

第2章 マイクロ波受動回路とその応用

このPDFは、CQ出版社発売の「実用マイクロ波技術講座-集積回路と応用-第6巻」の一部分の見本です。内容・購入方法などにつきましては是非以下のホームページをご覧ください。
<http://www.cqpub.co.jp/hanbai/books/79/79761.htm>

2.1 多層基板を応用したセラミック部品と集積回路

近年、マイクロ波装置、たとえば、携帯電話などの無線通信機器が一般に広く普及し、その小形軽量化が進んでいる。これら無線通信機器の高周波回路の中で使用される各高周波部品には、その性能の向上はもとより、小形・薄形・軽量化が強く求められている。このような要求を実現する方法として、まず半導体集積回路（IC、特にマイクロ波領域で動作するものは MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit) と呼ばれる）が思い当たる。MMIC はいわば能動回路素子の集積回路である。一方、高周波回路にはフィルタ、インピーダンス整合素子など、多数の受動回路も使用されている。受動回路素子を複合・集積化するものとして、セラミック多層基板が非常に有効であり、最近とみに注目されている。多層基板を応用したセラミック部品・素子としては、伝送線路に始まり、コンデンサ（以下Cと記す）、コイル（以下Lと記す）、共振器などの基本素子、及びこれらの素子を複合して構成されるフィルタ、方向性結合器（以下、カプラーと記す）、バルン、高周波スイッチ、アンテナ等の機能部品が実用化され、各種無線機器の高周波回路に広く使われている。重要なことは、多層基板のこのような高周波素子を複合する能力は、単に個別の回路機能をコンパクトに実現することにとどまらず、これら個別の機能を一つの基板の中で立体的に結合し、もっと大きな規模で回路ブロックを複合、集積化できることである。

さらに、多層基板は各種受動回路を集積できると同時に、トランジスタ、MMIC などのアクティブ素子を基板表面または内部に実装できるため、能動回路まで含めた広範囲

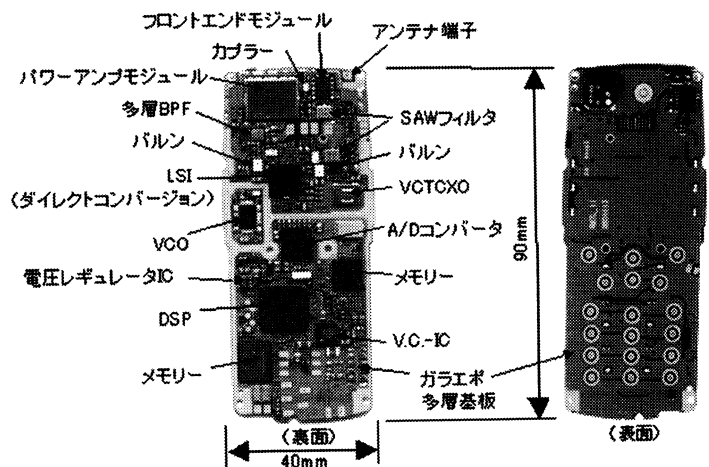


図 2.1 最近の携帯電話の例（欧州 GSM デュアルバンド機）

な集積回路を実現することが可能である。オペアンプなどがその例であり、後述する。

なお、図 2.1 に最近の携帯電話の内部基板の写真を参考までに示した。欧州 GSM デュアルバンド機で、ダイレクトコンバージョン方式を採用したものである。

2.1.1 セラミック多層基板とパッシブ・インテグレーション

(1) 多層基板

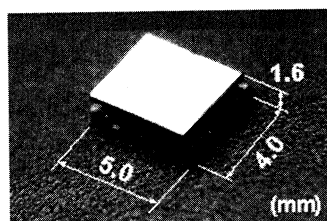
多層基板とは、一般に、導体層と誘電体層（または磁性体層）を交互に積み重ねた基板、といえる。誘電体（磁性体）の材質としては、セラミックあるいは樹脂が使われ、最近ではこれらセラミックと樹脂とを複合したものも提案されている。一方、導体の材質としては、セラミックの場合は焼結した銀または銅が、樹脂の場合は箔状の銅が、それぞれ使われる。セラミック系の多層基板と樹脂系の多層基板とは、それぞれ一長一短があり、用途に応じふさわしい場所に使い分けられている。

セラミック系の多層基板は 1000℃前後の温度で焼結されたものである関係で、樹脂に比べて硬く、耐湿度（吸湿）性、耐熱性、熱伝導性に優れ、L、C、共振器などの素子をその内層に高精度に構成できる（ $\pm 2 \sim 3\%$ ）。また、一般に高周波特性に優れている。しかし、焼結体であるため脆く、加工性が悪く、重いため、大きな基板には不向きである。したがって、セラミック系の多層基板は、高精度な受動素子（各種フィルタ、カップラー、バルン、アンテナスイッチなど）を高密度に内蔵させた回路、およびそれらを複合した適度な大きさの機能モジュールに適している。

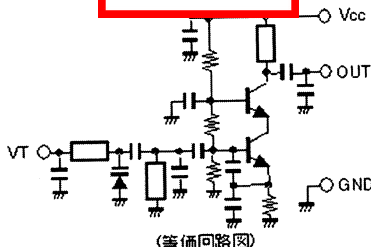
一方、マイクロ波・高周波回路用の低損失な樹脂基板材料として、テフロン（ $\epsilon_r = 2.5$ ）が有名である。多層基板としては、その強度をあげるため、ガラス繊維をクロスに編みこみ、テフロン・ガラス多層基板として実用に供されている。高周波領域での低損失を活かし高性能な伝送線路、また機能モジュール用基板として使われる。

樹脂系の多層基板として最も普及しているのは、ガラス・エポキシ（エポキシ樹脂中に、ガラスクロスを編み込んだもの、略してガラエポなどと呼ぶ。 $\epsilon_r = 4.2$ ）を用いたものである。ガラエポは、高周波特性はテフロンほど良くないが携帯電話など 3GHz 程度以下の周波数での通常の使用時には実用上問題は無く広く使われている。図 2.1 に示した携帯電話の内部のマザー基板にはガラエポ多層が使用されている。ガラエポ多層基板は高周波回路のみならず、一般の回路実装用基板として極めて広く利用

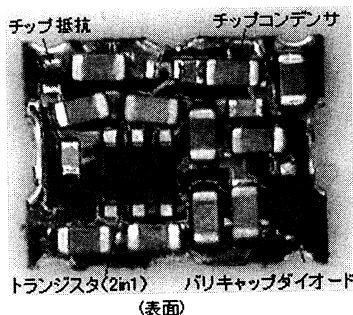
見本



(外観)



(等価回路図)



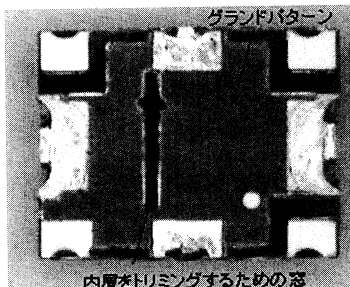
チップ抵抗

チップコンデンサ

トランジスタ(2in1)

バリキャップダイオード

(表面)



グラウンドパターン

内層をトリミングするための窓

(裏面)

図 2.2 ガラエポ多層基板上に構成された VCO の例
(等価回路と実装基板)

されているため、その量産効果により、コスト的には樹脂系・セラミック系を問わず断然安価になっている。樹脂多層基板は一般に、樹脂がベースのため、軽く、加工性が良く、また、導体として銅箔を使用していることで導体損失が小さいことが利点である。しかし、セラミック多層基板と比較し耐湿性、耐熱性

は低く、熱伝導性もあまり良くない。また、樹脂多層基板の場合、内層の導体層はほとんど配線用として使われている。内層の導体層は配線その他、Lの一部として設計されているが、Cを内蔵させることはほとんどない。その理由は、量産精度が10~20%程度と粗いからである。しかしこれは樹脂多層基板の欠陥というより、現在実用化されている量産プロセスが、もともと大形の配線基板用として設計されており、高精度な素子を埋め込むことを前提としてこなかったことに起因する。高周波部品への応用としては、VCO（電圧制御発振器）が有名である。内層に、共振器を構成するトリプレート形のインダクタを埋め込み、外部からレーザートリミングによりL値を調整することで発振周波数を±0.1%レベルで制御している。参考までに図 2.2 に代表的な小形・薄形 VCO の写真及び等価回路を示した。

なお、本章では、高周波回路を、より高性能・高密度に集積するという観点から、セラミック多層基板について詳述してゆく。

(2) セラミック多層基板 (LTCC) の材料と製造工程

セラミック多層基板は、しばしば LTCC と呼ばれる。これは、Low Temperature Co-fired Ceramics の頭文字をとったものである。低温同時焼成セラミック、というわけだが、その所以は次のとおりである。セラミック単体の焼成温度は、たとえばア



ルミナの場合 1,600℃といった高温として埋め込む導体の融点は、Ag の場合約 960℃、銅では約 1,060℃である。多層基板ではセラミックと導体を重ねて同時に焼成するわけだから、その焼成温度は少なくとも導体の融点より低くなければならない。したがって多層基板の誘電体セラミックは必然的にこれら導体の融点よりも低い温度で（同時）焼成できるものとなる。このような事情により、セラミック多層基板のことを LTCC と呼ぶようになったようである。さて、セラミック多層基板は必ず誘電体と導体を組み合わせて（同時焼成）構成するわけだが、導体材料としては地球上で得られる導体としては銀（Ag）と銅（Cu）がその導電率の高さ（いずれも $6 \times 10^7 \text{ S/m}$ （25℃）、理科年表より）で双璧であり、どちらかが採用されている。銀（Ag）を使うか銅（Cu）を使うかで、セラミック材料も変わって来る。銀または銅と同時焼成できるセラミック材料系がそれぞれ開発され、今日実用に供されることとなった。焼成後の導体としての性質はほとんど変わらないが、焼成時、銅は空気中では酸化してしまうため、窒素などの雰囲気中で焼成するところが最大の違いである。

次に、セラミック多層基板の製造工程の一例を図 2.3 に示す。

まず、所望の誘電体をグリーンシート化する。（焼成前の誘電体シートをグリーンシートと呼ぶ。平たく言うと、粉末状に粉砕された誘電体材料を、有機材料であるバインダーを「つなぎ」として「生八橋」のような柔らかいシート状にしたもの。）適切な大きさに

切断したグリーンシートに、ビアホールを形成するための孔を、メカニカルなパンチングまたは、レーザーパンチング法にてあける。このシートに厚膜ペースト化した導体をスクリーン印刷し、ビアホールを埋めるとともに、各シート上に設計された回路パターンを形成する。このようにして導体ペースト印刷済み誘電体

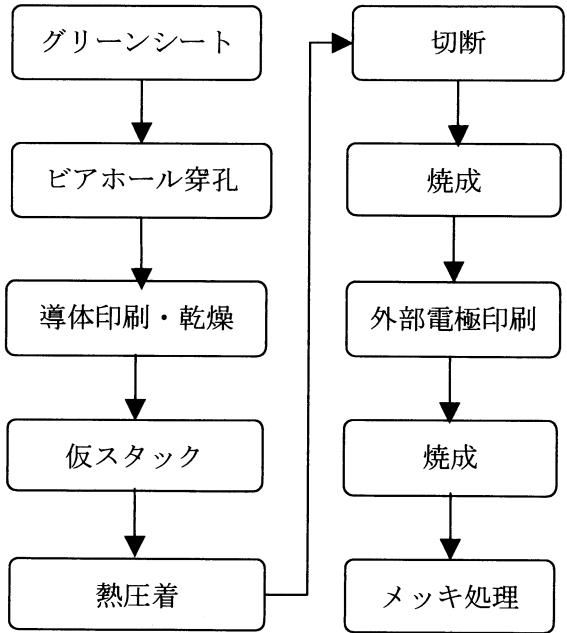


図 2.3 セラミック多層基板の工程

シートを必要な層数だけ作製しておき、次にこれらを精密に位置あわせした上で所定