

行波式波譜儀

林貽坤 丘秉生 張光昭

(物理系)

摘要

本文描述了工作在三厘米波段的，利用半開放式梳形慢波結構作為吸收室的行波式波譜儀，同時還描述了高頻調場、高頻調頻和高頻調幅行波式波譜儀的工作原理，綫路結構，以及它們的某些性能的比較。最後還從理論上考慮了行波式波譜儀的靈敏度。

實驗結果表明，行波式波譜儀具有結構簡單，操作容易，工作穩定等優點。提高慢波結構的慢波系數和利用高頻調制，可以提高波譜儀的靈敏度。計算結果表明，行波式波譜儀的靈敏度是可以同腔式波譜儀的靈敏度相比較的。

一 引言

現在，幾乎所有研究固體順磁共振的波譜儀都屬於諧振腔式的。由於諧振腔中的電磁場非常集中，因此，腔式波譜儀的最大優點是能達到很高的靈敏度。但是，在實際應用中，它有下列的缺點：1. 由於腔式波譜儀的結構中含有高Q諧振腔，因而具有非常尖銳的頻率特性。當穩壓電源的電壓有些微的變動，或者微波系統有微弱的機械振動時，都會嚴重影響波譜儀的工作。因此它對電源的穩定性和避震裝置要求比較苛刻。2. 在每次測試過程中都要求諧振腔同微波頻率嚴格調諧。當有些微失調時，都會引起譜綫形狀的嚴重畸變。因此，操作比較麻煩。3. 所研究的樣品是放置在諧振腔內，由於樣品的引入將使諧振腔內的電磁場結構受到擾亂，且使它的Q值下降。因此，要求所研究的樣品的耗損比較小，而且對它的綫度也有一定的限制。當改換樣品時，還要重新調諧，因此，操作也是很麻煩的。4. 在共振點附近，由於樣品的順磁色散 χ' 的影響，將使諧振腔的諧振頻率產生偏移，因而使譜綫形狀往往包含 χ' 的影響。

為了克服這些缺點，Siegman^[1]曾提出用行波技術來研究順磁共振。近年來，

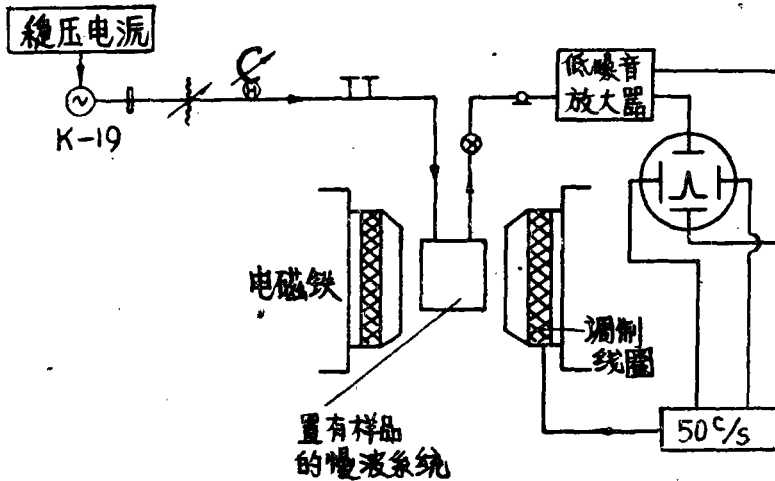
1964年12月5日收到。

由于行波式量子放大器的发展,促使对于慢波结构的研究有了进一步的深入。但是,对于行波式波谱仪的研究却还很少。

本文描述了工作在三厘米波段的,利用半开放式梳形慢波结构作为吸收室的行波式波谱仪,同时还描述了高频调场,高频调频和调幅行波波谱仪的工作原理,线路结构,以及它们的某些性能的比较。最后还从理论上考虑了行波式波谱仪的灵敏度。

二 简单式行波波谱仪

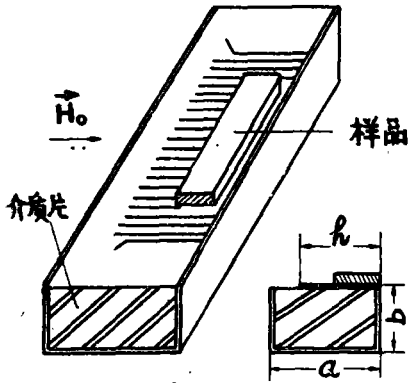
简单式行波波谱仪的结构如图一所示,它同腔式波谱仪的差别仅仅在于用慢波结构代替了谐振腔。



图一 工作在三厘米波段的简单式行波波谱仪

DeGrasse等人^[2]曾利用封闭式梳形慢波结构研制成功行波量子放大器。我们也曾将这种结构应用于行波式波谱仪中。但是,封闭式梳形慢波结构对于波谱的研究不很方便,它要求所研究的样品耗损小,能切成规则的形状,而且,更换样品时操作也较麻烦。因此,我们将这种慢波结构加以变形推广,研制成功半开放式梳形慢波结构。

半开放式梳形慢波结构如图二所示。将铜片折成“Π”字形,里面填充聚苯乙烯或石英片,在介质片上面安放一排很密的金属细导杆(梳齿),结构参数列于表一中。慢波结构同波导的耦合是通过插销的电耦合,插销的形状和长短是可以调节



圖二 半開波式梳形慢波結構

的，使它同耦合波導匹配。關於這種慢波結構的特性另有專文討論⁽³⁾。

如果所研究的樣品是單晶，可以直接放在梳齒上邊的基部（如圖二所示）。如果所研究的樣品是多晶，那麼，可以把它塗在雲母片上，如同上述的方法一樣放置在慢波結構中。

慢波結構放置在電磁鐵的磁極之間，恒定磁場 \vec{H}_0 的方向是沿梳齒的方向（如圖二中的箭頭所示）。

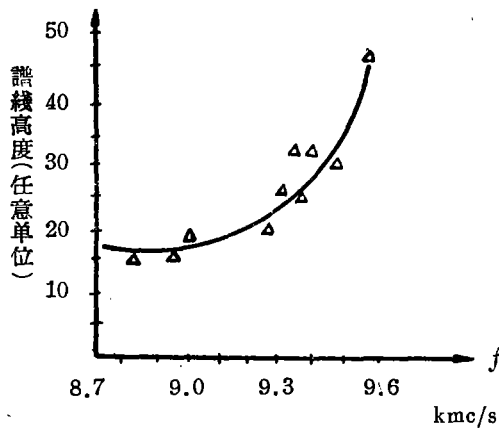
表1. 慢波結構的尺寸

填充介質	a	b	h	梳齒直徑	結構周期	結構長度
聚苯乙烯	11mm	2mm	5.5mm	0.3 mm	0.6 mm	50mm
石英片	11mm	1.5mm	5 mm	0.3 mm	0.6 mm	50mm

我們曾以二苯基苦味酸肼（簡稱 DPPH）為標準樣品，對波譜儀的特性進行了一些測量。對於慢波結構填充聚苯乙烯介質的波譜儀，測量的結果綜述如下：

1. 波譜儀的頻率特性：在檢波電流為恒定的條件下，改變速調管的頻率，測量譜綫高度隨頻率的變化，所得的結果如圖三所示。從圖中可以看出，行波式波譜儀具有很寬的頻帶，它幾乎在三厘米波段的任一頻率下都能工作。這個特性是同慢波結構的頻率特性相聯系的。

2. 電磁波沿慢波結構傳播時的表面特性：電磁波沿慢波結構傳播時是屬於表面波，即是說，只在梳齒表面附近具有較強的電磁場，當離開梳齒時，電磁場的強度指數律地迅速下降。電磁波傳播的這個特性我們已從波譜儀的測量中得到驗證。當電磁波的頻率和檢波電流固定的條件下，改變樣品離梳齒的高度，測量譜綫高度的

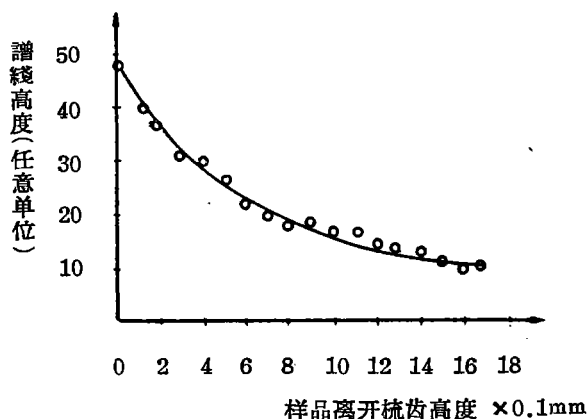


圖三 波譜儀的頻率特性曲綫

变化, 所得的结果如图四所示。从图中可以看出, 如果我们定义电磁场的能量密度下降到最大值的 $\frac{1}{e}$ 时的距离为电磁场的“表面深度 d ”, 那么在我們的情况下, $d \sim 0.8 \text{ mm}$

3. 正反向特性: 我們知道, 电磁波沿梳形慢波结构传播时, 对于主波(沿梳齿的 TEM 波)的磁场分量, 在梳齿两边是沿相反方向旋轉的圓偏轉场。因此, 对于某一恒定磁场取向时, 只有其中一个圓偏轉场能够引起共振吸收现象。如果将品样放置在梳齿的一边, 它只对某一恒定磁场取向才能产生共振吸收现象, 当恒定磁场反向时, 就不能产生共振吸收。我們在实验中已观察到这种现象, 测量结果正反向比约为 10 分貝。

简单式行波谱仪的最大优点是结构简单, 操作容易, 工作稳定等, 但它的灵敏度不够高。



图四 电磁波沿半开放式梳形结构传播时的表面特性

三 高频调制行波波谱仪

提高行波波谱仪的灵敏度有二个途径, 一方面是尽可能提高慢波结构的慢波系数, 另一方面是降低系统的噪音。系统的噪音主要有三方面的来源^[4]: 第一, 速调管和波导系统的噪音, 第二, 放大器的噪音, 第三, 检波晶体的噪音, 检波晶体的噪音是反比于检波频率的^[5], 在低频时, 它的噪音特别大。对于简单式波谱仪, 调制磁场的频率一般用 50 c/s , 因此检波晶体的低频噪音很大, 再者, 它采用了宽频放大器, 因而也增加了放大器的噪音, 因为放大器的噪音是比例于带宽的。

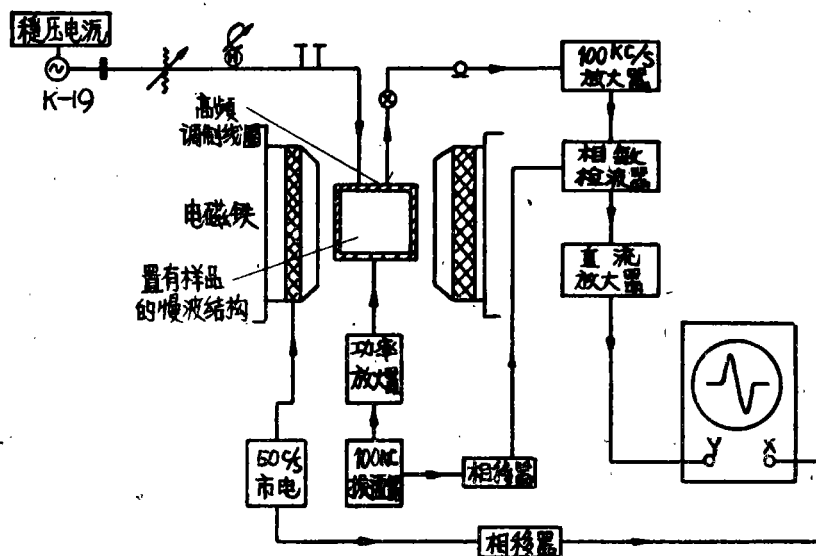
为了提高波谱仪的灵敏度, 必须提高检波晶体的检波频率。例如, 当检波频率大于 10 mc/s 时(超外差接收情况), 检波晶体的噪音同前二者相比较是可以忽略的, 当检波频率等于 100 kc/s 时(高频调制情况), 三者是可以比较的, 这时波谱仪的灵敏度约比理想灵敏度差一个数量级。由于超外差波谱仪的结构比较复杂, 因此实用上常采用高频调制波谱仪。

实用的高频调制波谱仪多属高频调场腔式波谱仪^[6], 最近也有一些高频调频

調幅腔式波譜儀的報導^[7,8]。而我們研制的是高頻調制行波波譜儀，調制的方法分別採用高頻調場，高頻調頻和高頻調幅。

1. 高頻調場行波波譜儀。

高頻調場行波波譜儀的綫路結構如圖五所示。它的工作原理同高頻調場腔式波譜儀的完全一樣，只不過用慢波結構代替諧振腔。由於半開放式梳形慢波結構有半邊開放，因此高頻調制磁場十分容易獲得，它只需將高頻調場綫圈直接套在慢波結構上。調制的效率很高，當調制頻率為 100kc/s 時，只需用單管(807)功率放大器就很容易在樣品處獲得強度為3高斯的高頻調制磁場。

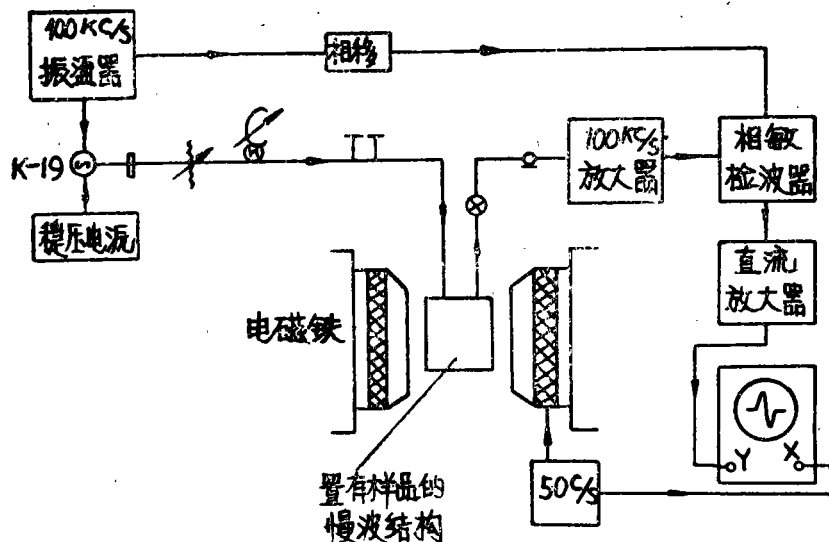


圖五 工作在三厘米波段的高頻調場行波波譜儀器

2. 高頻調頻行波波譜儀。

由於高頻調場綫圈的存在，對於低溫波譜的研究往往是不方便的，因此我們試用了高頻調頻的辦法。高頻調頻行波波譜儀的綫路結構如圖六所示。它的工作原理同高頻調場的相似，所不同的在於不是調制磁場，而是調制微波頻率。微波頻率的調制是借助於加在速調管反射極上的 100kc/s 正弦信號來達到，調制幅度可以按需要選擇。在微波頻率受到調制的同時，微波功率也受到調制。為了減小後者對於 100kc/s 放大器的干擾，必須嚴格選擇速調管的工作點。當速調管的工作點選擇在輸出功率的極大點時，功率調制訊號將是 $2 \times 100\text{kc/s}$ ，它不能通過 100kc/s 放大器。只有當順磁共振時，功率調制訊號中才含有 100kc/s 分量，它通過 100kc/s 放大器放大後，輸至相敏檢波器，即可檢出順磁共振訊號。

由於頻率調制的同時，伴隨著功率調制，因而使譜綫產生一些畸變。但是，實

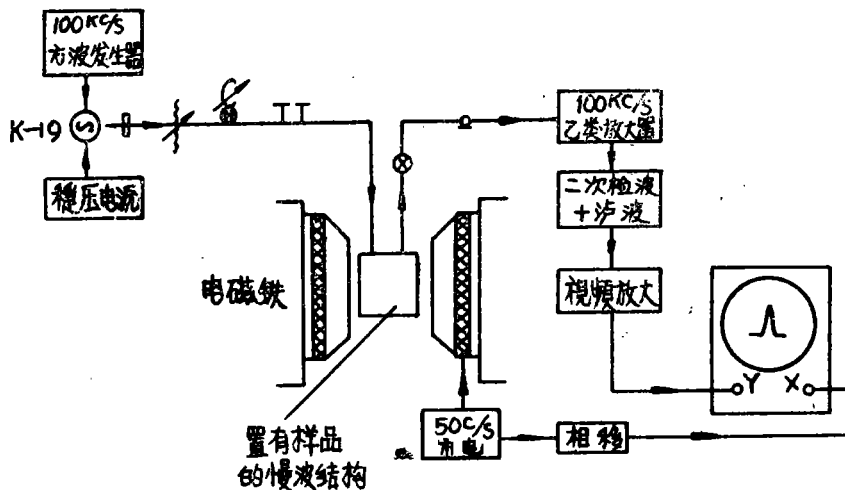


图六 工作在三厘米波段的高频调频行波波谱仪

驗和简单的分析表明，这种畸变并不是十分严重的。

3. 高频调幅行波波谱仪。

高频调幅行波波谱仪的线路结构如图七所示。它的工作原理同简单式波谱仪的一样，只不过将微波功率的幅度加以高频调制，这样可以达到提高晶体检波器的检波频率的目的。微波功率的调幅是借助于加在速调管反射极上的100kc/s方波讯号



图七 工作在三厘米波段的高频调幅行波波谱仪

来达到，調制系数等于1。这样，晶体檢波器檢波出来的順磁共振吸收訊号变为100kc/s載波調制訊号。一般100kc/s載波的幅度很大，兩順磁共振吸收調制訊号很小，如果采用甲类放大器的話，就会出现饱和現象，不可能显示出順磁共振吸收訊号。因此，我們采用了工作在乙类的100kc/s放大器，这样就可以抑制載波訊号，而尽可能放大作为調制的順磁共振吸收訊号。經放大后，再通过二次檢波和滤波就可以得出順磁共振吸收訊号，它的波形同簡單波譜儀的波形一样。

由于100kc/s方波訊号有一定的前沿和后沿，因此，不可避免地会引起速調管工作頻率的調制，因而会使譜綫产生畸变，但是，实验証明，如果用比較好的方波发生器，这种畸变并不严重。再者，由于方波发生器的电源有一定的紋波，它影响譜綫基綫不够平坦。

四 各式行波波譜儀的比較及其应用

波譜儀的質量一般可以从灵敏度、工作稳定性、結構的复杂程度、操作的难易以及譜綫畸变等几方面来考虑。在我們实验室里已經研制成功的各式行波波譜儀性能的比較列于表二。从表二可以看出，高频調制波譜儀的灵敏度較高。而且，由于我們所用的100kc/s放大器的增益不够大(5×10^3)和調制訊号源的50c/s感应較大，所以它們的潛力还没有完全发挥，还没有显出晶体和波导系統的噪音，因此，如果繼續提高100kc/s放大器的增益，灵敏度还有希望再提高一个数量級。

表二 各式行波波譜儀性能的比較

型 式 性 能	簡 单 式	高 頻 調 場 式	高 頻 調 頻 式	高 頻 調 幅 式
相对灵敏度		約比簡單式高一个数量級	約比簡單式高一个数量級	約比簡單式高一个数量級
稳 定 性	稳定,但50c/s影响較大	稳 定	稳 定	譜 綫 基 綫 不够平坦
結構复杂程度	最 簡 单	需要在慢波結構上多套一个高频調場綫圈,还需要100kc/s功率放大器等	簡 单	簡 单
操作难易	最 容 易	容 易	容 易	容 易
譜綫畸变	畸 变 小	畸 变 小	畸 变 不 大	畸 变 較 大

行波波譜儀的最大优点在于給順磁共振的研究工作带来許多方便。除此以外，在某些方面的应用上，它具有很大的优越性。例如，(1)可以研究耗損系数較大的

样品。将耗損較大的样品逐漸靠近半开放式梳形结构的梳齿,这时,由于样品的耗損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。(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。

五 行波波谱仪灵敏度的考虑

设慢波结构的长度等于 l , 所研究的样品是放置在慢波结构中。当慢波结构没有耗損时,在理想匹配情况下,输出功率可表示为^[9]:

$$P_2 = P_1 \exp(-2\pi s N / Q_m) \quad (1)$$

式中 P_1 和 P_2 相应地为输入和输出功率, s 为慢波系数 N 为以自由空间波长 λ 为单位慢波结构长度(即 $N = l/\lambda$), Q_m 为样品的磁性 Q 值,它等于

$$Q_m^{-1} = 4\pi\eta_T\chi'', \quad (2)$$

这里 η_T 是样品的填充系数, χ'' 是样品的磁化率的虚部。将(2)代入(1)可得,

$$p_2 = p_1 \exp(-8\pi^2 SN\eta_T\chi'') \quad (3)$$

如果計及慢波结构的耗損,設其衰减系数为 α , 那么,必須将(3)式加以修正,得,

$$p_2 = p_1 e^{-2\alpha l} \exp(-8\pi^2 SN\eta_T\chi''). \quad (4)$$

设波导的特性阻抗为 R_0 , 那么,根据等效电路的分析,在理想匹配情况下,加在晶体检波器上的讯号电压为:

$$V_{\text{訊}} = \sqrt{2R_0} \left(\sqrt{p_1 e^{-2\alpha l}} - \sqrt{p_2} \right). \quad (5)$$

将(4)代入(5),并設 $8\pi^2 SN\eta_T\chi'' \ll 1$, 則(5)可化为:

$$V_{\text{訊}} \approx \sqrt{2R_0 p_1} (4\pi^2 SN\eta_T\chi'') e^{-\alpha l}. \quad (6)$$

在匹配情况下,速調管振荡功率 P_0 等于 $2P_1$, 因此(6)式可化为

$$V_{\text{訊}} \approx \sqrt{R_0 P_0} (4\pi^2 SN\eta_T\chi'') e^{-\alpha l}. \quad (7)$$

在檢波器同波導理想匹配情況下，且僅考慮熱噪音，那么在晶体检波器上的方均根噪音電壓為：

$$V_N = \sqrt{2} \sqrt{RkTB}, \quad (8)$$

式中 k 為玻爾茲曼常數， T 為絕對溫度， B 為放大器的帶寬，當 $V_{訊} = V_N$ 時，这时的 χ'' 就是能觀察到的最小磁化率 χ''_{min} ，即

$$\begin{aligned} \sqrt{R_0 P_0 (4\pi^2 S N \eta_T \chi''_{min})} e^{-\alpha l} &= \sqrt{2} \sqrt{R_0 k T B}, \\ \therefore \chi''_{min} &= \frac{e^{\alpha l}}{4\pi^2 S N \eta_T} \left(\frac{2kTB}{P_0} \right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (9)$$

對於腔式波譜儀，相應的值为^[10]：

$$\chi''_{min} = \frac{1}{Q_0 \eta_c \pi} \left(\frac{2kTB}{P_0} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

式中 Q_0 為諧振腔的無載 Q 值， η_c 為填充系數（它不一定等於 η_T ），比較（9）和（10）二式，可以看出，行波波譜儀的靈敏度同具有 $Q_0 = 4\pi S N e^{-\alpha l} \eta_T / \eta_c$ 的腔式波譜儀的靈敏度一樣。在我們實驗的情況下， $\lambda = 3.2 \text{ cm}$ ， $S = 100$ ， $l = 5 \text{ cm}$ ， $\alpha \approx 0.022 \text{ cm}^{-1}$ （相應於通過慢波結構以後，微波功率衰減了20%），若取 $\eta_T / \eta_c = 10$ （這是可能的，因為行波波譜儀允許研究比較大的樣品，而腔式波譜儀只能研究小樣品），則可以算出這種行波波譜儀的靈敏度同具有 $Q_0 = 18,000$ 的腔式波譜儀的靈敏度相當。由於時間關係，靈敏度的定量測量尚未進行，只是作一些定性的比較。

感謝：在高頻調頻行波波譜儀的研製過程中，近兩屆畢業生張尤亮、駱植炯、黃來楚和梁志圖在做畢業論文時盡了很大的努力。另外，在低頻電路和微波元件的製造過程中，梁恩永、張紅富和林賢端等同志給我們很多幫助，在此一併表示感謝。

參 考 文 獻

- [1] A.E.Siegman; Quantum Electronics, edited by Townes, p.397. (1960) New York.
- [2] R.W.De Grasse; E.O.Schulz-Du Bois, H.E.D.Scovil BSTJ. 38 305, (1959).
- [3] 林貽坤、丘秉生、張光昭：半開放式梳形慢波結構，中山大學1962年校慶報告會報告。

- [4] G.Feheri, BSTJ, 36, 449. (1957).
- [5] D.J.E. Ingram, Free Radicals as Studied by Electron Spin Resonance. (1958), London.
- [6] H.A.Buckmaster, H.E.D. Scovil, Canad J.Phys. 34, 711(1956).
- [7] A.C. Rose—Innes, J.Sci. Instr. 34, 276(1957).
- [8] 董太乾, 物理学报, 1963年, 19期, 407页.
- [9] J.R. Singer: Masers, (1959). New York.
- [10] Д.Инграм: Электронный Парамагнитный Резонанс в Свободных Радикалах. Москва. (1961) 97页 譯者注

Traveling — wave EPR Spectrometer

Lin I—kuan, Chiu Bin—sen, Chang Guang—jou

Abstract

The Comb type slow wave structure of open boundary has been used instead of the ordinary absorption cell in this X band traveling—wave EPR spectrometer. The principles and block diagrams of the traveling—wave EPR spectrometer with high frequency field modulation, high frequency FM and high frequency AM have been described, and the characteristics of spectrometer with different schemes of modulation have been compared. The sensitivity of the traveling—wave EPR spectrometer has been determined theoretically at the end of this paper.

It has been shown experimentally that, the traveling—wave EPR spectrometer had its own advantage of simple construction, easy operation and higher working stability. The sensitivity of spectrometer could be still much increased by means of the raising of frequency of modulation and the value of slow wave coefficient of the structure, It was shown theoretically that the sensitivity of traveling—wave EPR spectrometer could be compared with the spectrometer of cavity type with the same scheme of modulation.