

可快速接觸式測試之多層共平面式毫米波收發機模組系統

本文提出一種運用先進共平面波導系統 (advanced coplanar strips system, ACSS) 的傳導技術，構建而成的開放式射頻積體電路 (radio frequency integrated circuit, RFIC) 系統架構。這種新穎的作法將可整合所有的射頻前端元件在單一模組內，並且使用現今工業界最成熟、普遍的印刷電路板 (printed circuit board, PCB) 製程來製作。為配合此種新式的全平面毫米波電路系統，本文同時設計出一套適合的共平面式探針量測系統，並藉由實際的收、發系統天線陣列的量測，說明此套量測設備的實用性，與利用全平面毫米波積體電路來實現無線通信系統的潛力。

吳經國、洪才弼、吳憲順、莊晴光

一、前言

近幾年來，操作於微波頻段的室內無線區域網路 (wireless local area network, WLAN) 與寬頻通訊系統，由於擁有便利與高速傳輸的優點，逐漸引起

吳經國先生現就讀於國立交通大學電信工程研究所博士班學生。

洪才弼先生為國立交通大學電信工程碩士。

李振榮先生為國立交通大學電信工程碩士，現服役中。

吳憲順先生現就讀於國立交通大學電信工程研究所博士班學生。

莊晴光先生為美國德州大學奧斯汀分校電機工程博士，現任國立交通大學電信工程系教授暨國際電機電子工程師學會會士。

政府與民間業者高度的重視與興趣。就現今最成熟的技術而言，使用非輻射型介質導管 (non-radiated dielectric guide, NRD guide) 與矩形波導管 (rectangular waveguide) 這兩種不同的技術已被嚴謹地研究、發展並有效地應用於具有嚴格規範的微波通訊系統^(1,2)。雖然前述的波導技術在微波頻段擁有良好的電氣特性，然而由其所構成的模組電路，往往需要極複雜的全波電磁場論分析與機械加工製程，因而增加系統整合模組的成本與複雜性。舉例而言，如廣為人知的矩形波導天線或波導管結構，即為複雜的三度空間結構，因此常常需要再考慮由波導結構轉至平面電路 (反之亦然) 的轉換電路，以達到電磁波場型轉換與阻抗匹配的要求⁽³⁾。

在政府大力推動的學術卓越計畫支持下，本實驗室已發展出一種新型的先進共平面波導系統

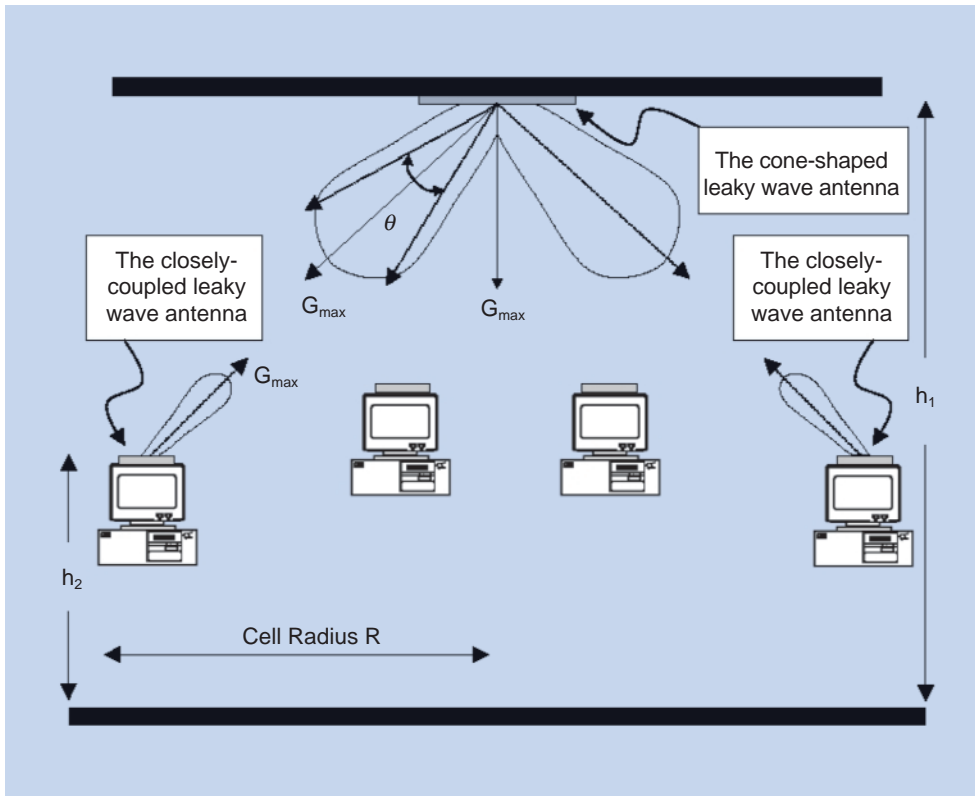


圖 1. 利用兩種微帶線洩漏波天線，可以一對多通聯的室內無線區域網路系統。

(ACSS) 技術，用以整合完成在傳送與接收系統中的每一個多功能模組，並已經據以完成一擁有每秒高達千萬位元 (10 Mb/s) 切換速率，操作於 Ka 頻段的頻率位移鑰別 (frequency-shift-keying, FSK) 數位收發系統原型⁽⁴⁾，如圖 1 所示。此種共平面波導技術基本上是由微帶線 (microstrip line)、共平面波導 (coplanar waveguide)、共平面帶線 (coplanar strip) 與矩形波導管⁽⁵⁾ 所組合而成的多層導波結構。通訊系統內所需的基本射頻元件，如低波束天線、含有波導共振腔的高功率本地振盪器、倍頻器、濾波器與偶次諧波四分之一型混波器，皆可用現行普遍的光學照像製板技術，同時地以此種平面電路的型式來完成。

在另一方面，一種適用於此種新型毫米波平面電路接收系統的共平面波導探針量測機具，預期將可以大大地降低量測所需的時間。相較於傳統同軸電纜式量測系統，更可避免因輸出 (入) 轉接頭所引起的不準確性因素。由此可知，此種新型毫米波平面電路系統的成功與否，實在與能否有一適當的共平面量測系統有著密切的關連。

二、共平面波導探針量測系統

1. 量測系統發展背景

對此種平面化電路系統而言，一套可直接在電路基板上對各個模組元件做精密量測的機具，是具有相當大的便利性與必需性。環顧現今工業界所用的量測設備，當屬用於半導體 (semiconductor) 的平面積體電路探針量測系統 (probe station)，最合乎此種微波通訊平面模組量測之需求。然而不巧的是，由於半導體晶圓 (wafer) 背面皆為堅硬、平整的均勻金屬導電層，與現今常用的微波基板硬度不高，常易因外力或加工而彎曲的性質大異其趣。再者，現今微波電路的接地面亦常為具有周期性、非連續均勻之金屬面，故一般常見的積體電路探針量測系統上所用的平整金屬平台，便不適合此種新型通訊模組系統，甚至會嚴重破壞、干擾其原先應有的電氣特性。故本實驗室便依據實驗室原先即已擁有，由 Wentworth LabsTM 公司所生產的平面積體電路探針量測系統，進一步加以改裝、自行設計、發展其酬載設備。在花費最小的成本及充份運用已有的

設備之考量下，使其可充份地符合此種新型共平面毫米波電路系統的測試要求。

2. 量測系統架構與設計

如圖 2 所示，本設備主體包含有吸盤、滑動溝槽、探針置放手臂、精密探針組、高倍率顯微鏡和真空抽氣機等組件。吸盤乃一長、寬、高為 $20 \times 20 \times 2 \text{ cm}^3$ 的立方體，由工程上常用之熱塑型塑膠乙炔鋼（學名為 UPE）所構成。此種材質具有近於空氣的低介電常數（permittivity）與優異的耐化性，硬度足以承受機械加工而不易變形，且價格低廉⁽⁶⁾。相較於傳統的積體電路量測系統的吸盤，此吸盤由於具有不導電的特質，所以作為待測電路的基座酬載體時，將不會影響待測電路的電氣特性。對於具有非均勻接地面金屬，如週期結構金屬面 UC-PBG (uniplanar compact photonic-bandgap) 的電路⁽⁷⁾，更是一項不可或缺的要求。如圖 3 所示，吸盤的上表面具有以中心點為圓心，蝕刻直徑依序為 1、2、4、6、8、10、12、14、16、18 公分的十個同心圓溝槽。溝槽內則緊密地填充具有高度彈性的塑膠墊圈，並以強力工業用膠將其固定於吸盤溝槽內，使在組裝本吸盤或量測時，墊圈不會脫落移位。

高頻微波基板通常為硬度不高的軟板，常易因受夾具施力而彎曲。即使是底部平面不像晶圓片一般平整的電路，此具有彈性的墊圈亦可使其平穩地置放於基座上量測。在吸盤表面上，同時於塑膠墊圈同心圓內，等距直線挖掘具有金屬螺紋壁的細孔；經由吸盤內部厚度一公分處的一條孔穴及塑膠軟管，連接外部一具小型的真空幫浦機。幫浦機的排風口並接上一消音器，以消除抽氣時所引起的噪音。當待測電路置放於吸盤上時，可依電路板的實際大小，將顯露於待測電路板外的真空抽氣孔以小螺絲塞住。故此吸盤將可輕易地緊密吸附各種不同尺寸的電路基板於其上，使待測電路於量測時不會任意移動，影響下針位置的準確性，甚至刮壞探針或待測電路。此吸盤底部，如圖 4 所示，則可經由一插銷穩固地固定於一「十」字型的雙層滑動溝槽基座上。故吸盤及其上的待測物於量測時，將可輕易地藉由粗、細轉輪沿水平面 (X-Y 方向) 平滑地移動至適當的位置後固定，因此具有極大的操作



圖 2. 共平面波導探針量測系統外觀。

空間。

基台上方則為一座具有燈光照明的高倍率顯微鏡 (7×20)，兩側各有一支置放精密探針的機械手臂，機械臂頭可視實際需要搭配各種常見的精密探針，如形式為 GSG (ground-signal-ground) 或 GS (ground-signal)。在本實驗則採用由 Picoprobe™ 公司所生產，間距為 $1250 \mu\text{m}$ 的共平面波導式 GSG 探針。機械臂尾端則接上低損耗的微波導管，可連接至各種精密的微波量測儀器，如功率計、頻譜分析儀及網路分析儀 (Agilent™ - 8510C) 等設備。

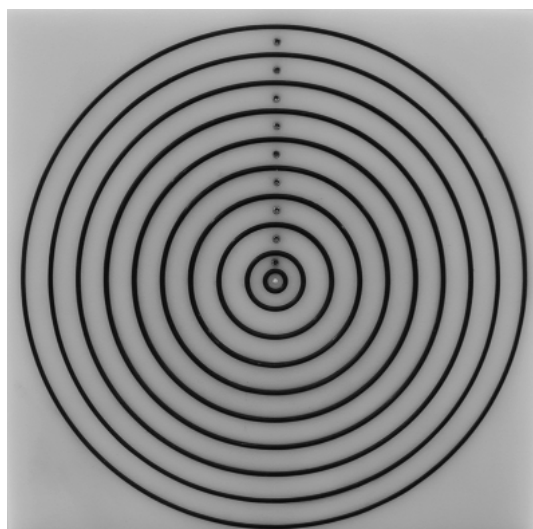


圖 3. 硬塑鋼吸盤的上表面。

三、量測步驟與結果

1. 頻率位移鑑別系統傳送器 (FSK Transmitter)

本實驗室設計完成的全平面系統傳送器的實際模組架構如圖 5 所示。其內包含了 FSK 調變器 (modulator)、倍頻器 (frequency doubler)、本地振盪器 (local oscillator)、功率放大器 (power amplifier) 和全向性的天線陣列 (omnidirectional antenna array)。圖 6 所示為在倍頻器的輸出端所測得的調變信號頻譜，其為一具有 50% 工作週期 (duty cycle)，速度為 10 Mb/s 的脈波序列；顯示此全平面系統傳送器在 Ka 頻段可擁有極高的 FSK 切換速度。

另以此具有全方向性輻射場型的積體陣列天線原型為量測實例，以實際說明前文所介紹的全平面量測系統的實用性。為了滿足室內無線區域網路通訊架構的需求，此發射端之天線陣列乃由七段相同的微帶線洩漏波天線，呈一「米」字型排列而成⁽⁸⁾。值得注意的是，此天線陣列的底層金屬面並非傳統的均勻接地金屬，而是一以反對稱型式蝕刻而成的週期性結構⁽⁹⁾，故能適當地激發出此微帶線的洩漏波模。而每一根微帶線天線可以提供一對仰角傾斜 48 度，分別往前與往後方向前進的洩漏波束。整組天線陣列因而形成具有 22 度 3 dB 波束寬

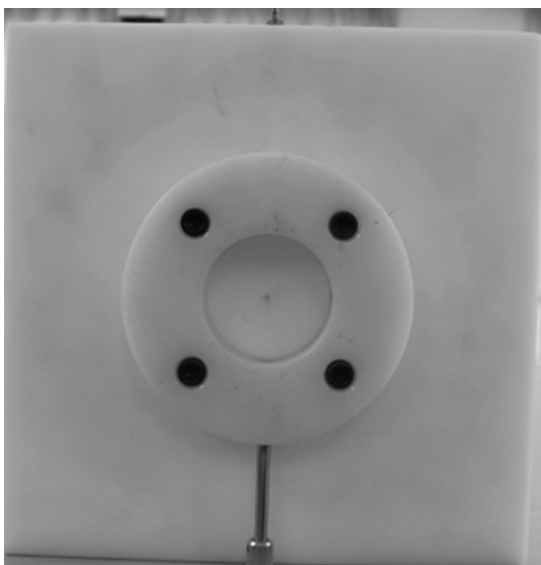


圖 4. 硬塑鋼吸盤的下表面。

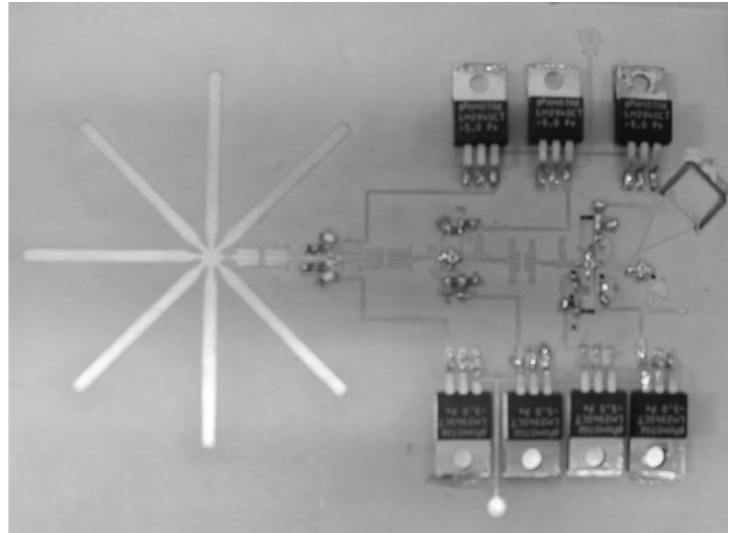


圖 5. FSK 傳送器模組架構圖。

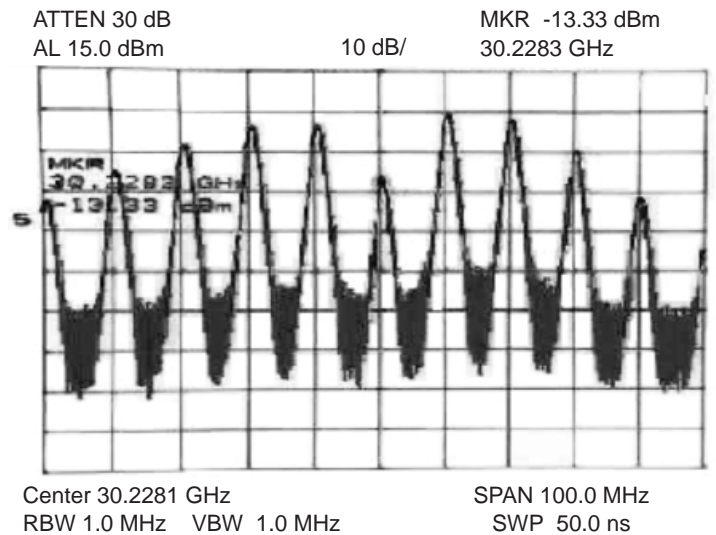


圖 6. FSK 調變信號頻譜量測圖。

度的錐形輻射場型。因此能形成均勻的覆蓋範圍，並提供一對多的傳輸特性。圖 7 則為利用全平面探針量測系統量測此天線陣列所得到的反射損耗 (S_{11}) 圖。在量測時為了配合所採用的共平面波導型式探針，故另外加上一小段微帶線至共平面波導的轉換匹配電路。而此段轉換電路的效應，也已經由大家所熟知的「穿透 (through) - 反射 (reflect) - 線 (line)」去埋藏校準平面方式 (TRL deembedding) 去除其效應。實際的量測結果顯示此陣列天線在 29.75 - 30.37 GHz 的寬廣頻段範圍內，其反射損耗的絕對

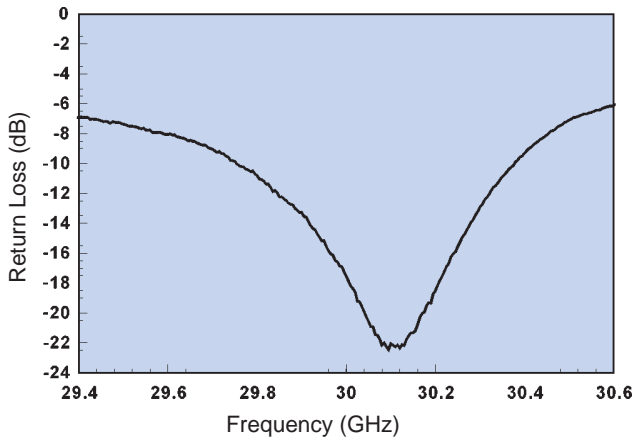


圖 7. FSK 傳送器積體陣列天線的反射損耗量測曲線圖。

值皆小於 -10 dB；而在 30.10 GHz 的設計頻率，更有著小至 -22 dB 的反射損耗。顯示此天線系統有著極佳的匹配電路，並能有效率的將能量發射至四周圍。

2. 直接轉換接收器 (Direct Conversion Receiver)

圖 8 所示為操作於 Ka 頻段的全平面接收器的實際模組架構圖，其中包含了一組洩漏波天線陣列 (leaky-wave antenna array)、低雜訊放大器 (low noise amplifier)、本地振盪源 (local oscillator) 和偶次諧波四分之一型混波器 (even harmonic quadrature mixer)。混波器的差動輸出 (differential output) 信號為一具有 90.18 度相位差的波形，如圖 9 所示，顯示此全平面接收器可成功地解調出 I/Q 信號。

同樣地，現以應用模耦合逼近法 (coupled modes approach) 所完成一操作在 30.2 GHz、緊密排列的微帶線洩漏波天線陣列為量測實例。此一陣列天線面積約有 2.5×3.5 cm²，含有八根緊密耦合的微帶線天線單元及平行饋入匹配網路。每一個天線單元乃藉由正負 180 度相位差的信號，適當地激發出其第一高階洩漏波模。再利用精密的全波場論分析法及模耦合理論⁽¹⁰⁾，適當地選擇天線單元間的

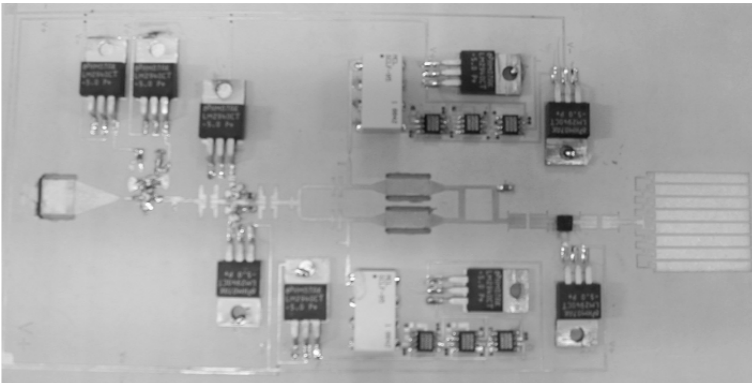


圖 8. Direct conversion 接收器模組架構圖。

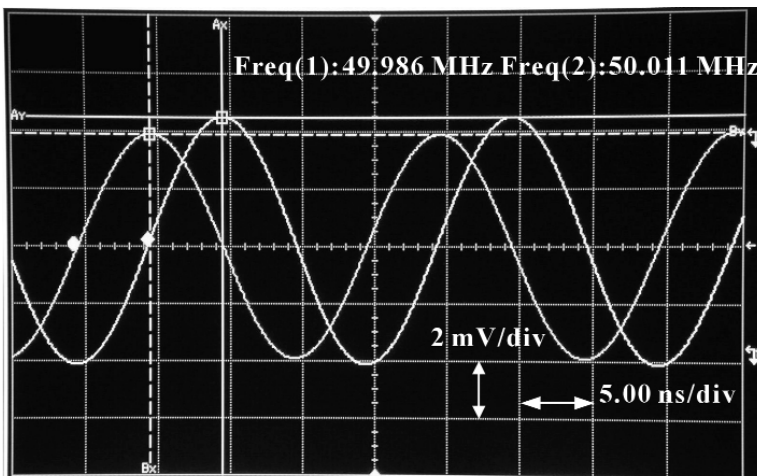


圖 9. I 通道和 Q 通道輸出波形的量測圖。

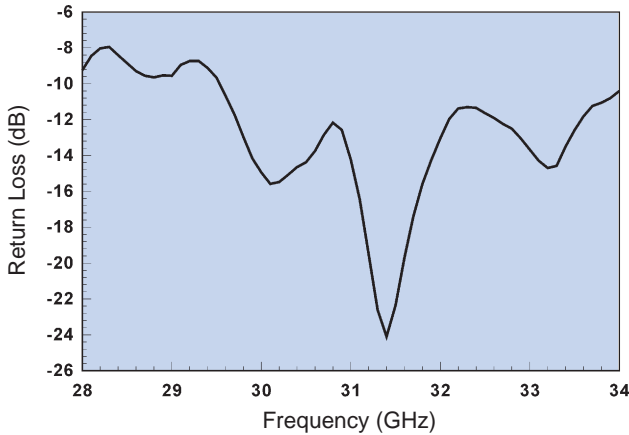


圖 10. Direct conversion 接收器積體陣列天線的反射損耗量測曲線圖。

距離及饋入網路。實際的遠場量測結果顯示此接收端天線陣列的垂直 / 水平角度為 43 度 / 94 度，指向性 (directivity) 為 17.3 dB，增益 (gain) 為 15.8 dB，孔徑效率 (aperture efficiency) 更可高達 70% 以上⁽¹¹⁾。相同地，利用前述之全平面探針量測系統、網路分析儀及 TRL 去埋藏法，可精密地量測到此天線陣列模組的反射耗損，如圖 10 所示。在 21.6 - 34 GHz 這一寬廣的頻段內，其反射耗損的絕對值皆低於 -10 dB，顯示此天線陣列具有良好的匹配性及接收特性。

四、結論

使用先進共平面的傳導技術構建而成的微波電路系統架構，將可整合所有的射頻前端元件在單一模組內，並大大地降低產品研發及生產的成本。同時發展的平面化量測設備操作簡單，但能提供多樣性的功能，以快速進行複雜的高精密實驗。藉由適當地改變共平面波導至微帶線轉換電路的尺寸，即可以適用於各個頻帶。而本設備亦可用於其它平面

化電路，相容性極高，足可供研發人員於研究階段發展出最高品質的元件，並用以檢驗是否合乎通訊系統的規格與標準規範。

誌謝

本研究乃由教育部卓越計畫 (advanced technologies for telecommunications, microwave and millimeter wave technologies (A1)) 第 89-E-FA06-2-4 號合約提供經費補助，特此感謝。

參考文獻

1. F. Kuroki, M. Sugioka, S. Matsukawa, K. Ikeda, and T. Yoneyama, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **46** (6), 806, Jun. (1998).
2. I. Gresham, N. Jain, N. T. Budka, A. Alexanian, N. Kinayman, B. Ziegner, S. Brown, and P. Staecker, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **49** (1), 44, Jan. (2001).
3. K. Hamaguchi, Y. Shoji, H. Ogawa, H. Sato, E. Kawakami, Y. Hirachi, T. Iwasaki, A. Akeyama, Y. Shimomichi, T. Kizawa, and I. Kuwana, *Proc. TSMW 2001*, 191, Mar. (2001).
4. C. J. Lee, T. P. Hung, S. C. Lin, H. S. Wu, C. Y. Tsai, K. F. Huang, Y. C. Chen, W. C. Lee, and C. K. C. Tzuang, *A Fully All-planar Integrated Ka-band FSK Transceiver Module*, to be published in APMC (2001).
5. C. K. C. Tzuang, K. C. Chen, C. J. Lee, C. C. Ho, and H. S. Wu, *2000 European Microwave Conference Proceedings*, **2**, 37, Oct. (2000).
6. *Modern Plastics Encyclopedia* (1989).
7. F. R. Yang, Y. Qian, R. Coccioli, and T. Itoh, *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, **8**, 372, Nov. (1998).
8. T. P. Hung and C. K. C. Tzuang, *Millimeter-wave Active Integrated Planar Antenna Array Emitting Cone-shaped Pattern*, to be published in European Microwave Conference Proceedings (2001).
9. K. C. Chen, C. K. C. Tzuang, Y. Qian, and T. Itoh, *1999 MTT-S Int. Microwave Symposium Digest*, **1**, 69, Anaheim.
10. C. N. Hu and C. K. C. Tzuang, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **49** (4), 629, Apr. (2001).
11. C. N. Hu and C. K. C. Tzuang, *1999 APMC*, **1**, 72 (1999).