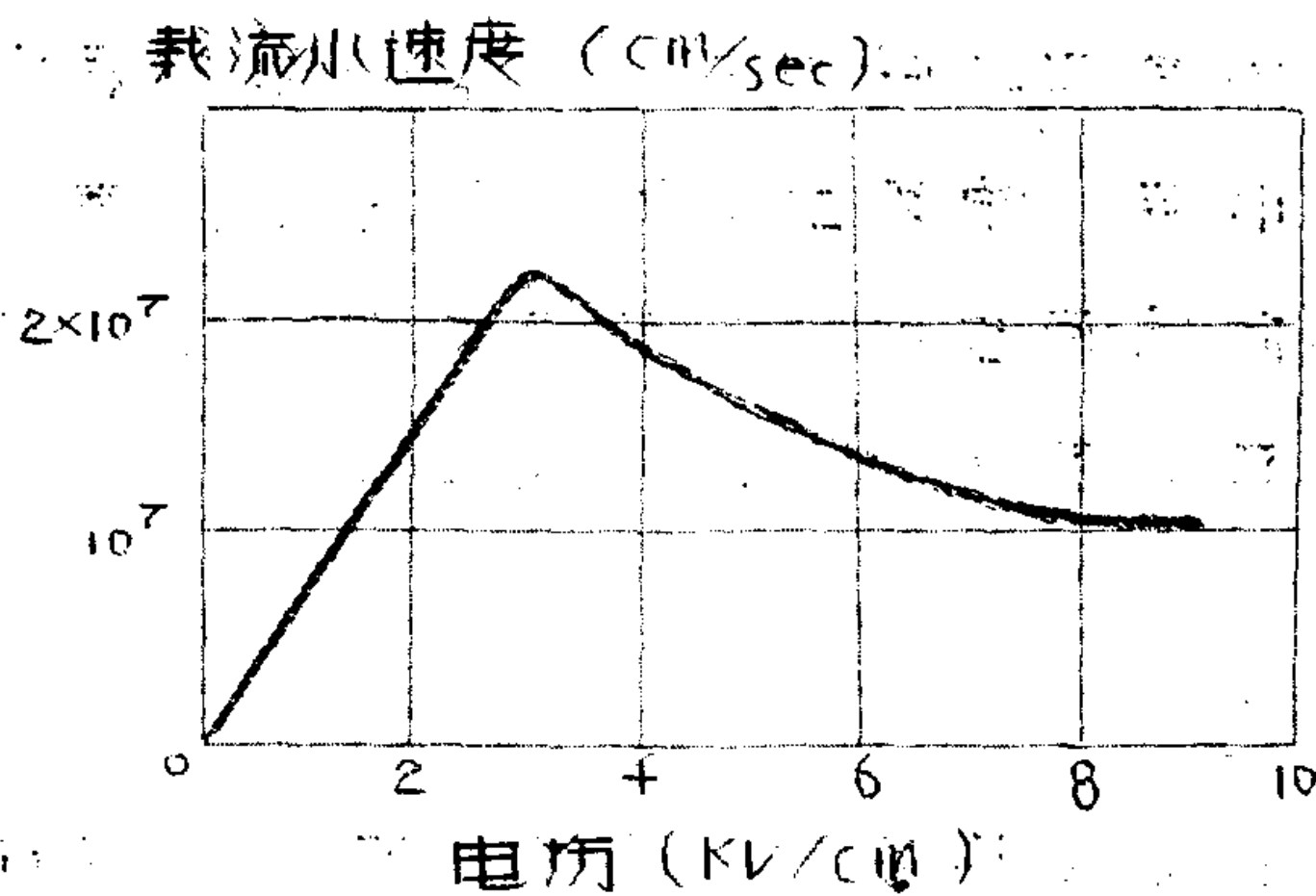
低质量高迁移率导带谷

高有效质量低迁移率导带谷



图一 砷化镓的能带图与导带结构

砷化镓(体效应器件的材料)能带图如图(1)所示在低电场时,大部分电子处在电子迁移率高而质量较低的能谷中,在高电场中,许多电子就跃迁到上面一个能谷,即电子迁移率低而质量较大,因而在低电场时导电率高,高电场时导电率低。电子速度以电场为函数的曲线如图二所示,



图二 砷化镓的速度——电场特性在超过 3.2 kV/cm 后导电率下降

在阈值以上，砷化镓的微小电导率是恒定的

阈值场的强度约为 3.2 KV/cm

它的损坏电压约为 20 KV/cm

当电压大于阈值时，电子密度涨落使某一点电压增加，运动的电子将减速，导致在靠近的靠阴极一侧形成电子积累，靠阳极一侧形成电子耗尽，这样就增加了电子密度的变化，这时畴在阴极形成向阳极移动，畴的漂移速度约等于电子的漂移速度 10^7 cm/s ，到达阳极后畴就消失，则新的畴就在阴极产生，畴一旦被阳极吸收电流突然增加，形成一尖峰，这样反复进行下去就产生一高频振荡，其周期等于畴的渡越时间 T_t 。

$$T_t = L/V_{el}$$

L 为有源区的长度

V_{el} 为畴的漂移速度 $\approx 10^7 \text{ cm/s}$

其频率为 $f = \frac{1}{T_t}$

体效应管在此时工作模式称之为渡越模

当体效应管和外电路相接，当外电路开始谐振，并且 Q 值足够高，此时外电路是可以控制体效应管工作频率。

如外加电路谐振频率低于渡越时间频率，由于足够高的 Q 值，外电路的电压可以扫到低于阈值，加在二极管上的瞬时电压经过阈值之前，阳极处新的畴将不会形成，因此体效应管此时工作频率将等于外电路谐振频率。

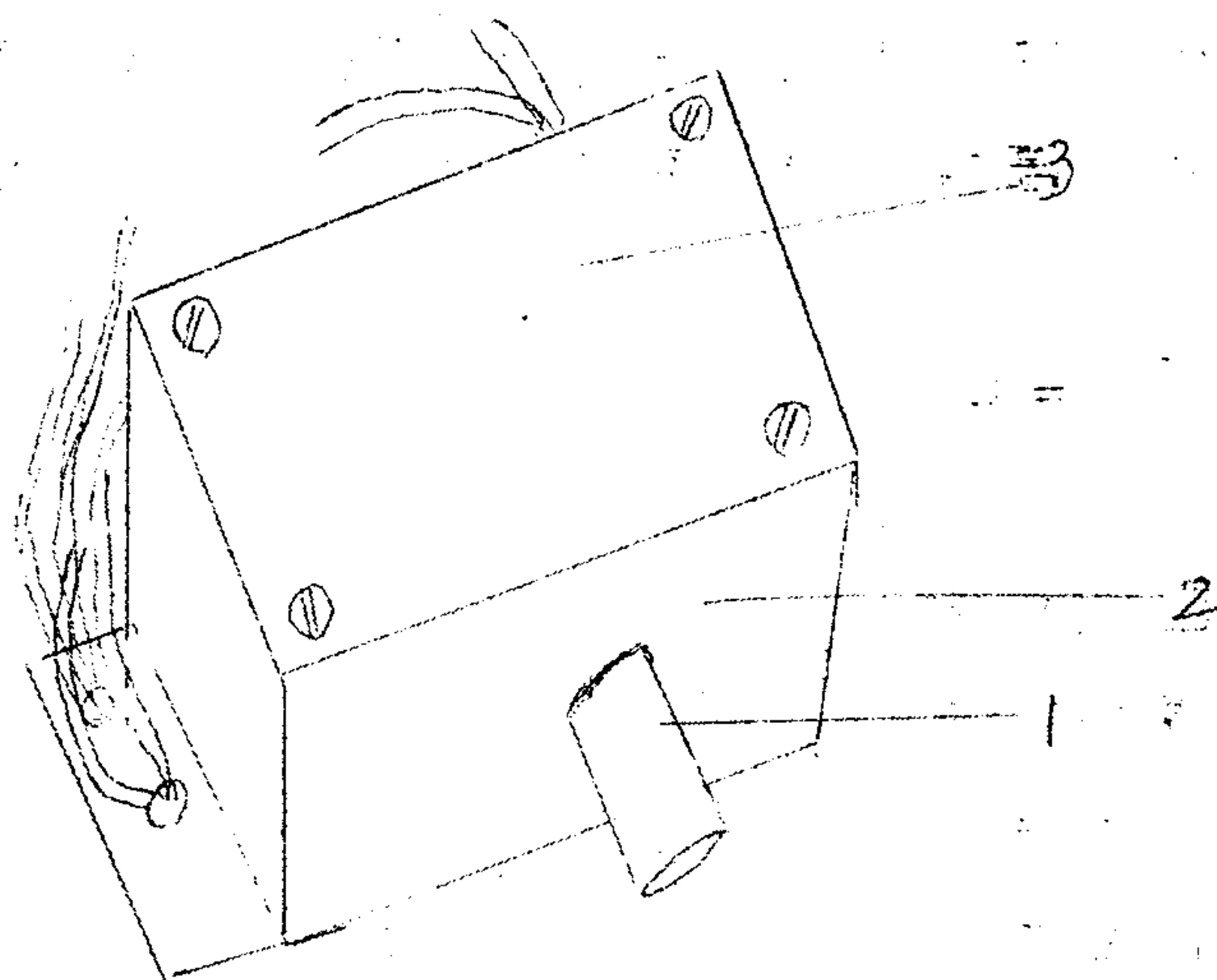
当外电路谐振频率高于渡越频率，这时将产生这种现象即畴还没有到达阳极时，电压已低于阈值，此时畴就提前率灭，亦就是因此时工作频率将等于外电路谐振频率。

由此可见工作频率范围是相当宽的。

了解了YIG器件的工作原理，如用YIG小球和体效应管作适当耦合，就会使得体效应管的工作频率由YIG器件来控制，亦即是由外加直流磁场来控制，形成一个磁调振荡器。

二 三厘米YIG振荡器的设计

图三是我们设计的振荡器外形



图三 三厘米YIG振荡器

整个器件分三个部分

① 微波电路部分

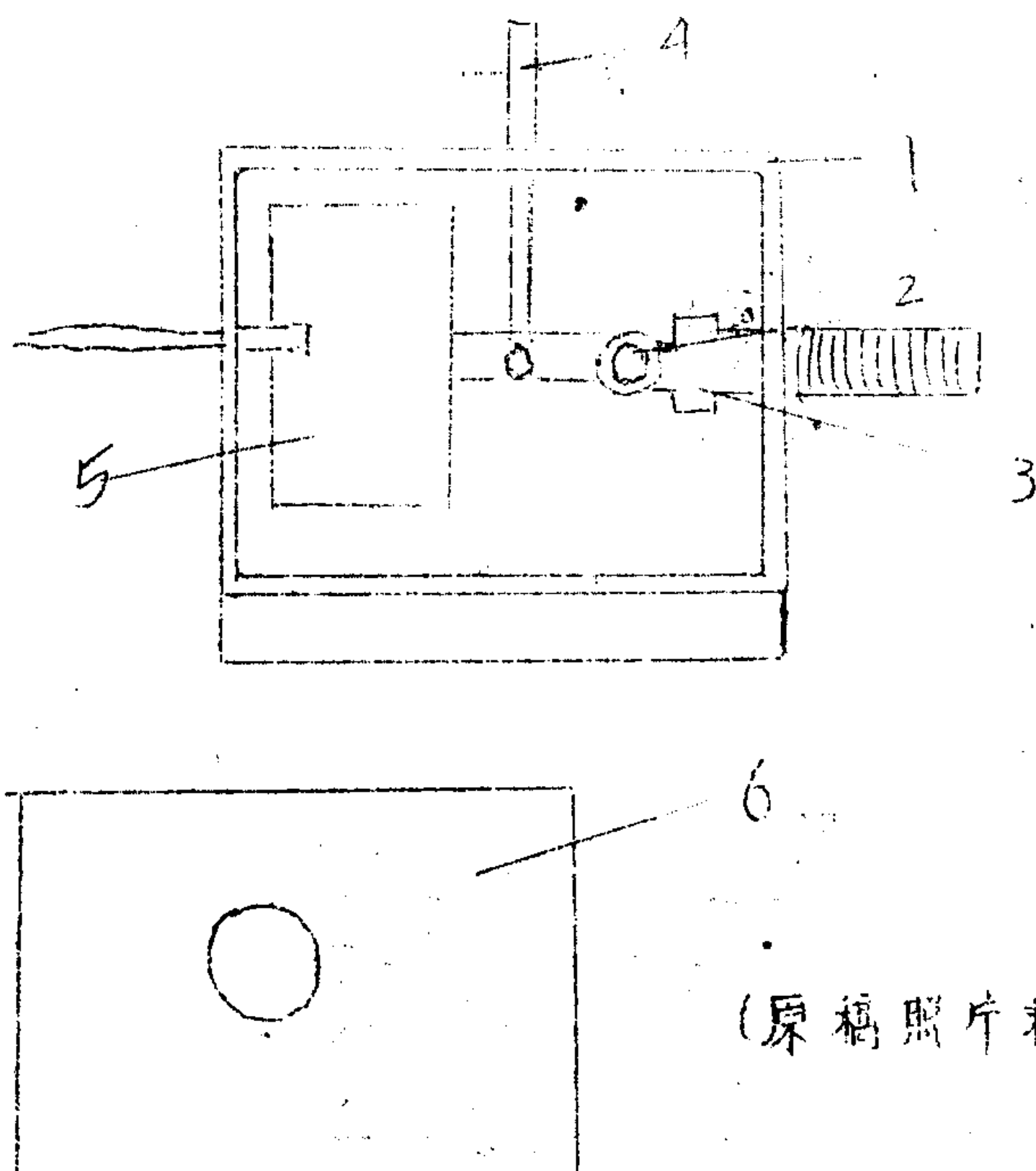
② 磁路部分

③ 加热部分

一 微波电路部分设计

1. 结构的确定

微波电路的详细结构如下图



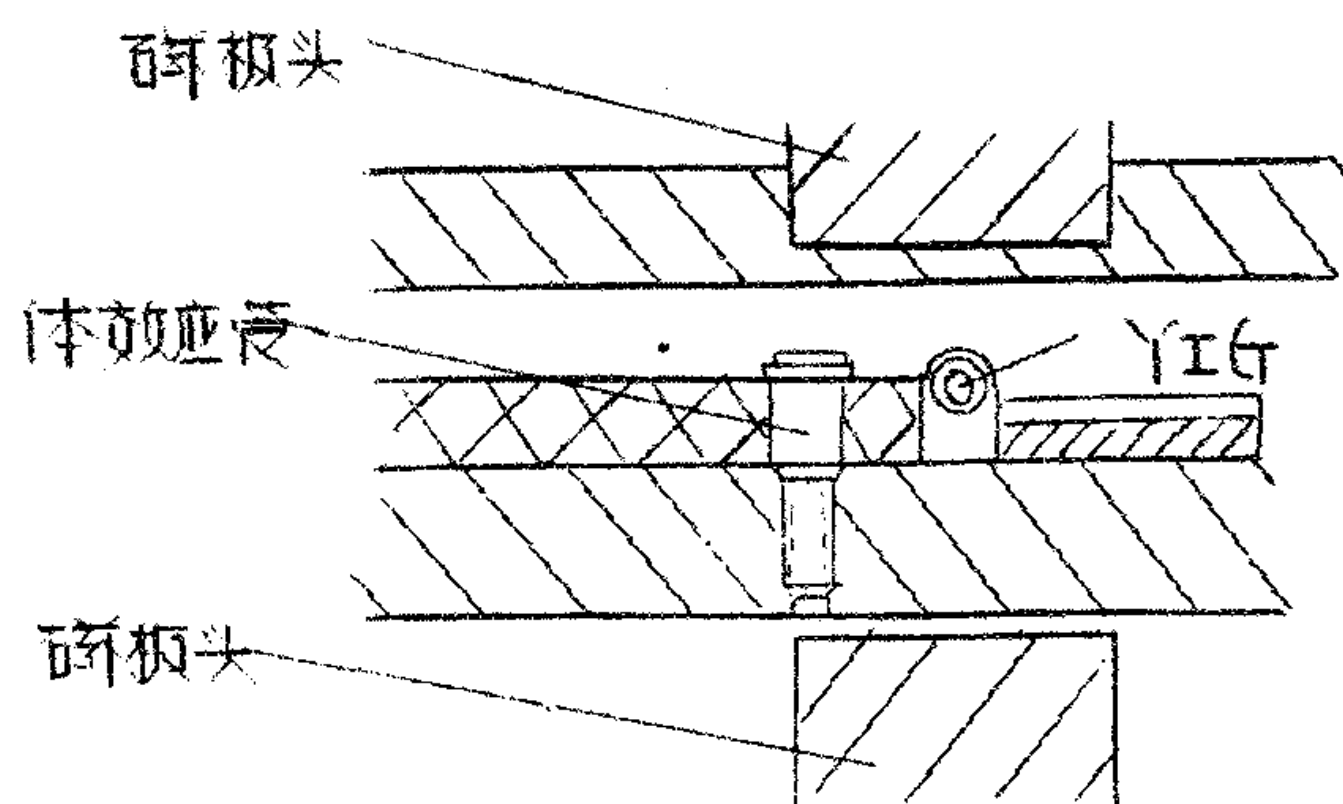
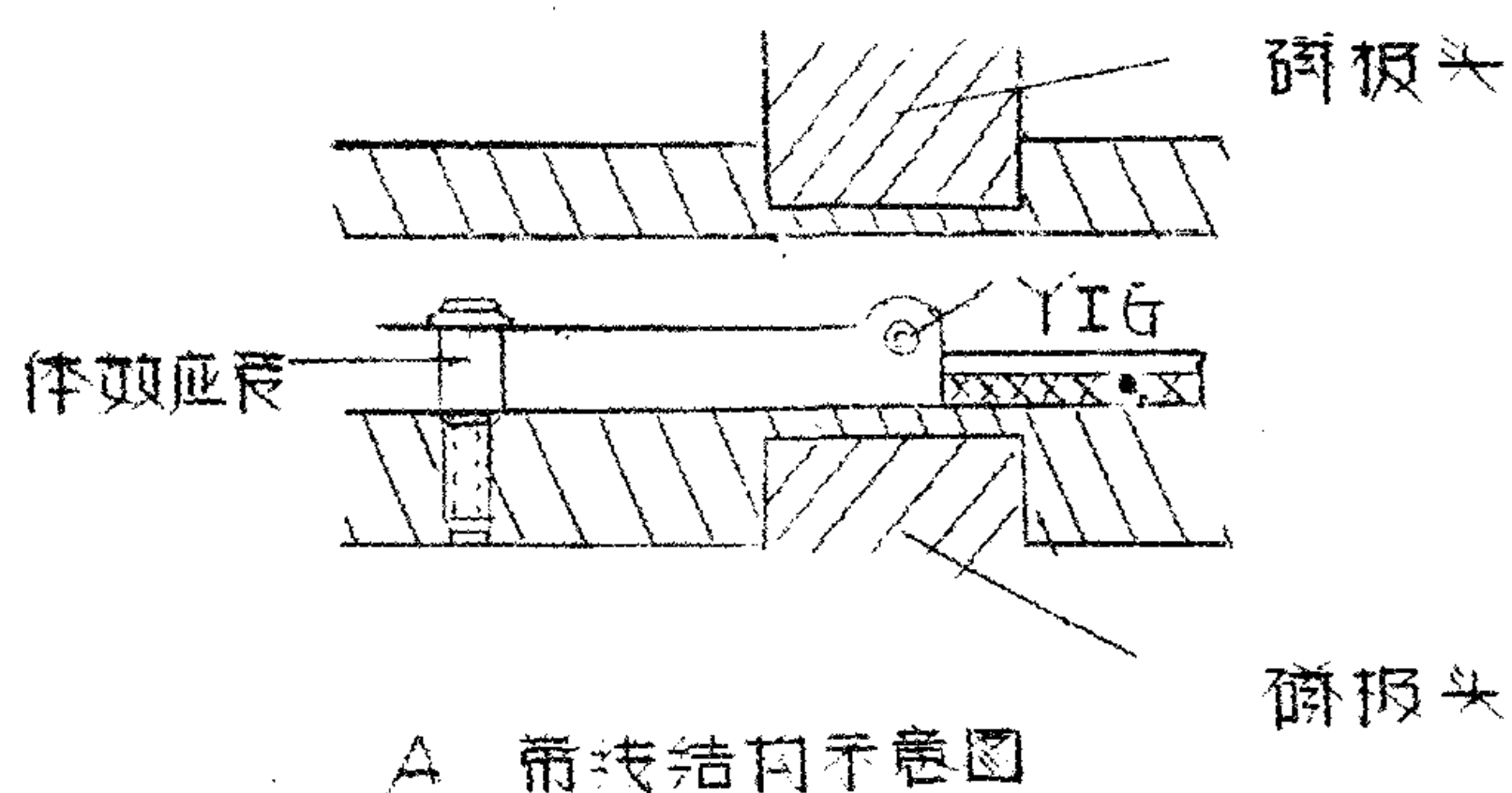
图四 微波电路结构图

主要由

- ① 盒子 ② 体效应管 ③ 帘线
- ④ 小珠和小珠座 ⑤ 短路板
- ⑥ 盖子等构成

结构上选用帘线装置的原因有二点：一是可设计高度较低的帘线盒（与同轴结构相比，同轴结构最小直径一般大于7mm，而帘线盒的高度可以小到3mm）这样可以缩小两板间的间距为短路设计创造了有利条件。二是与微带相比，由于同轴波长长，小可到管子的距离较长，避免

了加工精度与尺寸过大的影响。方便了简路极头的设计如下图。



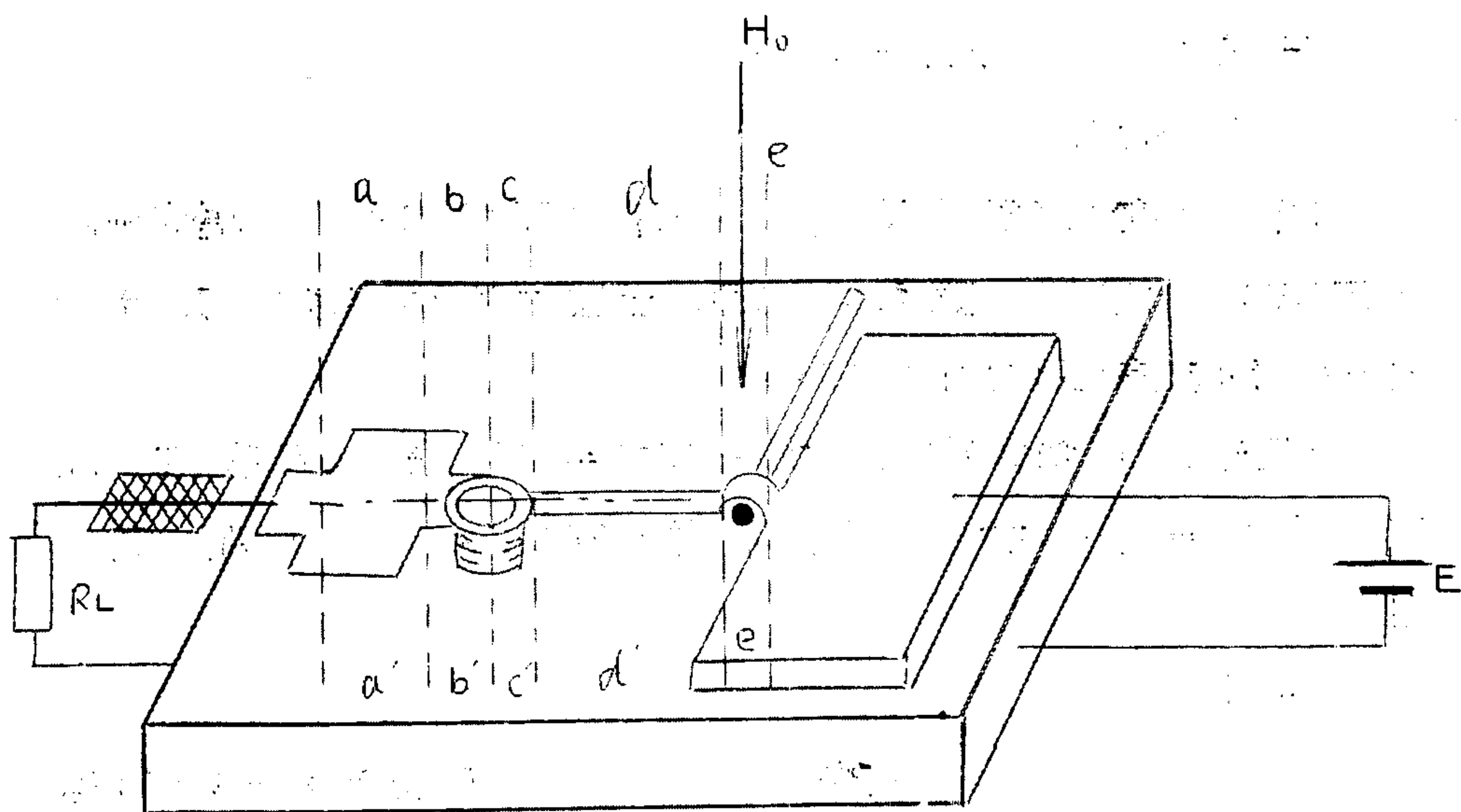
B 微带结构示意图

图 五

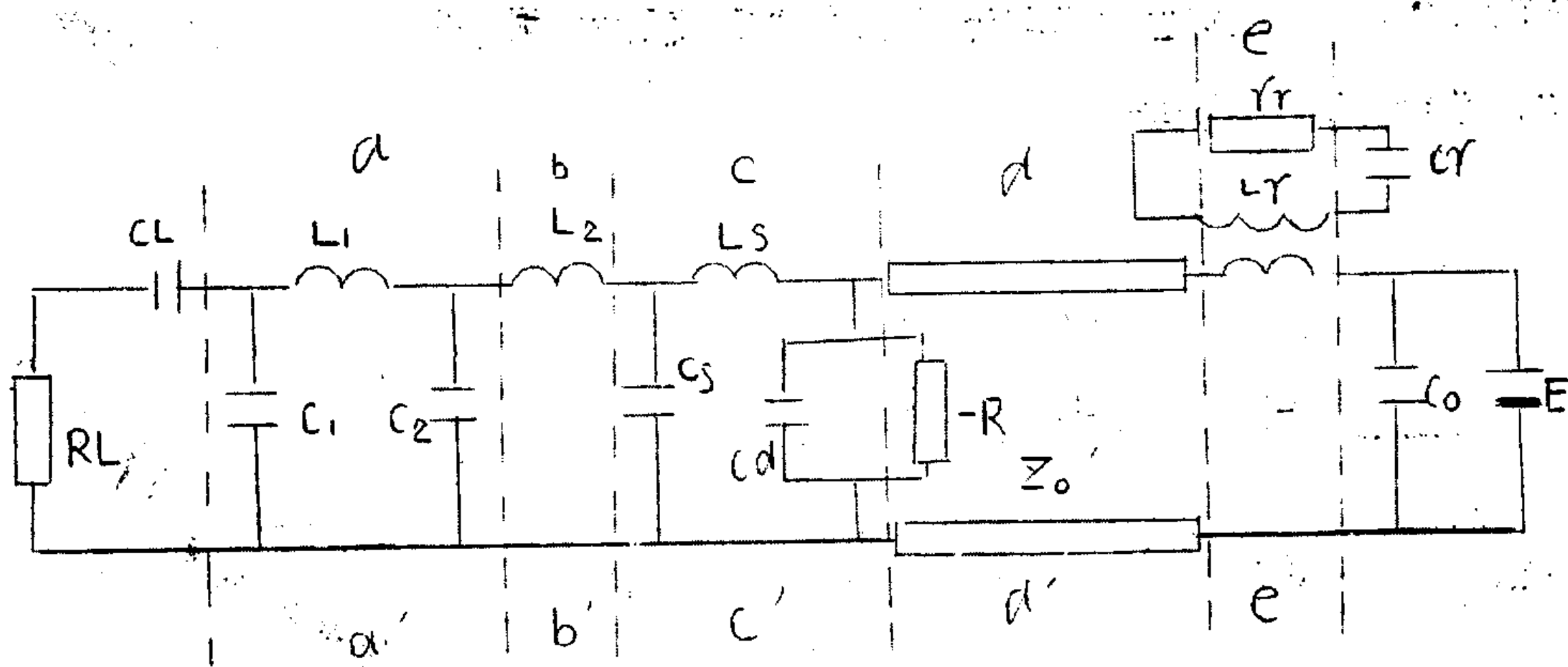
从图五看来，在目前尺寸条件下，微带结构的磁极头距离将显著增大。

2. 振荡器的等效电路和各部件的作用

振荡器正常工作的示意图和等效电路如下图：



A 振荡器微波电路的示意图



图六 B 振荡器的等效电路

图中 R_L 是负载

C_L 是隔直流电容

各部分等效电路是一一对应：

$L_S, C_S, -R, cd$ 是体效应管的等效电路

C_Y, L_Y, Y_Y 是 YIG 小球的等效电路

E 是体效应管的偏置电源

H_0 是偏置磁场

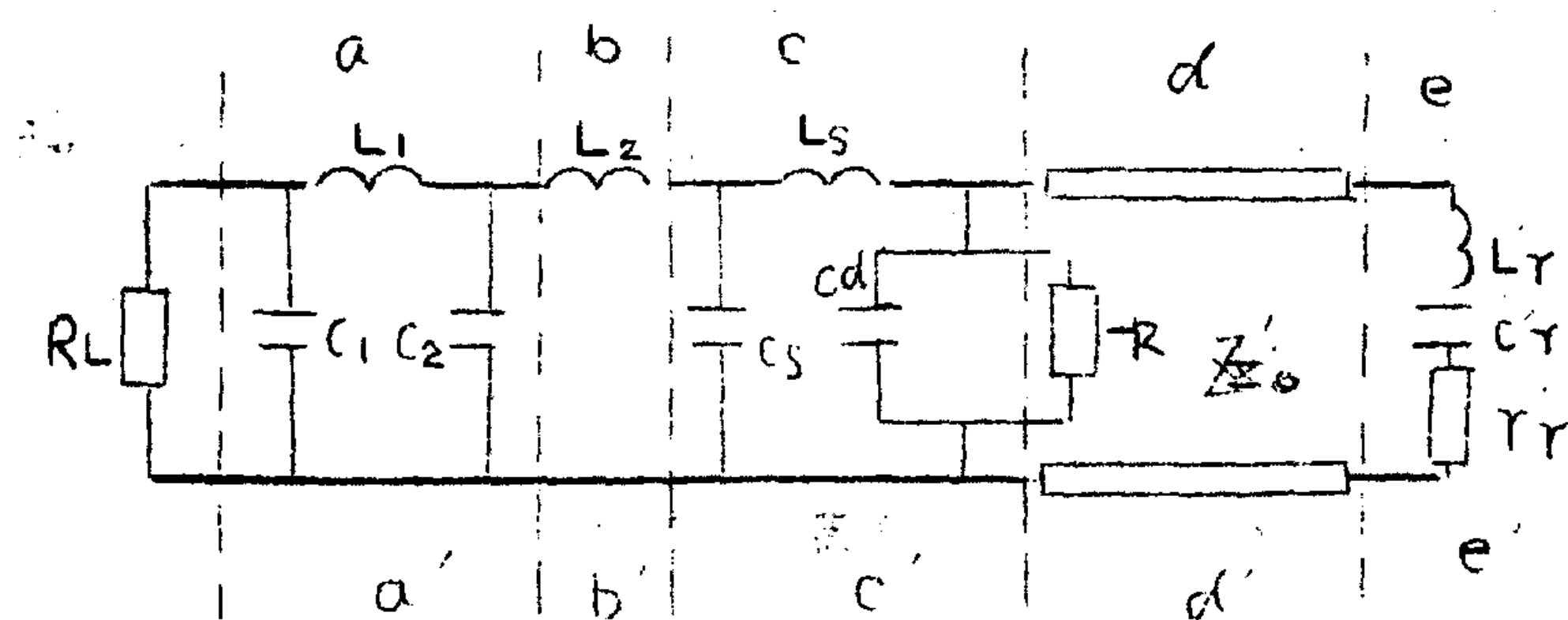
图中明显地表示了 π 型匹配网络位于短路端，即高频磁场较集中的地方，直流偏置磁场垂直于高频磁场，小环与带线的耦合是通过半环实现的。

在三分频段中 C_0 是一个大电容，使微波短路， LL 可以设计得近似短路，所以图示的等效电路可以简化为图 (七)。

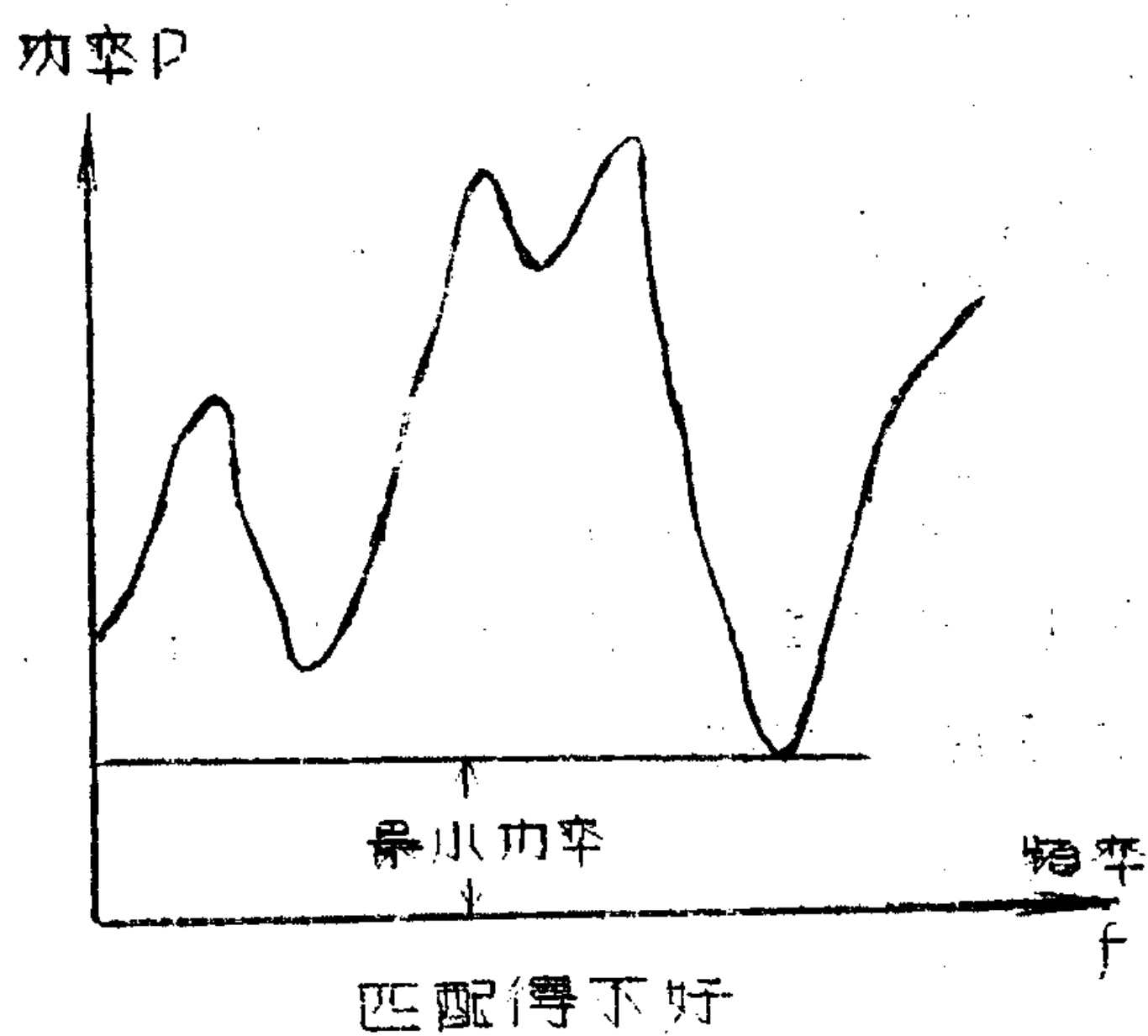
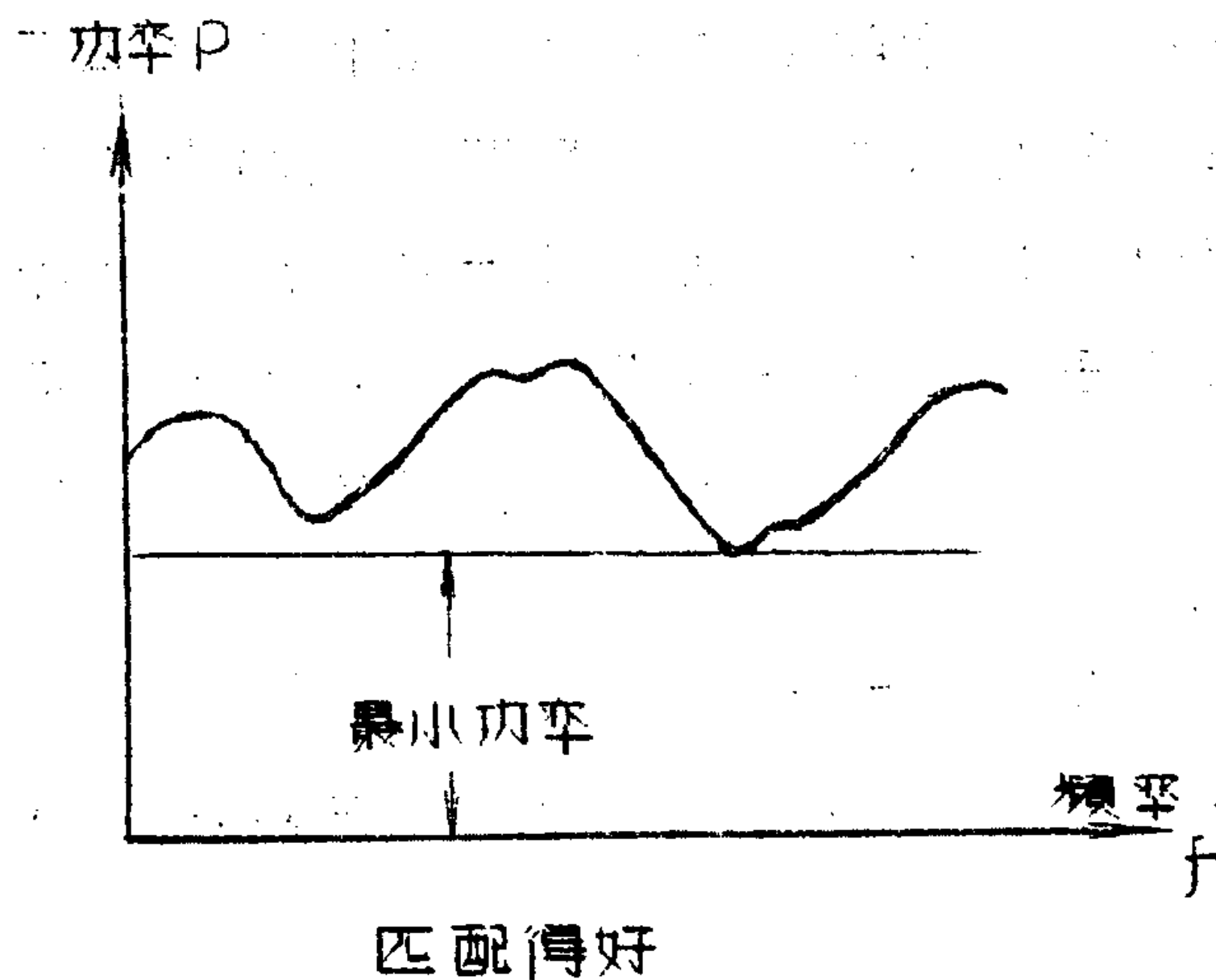
其中：

L_Y, C_Y, Y_Y 是 L_Y, C_Y, Y_Y 发射极主回路中等效电容、电容和电阻。

R_L 负载是属于时电路，它必须和器件很好匹配，如匹配得不好，输出功率在不同频率起伏会很大，降低了最小功率如图八那样。



图七 简化后的等效电路



图八 负载与输出功率的关系

C_{1L} 是隔直电容，这里从微波角度设计——利用 $\frac{\lambda}{4}$ 开路线的特性，设计成对微波来讲是短路的。

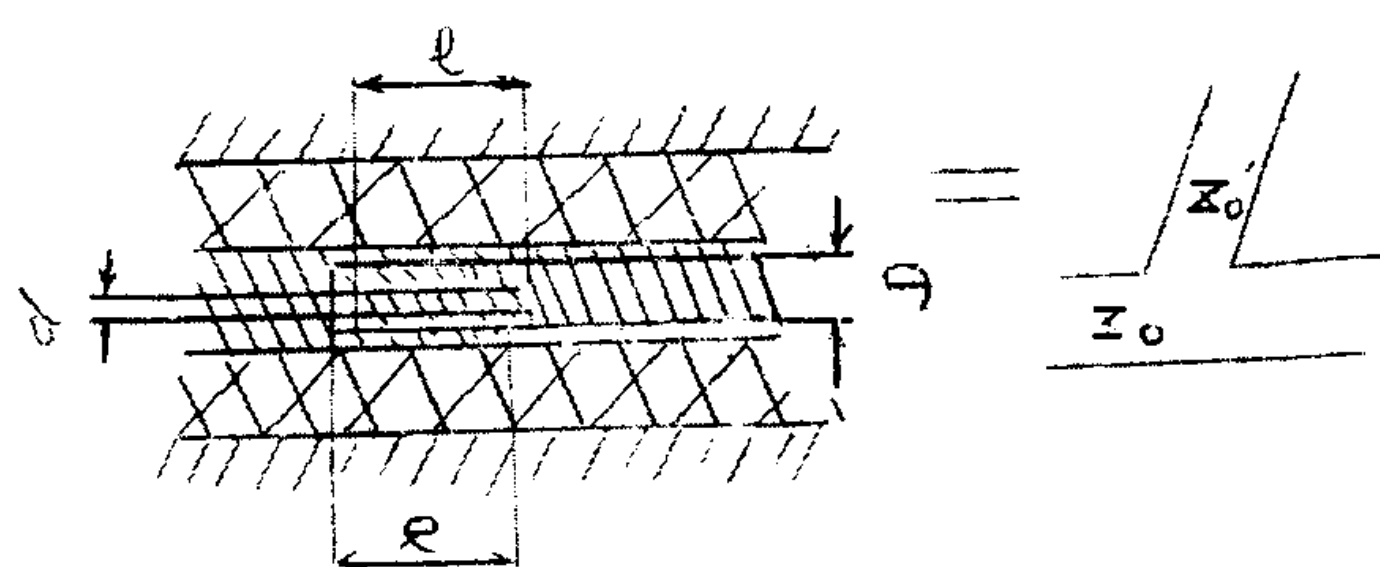
$a-a'$ 、 $b-b'$ 、 $c-c'$ 是构成一个固定谐振回路，其中， $a-a'$ 是一段低阻抗线，它将微波短路一部分，同时又适量的泄漏一点微波能量，亦即是使负载阻抗耦合适

当一点 下要本系以致影响振荡回路 θ 值太低而引起
 行振。b-b' 部分是起电容作用，它和电容应受的分到电
 容共同决定了回路的固有谐振频率。我们设计得使固有谐
 振频率高于调谐频段的高端。d-d' 部分是阻抗匹配段
 它使小球和管于达到良好的匹配，以获得高的有数 Q 。

$\gamma\gamma$ 还与小球与半环耦合强弱有关，改变耦合程度可
 以改变 $\gamma\gamma$ 的大小。

3. 主要部件设计与计算

A. 隔直流电容 C_L —— 即 $\frac{1}{4}\lambda$ 开路线的设计如下图
 所示。



图九 C_L 的示意图

要在宽频范围内获得小的驻波比特性阻抗 Z_0 愈小愈
 好，但受到加工限制，故选：

$$Z_0 = 11.4 \Omega$$

此时 $d = 0.9 \text{ mm}$

$$D = 1.5 \text{ mm}$$

介质是聚四氟乙烯

其长度

$$l = \frac{\lambda_{cp}}{4} \quad \lambda_{cp} \text{ 为频段中心频率的波长}$$

$$\lambda_{cp} = 30 \times 10^9 / \sqrt{2.5} \quad f_{cp} = 30 \times 10^9 / \sqrt{2.5} \times 9 \times 10^9 = 2.22 \text{ cm}$$

$$l = 5.55 \text{ mm}$$