

LTCC-Mehrlagenkeramik für Funk- und Sensor-Anwendungen

Von Reinhard Kulke, Matthias Rittweger, Peter Uhlig, Carsten Günner, IMST GmbH, D-47475 Kamp-Lintfort

In der LTCC-Technologie steckt ein großes Potential für Mikrowellenanwendungen. Sowohl die Keramiksubstrate als auch die Gold- und Silberleitbahnen weisen entsprechend gute physikalische und elektrische Eigenschaften auf. Darüber hinaus sind die Material- und Herstellungskosten konkurrenzfähig zu anderen Substratsystemen wie HTCC und Leiterplatte. Nach einem Vergleich von LTCC- und Leiterplatten-Technik werden die handelsüblichen LTCC-Materialien als auch eine Auswahl weltweiter Service-Hersteller aufgezeigt. Am Beispiel der Prototypenfertigung der IMST GmbH wird die Herstellung von LTCC-Modulen beschrieben und abschließend wird anhand eines 25 GHz Sende-/Empfangsmoduls eine kompakte und kostengünstige Anwendung der LTCC-Technologie gezeigt.

LTCC technology has large benefits in microwave applications. Ceramic substrates as well as the gold and silver pastes have excellent physical and electrical properties. Moreover, material and processing costs are competitive to other substrate systems like HTCC and printed circuit boards. A comparison between LTCC and PCB is followed by a listing of commercial LTCC materials and a selection of worldwide foundry services. On the basis of the prototyping line at IMST GmbH the manufacturing process of LTCC modules is described. Finally, with the example of a 25 GHz transceiver module a high integration and cost-effective application is demonstrated.

1 Einleitung

LTCC (*low temperature co-fired ceramic*) steht für ein Keramiksubstratsystem, das in der Elektrotechnik als preiswerte Substrattechnologie eingesetzt wird, wobei nahezu beliebig viele Lagen übereinander gestapelt werden können. Die Leiterbahnen sind üblicherweise aus Gold oder Silber bzw. aus Platin- und Palladium-Legierungen. Auch Kupferleiterbahnen sind möglich. Die Metallisierungen werden im Siebdruckverfahren Lage für Lage auf die ungebrannte („grüne“) Keramik gedruckt und nach dem Stapeln und Pressen des vielschichtigen Aufbaus gemeinsam im Prozessofen gebrannt. Die Sintertemperatur der LTCC Glaskeramik liegt unter 900°C. Diese relativ niedrige Temperatur ermöglicht erst den Einsatz von Gold- und Silberleiterbahnen, deren Schmelzpunkte zwischen 960°C und 1100°C liegen.

Während LTCC im ungebrannten Zustand ein Gemisch aus Glas, Keramik und organischem Lösungsmittel ist, besteht HTCC (*high temperature co-fired ceramic*) aus Aluminiumoxyd, das bei 1600°C sintert, so dass nur Metalle mit hohem Schmelzpunkt für das co-firing in Frage kommen. Als Leiterbahnen finden hier Wolfram und Molybdän Verwendung, die jedoch eine geringere Leitfähigkeit und daher höhere Leitungsverluste aufweisen.

Wegen der geringeren Verluste ist LTCC für den Aufbau von HF-Modulen die vielversprechendere Alternative. In der Praxis besteht jedoch eher eine Konkurrenz zur Leiterplattentechnologie. Leiterplatten auf FR4-Basis stellen eine ausgereifte Technik mit niedrigen Initial- und Produktionskosten dar. Allerdings ist das preiswerte FR4 nicht wirklich HF-tauglich und muss bei höheren Frequenzen durch teure HF-Basismaterialien ersetzt werden.

2 Vergleich zwischen LTCC und Leiterplatte

Die Autoren sehen den Einsatzbereich von FR4 Leiterplatten bis hin zu wenigen GHz. Typische Anwendungsbeispiele sind Schaltungen bei den niedrigen ISM-Band Frequenzen (industry science and medicine) 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz (amerik. Standard) und 2,45 GHz, als auch bei den Mobilfunkfrequenzen 900, 1800 oder 1900 MHz. Darüber hinaus ist es ratsam, HF-taugliche Leiterplatten zu verwenden, die in Material- und Herstellungskosten deutlich teurer sind als FR4.

Neben den Kosten sind auch physikalische Eigenschaften zu beachten, wenn das optimale System ausgewählt wird. In den heutigen Mobilfunktelefonen ist z.B. die Hauptplatine eine mehrlagige Leiterplatte, auf der u.a. der Digital- und der HF-Teil untergebracht sind. Der Leistungsverstärker und häufig auch der Diplexer sind auf LTCC aufgebaut. Dem Verstärker gereicht die höhere Wärmeleitfähigkeit von Keramik und beiden Komponenten die hohe Integrations- und Verdrahtungsdichte zum Vorteil. Darüber hinaus lassen sich solche kleineren Baugruppen in großen Stückzahlen preiswert produzieren, da die einzelnen Lagen parallel gefertigt und geprüft werden können, bevor der Stapel laminiert wird.

Tabelle 1: Vergleich einiger HF-Leiterplatten- und LTCC-Systeme

Anbieter	Substrat	h μm	ϵ_r	ϵ_r tol. %	$\tan(\delta)$ *	TCE** ppm/K	TC*** W/mK	relativer Preis****	Material
Rogers	RO3003	760	3	1,3	0,13	17	0,5	1,2	PTFE: keramikgefüllt
	RO3006	635							
	RO3006	1270	6,15	2,4	0,25	17	0,61	2,2	
	RO3010	635	10,2	2,9	0,35	17	0,66	2,4	
	RO3010	1270						4,1	
Arlon	AR 600	635	6	2,5	0,35	12	0,43	6,1	PTFE: glasfaserverstärkt, keramikgefüllt
	AR 1000	635	10	5	0,35	14	0,65	4,8	
Taconic	RF-60	635	6,15	4,1	0,28	12	0,5	1,1	PTFE: glasfaserverstärkt, keramikgefüllt
	CER-10	635	10	5	0,35	14	0,3	1,8	
DuPont 951	AX, Au	210	7,8	1,3	0,5	5,8	3	1,5	Glaskeramik
	AX, Ag							1,0	
Ferro	A6M, Au	185	5,9	2,5	0,2	7	2	2,2	Glaskeramik
	A6S, Ag					8		0,6	

* Verlustfaktor des Dielektrikums bei 10 GHz

** TC: thermische Leitfähigkeit

*** TCE: thermischer Ausdehnungskoeffizient in X- und Y-Richtung

**** relativer Preis für PCB-Substrate mit Cu-Leiterbahnen;
für LTCC: Dickschicht-Gold (Au) oder Silber (Ag) mit einem Deckungsgrad von 20%

In einer Studie haben die Autoren kürzlich einige HF-Leiterplatten und LTCC-Materialien gegenübergestellt. Zum einen sind die physikalischen Eigenschaften, die Datenblätter und anderen Quellen entnommen wurden, und zum anderen die Materialkosten verglichen worden. Dabei wurde von einer Fertigung von kleinen bis mittleren Stückzahlen ausgegangen (ca. 10.000

Module pro Jahr). Die Anwendungsfrequenz liegt bei 24 GHz und der HF-Teil benötigt eine Fläche von ca. 5-7 cm². Als geeignet erschienen u.a. HF-Leiterplatten aus *Rogers*-, *Arlon*- und *Taconic*-Material. Aus dem Bereich LTCC wurden die Systeme *DuPont 951* und *Ferro A6* ausgewählt. Darüber hinaus gibt es weitere HF-taugliche Substrate, die hier zur Vereinfachung nicht genannt sind. Die angegebenen Materialkosten werden in der *Tabelle 1* nur als relative Preise angegeben, um ein ungefähres Vergleichsniveau zu erhalten.

Es wird darauf hingewiesen, dass diese Angaben den spezifischen Projekt- und Angebotsbedingungen unterlagen und durchaus anders ausfallen können. Ebenfalls nicht berücksichtigt ist ein Flächenfaktor, durch den eine zur Wellenlänge relative Leitungslänge bei gleicher Frequenz verkürzt wird, wenn die Permittivität ϵ_r des Substrates steigt.

Die folgende Liste fasst die Vorteile beider Substratsysteme zusammen:

Vorteile der HF-Leiterplatte:

- geringe Toleranz der Permittivität (*RO3003*)
- hohes TCE (angepasst an Kupfer und Aluminium)
- Möglichkeit des Mehrlagenaufbaus
- große Substratplatten >(20 x 20)inch² verfügbar
- niedrige Produktionskosten bei kleinen und mittleren Stückzahlen
- niedrige Initialisierungskosten

Vorteile von LTCC

- geringe Toleranz der Permittivität (*DuPont 951*)
- bessere thermische Leitfähigkeit
- geringes TCE (angepasst an Silizium und GaAs)
- hervorragend geeignet für Mehrlagenmodule
- Integration von Kavitäten und R-, L- und C-Komponenten
- sehr robust gegen mechanischen und thermischen Stress (hermetisch dicht)
- geringe Materialkosten bei Silberleiterbahnen
- niedrige Produktionskosten bei mittleren und großen Stückzahlen

3 Weltweite LTCC-Materialhersteller und Service-Produzenten

Im weiteren wird die LTCC-Technologie, sortiert nach Materialien, Herstellern und Anwendern detailliert beschrieben, um ihre Einsatzmöglichkeit deutlicher hervorzuheben. Im Handel sind im wesentlichen 4 LTCC-Systeme verfügbar. Unter System verstehen die Autoren die ungebrannten Keramikfolien in verschiedenen Stärken und mit unterschiedlichen Permittivitäten, zu denen auch immer ein Satz Siebdruckpasten gehört, die in ihren Eigenschaften der Keramik angepasst sind. Ihre Hauptbestandteile sind Gold oder Silber. Es wird unterschieden zwischen Pasten für den äußeren und inneren Siebdruck von Leiterbahnen bzw. für das Füllen von Durchkontaktierungen. Darüber hinaus sind angepasste Leiterbahnen geeignet zum Lötten oder Bonden.

Tabelle 2: Beispiele für weltweiten Foundry-Service

Foundry	Land	LTCC-Materialsysteme	Produktion
ACX	Taiwan	DuPont 951, Ferro A6, ACX	90.000 Sq.-Foot-Facility
ATC	USA	ATC K30, DuPont 951, Ferro A6, Heraeus CT2000	8''x8'' Nutzen, mittlere und große Stückzahlen
C-MAC (SEI Scrantom)	Deutschland, USA	DuPont 951, Heraeus CT800, Ferro, ESL, Emca	5''x5'', 8''x8'' Nutzen; große Stückzahlen
CoorsTek	USA	DuPont 951	Große Stückzahlen
CTS	USA	DuPont 951, Ferro A6, Heraeus CT700	>100.000 Sq.-Foot-Facility
EPCOS	Österreich	NEG MKE-100, NEG MLS-41, DuPont Pasten	6''x6'', 8''x8'' Nutzen, große Stückzahlen
IMST	Deutschland	DuPont 951, Ferro A6	3,5''x3,5'' Nutzen, Prototypen
MSE	Deutschland	DuPont 951	Mittlere Stückzahlen
National Semiconductors	USA	DuPont 951, 943, Ferro A6	6''x6'' Nutzen, große Stückzahlen
NIKKO	Japan	AG2, AG3	5''x5'' Nutzen, 25k/Monat
Northrop Grumman	USA	Ferro A6, DuPont 951, NG ($\epsilon_r=3.9$, $\tan\delta=7 \times 10^{-4}$)	6.000 Sq.-Foot-Facility
Samsung, ThinkCera	Korea	TLC-4B, TLC-6A, TLC-7A, TLC-10H, TLC-20B	in Kürze verfügbar
Selmic	Finnland	DuPont 951	mittlere Stückzahlen, Prototypen
TAHLES-Microelectronics	Frankreich	DuPont 951, Ferro A6	>10.000 Sq.-Foot-Facility 6''x6'' Nutzen, 10 mil./Jahr
Via electronic	Deutschland	DuPont 951, Heraeus CT700	mittlere Stückzahlen
Vispro (Kyocera America)	USA	Ferro A6, DuPont 951	5''x5'', 6''x6'' Nutzen
VTT	Finnland	DuPont 951, 943, Ferro A6, Heraeus	kleine Stückzahlen, Prototypen

Es werden aber auch Widerstandspasten für den Druck auf Außen- und Innenlagen angeboten. Selbstverständlich können Dickschichtwiderstände und -leiterbahnen auch nach dem Sinterprozess auf die Außenlagen gedruckt werden. Solche LTCC-Systeme, die für HF-Anwendungen in Frage kommen, werden u.a. von *DuPont* (951 und 943: low loss), *Ferro* (A6M und A6S), *Heraeus* (CT700, CT800 und CT2000) und *Electro-Science Laboratories* (ESL) angeboten. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von LTCC-Kompositen, die ohne eigenes Pastensystem angeboten werden. In der Regel sind diese kompatibel zu Pasten anderer Hersteller. Beispiele dafür sind *CeramTec* und *Nippon Electric Glass* (NEG).

Weltweit gibt es Firmen, die die Produktion von LTCC-Modulen in unterschiedlichen Stückzahlen anbieten, sogenannte foundries. Die meisten dieser Firmen greifen auf die Standard-LTCC-Materialien zurück. Einige haben jedoch auch eigene Systeme entwickelt und bieten diese an. Ein potentiell Problem dabei ist, dass unter Umständen kein Zweitanbieter (second source) mit diesen Materialien arbeitet, was heute ein wichtiges Kriterium für viele Produkte sein kann. *Tabelle 2* zeigt eine Auswahl von weltweiten LTCC-Modulherstellern, die verwendeten Materialien und deren Produktionskapazität, soweit diese Informationen verfügbar waren.

Darüber hinaus gibt es viele Hersteller, die ihre Produktionskapazitäten nicht als Foundry-Service anbieten, da dort eigene Produkte gefertigt werden, dazu gehören u.a.: *Bosch*, *Hitachi* und *Murata*.

4 LTCC-Herstellungsprozess

Die Prozessschritte zur Verarbeitung von LTCC-Materialsystemen von der ungebrannten Keramikfolie bis zur Inspektion des fertigen Moduls sind bei allen Herstellern ähnlich (*Abb. 1*). Die wichtigsten Stationen der Fertigung sind im folgenden am Beispiel der Prototypenlinie der *IMST GmbH* beschrieben. Diese ist so angelegt, dass die gefertigten Substrate absolut baugleich mit entsprechenden Produkten der großen Fertiger sind.

Die „grüne“ Ausgangsfolie wird auf der Rolle oder als konfektionierte Coupons geliefert. Nach dem zuschneiden auf die passende Größe wird die Keramikfolie mit einem YAG-Laser bearbeitet, der auch für den Abgleich von Widerständen Verwendung findet. Aus den Layout-Daten wurde vorab ein Programm extrahiert, das nun den Laserstrahl führt und so die Löcher für die Durchkontaktierungen, die Positionierungslöcher und Kavitäten beliebiger Größe und Form in die Keramik schneidet. Eine Absaugvorrichtung hält die Oberfläche des Werkstücks frei von Verunreinigungen. In der Volumenproduktion werden die Löcher eher ausgestanzt. Spezielle Stanzen, in denen mehrere Werkzeuge gleichzeitig eingesetzt werden, schießen bis zu mehreren zehntausend Löchern pro Minute in das Werkstück. Für kleinere Serien ist ein Laser jedoch flexibler und preiswerter, das Resultat beider Verfahren ist vergleichbar.

Im nächsten Bearbeitungsschritt werden die Löcher mit Leiterbahnpaste gefüllt. Dies geschieht im Siebdruckverfahren: Eine Edelstahlschablone mit gleichem Lochmuster wird über die Keramik gelegt. Mittels einer Rakel, die über das Sieb gefahren wird, wird die Paste in die Öffnungen gedrückt und gleichzeitig durch ein Vakuumnest unter der Keramik angesaugt. Auf diese Weise entstehen leitende Verbindungen durch die Substratebene, wobei Standarddurchmesser von 250 μm , 150 μm aber auch 100 μm erreicht werden. Im nächsten Schritt werden die Leiterbahnen im Siebdruckverfahren aufgedruckt. Hier lässt sich eine Auflösung ca. 100 μm (Leiterbahnbreite und -abstand) erreichen. Mit feineren Sieben und feinkörnigen Pasten lassen sich auch deutlich schmalere Leitungen realisieren. Will man die Auflösung noch weiter erhöhen, können fotostrukturierbare Leitungen aufgebracht werden (z.B. *Fodel* von *DuPont* oder *TC2301PI* von *Heraeus*).

Nachdem alle Einzelschichten bedruckt und getrocknet wurden, erfolgt eine optische Inspektion. So können fehlerhafte Lagen frühzeitig aussortiert werden. Die einzelnen Lagen werden jetzt gestapelt. Im einfachsten Fall geschieht dies durch aufziehen auf ein Werkzeug, das Passstifte an den Stellen der Positionierlöcher aufweist. In der Produktion übernehmen Stapelmaschinen die Aufgabe der μm -genauen Positionierung. Der Stapel wird anschließend gepresst. In der Fertigung werden häufig uniaxiale Pressen eingesetzt, in denen der LTCC-Stapel zwischen zwei aufgeheizten parallelen Platten gepresst wird. Da die Platten nie vollständig parallel sind und das Werkstück auch nicht ideal plan ist, ergeben sich nach dem Sintern größere Toleranzen in den Abmessungen. Module mit Kavitäten sind schwierig in der uniaxialen Presse zu la-

minieren, da hoher Druck auf die Ränder und kein Druck auf die inneren Lagen ausgeübt wird. Alternativ wird isostatisches Laminieren eingesetzt, bei dem der LTCC-Stapel in einer mit Wasser gefüllten Druckkammer verpresst wird. Der Druck wirkt gleichmäßig auf alle Stellen des Werkstücks. Spezielle Hilfsmittel garantieren, dass der Stapel plan bleibt und Kavitäten nicht deformiert werden. Dieses Verfahren wird daher im Prototypenprozess der *IMST GmbH* angewendet.

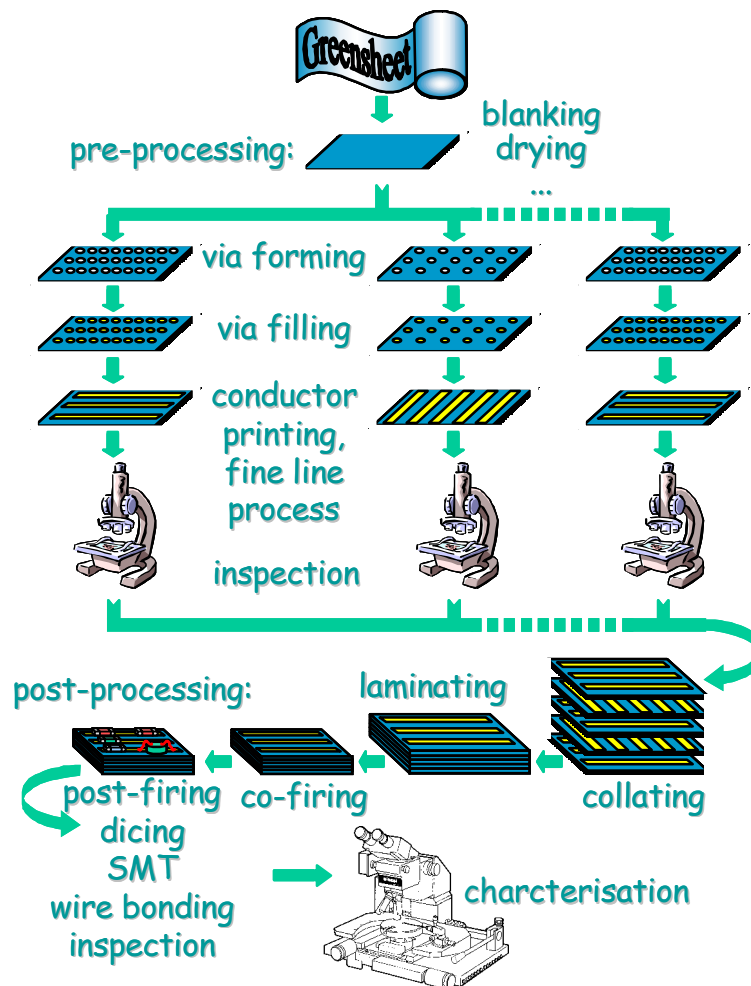


Abb. 1: Prozessschritte zur Herstellung von LTCC-Modulen

Nach dem Laminieren, das mit 3000 psi unter 80°C durchgeführt wird, wird der Stapel im Ofen gesintert. Dabei ist ein dem LTCC-Material angepasstes Temperatur-Zeit-Profil einzuhalten. In der ersten Phase wird der Ofen mit ca. 2-5°C pro Minute bis auf 450°C aufgeheizt. Dabei entweichen die organischen Lösungsmittel vollständig. In weiteren 30 Minuten wird die Temperatur auf ca. 880°C erhöht und der Verglasungsprozess setzt ein. Diese Temperatur wird ca. 15 Minuten gehalten und danach wird der Ofen langsam abgekühlt. Der gesamte Prozess dauert ca. 3 Stunden. Damit ist der co-firing Prozess abgeschlossen. Der Keramikstapel ist ausgehärtet und fertig für weitere Inspektionen und Nachbearbeitungen. Übliche Arbeiten sind das Drucken weiterer Leiterbahnen oder Widerstände (als post-firing bezeichnet), das vereinzeln der Schaltungen aus dem Nutzen, das Bestücken mit SMD-Komponenten und das Aufbringen und Bonden von Chips. Abschließend können Schaltungen und Antennen im IMST vermessen werden. Hierfür stehen besondere Einrichtung für die Charakterisierung von HF-Parametern zur Verfügung.

5 Anwendungsbeispiel LMDS-Modul

LMDS steht für local multipoint distribution services. Damit ist ein digitales, lokales Funksystem gemeint, mit dem örtlich begrenzte Bereiche (z.B. Städte oder große Firmengelände) mit einem Datenfunknetz versorgt werden können. An zentralen Stellen werden Multipoint-Basisstationen (Relais-Stationen) eingerichtet, die Daten über ein Funknetz mit einzelnen Teilnehmern austauschen. Über diese Funkstrecken können lokale Computernetze, digitale Telephonie, digitales Video und andere Dienste übertragen werden. Bestimmte Frequenzbereiche sind für diese Anwendungen vorgesehen. Europäische Organisationen wie CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) oder ERO (European Radio Communication Office) geben Empfehlungen für die Verwendung dieser Bänder heraus. Eine dieser Empfehlungen heißt „T/R 13-02“ und befasst sich mit dem Frequenzband von 24,5 bis 26,5 GHz.

Entsprechend dieser Norm wurde ein Sende-/Empfangsmodul entworfen, gefertigt und bestückt (Abb. 2). Als Substrat wurde *Ferro A6M* LTCC mit Goldleiterbahnen auf den Außenlagen und Silberleiterbahnen in den Innenlagen verwendet. Insgesamt werden 5 Substratlagen benötigt. Die monolithisch integrierten GaAs-Schaltungen wie Verstärker, Mischer und Dämpfungsglieder (*Att*) wurden in Kavitäten versenkt, um optimale HF-Übergänge von den Schaltungen zum LTCC-Substrat zu erhalten. Andere Baugruppen dieser Anwendung sind direkt in LTCC realisiert worden. So sind alle Bandpassfilter (*BP*) als vergrabene Streifenleitungsfilter realisiert, so dass DC-Versorgungsleitungen störungsfrei darüber hinweggeführt werden können. Ebenso wurde ein Frequenzverdreifacher (*tripler*) und ein Wilkinson-Leistungsteiler in LTCC integriert. Gehäusewände werden auf dem LTCC-Substrat aufgesetzt und sind mit dem Deckel verbunden. Im Substrat selbst werden diese Schirmwände durch eine doppelte Zaunreihe aus Durchkontaktierungen fortgesetzt. Mit dieser Technik lässt sich eine optimale Schirmung der drei Schaltungszweige (Sende-, Empfangs- und LO-Zweig) erreichen. Die HF- und DC-Anschlüsse sind mit geeigneten Konnektoren, die im Aluminiumgehäuse befestigt sind, aufgebaut. Wie in Abb. 2 dargestellt, erhält man ein sehr kompaktes Modul mit den Innenmaßen 30x55mm.

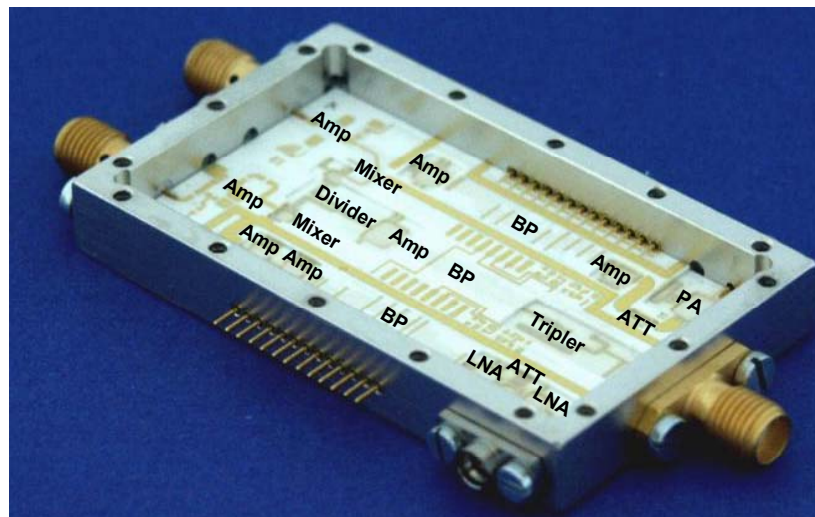


Abb. 2: Sende-/Empfangsmodul für 24,5 bis 26,5 GHz (LTCC-Substrat: 5 Lagen Ferro A6M)

6 Weitere Informationen

Broschüre „LTCC – An Introduction and Overview“ der IMST GmbH, Ausg. August 2001

Internetseite <http://www.ltcc.de>