

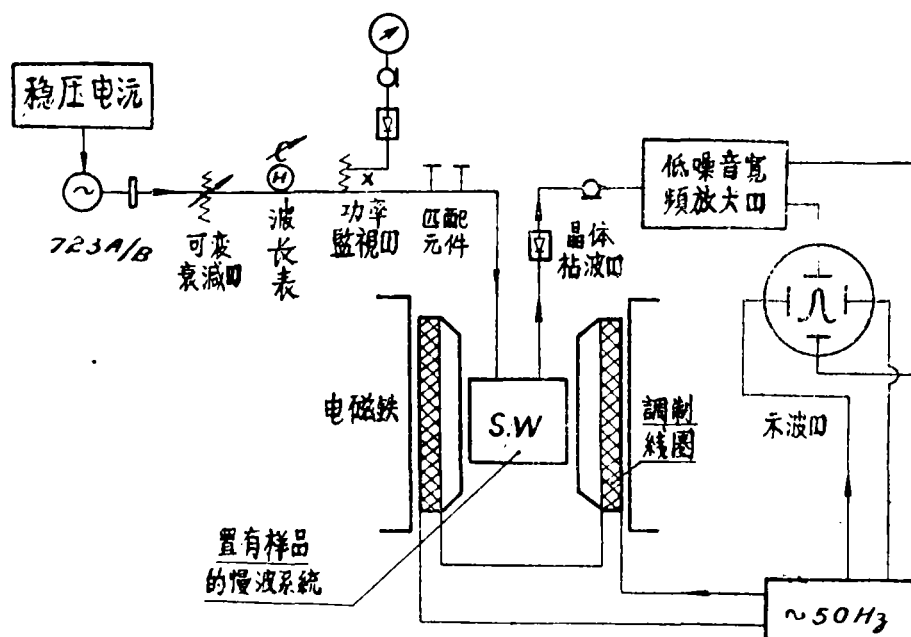
行波式波譜儀

林貽堃 丘秉生 張光昭

(物理系)

現在，几乎所有研究固体順磁共振的波譜儀都属于諧振腔式的。腔式波譜儀的最大优点是可达到很高的灵敏度。但是，由于它具有尖銳的頻率特性，因而具有一些缺点。例如，对稳压电源和避震裝置要求苛刻；調整步驟比較麻煩，尤其在改变工作頻率和更換样品时，操作更复杂；共振譜綫往往包含順磁色散 x' 的影响；要求所研究的样品耗損較小，綫度較小等。为了克服这些缺点，1959年 Siegman^[1]曾提出用行波技术来研究順磁共振。我們就是根据这个建議，研制成功三厘米波段的行波式波譜儀。

1958年 DeGrasse 等人^[1]利用波导式梳形慢波結構研制成功行波量子放大器。我們也已成功地将这种慢波結構应用于行波式波譜儀中。但是，波导式梳形慢波結構对于波譜的研究不很方便，它要求所研究的样品耗損小，能切成規則的形状，而且，更換样品时操作也較麻煩。因此，我們將这种慢波結構加以变形推广，提出并研制成功半开放式梳形慢波結構。它更适用于行波式波譜儀中。

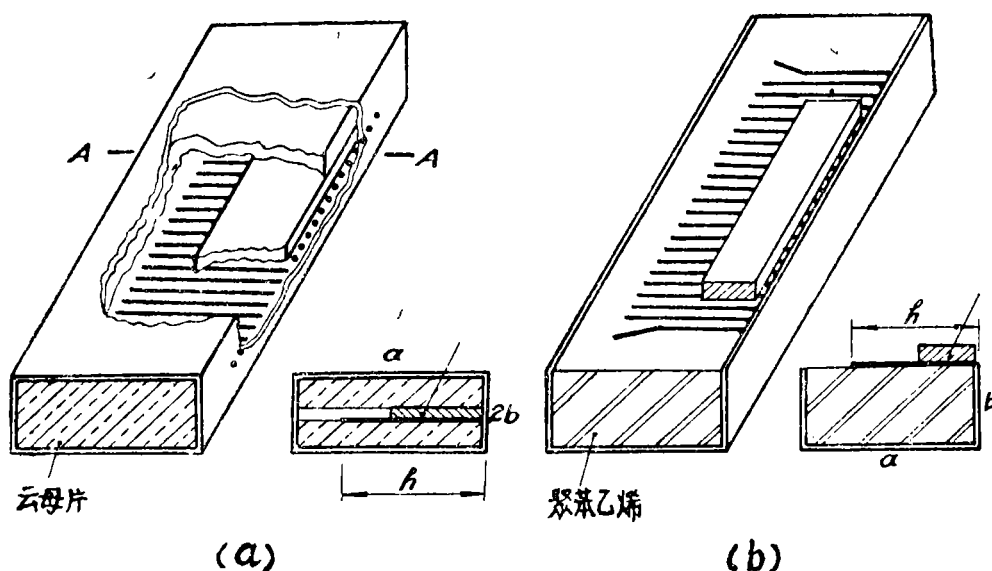


图一 工作在三厘米波段的行波式波譜儀示意图

工作在三厘米波段的行波式波譜儀的結構如图一所示。它主要由下列四个部件所組成：

1. 微波訊号源：包括調速管 723A/B及稳压电源；

2. 慢波系統：在我們的实验中采用了两种慢波結構，一种是波导式梳形結構，另一种是半开放式梳形結構，如图二所示。对于波导式梳形結構，整个波导都填充云母片。对于半开放式梳形結構，閉合的一边填充聚苯乙烯。两者同波导的耦合都是通过插銷的电耦合，插銷的形状和长短是可以調節的，使它同耦合波导匹配。慢波結構的尺寸列于表一中。关于波导式梳形結構的設計和特性可以参考文献(2.3)。



图二、慢波結構 (a)波导式梳形結構

(b)半开放式梳形結構

表一、慢波結構的尺寸

类 型	a	b	h	L	梳齿直径	結構周期	填充介质
波 导 式	11 mm	0.35mm	4 mm	50 mm	0.2 mm	0.5 mm	云 母 片
半 开 放 式	11 mm	2 mm	5.5mm	50 mm	0.3 mm	0.6 mm	聚苯乙烯

如果所研究的样品是单晶，可以直接放在半开放式梳形結構的梳齿上边的基部（如图二，b所示），或切成片状，夹在波导式梳形結構的云母片中間（如图二，a所示）。如果所研究的样品是多晶，那么，可以把它涂在云母片上，如同上述的方法一样，放置在慢波結構中。

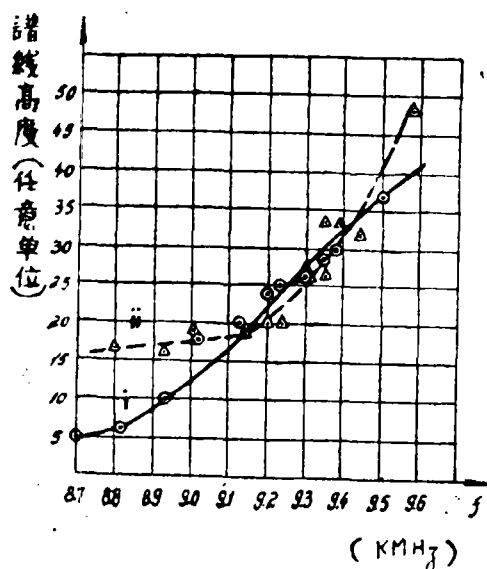
3. 低噪音宽頻放大器及显示設備；

4. 磁鉄：为了得到足够均匀的磁场，要求磁极的直径至少比慢波結構的綫度大一倍以上，且尽可能縮短极間の間隙。我們所用的磁极直径是10厘米，极間の間隙为3厘米。

恒定磁场 H_0 的方向是沿梳齿的方向。除了恒定磁场以外，还要加上50赫的调制磁场，它是由套在磁极上的调制线圈产生的。

我們曾分別以紅寶石单晶（含 Cr^{3+} 浓度約0.1%），硫酸銅单晶及二苯基苦味酸肼（简称DPPH）多晶为样品，观察了它們的共振吸收譜綫。并且以DPPH为标准样品，进行了一些測量。从实验結果可以得出下面几点結論：

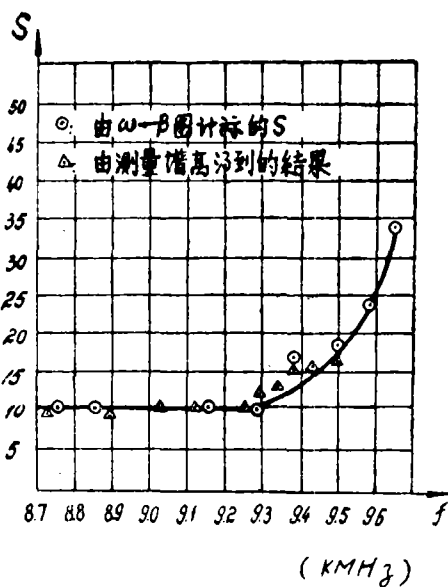
1. 用两种慢波結構所制成的行波式波譜仪都具有很宽的頻带，如图三，a所示，它几乎在三厘米波段的任一頻率下都能工作。这个特性是同慢波結構的頻率特性相联系的。对于半开放式梳形結構，由于它半边开放，因而可用簡便的測量駐波的方法測量 $\omega-\beta$ 色散曲綫，从而計算出慢波系数 S 与頻率的特性曲綫。測量結果如图三，b所示。另方面，經過簡單的計算可以証明，共振吸收的譜綫高度是比例如 $S\omega^2$ ，因此，从图三，a也可求出相对慢波系数 S' ，所得的結果用“ Δ ”符号示于图三，b中。从图中可以看出，两种方法測量的結果很好地一致。



图三 a、波譜仪的頻率特性曲綫

(i) 波导式梳形結構的

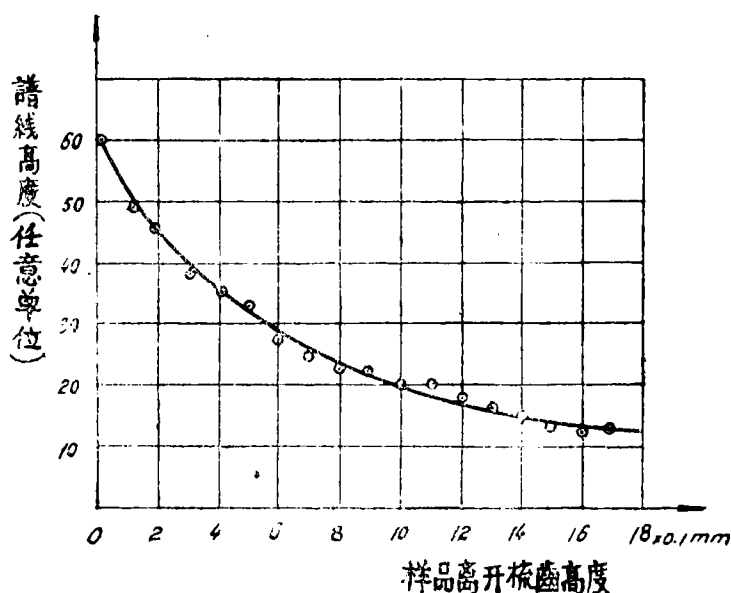
(ii) 半开放式梳形結構的



图三 b、半开放式梳形結構的慢

波系数 S 与頻率的特性曲綫

2、电磁波沿半开放式梳形結構传播时，电磁场在半开放部分是按指数律衰减的，而且，电磁场的能量大部分集中在梳齿的表面。当工作頻率和传输功率为一定的条件下，改变样品离梳齿表面的高度，測量共振吸收譜綫高度的变化，所得的結果如图四所示。从图中可以看出，如果我們定义电磁场的能量密度下降到最大值的 $1/e$ 时的距离为电磁场的“表面深度” d ，那么，在我們的情况下， $d \sim 0.8mm$ 。



图四 电磁波沿半开放式梳形结构传播时的表面特性。

3. 改变恒定磁场的取向, 可得到共振吸收的正反比为10分贝。这说明电磁波沿梳形慢波结构传播时, 它的磁场分量在梳齿两边是沿相反方向旋转的圆偏振场。因此, 在慢波结构中传输的基波是沿梳齿方向的TEM波。

4. 从波谱仪操作的难易, 结构对样品形状的要求, 慢波结构的频率特性, 及测量的传输特性等方面来考虑, 都表明半开放式梳形结构比波导式梳形结构更适用于行波式波谱仪中。

基于上述的结论, 我们可以指出行波式波谱仪的几个特点: (1) 操作简单, 尤其在改变工作频率和更换样品时, 操作很方便; (2) 工作稳定, 它对电源的稳定性和避震装置的要求都不象腔式波谱仪那么苛刻; (3) 可以避免顺磁色散 χ' 对谱线形状的影响; (4) 可以设法提高慢波结构的慢波系数和适当增大样品的线度来提高波谱仪的灵敏度。但是, 由于所用的样品较大, 要保持磁场的均匀, 就要求磁极的直径也较大。

行波式波谱仪的最大优点在于给顺磁共振的研究工作带来许多方便。除此之外, 在某些方面的应用上, 它具有很大的优越性。例如, (1) 可以研究耗损系数较大的样品。将耗损较大的样品逐渐靠近半开放式梳形结构的梳齿, 这时, 由于样品的耗损, 将使慢波结构的传输系数下降, 直到离梳齿的某一位置, 使得仍有一定的传输功率, 当外加磁场时, 就可以观察到其共振吸收谱线。我们曾将铁氧体粉末涂在云母片上作为样品, 观察到很宽的共振吸收谱线。(2) 可以研究用光激励的双共振。由于半开放式梳形结构有半边开放, 因此, 用光或其他射线来辐照样品是十分方便的。(3) 对于化学样品, 或在化学反应过程中所产生的中间产物的研究, 用半开放式梳形结构波谱仪特别方便。这时, 反应器可以用很薄的石英管做成, 然后放置在半开放式梳形结构的梳齿上边, 在观察顺磁共振的同时, 还可以看到化学反应的情况。这种结构比较简单, 且有效

的作用体积大。如果用腔式波谱仪，则谐振腔的结构将是十分复杂的。

如上所述可以看到，对于行波式波谱仪的研究具有很大的前途，虽然我们得到了一些结果，然而，我们的工作还是很初步的。对于半开放式梳形慢波结构特性的较全面系统的研究，以及提高行波式波谱仪灵敏度方面的研究，都正在进行之中。

参 考 文 献

- (1) A.E. Siegman, 1960. Quantum Electronics, edited by Townes, p. 597. New York.
- (2) R.W. DeGrasse, E.O. Schulz-DuBois, H.E.D. Scovil, 1959. BSTJ, 38, 305.
- (3) Г. С. Мисежников, В. Б. Штейншлейгер, 1961. РИЭ, 9, 1545.