

報告番号	甲 第 13307 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 レーザによるガラス貫通電極の形成とその  
応用に関する研究  
(Study of Through Glass Via Formation  
by Laser and Its Applications)

氏 名 佐藤 陽一郎

## 論 文 内 容 の 要 旨

ガラスは将来の System on Package (SOP) における実装基板の材料の有望な候補である。ガラス実装基板の実現には、ガラス貫通電極 (TGV: Through Glass Via) の形成が欠かせない。本研究では、これまでほとんど開発が行われてきていないポリマーラミネートガラスへの TGV 形成の課題を解決して、信頼性、及び生産性の高い TGV 形成方法を示した。また TGV を形成したガラスの用途について、TGV 技術が特に活きる展開先として、“3D ガラス IPD”、及び“非平衡大気圧プラズマ”を提案し、有用性を実証し、新しい応用を開拓してきた

本論文は 5 章で構成されており、以下に各々の章の概要を示す。

第 1 章では、本研究の背景と目的を述べた。過去 60 年の間、半導体回路は驚異的なスピードで微細化が進んできた。しかし近年は技術、経済の両側面から、半導体回路の微細化の速度が緩やかになってきている。そこで昨今、半導体実装技術を進化させることにより、半導体回路の微細化のみに頼らない方法で半導体デバイスの高機能化、小型化を実現する動きが始まっている。その潮流の中で、これまではマザーボード上に存在した種々の機能を大面積の実装基板上に搭載し、システムレベルでの小型化、最適化を図る SOP と呼ばれるアイデアが提唱されている。SOP を実現する為には、SOP のプラットフォームとなる大面積かつ微細配線が可能な実装基板の実現が鍵となる。その実装基板の基材には平坦性等の物理的特性、電気的特性、機械的特性等の複合的な要素が求められ、樹脂系やシリコン系等の現行の材料では実現が難しい。そのような状況の中で、近年 SOP 向けの実装基板材料として新たにガラスが提案されている。ガラスは大面積で平坦な表面を実現でき、電

氣的特性、また形状安定性等の機械的特性も優れており、SOP 向け実装基板の材料として潜在的に適している。しかし、ガラスはこれまで実装基板に適用された実績は無く、その実現の為には様々な開発課題が存在する。その中でも TGV 形成はガラス実装基板特有の大きな課題の 1 つである。特に大面積ガラスのハンドリングに優れたポリマーラミネートガラスへの TGV 形成は、これまで開発が行われていない。そこで本研究ではポリマーラミネートガラスに対し、信頼性、及び生産性の高い TGV の形成方法を探索し提案することを第 1 の目的とした。そして、その TGV 技術が特に活きる展開先を提案し、実証することを第 2 の目的とした。

第 2 章では、ポリマーラミネートガラスに最適な TGV 形成方法について述べた。本研究では信頼性、及び生産性の観点からレーザー加工に注力して TGV 形成方法の探索を行った。ガラスへの吸収率の観点から、CO<sub>2</sub> レーザ ( $\lambda=9.3 \mu\text{m}$ )、UV レーザ ( $\lambda=355 \text{ nm}$ ,  $266 \text{ nm}$ )、ArF エキシマレーザ ( $\lambda=193 \text{ nm}$ ) を選択し、100~180  $\mu\text{m}$  厚の無アルカリガラスの両面に 20  $\mu\text{m}$  厚のポリマーフィルムをラミネートしたポリマーラミネートガラスへの加工を実施した。CO<sub>2</sub> レーザはその加工原理が振動励起による熱加工の為、ガラス内のクラックの原因となる内部応力の発生が避けられなかった。その為、CO<sub>2</sub> レーザによる TGV はその信頼性に懸念がある。UV レーザは、短波長による加工により CO<sub>2</sub> レーザで見られたような内部応力に起因するクラックの発生は見られなかった。しかし、ガラスに吸収されず透過したレーザーエネルギーが出射側のポリマーにダメージを与え、それがポリマーの変性や剥離を引き起こした。ArF エキシマレーザは短波長、低繰り返し周波数による加工により、熱の影響をさらに小さくでき、内部応力が低く直線的でダレの無い形状の孔加工が可能であった。また波長が短く、ガラスへの吸収率が 90 % 以上と非常に高い為、出射側のポリマーへのダメージも抑制できた。続いて ArF エキシマレーザで孔加工し、その後メタライゼーションを実施した TGV に対し、その熱機械的信頼性を検証する為、 $-55^{\circ}\text{C}\sim-125^{\circ}\text{C}$  の熱サイクル試験を実施した。その結果、1,572 サイクル後にも、最も欠陥の発生が懸念されていた各材料間の接合部においても、ガラスや銅にクラック等の明らかなダメージは見られなかった。一方で、熱サイクル試験後のサンプルで、レーザー出射側の TGV 周辺のポリマーに剥離が見られた。これはレーザー加工時にレーザーの透過光、またはアブレーション時の衝撃に起因してレーザー出射側の TGV 周辺のポリマーの密着力が低下し、熱サイクル試験中の熱応力により剥離欠陥として顕在化したと考えられる。そこで、シランカップリング剤による前処理を導入しポリマーの密着力を改善したところ、剥離欠陥を抑制できた。すなわち ArF エキシマレーザとシランカップリング剤による前処理を用いる事で、ポリマーラミネートガラスに対し信頼性、及び生産性の高い TGV を形成できる。

TGV の応用について次に述べた。

第 3 章では高周波受動部品の更なる高密度集積と小型化を可能にする 3D ガラス IPD のコンセプトを提案し、実証した。IPD (Integrated Passive Device) は受動部品の高密度実装技術の 1 つで、1 枚の基板の上にインダクタ、キャパシタ、抵抗等の複数の受動部品回路を

形成したものである。IPDの基板としてガラスは既に使用されているが、現在のガラスIPDは基板の片面のみに素子を形成した、いわゆる2D構成のものである。本研究で提案する3DガラスIPDは、ガラスIPDにTGVを導入する事により基板両面に素子形成が可能になり、IPDの更なる高密度集積と小型化を実現するものである。本研究では、3DガラスIPDのコンセプトを実証すべく、基板の両面にローパスフィルタ(LPF)を形成した3DガラスIPDの設計、製作、評価を行った。100  $\mu\text{m}$ 厚のガラスを基材としたポリマーラミネートガラスを用いたデザインルールを作成し、それを基に配線層内に複層平面スパイラルインダクタ平行平板キャパシタを組み合わせたLC型のLPFを設計した。TGVはArFエキシマレーザで形成し、セミアディティブプロセスで配線形成を行った。その後、素子を個片化し、BGA(Ball Grid Array: プリント配線板との接続を担う一定間隔で並んだ球状のソルダー)にてプリント配線に表面実装を実施した。製作した3DガラスIPDのLPFは、配線層厚の偏差が原因と考えられるカットオフ周波数のズレは観測されたものの、フィルタ特性は通過帯域で挿入損失が-1 dB程度、減衰帯域で-20 dB程度と実用にも適う良好な特性を示した。またTGV有無での比較により、TGVの挿入はフィルタ特性に顕著な劣化を及ぼさないことを示した。プリント配線板に実装後の特性は、更に5%程度のカットオフ周波数のズレが観測されたが、これはBGA部の寄生インダクタンスの影響と考えられる。今回のデモンストレーションにより、ガラス基板の両面に配置したLPFは良好に機能し、受動部品の高集積化を実現する3DガラスIPDのコンセプトが実証できた。

第4章ではTGVの新しい展開先として、非平衡大気圧プラズマへ適用を示した。非平衡大気圧プラズマは、ガス温度が低温であり、大掛かりな真空装置が不要になることから幅広い分野への応用が期待されている。ガラス実装基板の製造においてもプラズマ処理は必須の技術であるが、特に工業的応用では、高い電子密度を広い処理範囲で実現できるプラズマ源が必須である。そこで、高誘電率材料の表面に沿って発生する沿面放電をプラズマ源に導入するアイデアを考案した。沿面放電はガス中の放電に比べ放電が拡がりやすく、また低電圧で放電が発生するという特徴がある。そこでプラズマ源の材料、及び構成を工夫することにより、沿面放電を発生、そして制御できれば、これを利用して処理範囲を拡張できる可能性がある。そこで本研究では、脆く、また材料コストの高い高誘電率材料の代わりに、TGVガラスが使えないかを検討した。TGVはガラス内にある数10  $\mu\text{m}$ オーダーの金属の構造体である為、TGVの存在する領域は高誘電率を持つ有効媒質と見なすことができる。そこで本研究では、50 mm幅の非平衡大気圧プラズマ源の内壁にTGVガラスを用いた時に、発生するプラズマへの影響を検証した。その結果、TGVガラスを導入した際は、放電開始電圧が低下し、また放電がガス流に流されにくくなる様子(沿面モードと呼称)が確認された。放電開始電圧の低下は、TGVの挿入により電位分布が変化し、電極、TGV間に強い電場が発生した為、起こった現象だと考えられる。またTGVアレイの領域は、放電にとってマクロ的な視点では高誘電率を持つ有効媒質と見なされ、放電と内壁内の有効媒質間の相互作用が強まる結果、沿面モードへの遷移が見られたと考えられる。ま

た更に放電電圧の低下や沿面モードの遷移は、TGV を電極付近に配置したとき程、顕著に現れた。これは TGV を電極付近に配置することにより、電極付近の電位勾配が更に急峻になった為である。このように TGV のプラズマ源への導入は沿面放電の発生を促す。また TGV の配置を工夫することにより、任意の位置に沿面放電を起こす方法を見出した。

本研究で示した TGV 形成を含むガラス実装基板製造技術が確立できれば、それは SOP 実現の重要なプラットフォームとなり、半導体デバイスの新たな進化軸となる。また本論文で TGV の非大気圧プラズマ源への展開を示した通り、ガラスのユニークな特徴を活かした TGV は他分野への展開性も大いに秘めている。