

材料與微波之頻率響應與反應特性

◎作者：張存續

現職：國立清華大學物理系助理教授

材料與電磁波的作用，以功率來分可以大約分成兩類，第一類是小功率，也就是材料特性隨頻率改變的現象；另一類是大功率，也就是電磁波功率足以改變材料結構與性質。對於材料特性的頻率響應，是材料研究很重要的一環，這些特性可以告訴我們最好的微波吸收窗口，更進一步進行材料/微波處理。然而，由於電磁波源在數十GHz至數個THz的不足，連帶造成此一頻帶知識不足。本文將回顧這頻帶內目前的研究方法與近況，並報告清華大學與工研院目前正在積極發展的研究現況。

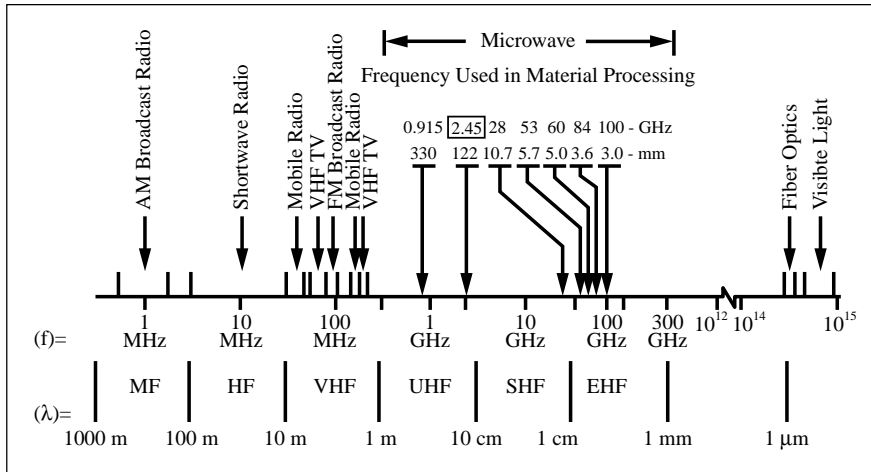
關鍵詞：微波、毫米波、頻率響應、作用腔、材料特性

前言

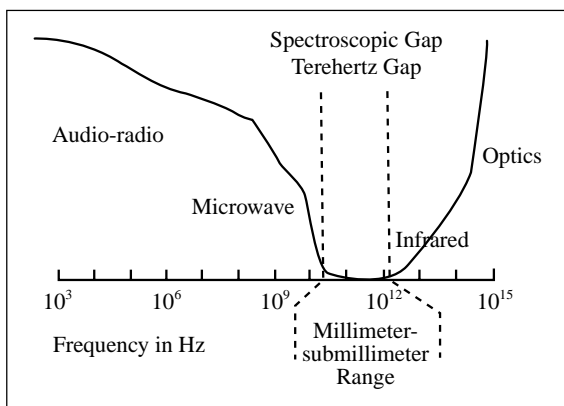
從 1895年馬可尼(Guglielmo Marconi)發現電磁波至今，一百多年來電磁波的發展可以說是突飛猛進。以頻率來分，發電廠送出的電源頻率是60 Hz。此電力推動了工商業的高速發展，也使得我們日常更加的便利。圖一表示各個頻帶目前的使用狀況：在低頻有調幅、短波、調頻等通訊頻帶；接著從數個MHz到幾個GHz，有線電視頻道及大哥大的無線通訊等；隨著微波管工業的發達，2.45 GHz普遍應用在物質的加熱，最常見的是家用微波爐，它造福了千千萬萬的家庭；更高的微波頻帶例如35 GHz與94 GHz由於技術難度較高，目前是軍事應用領導工業發展方向。雷射光源的高度發展，使我們能夠

產生從遠紅外線(THz)到可見光，甚至到紫外線；接下來的x-光、 γ -射線進入宇宙射線，更大大的提高我們對電磁波的了解。然而在這麼廣的頻帶範圍中，有一個頻帶目前我們所知甚少，也就是約從35 GHz到遠紅外線頻帶(THz)。這個頻帶的特性，將是本文的討論重點。

以波長來分，在雷射波源範圍也就是短波長，通常作用空間較大，因此相對的功率容量較大，但是每個能階躍遷只能激發出一個光子，所以隨著波長增加，輸出的總功率也就下降。相對的，在傳統微波源範圍也就是長波長，雖然每個作用能激發出數個光子，但是隨著波長變短，作用空間變小，功率容量急速下降。在這兩個極端下，中間有個範圍幾乎找不到好的電磁波源。因為缺乏大功率的電磁波源，所



▲圖一 電磁波的應用分布圖



▲圖二 定性的表示光譜學的空白

以各種材料如何與這個頻帶的電磁波交互作用，仍有待研究。此外，材料特性隨頻率響應的關係，至今也不甚明瞭。圖二定性的表示這個特性，此知識的缺口我們稱之為光譜學空白或 THz 空白。

高功率微波與毫米波之應用範圍非常的廣泛，如圖三所示，包括加速器應用、外太空與衛星通訊、核融合研究、毫米波雷達、電戰系統、電漿特性的診斷以及材料特性量測與材料處理。微波早期的應用

大多於通訊、導航以及乾燥食物。現今工業上，微波能量被用於木材製程、橡膠的硫化、食物烹調及溶化、醫療治療等。最近，微波不只被應用於陶瓷材料，還被應用於聚合物、陶瓷合成、陶瓷和聚合物的混成、陶瓷和金屬的混合或是用於純金屬粉

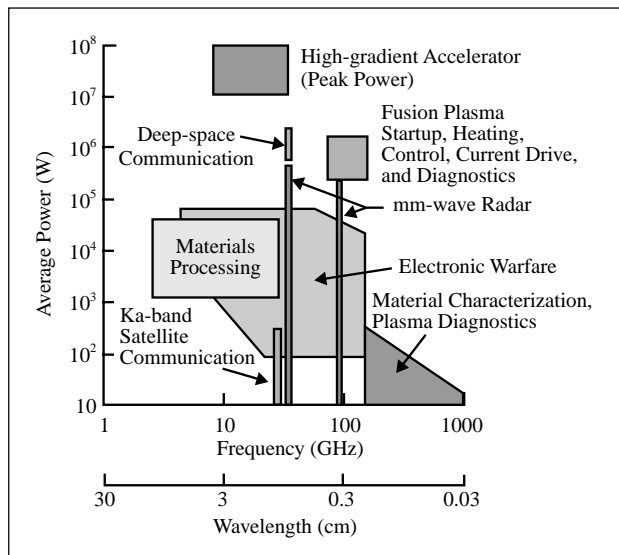
體的備製。特別是，從八〇年代起，吸波材料的微波製程被廣泛的研究，且被應用於一系列的材料，如三氧化二鋁、鋅的氧化物、二氧化鋅、PZT、BPT 等。製程技術包含了乾燥、鍛燒、燒結、退火、聚合化/緻密化、化學合成、覆膜、熔融以及接合等。此外，還有許多對微波幫助合成的研究。用微波能量做材料製程較傳統加熱有其潛力與好處。例如，在低溫製程以及較短的製程時間下，微波可以提高緻密度。微波加熱的好處有：空間均勻、快速加熱率、降低作用時間及作用溫度、優化微結構，也因此增加了機械性/電性，也有較佳的製程效率、選擇性加熱、低環境因素影響、節省能量。這些好處可使無機材料緻密化，以及在一個製程即可將其與有機材料結合，尤其是快速、選擇性、短時間加熱可使我們在不同區域上加熱不同溫度。

本文我們將針對最後兩部分之目前研究狀況與工研院/清華大學目前正在進行

的研究做比較深入的探討。整篇文章組織如下：第二節我們將回顧材料特性的量測方法，主要是量測介電係數(Permittivity)與導磁係數(Permeability)，我們回顧低頻到高頻的量測，最後會進入 THz 的光譜學(Spectroscopy)；接著第三節，我們將報告工研院與清華大學目前利用共振法量測材料特性的方法與進度；第四節與第五節，我們將進入高功率的材料處理，首先我們會整理目前國際上利用高功率微波處理材料的研究進展，藉以引出清華大學具備多頻帶微波材料處理之優勢。接著報告目前的研究方法與進展並做一個總結。

材料特性與電磁波頻率 響應關係研究現況

談到材料，我們最關心幾個基本特性：如折射係數($N^*(\nu)=n(\nu)+ik(\nu)$)、介電



▲圖三 高功率微/毫米波源之目前與潛在應用⁽¹⁾

係數($\epsilon^*(\nu)=\epsilon'(\nu)+i\epsilon''(\nu)$)、導磁係數($\mu^*(\nu)=\mu'(\nu)+i\mu''(\nu)$)、吸收係數($\alpha(\nu)$)及導電係數($\sigma^*(\nu)=\sigma'(\nu)+i\sigma''(\nu)$)。對先進陶瓷材料來說，導電係數通常很低，並不太重要；而折射係數與吸收係數都可以由介電係數與導磁係數計算獲得。因此我們真正最關心的是介電係數與導磁係數。這兩個特性會隨頻率而改變。基本上，低頻的特性比較容易掌握，有較多的方法可以量測並交互驗證。然而，隨著頻率增高，難度也越來越高，一般的材料在頻率超過幾十 GHz 後就不太容易找到資料，而且也常被視為重要的商業機密，因此我們若能掌握量測能力，對材料研究將有極大助益。我們在下文中將先介紹基本的量測方法⁽²⁾，再簡介高頻光譜學。

1. 低頻材料特性量測介紹

圖四表示常用的介電值量測方法，圖四(a)是低頻最常見的量測方法，介電物質置於平行板導體內，藉此改變電容質、共振頻率與品質參數。最後再由這些數據求得介電值的實數部分與虛數部分。但是這個方法有其缺陷—越高頻誤差越大。有鑑於此，在高頻介電特性的量測上出現了各式各樣的變形，如圖四(b)~(e)，這些方法基本概念與圖四(a)很接近，但是共振系統係採用同軸線或波導管形式，然而隨著頻率升高，共振腔變得很小，加工尺寸誤差會增加量測不準確。因此在更高的頻帶如 90 GHz~1 THz，我們將採用類似光學的方式，如圖四(f)。

技術專題

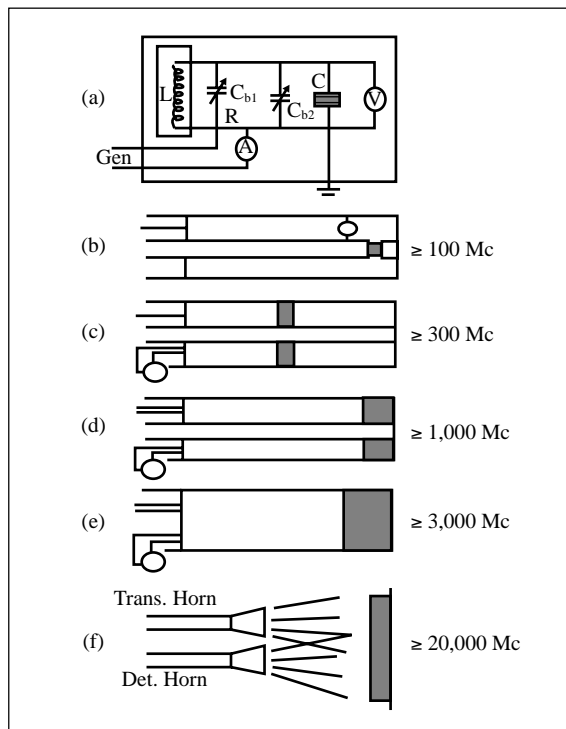
圖五表示導磁係數的基本量測方法。圖五(a)是在直流時的量測方法，嵌入待測物至一線圈中，藉由量測電感值的變化可以獲得導磁係數的實數與虛數部分。圖五(b)~(d)是一般在高頻常用的量測方法。跟介電值的量測方法有些類似，都是利用共振頻率與品質參數的改變特性，來計算導磁係數。然而，為了有效區分介電係數或導磁係數的貢獻，通常這類系統我們還會加上一些變數，例如共振結構可調。

2. 高頻光譜學

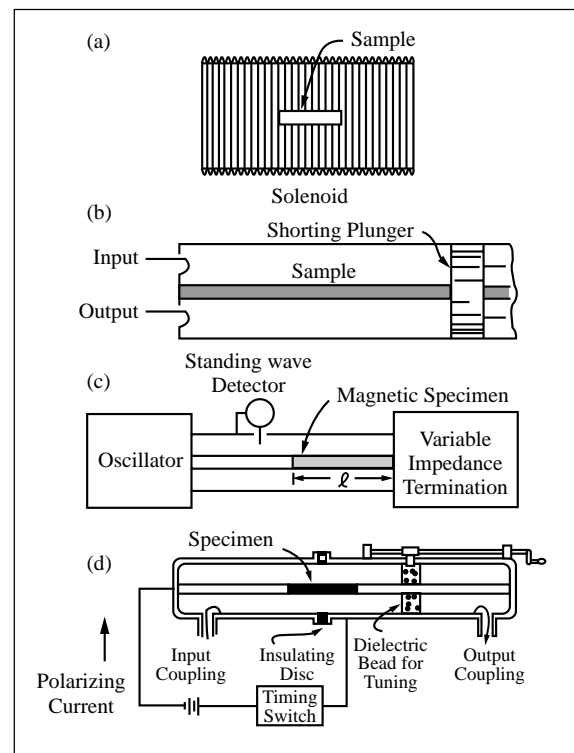
我們前面提及在高頻材料特性量測時，使用波導機構有其限制，高頻光譜學乃應運而生。由於材料的發展與應用突飛

猛進，國際紅外線與毫米波會議近幾年有很多關於這方面技術的研究報告。其中，有些人利用返波震盪器具有較寬頻的特性，來進行高頻光譜學研究，其中俄國國家科學院次毫米波光譜學研究所做得很成功⁽³⁾。其方法如圖六所示。圖六(a)純粹量測穿透係數振幅的變化，所獲得的資訊較為有限；圖六(b)可以完整的量測穿透係數的振幅與相位；圖六(c)可以量測反射係數的振幅與相位。利用這些數據我們可以算出物質的頻率響應特性。這是一個簡便但是很有效率的方法，很值得發展。

另一研究重點是薄膜的高頻微波特性，這是一個很大的挑戰，目前國際上關



▲圖四 介電特性量測方法

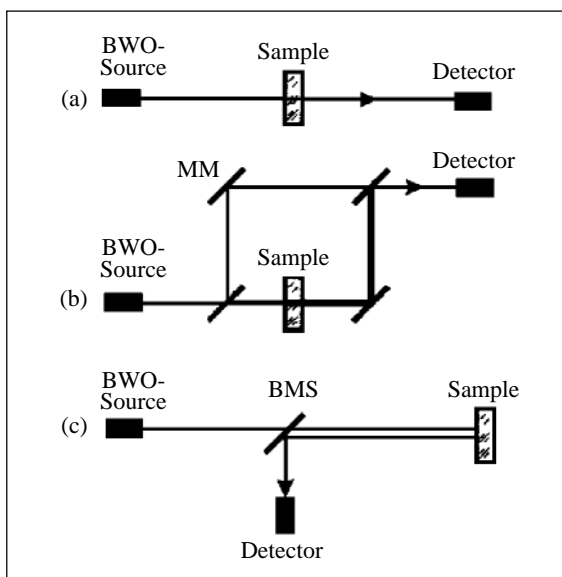


▲圖五 磁化率量測方法

於這方面的研究非常有限。我們設計一量測系統，先從材料的塊狀特性，漸次進入薄膜特性，同時利用高頻電磁分析軟體 (HFSS) 進行分析與比較。

共振式反射法之材料特性研究

初步的研究將會集中在 Ka 頻帶 (26 - 40GHz)。我們採用 WR-28 波導管，波導管的左端置偶合孔 (Coupling Hole) 藉以改變共振特性，右端放置待測物，共振腔的大小可以改變。此種共振式反射法可以幫助我們準確的獲得材料的介電特性。圖七(a)為此種方法的作用示意圖；圖七(b)是成品圖。由於時間匆忙，冷測尚未完成。如果想要知道更多材料的基本特性，那麼此方法可以搭配共振式穿透法，目前這些方法正在積極進行中。



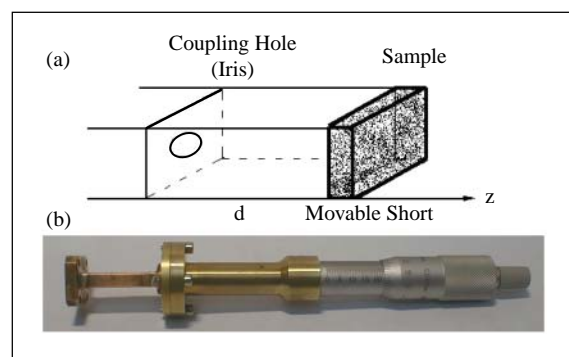
▲圖六 材料特性量測方法

先進材料與微毫米波反應研究現況

高功率、高頻率微毫米波源的研發非常具有挑戰性。世界各大工業國都把它視為一個重要的技術指標，因此微毫米波源的取得也相對的比較受限。一般來說，從事材料研究所需的功率範圍大約在幾百瓦特到幾千瓦特之間。在較低頻帶如 915 MHz 到 2.45 GHz，磁控管仍是最佳選擇。由於此一微波源可得之價格便宜，因此已經被廣泛的應用在各式各樣材料與微波反應研究與應用。然而，有些很有用的先進陶瓷材料，低頻時的微波吸收率很低。換句話說，就是它根本不與微波反應，這使得低頻微波材料處理有其侷限性。

然而我們知道，每單位體積的能量吸收為 $P_a = 1/2 \epsilon'' \omega |E|^2$ ，也就是它與物質本身的特性有關（介電物質的虛數部分 ϵ'' ），更與電磁波頻率 ω 與場強 $|E|^2$ 有密切的關係。有鑑於此，提高操作頻率與增加場強似乎是兩個很好的方式。

表一總結目前各國在材料研究的方向與所使用的微波源。我們發現這些對材料



▲圖七 反射共振式材料特性量測

有深入研究的國家，本身都有發展高功率微波源－磁旋管(Gyrotron)。在主要的研究活動上有：陶瓷燒鍛、表面處理、薄膜特性改質等多種研究與用途。使用的微波源除了 2.45 GHz 外，28 GHz 是另一個最常使用的高功率微波源，這是因為這個頻率的磁旋管微波源已經商業化了，其輸出功率為 10 kW。值得注意的是，清華大學與工研院現有微波源涵蓋範圍非常廣泛，除了 2.45GHz 外，還有 16.8、24.0、28.0 及 35.0 GHz。這麼多的微波源使得我們可以廣泛的探索寬頻帶的頻率反應特性。

清華大學與工研院 正在進行的研究

在上一節中我們提及，增加微波吸收的方法不外乎增加操作頻率或是提高場強，這就需要設計並優化反應作用腔(Applicator)。作用腔主要的目的是控制電磁波與材料的交互作用方式，使得反應處於安全、可信賴與有效率的操控環境。基本上，在材料處理上常見有三種作用腔：行波作用腔、多模作用腔與單模作用腔。行波作用腔是由波導結構所建立，另外兩個類型是共振腔。因為共振腔可產生比行波結構更高的電場，這對材料來說是最有用的。特別是電磁場在單模共振腔較易掌控，並可藉由共振產生很大的場強，進而用來加熱低損耗的先進陶瓷材料。微波加熱特性比傳統

的高溫爐加熱法有更多益處。如空間上的均勻性、選區性、快速加熱性、降低製程時間、細化顆粒以及節約能量。我們設計兩組高品質參數的反應作用腔，分別給 2.45 GHz 與 24.0 GHz 微波源。薄膜的微波吸收對頻率響應特性是本實驗重點。微波對粒子作表面的修飾作用，以達到再結晶、平整化、較好的色散和多機能的殼層結構。

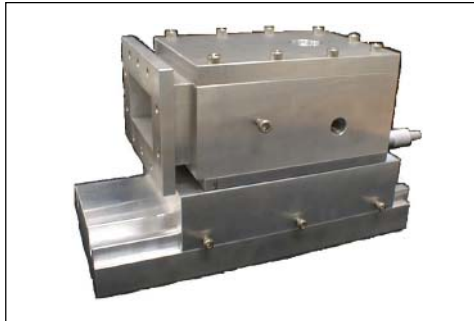
1. 新型 2.45 GHz 高場能反應腔

此一作用腔的設計理念是提高電磁波的傳輸、降低能量反射、提高場強與增加微波加熱的控制能力。我們採用一個半橢

▼表一 微/毫米波材料處理之主要研究活動與使用微波源

單位與國家	主要研究活動	使用微波源
Institute for Research in Electronics and Applied Physics, Univ. of Maryland, 美國	雙頻材料處理、長晶、燒結特性研究	* 2.45 GHz, 3 kW, CW * 28 GHz, 10 kW, CW
Materials Science and Technology, Los Alamos, National Laboratory, 美國	陶瓷纖維燒結、材料處理溫度變化研究	* 2.45 GHz, 3 kW, CW
Oak Ridge National Laboratory/Lambda Technology, 美國	聚合物材料修補、結構結合	* 5.8 - 7.0 GHz, 0.7 kW * 7.3 - 8.7 GHz, 1.8 kW
Dept. of Chemical Engineering, Korea Research institute of Chemical Technology, 韓國	金屬氧化物鍛燒、碳化合物催化	* 2.45 GHz, 5 kW, CW
Institute for Pulsed Power and Microwave Technology, Karlsruhe, 德國	去黏結、先進陶瓷燒結、表面處理	* 30 GHz, 10 kW, CW
Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 俄國	先進陶瓷燒結、陶瓷與金屬接合	* 2.45 GHz, 5 kW, CW * 30 GHz, 10 kW, CW
The Joining and Welding Research Institute, 日本	先進陶瓷燒結、薄膜特性改質	* 28 GHz, 10 kW, CW
工研院材料所與清華大學物理系, 台灣	表面處理、先進陶瓷處理、微波/物質反應特性研究	* 2.45 GHz, 3 kW, CW * 16.8 GHz, 1 kW, CW * 24.0 GHz, 800 W, CW * 28.0 GHz, 1 kW, CW * 35.0 GHz, 1 kW, CW

圓共振腔形式，操作在基波並遠離高次模之激發，共振頻率可以微調來補償待測物造成的頻率飄移。頻率微調鈕每改變 0.1 mm，共振腔頻率大約改變 22 MHz。同時也設計可移動式



▲圖八 成品圖

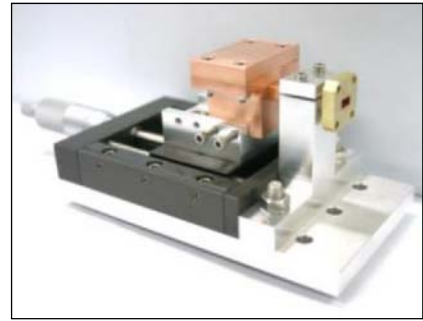
平台，方便樣品的置入與取出。圖八是成品圖。冷測與熱測正在積極進行中。我們以高頻電磁模擬軟體(HFSS)來做最基本的設計。操作模式是 TM 模且在 z- 軸上電磁場沒有變化，所以樣品可以放在最底部。

2. 新型 24.0 GHz 橢圓反應腔

此一作用腔的設計理念類似 2.45 GHz 作用腔。由於體積較小，品質參數不如 2.45GHz 作用腔，但是同樣的微波功率輸入，它卻可以建立更強的電磁場強。此半橢圓共振腔是操作在 TM 模式並遠離高次模，共振頻率也可以微調來補償待測物造成的頻率飄移。頻率微調鈕每改變 0.1 mm，其共振腔頻率大約改變 200 MHz。HFSS 模擬顯示操作模式就如同我們設計的 TM 模，而電場的方向是在 z- 軸上，其組合圖如圖九所示。

結 論

深入了解材料特性在微 / 毫米波之頻率響應關係，有助於我們了解材料的基本性質，更重要的是，它有助於我們設計材



▲圖九 組合圖

料與微波的製程，進而改進材料特性。我們藉由對材料頻率響應特性的掌握，得以設計出更好的反應腔，提高反應效率，達成以表面修飾、改質與緻密等功能。

以微毫米波處理先進材料，學術界在此一領域所知非常有限，這提供一個嶄新的研究舞台，更可能是廣大工業應用前景的一個開端。清華大學多年來在電磁波與電漿領域耕耘，擁有數套高頻、高功率微波源。工研院材料所以多年材料專業，搭配清華大學的研發能力，必能使材料與微毫米波的反應關係得到更好的研究，甚至工業應用潛力也是指日可待。筆者感謝朱國瑞教授、張宏宜博士與鄭世裕博士的寶貴建議，更感謝清大的工作團隊－戴伶潔、姜惟元、余青芳、盧佳慧、連曼均與方文志。☞

參考資料

1. K. R. Chu, "The electron cyclotron maser", Rev. Mod. Phys., 76, 489, 2004.
2. Dielectric materials and applications, edited by A. R. Von Hippel, John Wiley & Sons, New York, 1961.
3. Millimeter and submillimeter wave spectroscopy of solids, edited by G. Gruner, Springer, Berlin, 1998.