

レーザーによるガラス貫通電極の形成とその応用
に関する研究

佐藤 陽一郎

目次

第1章 序論	1
1.1. 背景.....	1
1.1.1. System on Package とその実装基板.....	1
1.1.2. ガラス実装基板の課題.....	6
1.1.3. ガラスの誘電理論と TGV(Through Glass Via)アプリケーション	12
1.2. 本研究の目的と本論文の構成	16
第2章 レーザによるポリマーラミネートガラスへの TGV 形成.....	18
2.1. 背景.....	18
2.2. 実験方法	19
2.2.1. 材料	19
2.2.2. ポリマーラミネートガラス.....	20
2.2.3. レーザ孔加工.....	22
2.2.4. TGV メタライゼーション.....	24
2.2.5. 熱サイクル試験	26
2.2.6. 観察・評価方法	26
2.3. 実験結果	29
2.3.1. CO ₂ レーザ	29
2.3.2. UV レーザ	30
2.3.3. ArF エキシマレーザ	32
2.4. 考察: 欠陥のないレーザ孔加工について	32
2.4.1. CO ₂ レーザ	33
2.4.2. UV レーザ	37

2.4.3. ArF エキシマレーザ	40
2.5. 考察: TGV の熱機械的信頼性	43
2.6. まとめ	50
第 3 章 TGV の IPD (Integrated Passive Device) への応用	52
3.1. 背景.....	52
3.2. ローパスフィルタの設計	54
3.2.1. 3D ガラス IPD の構成.....	54
3.2.2. インダクタ.....	55
3.2.3. キャパシタ.....	56
3.2.4. ローパスフィルタ	57
3.3. 3D ガラス IPD の製作	59
3.4. 3D ガラス IPD の評価	62
3.5. まとめ	66
第 4 章 TGV の大気圧プラズマ源への応用.....	68
4.1. 背景.....	68
4.2. 実験方法	69
4.2.1. TGV 基板.....	69
4.2.2. 50mm 非平衡大気圧プラズマ源	70
4.2.3. プラズマ特性の評価方法	73
4.3. 実験結果	76
4.3.1. TGV の無いガラスをプラズマ源内壁に用いたとき	76
4.3.2. TGV ガラスをプラズマ源内壁に用いたとき	80
4.3.3. TGV の位置の影響の検証.....	84
4.3.4. 電子密度測定	86

4.4. 考察.....	88
4.4.1. 放電開始電圧が低下する理由に関して.....	88
4.4.2. 浴面モードになる理由に関して	91
4.5. まとめ	93
第5章 結論および将来展望	95
5.1. 総括.....	95
5.2. 結論.....	97
5.3. 将来展望	97
参考文献.....	99
謝辞	112
論文目録.....	114

第1章 序論

1.1. 背景

1.1.1. System on Package とその実装基板

Intel の創業者の 1 人である Gordon Moore が 1965 年に唱えた “半導体の集積密度は 18 カ月で倍増する” という Moore の法則に則った半導体の進化は、過去 60 年間、個人デバイスからインフラに至るまでのすべての IT 機器の進化を支えてきた [1, 2]。近年はその半導体回路の微細化の速度が緩やかになり、集積密度の増加ペースが緩やかになってきている [3]。微細化の進展速度の鈍化の理由は、半導体のテクノロジーノードが 2020 年現在 10 nm 以下と原子サイズに近い領域にまで迫ってきており、トランジスタのリーク電流による電力消費やトランジスタ特性のバラツキの抑制が物理的に困難になってきているためである [4]。これまでは微細化で得られるメリットが、技術進化に伴う開発、及び製造コストの増加を上回ることによりカバーされ、1 トランジスタ当たりのコストダウンが継続されていた。微細化が極限的に進んだ現在では、次のノードに移行しても開発、及び製造コストの回収が見込めず、経済的な側面からも半導体の進化の鈍化は避けられない [2]。図 1-1 は国際技術ロードマップ (the International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)) が 2015 年に発行した半導体回路の微細化 (High performance logic デバイスのゲート長) のロードマップであるが、2021 年以降、微細化の進化は止まると予想している [5]。

電子機器では移動体通信機器の第 5、6 世代 (5G、6G) 通信や人工知能 (AI) 技術等に代表されるように、今後も技術革新が見込まれる。その為、その基幹部品である半導体の更なる高性能化、小型化は必要不可欠である。

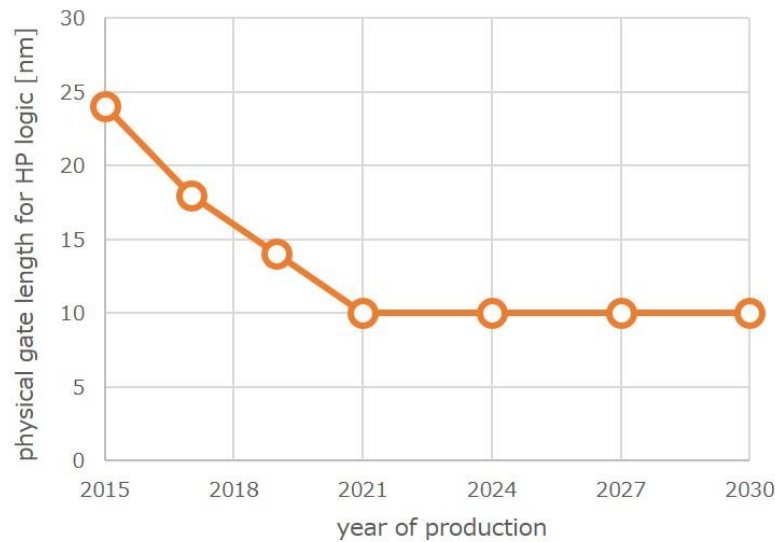


図 1-1 ITRS による半導体回路微細化のロードマップ

そこで近年、半導体の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 [6]。例えば、図 1-2 に示すような複数の半導体チップを 3 次元的に積層する 3D 実装や、高密度サブストレート基板（インターポーザ）上に半導体チップを水平に複数並べる 2.5D 実装は、半導体回路を微細化せずに高密度化、高性能化、低コスト化を達成する現実的な方法として、今後主流となることが予想される。究極的には、図 1-3 に示すように、デジタル回路に加え、RF 回路、受動素子、センサ、パワー素子等のこれまではマザーボード上に存在した機能を、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、最適化を図るアイデアも提唱されている。これは半導体回路の微細化により 1 つの半導体内にシステムを構築するこれまでのコンセプト System on Chip (SOC) に対し、1 つの半導体パッケージ内にシステムを構築する System on Package (SOP) と呼ばれている [7]

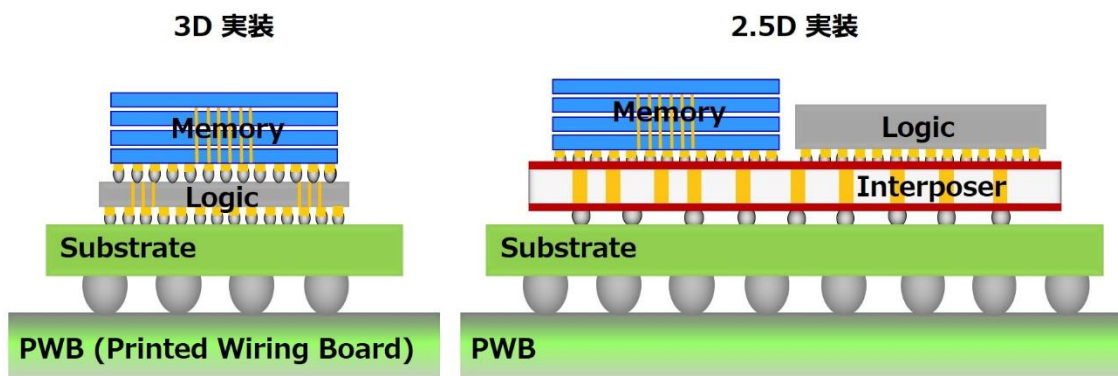


図 1-2 3D 実装と 2.5D 実装

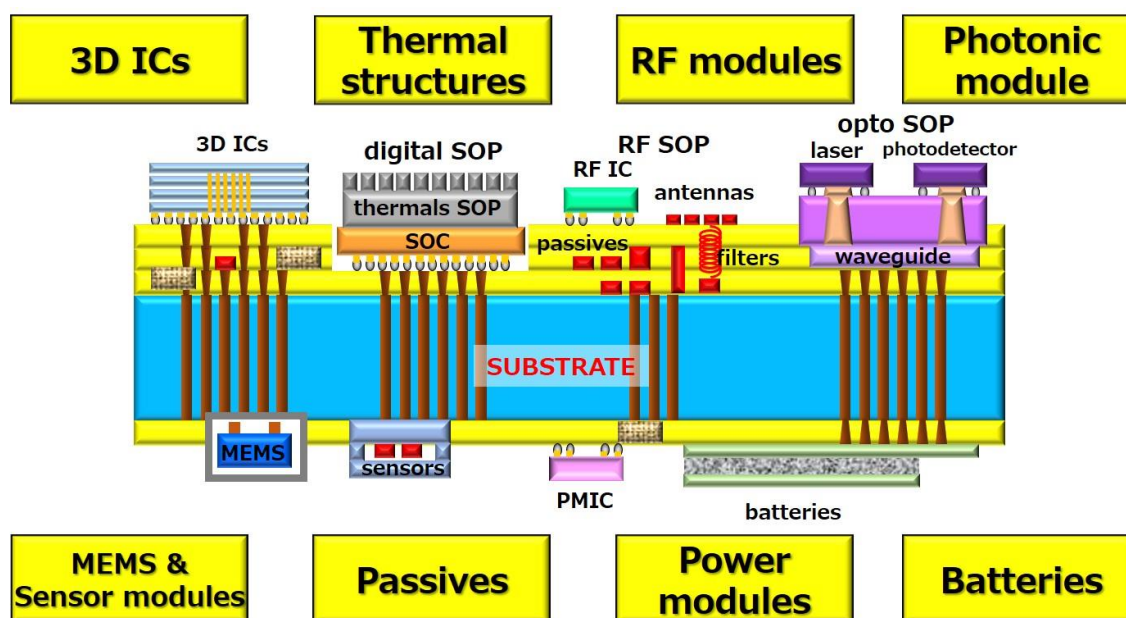


図 1-3 System on Package の概念図

パッケージ上にシステムを構築する SOP のプラットフォームとなる実装基板のコア材料には、低誘電率、低誘電損失等の電気特性、微細配線形成時に重要になる平坦性等の物理特性、熱伝導性や耐熱性等の熱的特性、基板の反りやプロセス安定性に直結する機械的特性、耐薬品性等の化学的特性、信頼性、そして産業的な観点から製造コスト等、複合的な特性・要素が求められる。これまでの実装

基板の主な材料は大別すると樹脂系、シリコン系、セラミック系であるが、SOPでの使用を想定すると、それぞれ課題を抱えている。表 1-1 に各材料の比較を纏めた。

樹脂系の材料では、主にガラスエポキシ基材に代表されるように、ガラスクロスに樹脂を含浸させたものが一般的である。樹脂基板もこれまで樹脂材料の改良、内包するガラスクロスやフィラー量の増加による低熱膨張率化、ガラス転移点 (Tg) 高温化を実現し、配線の微細化、及び半導体の入出力端子を接続するパンプ間隔の微細化に対応してきた。しかし、樹脂材料に起因する熱的安定性、また複合材料であることによる平坦性や形状安定性における限界は、SOP 用途で必須となる大面積における微細配線形成において大きな課題である。

表 1-1 SOP 実装基板としての各材料の比較

特性	理想的な特性	樹脂	シリコン	セラミック	ガラス	ポリマーラミネートガラス
電気的特性	低誘電率、低誘電正接 高抵抗	○	×	○	○	○
物理的特性	高平坦性（低うねり、 低粗さ）	×	○	×	○	△
熱的特性	高熱伝導性（放熱性） 高熱安定性（耐熱性）	×	○	○	△	△
機械的特性	高剛性、高弾性率 形状安定性	×	○	△	○	○
化学的特性	高耐薬品性	△	△	○	○	△
信頼性	周辺材料と近い熱膨 張率	△	△	△	○	○
コスト	パネル拡張性 プロセス成熟度	○	×	△	○?	○?

シリコンインターポーザに代表されるようなシリコンをベースとした基板では、半導体回路製造プロセスで培った BEOL (Back End of Line) 技術による微細配線形成が可能である。また優れた放熱性、高い弾性率に依る反りの低減、半導体にマッチした熱膨張率等、シリコン基材は樹脂が抱えていた課題を解決しうる [8]。しかしながらシリコンは他材料に比べ材料コストが高く、また BEOL 技術のプロセスも高価である。さらに基本的には既存の製造ラインを活用し 300 mm ウェハでの生産となる為、SOP のような大きなサイズの実装基板では取り数が悪く、製造コストが高いという課題がある。またシリコンは半導体である為、TSV (Through Silicon Via) を含む伝送線路の損失が大きく、特に高周波信号の伝送には向かないという欠点もある。

セラミック基板は電気特性や放熱性に優れ、高周波用途、パワー用途、照明用途等に用いられてきた。しかし、焼結工程における材料収縮の影響で微細化が難しく、またパネルサイズの拡張 (大面積化) は困難である。さらに結晶化時に粒界が現れ平坦な表面を得ることが難しく、またセラミック基板の配線形成で使われる印刷技術では微細化した配線は製造できないという欠点がある。

上記するように、これまでの実装基板の材料は、それぞれ本質的な課題を抱えている。そのような状況の中、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 [9]。ガラスはディスプレイ用途で利用されているように、大パネルサイズで非常に平坦な表面を実現できる。その為、その平坦性、及び形状安定性により、シリコンインターポーザと同等の微細配線が大面積で実現できる可能性がある。また近年のガラス成形技術の進化により、100 μm 以下の超薄板基板が直接成形でき、シリコンやセラミックのように薄板を得る為の研究が必要ない。ガラスは化合物であることから、組成を最適化することにより優れた電気特性を実現でき、その結果良好な伝送特性も実現できる。さらに組成に

より熱膨張率の調整も可能であり、アプリケーションに合わせて熱膨張率を最適化することで、反りの低減や信頼性の向上が期待できる。

このようにガラスは、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、他材料に比べ開発要素が大きいことも事実である。次節にガラス実装基板の開発課題を述べる。

1.1.2. ガラス実装基板の課題

ガラスを実装基板に適用する際には下記、及び図 1-4 に示すような複数の懸案事項が存在する [10]。

- ・ 最適ガラス材料の選定
- ・ 大サイズ薄板ガラスのハンドリング
- ・ ガラス貫通孔加工
- ・ ガラス貫通孔メタライゼーション
- ・ RDL (Redistribution Layer: 再配線層) 形成
- ・ 1次実装、2次実装
- ・ 電気特性 (伝送特性)
- ・ 信頼性
- ・ その他

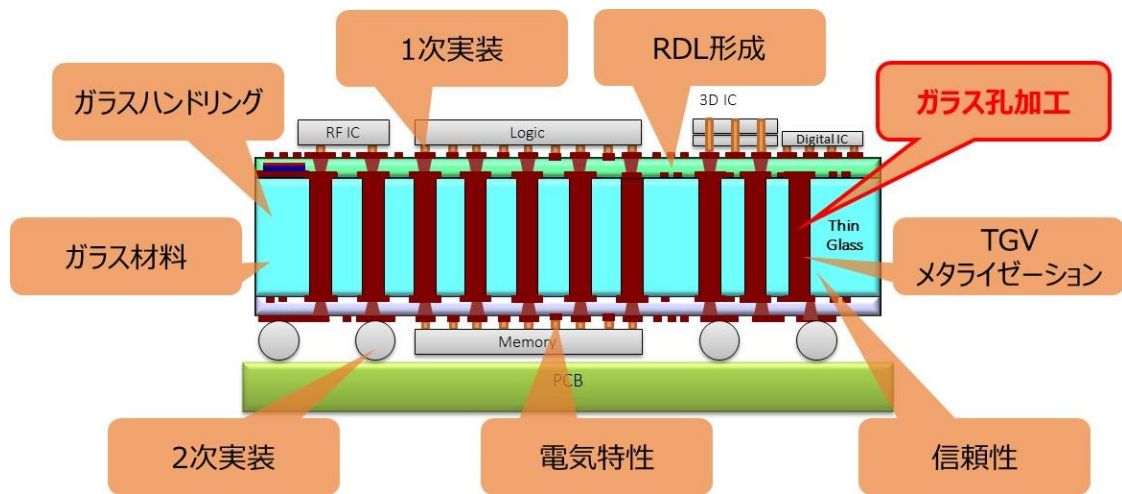


図 1-4 ガラス実装基板の課題

本論文では便宜上、ガラス貫通孔を“ガラス孔”、または“孔”と表現し、それにメタライゼーションを施しガラス貫通電極としたものを“TGV (Through Glass Via)”と表現する。

本論文の主題はガラス孔加工である。また大面積薄板ガラスのハンドリングは難易度が高く、ガラス実装基板特有の課題である。

大サイズ薄板ガラスのハンドリング

ガラス実装基板では、アプリケーションにもよるが、そのコア材となるガラスの厚さはおおよそ $100\sim 500\ \mu\text{m}$ 程度である。また樹脂基板の製造サイズを考慮すると、製造時の大きさは $500\ \text{mm}$ 角程度が想定される。図 1-5 に $100\ \mu\text{m}$ 厚のロールに丸められた薄板ガラスを示す。製造時はこのような薄くかつ大きいガラスパネルに対し、様々なプロセスを実施する必要があり、そのハンドリングは非常に大きな課題である。



図 1-5 100 μm 厚超薄板ガラス

まずガラスの割れについて考える。ガラスは割れやすいというイメージがあるが、本来その化学結合力は強く、例えばキズの無いシリカガラスファイバーの強度は液体窒素温度で約 10~20 GPa、室温で 5~6 GPa 程度である [11, 12, 13]。しかし、実用強度はガラスの表面に存在する無数の微細な傷（マイクロクラック）の影響で 2 桁程度小さい値である。ガラスの場合、そのマイクロクラックの先端部が非常に鋭い為に、印加された応力がマイクロクラック先端に集中し、クラックが一挙に進展し割れに至る。(1-1)式は破壊力学の観点から Griffith により導かれた式であり、破壊靱性を K_{IC} [MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$]、クラックの大きさを c [m]、クラック形状による定数を Y とすると、クラックが伸展する許容応力 σ_c [MPa]は(1-1)式で表される [14]。

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{Y \cdot c^{1/2}} \quad (1-1)$$

このようにクラック伸展する許容応力はマイクロクラックの大きさの平方根に反比例する。ガラスサイズが大きくなると、そのようなクラックの存在確率が増え、また自重によるたわみも大きくなる為、割れる確率が高くなる。また曲げによって加わる応力はガラスの厚さの 2 乗に反比例する為、大面積ほど、また薄いほどガラスのハンドリングは難しい。逆にガラスを割らない為には、マイク

ロクラックをできるだけ発生させない、そして発生したマイクロクラックを拡大させるような応力を加えないことが重要である。

そこでガラスのハンドリング性を向上させるアイデアのひとつとして、薄板ガラスの両面に熱硬化型ポリマーフィルムをラミネートする構成が提案されている [15]。熱硬化型ポリマーフィルムをガラス表面にラミネートすることにより、図 1-6(a)のようにポリマーの硬化収縮、及び熱収縮によりガラス表面に圧縮応力が加わる。その圧縮応力が、ガラス表面のマイクロクラックを拡大させる引っ張り応力を抑制する。またポリマーフィルムがガラス表面を覆うことにより、外部からの衝撃を和らげる効果もある。その為、薄板ガラスであってもガラスが割れにくくなり、薄板ガラスのハンドリング性が著しく向上する。

ガラスの表面をポリマーで被覆しても、基板全体の体積比はガラスが支配的である為、剛性、形状安定性、熱膨張率等はガラスの特性と大きく変わらず、ガラスの優位性を引き継ぐ。平坦性に関しては、均一で平坦なガラスが基材となるポリマーラミネートガラスは、ガラスクロスを含む樹脂基板に比べ、うねりが小さい。一方で、ポリマーラミネートガラスの表面粗さはポリマー表面の粗さとなり、 R_a (算術平均粗さ) がナノ～サブナノメートルオーダーのガラスに対して劣る。これは微細配線形成 (特に配線幅が数マイクロメートル以下) や高周波伝送回路 (特にミリ波以上) における伝送損失に影響する。その為、微細配線形成時や高周波伝送用途においては、より粗さの小さいポリマーフィルムを選定する必要がある。同様に、耐熱性、耐薬品性は、ガラスが主材料になる為、一般的に樹脂材よりは優れるものの、ガラスと比べると劣る為、プロセスやアプリケーションに応じて適切なポリマーを選択する必要がある。他材料と比較した時の実装基板材料としてのポリマーラミネートガラスの特徴を表 1-1 に示した。

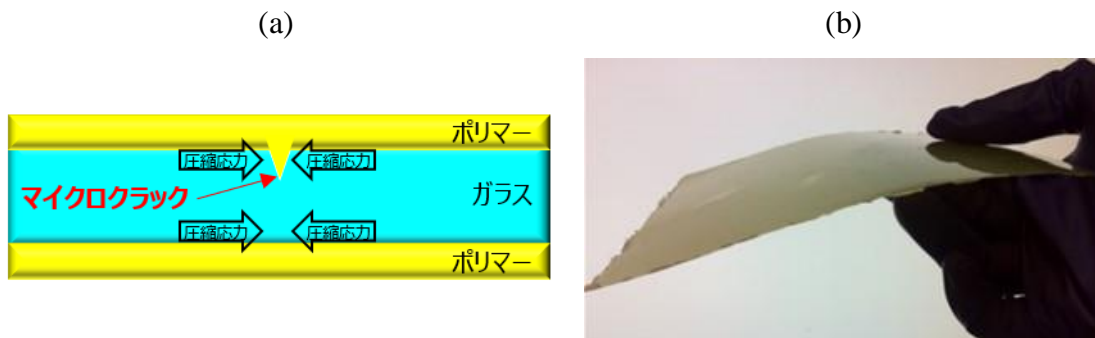


図 1-6 ポリマーラミネートガラス; (a)ポリマーによるガラスのハンドリング性向上の概念図、(b)20 μm のポリマーフィルムを両面にラミネートした 50 μm 厚の超薄板ガラス

ガラスに対し、ポリマーの被覆により基板表面の粗さは劣化するものの、それが配線形成工程において役立つこともある。プリント配線板製造工程におけるメタライゼーションのシード層成膜工程においては、スルーホールへの金属膜の付きまわり、及びプロセスコストの観点から、無電解めっきによる成膜が採用されている。しかし、ガラスの表面は非常に平坦で物理的吸着（アンカー効果）が得られないことから、無電解めっきによる成膜が難しい [16]。そこでポリマーフィルムをガラス表面にラミネートすることにより、物理的なアンカー効果が得られるようになり、無電解めっきによる金属成膜が適用可能になる。

ポリマーラミネートガラスの一例として図 1-6(b)に 20 μm 厚のポリマーフィルムを両面にラミネートした 50 μm 厚の超薄板ガラス基板を示す。

ガラス孔加工

ガラスの微細加工は、これまで様々な技術開発が行われているが、特にガラス実装基板のアイデアが提唱された 2010 年以降、ガラスへの微細孔加工の開発が世界中で精力的に行われてきている。具体的には、エッチング加工、機械的加

工、レーザ加工、放電加工（図 1-7）、さらにはそれらを組み合わせた方法等、様々な加工方法が提案されている [17, 18, 19]。

ガラスの微細孔の工法の多くは、難加工性のガラス材料への孔加工に最適化されている。その為、ガラスとポリマーという加工性が全く異なる複合部材であるポリマーラミネートガラスには適用ができない。またポリマーラミネートガラスは複合部材であるが故、その異種材料間に界面が存在する。孔加工においてその界面に欠陥を発生させてしまうと、そこが応力集中の起点になり、またその後のプロセスで薬品等が流入し、ポリマーの剥離等の更なる欠陥に発展してしまう。その為、ポリマーラミネートガラスへの孔加工は、ガラス単体への孔加工に比べて難易度が高い。逆にガラスに孔加工を実施した後に、ポリマーをラミネートする方法では、ポリマーラミネート後に孔部のポリマーを選択的に除去する必要が有る。これはプロセスコストがかさむ上に、孔領域を選択的に加工するときのアライメント精度による課題、またポリマーを残渣なく完全に除去できなければ信頼性が劣化する懸念もある。その為、ポリマーラミネートガラスに対しポリマー及びガラスを一括で、かつそれぞれの材料と界面に欠陥を作らない方法で孔を形成しなければならない。この事は大きな課題であり、本研究のテーマの1つである。

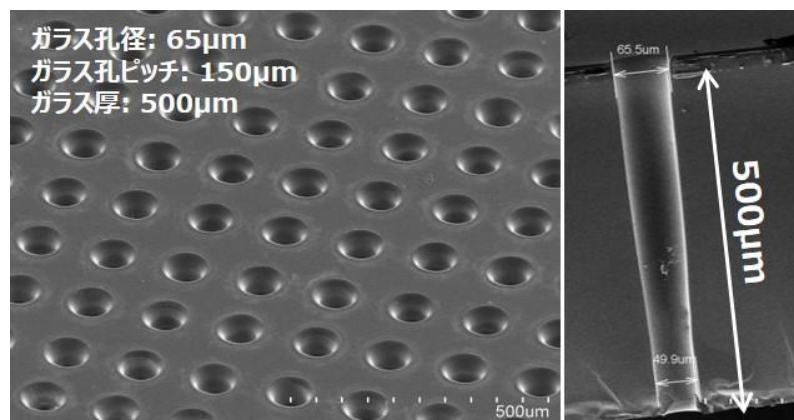


図 1-7 ガラス微細孔加工の例; 放電加工

1.1.3. ガラスの誘電理論と TGV(Through Glass Via)アプリケーション

1.1.1 にて実装基板におけるガラスの潜在的優位性について述べた中でも電気特性はガラスの大きな優位点の 1 つである。そこで本項ではガラスの誘電特性に関する学理を述べ、それが活かせる TGV のアプリケーションについて考える。

誘電体に外部電界が印加されたときに材料内で電荷の偏り、すなわち誘電分極が発生する。微視的な立場から物質内に引き起こされた誘電分極を考えると、誘電分極にはいくつかのメカニズムが存在する。1 つは図 1-8(a)のように原子内の電子と原子核が互いに電界と逆方向に変位することによって発生する電子分極である。次に図 1-8(b)のように正負イオン核が逆方向に変位することによって発生する原子分極（イオン分極）がある。これらは電界が存在することによって初めて発生する誘起双極子である。一方で、図 1-8(c)のように物質内の永久双極子が電界方向に向きを変えることによって発生する双極子分極（配向分極）もある。

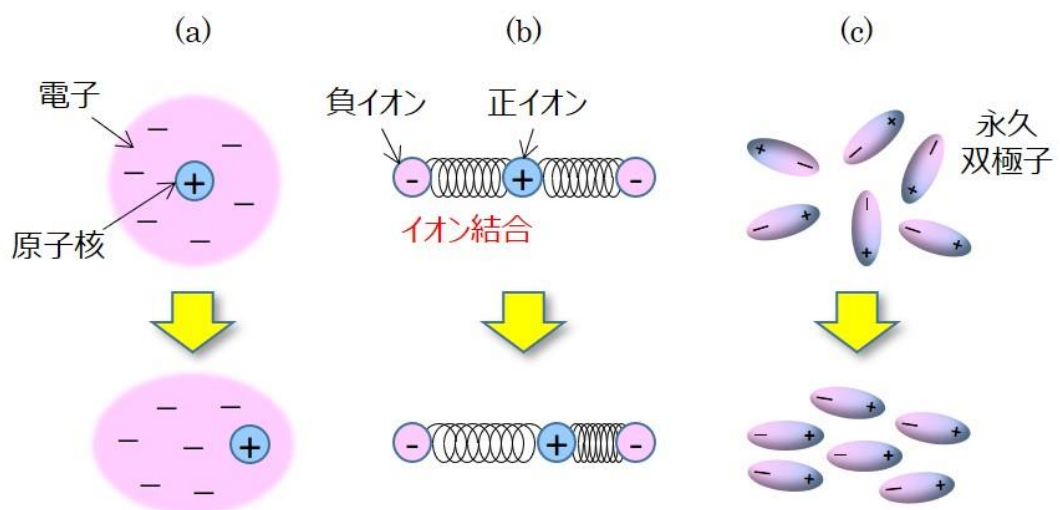


図 1-8 誘電分極の種類; (a)電子分極、(b)原子分極、(c)双極子分極

誘電体に交流電界を印加した時、周波数が低いうちは、上記の三つの分極メカニズムのすべてが電界に追従できる為、誘電分極はそれらの総和となる。一方で、各メカニズムによって応答可能な周波数が異なり、そのカットオフ周波数を超えると、そのメカニズムは電界に追従できなくなる。その為、周波数が高くなるにしたがって、カットオフ周波数を超えるごとに成分が減っていき真空の誘電率のみが誘電分極に寄与するようになる。

物質の複素誘電率を $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ と表すと、実数部 ϵ' は外部電界から材料へのエネルギーの蓄積量を表し、虚数部 ϵ'' は外部電界に対する材料のエネルギーの損失を表す。そして一般的な誘電体の ϵ' 、及び ϵ'' の周波数依存性は図 1-9 のようになる。

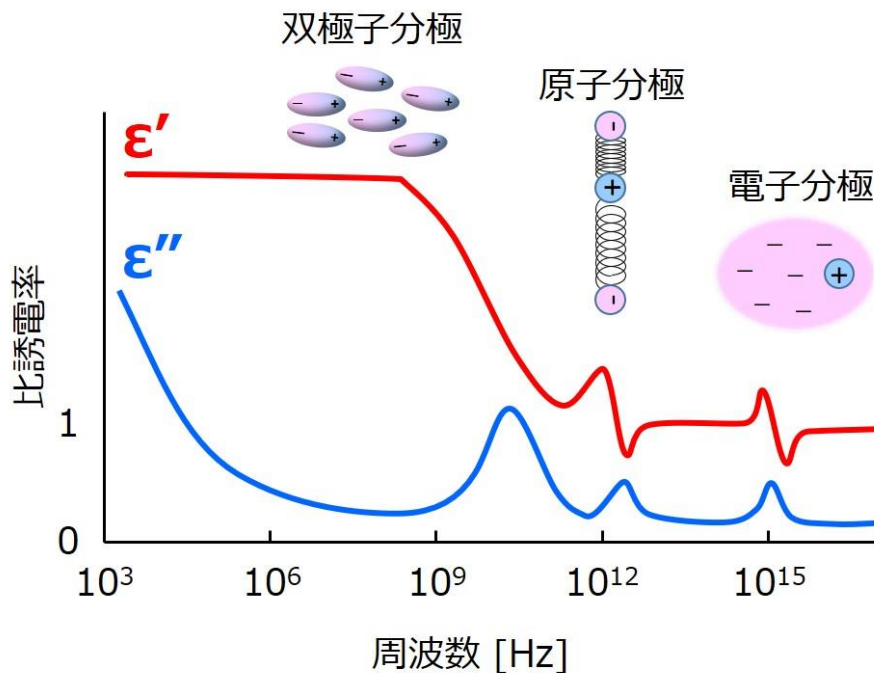


図 1-9 誘電体の誘電率の周波数依存性

ガラスは化合物であり、その組成に依っては導電性を有するものもあるが、板ガラスや容器ガラスなどの実用的な酸化物ガラスの多くは、室温での導電率が $10^{-11} \text{ Scm}^{-1}$ 以下であり絶縁体に分類される [20]。ガラスの中ではイオンや電子は拘束されて自由に移動する事ができない。絶縁体は電場の大きさに比例して、イオン結合や原子核に対する電子雲が本来の位置からわずかに変位する誘電性を示し、その特性はガラスの組成に依って異なる。

例えば、一般的な窓ガラス等に使われるソーダライムガラスは、非架橋酸素を生成しガラスの粘度を下げ熔融を容易にするために、 Na_2O や K_2O 等のアルカリ成分が含有されている [21]。これらの一価のアルカリ金属は、ガラス構造中での束縛が弱く動きやすい。その為、アルカリ金属を添加するほどに、特に MHz ~GHz の周波数にかけて誘電率が大きくなり、また温度に依る誘電率の変化も大きくなる [22]。

それに対し、半導体製造工程におけるフォトマスク等に使用される合成石英ガラスは、非架橋酸素が存在しない非周期的な Si-O-Si の完全なネットワークのみで構成されており、構造が非常に剛直で安定している。またアルカリ金属等の動きやすいイオンが一切存在しない為、その誘電率は非常に低い。しかし、その熱安定性により熔融温度が非常に高い為、大面積での大量生産は難しい [23]。

液晶パネルや電子回路基板用には無アルカリアルミノホウケイ酸ガラスが使用されている。液晶パネル等の製造工程においてガラス中のアルカリ成分が溶出すること防ぐ為、アルカリ成分を除き、 Al_2O_3 や B_2O_3 を加えたものである。アルカリ金属のような動きやすいイオンが除かれたことで誘電率が低くなり、またその誘電率の温度変化も小さいという特徴が有る [24]。

表 1-2 に典型的なソーダライムガラス、合成石英ガラス、無アルカリガラスの誘電特性を含む物性値を示す。

表 1-2 典型的なソーダライムガラス、合成石英ガラス、無アルカリガラスの物性値

			ソーダライム ガラス	合成石英 ガラス	無アルカリ ガラス
熱的 特性	熱膨張率	ppm/K	8.7	< 1	3.6
	ガラス転移点	°C	550	—	710
機械的 特性	密度	g/cm ³	2.5	2.2	2.5
	ヤング率	GPa	73	74	76
電氣的 特性	抵抗率	log($\Omega \cdot \text{cm}$)	7	13	13
	誘電率	@10kHz	10	4	5.5
	誘電正接	@10kHz	0.02	0.0001	0.001

本研究では、生産性が高く、特に～数 GHz 帯域まで誘電率が低く安定しており、またその温度変化も小さいという無アルカリガラスの特徴を活かした 2 つの TGV アプリケーションを検討した。

1 つは、高周波用途での実装基板である。無線通信で使用されるような高周波用途の実装基板では、これまで述べたような誘電特性を始めとしたガラスの優位性が強く反映される。特に本研究では、ガラス実装基板に受動部品を作り込んだガラス IPD (Integrated Passive Device) の製作を行った [25]。ガラス IPD は既に一部のメーカーにて製造されているが、これらはすべて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 [26]。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、また TGV を利用した機能等も付与できるようになる。そこで、本研究では TGV を利用し、両面に GHz 帯のローパスフィルタを作り込んだ 3D ガラス IPD の製作を行い、そのコンセプトを実証

した。

もう 1 つは、kHz 帯における TGV の全く新しい用途として、非平衡大気圧プラズマのプラズマ源への適用を検討した。詳細な背景は 4.1 節で述べるが、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、製造時のワークサイズは数 100mm サイズで大きい為、真空装置の不要な非平衡大気圧プラズマは魅力的である。広い処理範囲が必要な用途への展開の為に、プラズマ源を高効率化し、広範囲で高プラズマ密度を実現する必要がある。そこで本研究では、プラズマ源の高効率化の為に、TGV をプラズマ源に適用するアイデアの検証を行った。

1.2. 本研究の目的と本論文の構成

将来の SOP の実装基板材料としてガラスは期待が大きい。既存の材料に対しガラスは複数の潜在的な優位性を持っている。しかし、ガラス実装基板の実現には TGV 形成が大きな課題である。特に大面積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。

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 の目的とする。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。

はじめに、レーザーによる TGV 形成について述べる。

第 2 章では、ポリマーラミネートガラスに最適な TGV 形成方法を提案する。ここではレーザー加工に集中して、複数種のレーザーによる加工検証を行った結果を報告する。また特に ArF エキシマレーザーで加工した TGV に関して、その熱機械的信頼性について議論する。

次に TGV を用いた応用について述べる。

第3章では、ガラスの優位性が最も活きる高周波向け実装基板において、TGVを利用した3DガラスIPDのコンセプトを提案し、実証を行ったので、その設計、製作、評価結果について報告する。

第4章では、TGVの全く新しい用途として、非平衡大気圧プラズマへの展開を議論する。非平衡大気圧プラズマの課題であるプラズマ源の高効率化に向け、プラズマ源の内壁材料にTGVを挿入し、そのときに発生するプラズマについて調べたので報告する。

第5章では、本論文の結論と本研究の将来展望について述べる。

第2章 レーザによるポリマーラミネートガラスへの TGV 形成

2.1. 背景

1.1.2 項で述べたように、ポリマーラミネートガラスに対しポリマー及びガラスを一括で、かつ信頼性の高い、すなわちそれぞれの材料と界面に欠陥の少ない孔を形成する事は、ガラス実装基板を実現する上での大きな課題である。そこで本章では、ポリマーラミネートガラスへの最適な TGV 形成方法について述べる。

ポリマーラミネートガラスへの最適な孔加工を検討するにあたり、サンドブラストや超音波ドリルのような機械加工は、孔周辺に微細なクラックやチップングを発生させ信頼性の高い TGV を形成することが難しい為、検討から除外した [27, 28]。またウェットエッチングやドライエッチングは、ポリマーとガラスを同時に加工できるエッチャント溶液、またはガスを選ぶことが難しい [29, 30, 31]。そこで本研究ではレーザ加工に集中してポリマーラミネートガラスに最適な TGV 形成方法の探索を行った。

ガラスは一般的に可視域での吸収が少なく透明であり、その長波長側（赤外域）と短波長側（紫外域）で大きな吸収を持つ。尚、赤外域では振動励起による吸収、短波長側では電子励起による吸収である [32]。その為、赤外域、または紫外域のレーザの方がガラスに対する加工の効率が良い [33, 34]。そこで本研究では赤外域のレーザとして CO₂ レーザ（レーザ波長: 9.3 μ m）、紫外域のレーザとして Nd:YAG 第三高調波（レーザ波長: 355 nm）、及び第四高調波レーザ（レーザ波長: 266 nm）、ArF エキシマレーザ（レーザ波長: 193 nm）を用いてポリマーラミネートガラスへの TGV 形成を検証した。尚、可視域であっても、ピコ秒、またはフェムト秒レーザ等の超短パルスレーザは、多光子吸収によりガラスへの吸収率が高く、かつ熱影響層の少ない非熱加工が可能である [35]。しかしながら超短パルスが照射されて光励起された領域には強い衝撃波が発生し、その

衝撃波が形成された孔の側壁に微小クラックを発生させる [36]。その為、信頼性の高い TGV 形成が難しく、超短パルスレーザは本検討から除外した。

2.2. 実験方法

2.2.1. 材料

ガラス

本研究では無アルカリアルミノホウケイ酸ガラスである AGC 社の EN-A1 ガラスを用いた [37]。表 2-1 に EN-A1 ガラスの物性値を示す。EN-A1 ガラスの誘電率、誘電正接はソーダ石灰ガラス等と比べて低く、低遅延かつ低損失な信号伝送に寄与する。また EN-A1 ガラスの熱膨張率は広い温度域でシリコンと近く、半導体チップと実装基板との接続端子の微細化、信頼性向上に役立つ。さらに EN-A1 ガラスはフロート法と呼ばれる生産性の高い方法での製造が可能であり、生産性も優れている。

ポリマーフィルム

電気特性が優れる無アルカリガラスの優位性を活かす為には、ガラスにラミネートする熱硬化性ポリマーフィルムも誘電率、及び誘電正接が低く電気特性に優れる材料を選定する必要がある。またガラスとポリマーの界面に水分が侵入すると界面でイオンマイグレーションが発生し信頼性が低下する恐れがある為、吸湿性が低い事も重視した。そこでポリマーフィルムは、低誘電率、低誘電損失、低吸水性の日本ゼオン社の ZS-100、または Rogers Corporation の RXP4 を用いた [38, 39]。ZS-100 は表面粗さが低い ($R_a < 100 \text{ nm}$) という特徴も持つ。表 2-1 に ZS-100、RXP4 のそれぞれの材料物性を示す。

表 2-1 無アルカリガラス EN-A1、熱硬化性ポリマーフィルム ZS-100、RXP4
の物性値 [37, 38, 39]

	無アルカリガラス EN-A1	ポリマーフィルム ZS-100	ポリマーフィルム RXP4
誘電率	5.5 @10 GHz	3.0 @10 GHz	2.95 @1~12 GHz
誘電正接	0.006 @10 GHz	0.006 @10 GHz	0.004 @1~12 GHz
熱膨張率 [ppm/°C]	3.6	25	67
吸水率 [wt%]	-	0.2	0.3

2.2.2. ポリマーラミネートガラス

ポリマーラミネート

ガラス基板の表面をアセトン、IPA、純水で洗浄した後、それぞれのポリマーフィルムに合わせて 180~240 °C でラミネートをし、ポリマーラミネートガラスを作製した。図 2-1 に 20 μm 厚の ZS-100 フィルムを両面にラミネートした 100 μm 厚の EN-A1 ガラスを示す。



図 2-1 20 μm 厚の ZS-100 フィルムを両面にラミネートした 100 μm 厚の EN-A1 ガラス

シランカップリング剤による前処理

ガラスへのポリマーフィルムの密着力を向上させる為に、一部のサンプルでは、ポリマーフィルムをガラスにラミネートする前にシランカップリング剤による前処理を実施した。シランカップリング剤には 3-アミノプロピルトリメトキシシラン (APTMS) を用いた (図 2-2(a))。洗浄後のガラスにエタノールで希釈した APTMS を塗布し、15 分間 130 °C でベークした。これにより APTMS のメトキシが加水分解してガラス表面にシラノールを生成した後、ガラス表面にある水酸基と水素結合、さらに脱水縮合結合をして強固な Si-O-Si 共有結合を生成する (図 2-2(b))。アミノ基で終端した表面にポリマーフィルムをラミネートすることによりアミノ基がポリマーと反応し、カップリング層を介して密着力が向上することが期待できる。

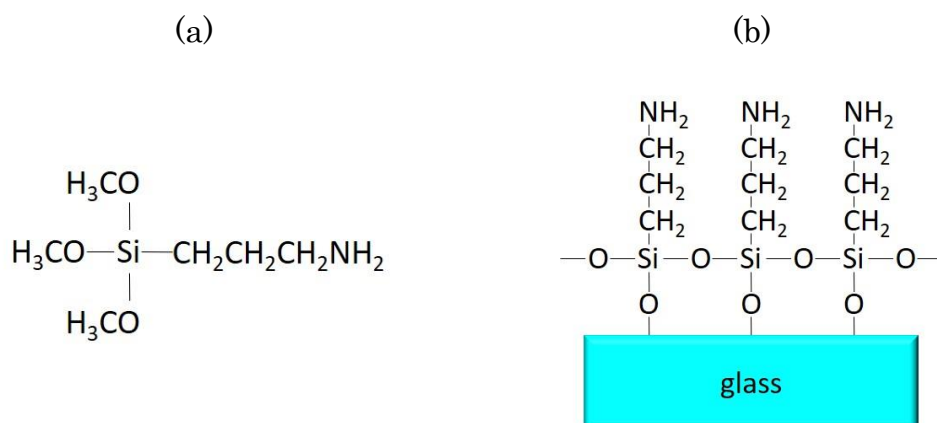


図 2-2 シランカップリング処理; (a)3-アミノプロピルトリメトキシシランの構造式、(b)ガラス上でのシランカップリング剤の反応

2.2.3. レーザ孔加工

CO₂ レーザ

赤外領域の CO₂ レーザによるスルーホールやマイクロビア加工は、プリント配線板の製造工程において一般的な技術である [40]。また過去に、Katsura 等はプリント配線板で使われている高ピークパワー・パルス CO₂ レーザを使用し、100 μm 厚のベアガラスへ 25 μm 径のガラス孔を形成したことを報告している [41]。この場合、ガルバノミラースキャンを装置に搭載することにより、ガラスにおいても毎秒 200 孔の加工が可能とのことである。

本実験では波長が 9.3 μm の高ピークパワー・パルス CO₂ レーザを搭載した三菱電機の基板孔あけ用レーザ加工機 GTW4 を用いて、ポリマーラミネートガラスへの孔加工を試験した [42]。尚、実験には 100 μm 厚の EN-A1 ガラスの両面に 20 μm 厚の ZS-100 をラミネートしたポリマーラミネートガラスを用いた。

UV レーザ

UV (Ultra Violet: 紫外) レーザは紫外光のレーザであり、CO₂ レーザよりスポット径を小さくする事ができる為、開口する孔径を小さくする事ができる。その為、プリント配線板工程においても、マイクロビア径の縮小に伴い、その加工方法が CO₂ レーザに代わり UV レーザが用いられる機会が増えてきている [40]。

本実験では、UV レーザとして Nd:YAG 第三高調波 (レーザ波長: 355 nm)、及び第四高調波レーザ (レーザ波長: 266 nm) をそれぞれ評価した。またポリマーラミネートガラスには 180 μm 厚の EN-A1 ガラスの両面に 20 μm 厚の RXP4 フィルムをラミネートしたものをを用いた。

ArF エキシマレーザ

ArF のレーザ励起波長は 193 nm であり、今回評価したレーザの中では最も波長が短い。その為、ガラス材料への吸収率が最も高く、またアブレーション効果の寄与が大きい為、ガラスへの熱ダメージの抑制が期待できる [43, 44]。しかし、加工の観点でエキシマレーザの欠点は、CO₂ レーザや UV レーザに比べて、その繰り返し周波数が低いことである。その結果、孔加工スピードを速くできない。一方でエキシマレーザは空間コヒーレンスが低いことから、図 2-3 に示すマスクプロジェクション光学系が適用でき、複数孔の同時加工が可能である。その為、孔パターンを最適化することにより、孔加工の生産性を向上させることができる。

今回使用したレーザ光学系では光源にはコヒレント社のエキシマレーザ LPXpro 220 を使い、1/10 の縮小光学系にてサンプル面で 1 mm² の領域に直径が 60 μm で 8×8 の孔が同時加工できるマスクを用いた [45]。ポリマーラミネートガラスには 20 μm 厚の RXP4 フィルムを 180 μm 厚の EN-A1 ガラスの両面にラミネートしたものをを用いた。

表 2-2 に今回の実験で使用したレーザの仕様、及びパラメータを纏めた。

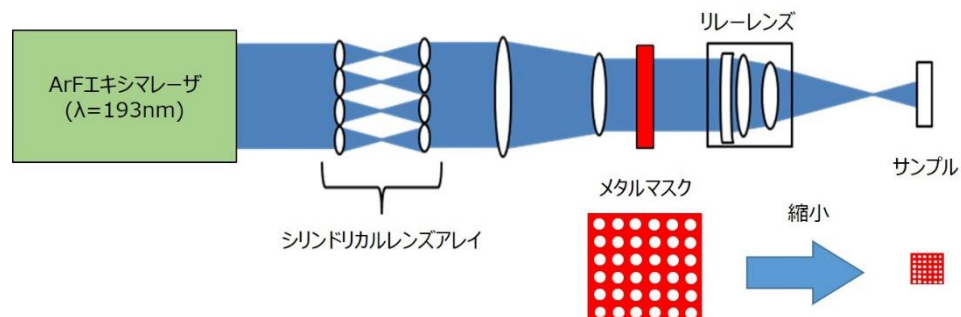


図 2-3 エキシマレーザマスクプロジェクション光学系の概略図

表 2-2 実験で使用したレーザーの仕様、及びパラメータ

レーザー	CO ₂ レーザ	UV レーザ	ArF エキシマレーザー
モデル	三菱電機社 GTW4	Micron Laser Technology 社に おける Nd:YAG レーザ	コヒレント社 LPXpro 220
波長	9.3 μ m	355 nm or 266 nm	193 nm
パルス 幅	1~5 μ sec	20~30 nsec	20~30 nsec
孔加工 プロセス	・ 複数パルスによる パーカッション加工* ・ 単孔加工	・ 複数パルスによるパーカッ ション加工* ・ 単孔加工	・ 複数パルスによるパー カッション加工* ・ マスクプロジェクシ ョンによる多孔同時 加工

*パーカッション加工： レーザビームを固定し定点に複数パルスを照射し加工する工法

2.2.4. TGV メタライゼーション

孔加工後、孔は導電物で埋められる必要があるが、そのメタライゼーション工程との親和性も最適な孔加工方法を選択する上で重要である。その為、今回の検討では孔加工後のサンプルにメタライゼーションも実施した。孔の開いたポリマーラミネートガラスに、レーザー加工によるデブリの除去、及びポリマーフィルム表面を粗化しシード層の密着力の担保することを目的に、デスマリア工程 (Atotech Securiganth MV) を実施した。具体的には樹脂を膨潤させるコンディショナー処理を行った後、過マンガン酸塩溶液でポリマーフィルムの表面を僅かにエッチングした。その後、パラジウムを触媒とした無電解銅めっき工程 (Atotech Printoganth MV) を実施し、約 0.4 μ m 厚の銅をシード層としてポリマーの表面、及び孔内に成膜した。その後、以下に示すセミアディティブプロセスと呼ばれる工法で表面配線形成を行った [46, 47]。ドライフィルムフォト

レジストをシード層で覆われたポリマーラミネートガラスの両面に貼合し、フトリソグラフィーでフォトレジストのパターニングを行った。その後、電解めっき（Atotech Cupracid AC）にて約 $10 \mu\text{m}$ の銅をフォトレジストの開口部に堆積し、フォトレジストを剥離した後、最後にシード層をエッチングにより除去することにより、表面配線を形成した。図 2-4 に上記プロセスの概要図を示す。

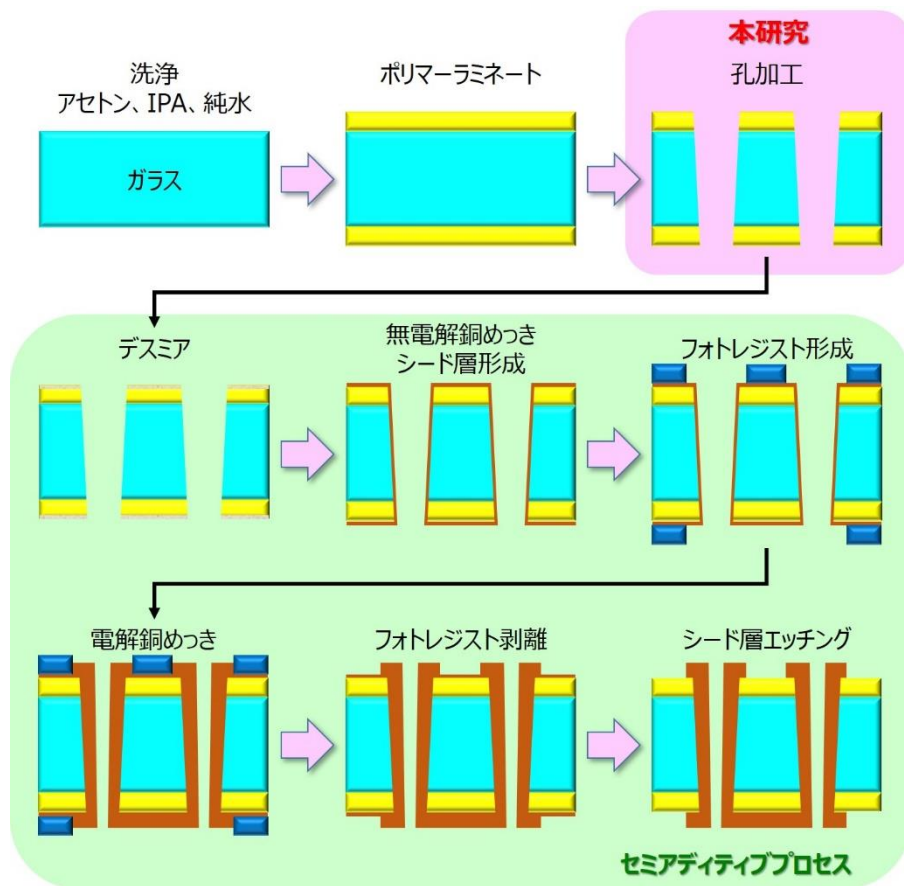


図 2-4 セミアディティブプロセスによるメタライゼーション

2.2.5. 熱サイクル試験

一部のサンプルについては、熱応力発生時の信頼性を検証する為に、熱サイクル試験を実施した。

試験用のサンプルは、試験前にプリコンディショニングと呼ばれる実運用を模した工程を実施した。具体的には、まず 125 °C のオーブンに 24 時間投入し乾燥させた。その後、保管工程を模して、米国電子回路協会 (IPC) と半導体技術協会 (JEDEC) の共通規格である J-STD-020E で定められたレベル 3 加速条件に従い温度 60°C、湿度 60 % の環境で 40 時間吸湿させた [48]。最後にはんだ接続工程を模して、ピーク温度が 260 °C のリフロープロセスを 3 回実施した。

上記プリコンディショニング工程を実施した後、JEDEC 規格の JESD22-A104E B 条件に基づいた -55 °C ~ 125 °C の熱サイクル試験を実施した [49]。

2.2.6. 観察・評価方法

光学顕微鏡によるガラス孔/TGV の表面・断面の観察

レーザ孔加工後、または TGV メタライゼーション後、ガラス孔/TGV の表面、及び断面は、落射照明の光学顕微鏡で観察を行った。尚、ガラス孔/TGV の断面は、ガラス孔/TGV の周辺を切断し小片化した後、エポキシ樹脂で包埋し、その後研磨により断面を露出させ観察を行った。

X 線検査装置による TGV の観察

X 線検査装置を用いることにより、基板内部の金属配線の状態を非破壊で観察することができる。メタライゼーション後のガラス内の TGV の状態を X 線検査装置 (Nordon DAGE XD 7600NT) を用いて観察を行った。

超音波顕微鏡観察による内部欠陥の観察

超音波顕微鏡は水浸した対象物にプローブ（トランスデューサー）から発振される超音波を照射し、対称物からの反射波を捉えて画像化する装置である。反射波は異なる材料の界面で発生し、特に空気層からは強い反射波が発生する為、外部からは観察できない構造体内部の剥離やボイド等を非破壊で観察できる。ポリマーラミネートガラスの TGV において、ポリマーの剥離等の内部欠陥検出の為に、走査型超音波顕微鏡（Sonoscan C-SAM）で観察を行った。

光弾性効果を用いたガラスの内部応力測定

ガラスは応力を受けると、その歪の大きさと向きに応じて複屈折が生じる光弾性効果を示す [50]。その為、逆に複屈折を測定することでガラス内部に発生している応力を見積もる事ができる。そこで Cambridge Research & Instrumentation 社製の複屈折イメージングシステム Abrio-IM を用いてガラスに発生している複屈折を測定した [51]。図 2-5 に Abrio-IM の光学系構成を示す。Abrio-IM では試料に 546 nm の円偏光を照射し、試料の複屈折にて変化した偏光状態を、その後の液晶光学素子、検光子を介して取得する。その際に液晶光学素子にて偏光状態を変換して複数枚画像を取得し、それらを解析することにより、試料の複屈折情報が得られる。複屈折情報は屈折率が最小の進相軸と屈折率が最大の遅相軸間の複屈折位相差（リタデーション）として得られる。基板の厚みを t 、リタデーションを R とすると、内部応力 σ は光弾性定数 C を用いて式(2-1)で与えられる [52]。

$$\sigma = \frac{1}{C} \cdot \frac{dR}{dt} \quad (2-1)$$

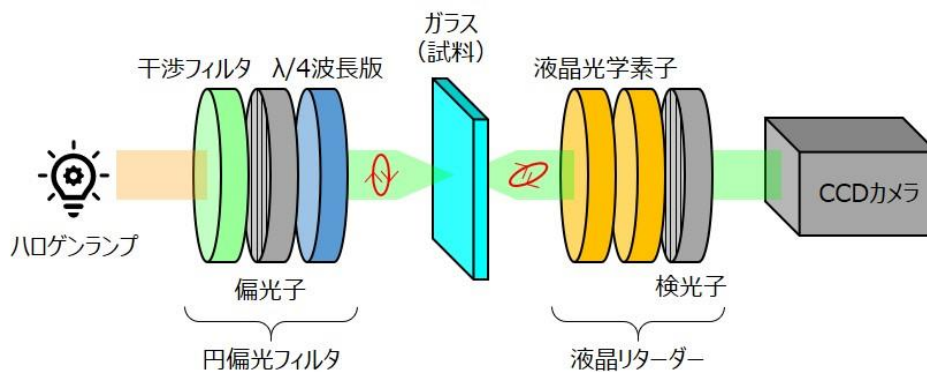


図 2-5 Abrio-IM の光学系構成図

尚、ポリマーラミネートガラスは表面のポリマーが偏光状態を乱しガラスの複屈折情報が得られない為、内部応力測定はポリマーをラミネートしないガラスで実施した。

ポリマーフィルム密着力の測定

ポリマーフィルムは薄く脆い為、その密着強度をピール密着力試験等で測定する事は困難である。そこで本研究では、ダイプラ・ウィンテス社製の Surface And Interfacial Cutting Analysis System (SAICAS) による測定を行った [53]。SAICAS は図 2-6 に示すように、ポリマーとガラスの界面において、鋭利な切刃でポリマーを切削及び剥離をして、切刃に掛かる切削抵抗より剥離強度を求める測定方法である。

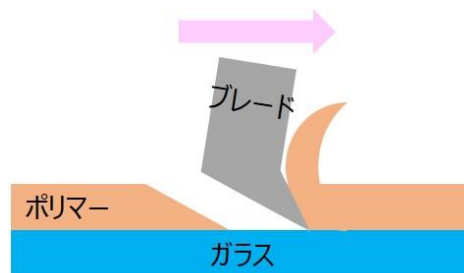


図 2-6 SAICAS 測定の概要図

2.3. 実験結果

2.3.1. CO₂ レーザ

図 2-7(a)、(b)に、CO₂ レーザで加工した孔のレーザ入射側、出射側の光学顕微鏡による上面図をそれぞれ示す。また図 2-8(a)に無電解めっき、電解めっきによりメタライゼーションを実施した後の TGV の断面図を示す。図 2-7(a)、図 2-8(a)に示すように、レーザの入射側ではガラスの開口が約 75 μm 程度であるのに対し、ポリマーの開口は約 120 μm 程度にまで広がってしまっている。また図 2-8(a)の TGV の側壁近辺のガラスを詳細に観察すると、図 2-8(b)に示すように TGV の側面に沿って熱影響層が形成され、それによりガラス内にクラックが発生していることが分かる。

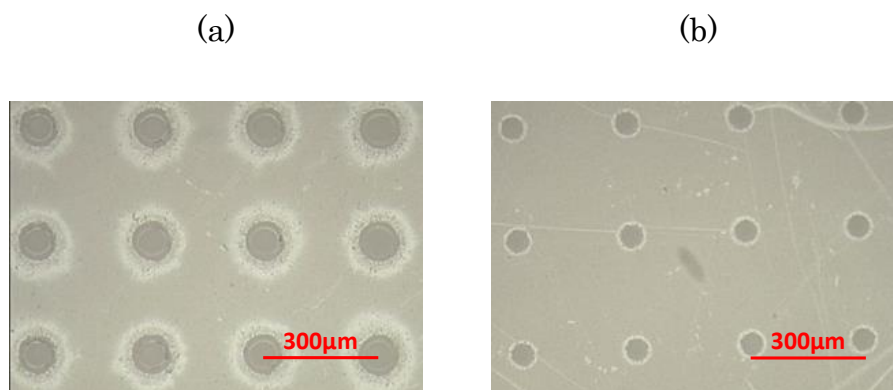


図 2-7 CO₂ レーザで加工した孔の上面図; (a)レーザ入射側、(b)レーザ出射側

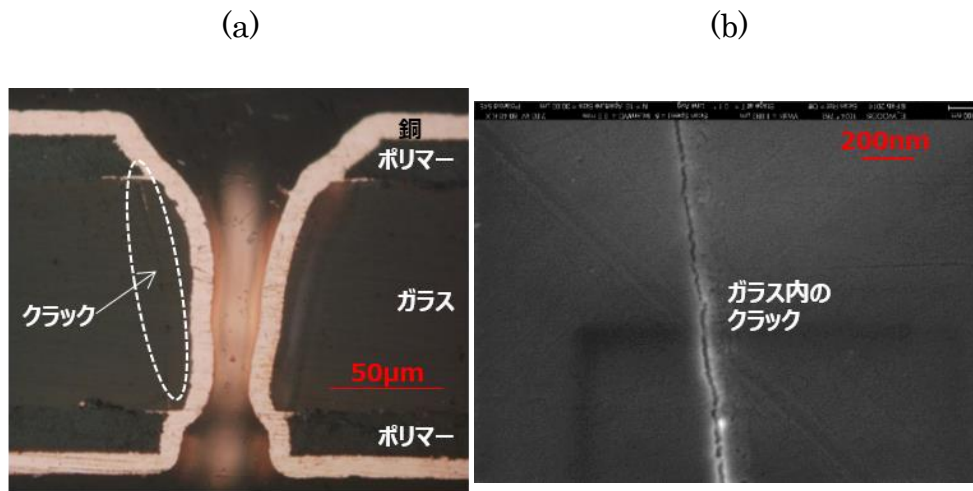


図 2-8 CO₂ レーザで加工した TGV の断面図; (a)TGV 全体図、(b)TGV 側面付近の拡大図

2.3.2. UV レーザ

図 2-9(a)、(b)、(c)に Nd:YAG 第三高調波レーザ（波長: 355 nm）で加工を実施した孔のレーザ入射側の上面図、レーザ出射側の上面図、メタライゼーション後の TGV の断面図をそれぞれ示す。図 2-9(a)、(c)に示すように、レーザ入射側でガラスの開口が約 100 μm 程度であるのに対し、ポリマーの開口が約 150 μm 程度まで拡大されており、これは CO₂ レーザのときと同様の傾向である。しかし CO₂ レーザのときとは異なり、孔周辺にクラックは確認されず、UV レーザはガラスに与える熱ダメージが CO₂ レーザに対して小さいことが分かる。一方でレーザ出射側ではガラスの開口は 50 μm 程度であるが、図 2-9(b)を見ると開口周辺の広い領域でポリマーが黒く変性している。また図 2-9(c)ではレーザ出射側のガラスとポリマーの界面に銅が侵入しており、この領域ではポリマーがガラスから剥離してしまっていたことが分かる。

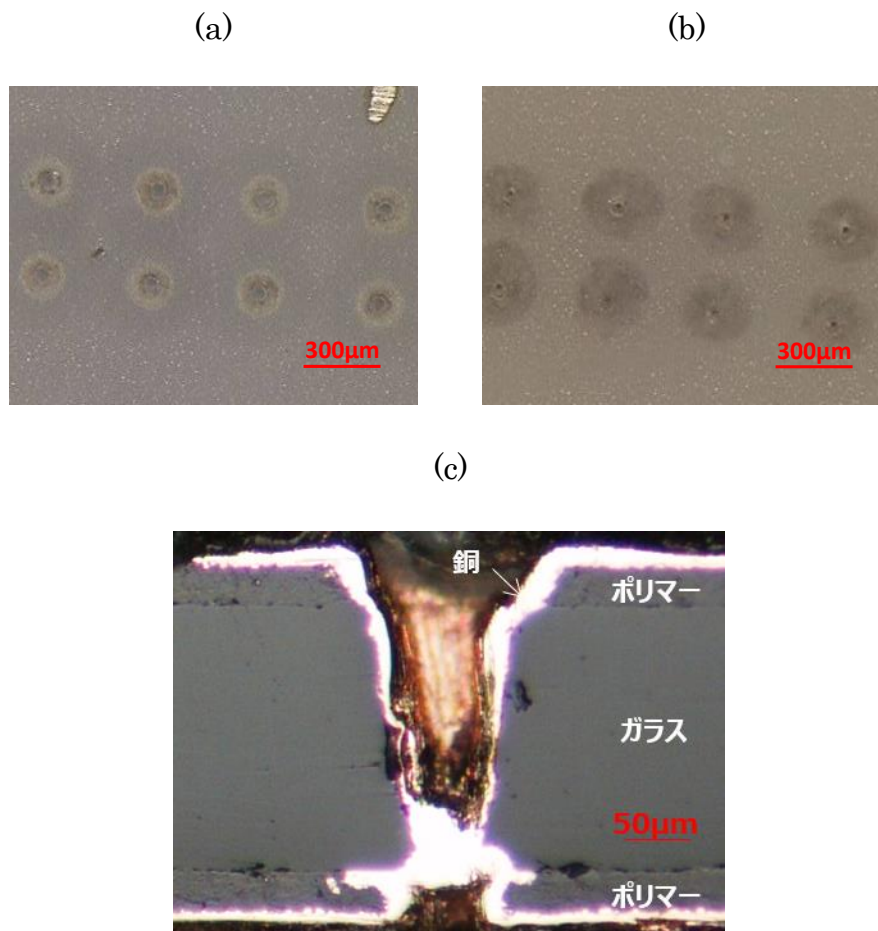


図 2-9 UV レーザ (355 nm) で加工した孔; (a)レーザ入射側の上面図、(b)レーザ出射側の上面図、(c)メタライゼーション後の TGV 断面図

続いて Nd:YAG 第四高調波レーザ (波長: 266 nm) で加工を実施した孔のレーザ出射側における上面図を図 2-10 に示す。355 nm UV レーザの時と同様に、孔周辺のポリマーには剥離を示唆する黒い変性領域が観察された。またこのポリマーの変性領域は、レーザが照射された後、出射側までガラスが貫通する以前に既に発生していた事が確認された。

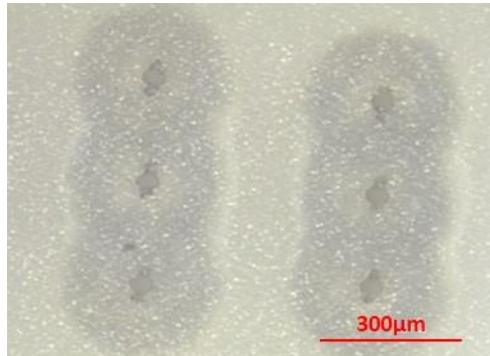


図 2-10 UV レーザ (266 nm) で加工した孔のレーザー出射側の上面図

2.3.3. ArF エキシマレーザー

図 2-11(a)、(b)に ArF エキシマレーザーで加工した孔のレーザー入射側、出射側の上面図をそれぞれ示す。今回のレーザーの光学系では径 $60 \mu\text{m}$ の像がサンプルの入射側の表面に投影されたが、入射側でおよそ $60\sim 65 \mu\text{m}$ 、出射側で $30\sim 35 \mu\text{m}$ の直径の孔が形成された。図 2-11(c)はメタライゼーション後の TGV の断面図であるが、孔は直線的なテーパ形状となっており、また CO_2 レーザで見られたような熱影響層は見られない。また UV レーザで見られたような、レーザー出射側でのポリマーのダメージも見られなかった。

2.4. 考察: 欠陥のないレーザー孔加工について

前節での実験結果より、本節ではポリマーラミネートガラスへの孔加工において、どのレーザーが最も欠陥が少なく加工できるかについて議論する。

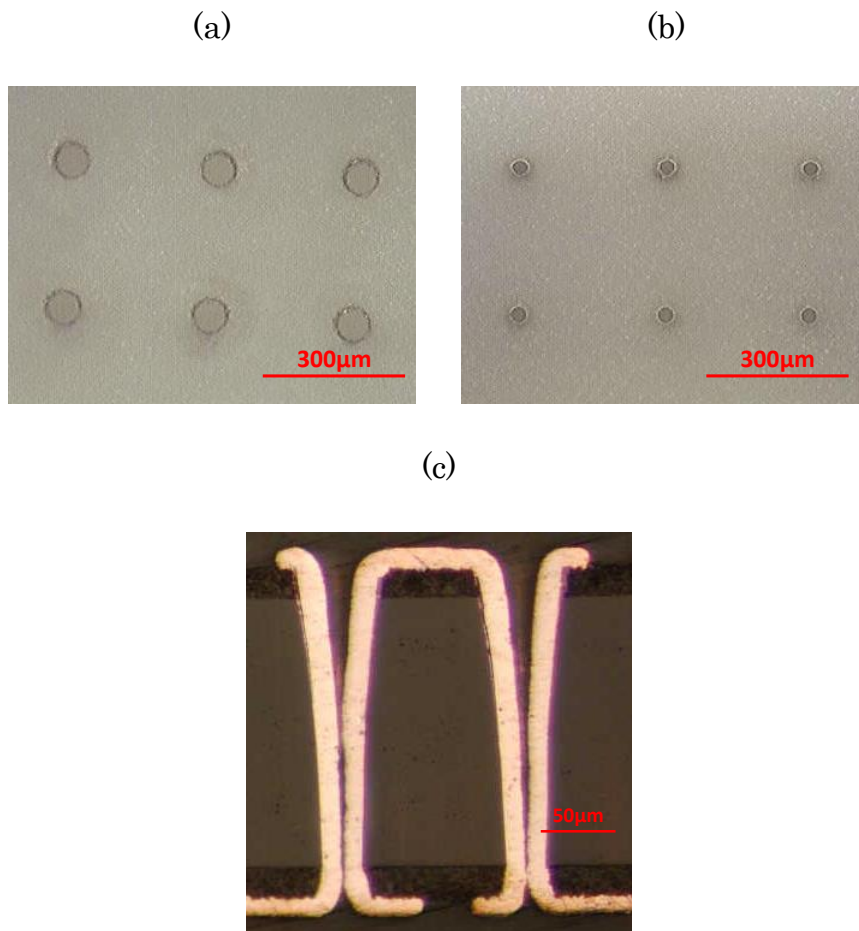


図 2-11 ArF エキシマレーザで加工した孔; (a)レーザ入射側の上面図、(b)レーザ出射側の上面図、(c)メタライゼーション後の TGV 断面図

2.4.1. CO₂ レーザ

CO₂ レーザによる孔加工ではポリマーの開口がガラスの開口に対して大きく広がってしまっていた。また孔の側壁周辺にクラックが発生していた。

まずポリマーの開口がガラスの開口に比べて大きく広がってしまった現象について考える。これはレーザの加工効率が、ガラスに対してポリマーが著しく高い為に発生した現象であると考え。ここでレーザの強度分布をガウス分布と仮定すると、その開口 D は、加工閾値 I_{th} を使って以下の式で表せる [54]。

$$I(D) = \sqrt{\frac{1}{2} \ln \frac{I_m}{I_{th}}} D_0 \quad (2-2)$$

ここで D_0 はビーム直径、 I_m はレーザーのピーク強度である。式(2-2)にて加工閾値の低いポリマーは、加工閾値の高いガラスに対して開口が広がる (図 2-12)。

そこでポリマーの開口を狭める為、ポリマー上に銅を被覆するアイディアを検証した。赤外域で高い反射率を示す銅層をポリマー上に設けることにより、その銅層は図 2-13(a)のように銅の加工閾値以下のサイドローブをカットし、レーザーのピーク近傍のみを透過させるマスクとして働く。そこで図 2-13(b)のように実際に無電解めっき、および電解めっきにて $1\sim 3 \mu\text{m}$ の銅を被覆したポリマーミネートガラスに対し、 CO_2 レーザで孔加工を行った。加工された孔に対し表面の銅を一旦エッチングで除去し、その後改めてメタライゼーションを実施した TGV の断面図を図 2-13(c)に示す。入射面側のガラスの開口が $40 \mu\text{m}$ 程度に対し、目論見通りポリマーの開口を $70 \mu\text{m}$ 程度まで縮小する事ができている。

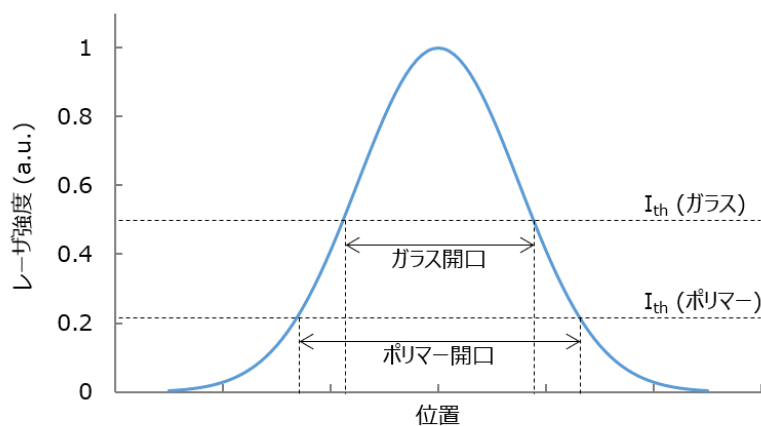


図 2-12 レーザ加工閾値と孔開口の概念図

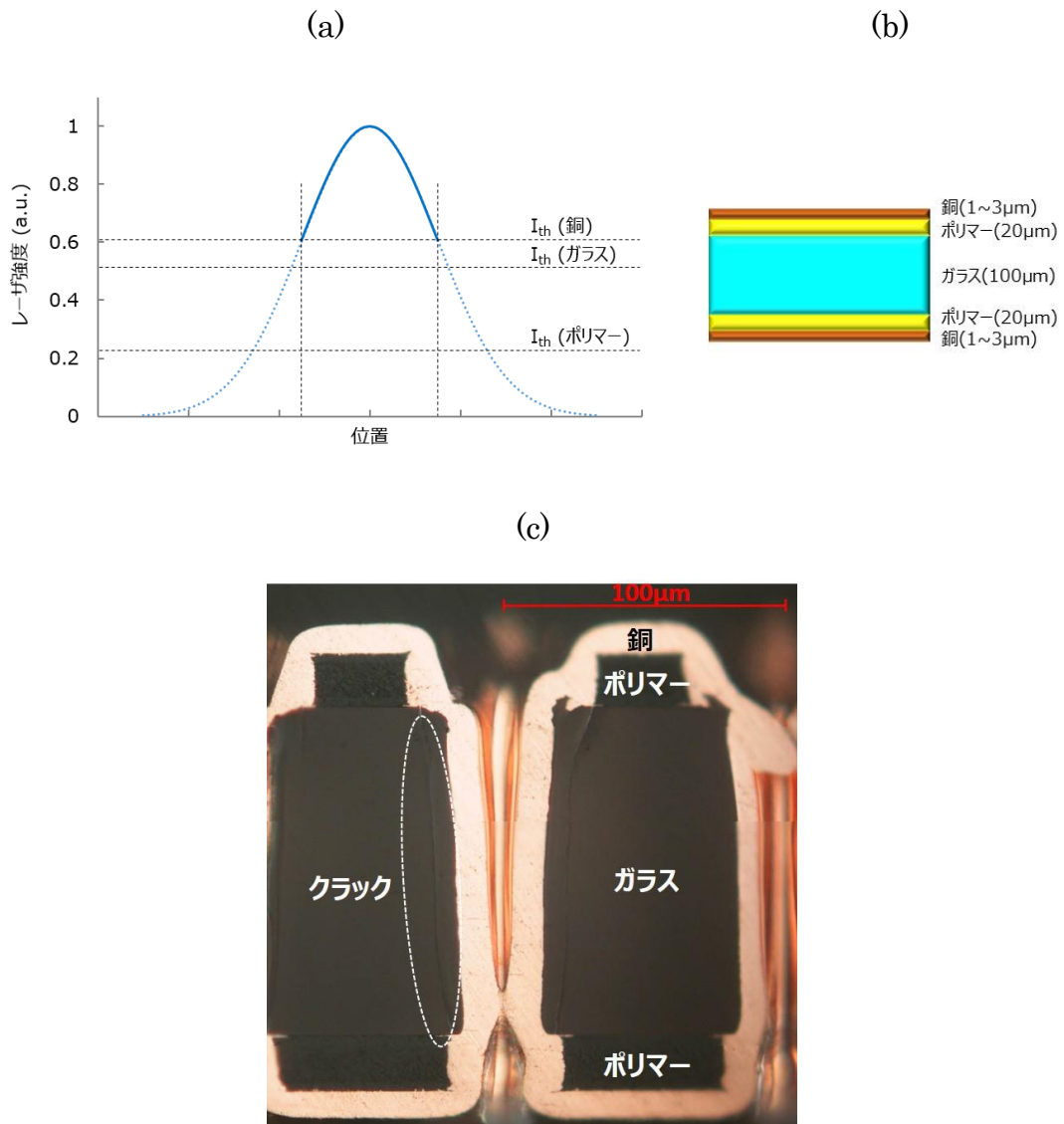


図 2-13 ポリマー上に銅を被覆しての孔加工; (a)レーザー強度分布の概念図、(b)銅被覆ポリマーラミネートガラスの構成、(c)加工した TGV の断面図

しかし、図 2-13(c)においても、図 2-8 と同様に TGV の側壁付近のガラスにクラックが見られた。CO₂ レーザ照射部は振動励起によりガラスが急速に加熱され、熔融過程を経て蒸発し孔加工が進む。しかし、レーザー照射部及び熱伝導が広がった照射部周辺のみが急昇温し、レーザー照射が終わると急冷されることになる為、冷えた周辺のガラスとの間に内部応力が発生する。この内部応力がクラ

ックを発生させたと考えられる。

そこでレーザ加工によりガラスに蓄積される内部応力を Abrio-IM にて測定した。測定サンプルは図 2-14(a)に示す 200 μm 厚のガラス単体に CO_2 レーザで孔加工したものをを用いた。図 2-14(b)は孔周辺のリタレーション分布を表したもので、図 2-14(c)は図 2-14(b)の赤線部で示す位置のリタレーションプロファイルである。孔の端部でリタレーションはおよそ 55 nm であった。ここで内部応力の式(2-1)において、内部応力はガラスの厚み方向に一様に発生していると仮定すると、EN-A1 ガラスの光弾性定数 31 [$10^{-13}/\text{Pa}$]より、内部応力はおよそ 90 MPa となる。このように CO_2 レーザの孔加工では、かなり大きな内部応力が発生している事が分かる。

CO_2 レーザは熱加工である為、局所的な急昇温・急降温による内部応力の発生は避けられない。仮に孔加工直後にクラックが発生しなかったとしても、その内部応力はガラス内に蓄積されている。その為、その後の製造工程や環境により新たな応力が加えられると、許容応力を超えクラックが発生する可能性が有る。そのような内部応力はガラス転移点以上の温度でガラスをアニールすることにより解放する事ができる [55]。しかしながら、ポリマーラミネートガラスの場合、ポリマーがガラスのアニール温度には耐えられない為、アニールによる応力解放は適用できない。それ故、 CO_2 レーザは、内部応力の観点から、ポリマーラミネートガラスの孔加工に用いる事は難しいと考える。

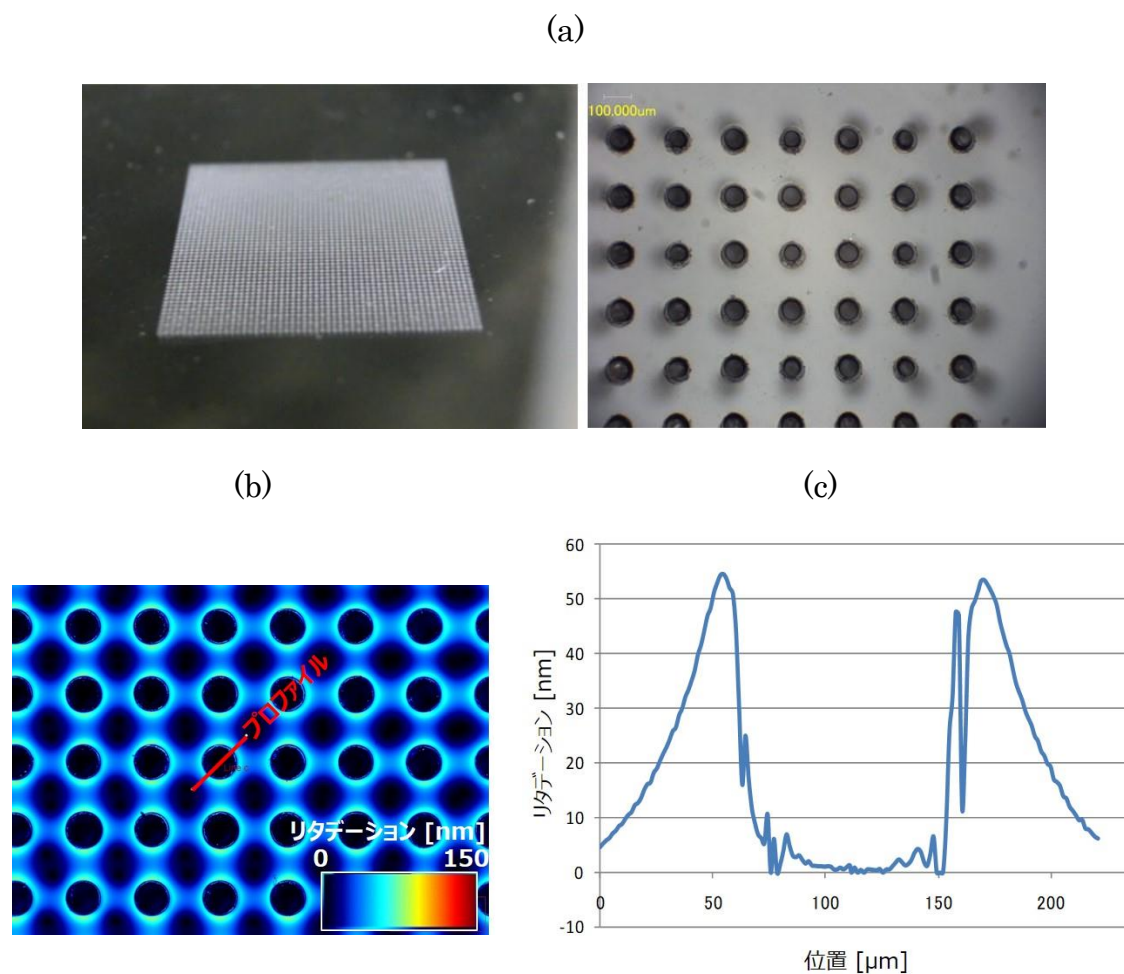


図 2-14 CO₂ レーザで加工した孔周辺に発生する応力; (a)測定したサンプル、
(b)リタデーシヨンの二次元画像、(c)孔周辺のリタデーシヨンプロファイル

2.4.2. UV レーザ

355 nm、及び 266 nm の UV レーザによる孔加工においては、CO₂ レーザのときとは異なり、孔周辺に内部応力に起因するクラックは確認されなかった。これは、UV レーザの波長が短い為である。UV レーザは CO₂ レーザに比べフォトンのエネルギーが 355 nm で 26 倍、266 nm で 35 倍と各段に大きく、またスポット径を小さくできる。それにより、レーザ照射による作用を短く、またより局部的にできる為、レーザ照射部周辺に与える熱損傷を小さくできた。

一方でレーザー出射側の孔周辺のポリマーにダメージが見られた。またこのポリマーのダメージはレーザー照射後、孔が完全に基板を貫通する以前にも観察された。その為、図 2-15 に示すように、レーザーがガラスを加工している最中に一部のレーザー光がガラスを透過し出射側のポリマーに到達して、ポリマーの変性を発生させたと考えられる。図 2-16 に各厚みの EN-A1 ガラスの透過率スペクトルを示す。これによると 0.2 mm 厚の EN-A1 ガラスの場合、波長が 355 nm で 90 %以上のレーザーエネルギーがガラスを透過し、出射側のポリマーに到達してしまう事が分かる。透過率はおおよそ 350 nm からそれ以下の波長にかけて急激に低下し、0.2 mm 厚の EN-A1 ガラスの場合、266 nm の波長ではおおよそ 40 %の透過率となっている。しかしながら、ガラスとポリマーの加工効率の差異は大きく、その程度のレーザーエネルギーであってもポリマーを劣化させるには十分であったと考えられる。それ故、出射側のポリマーのダメージを抑制する為には、ガラスへの吸収率が高いレーザーを使用する必要がある。

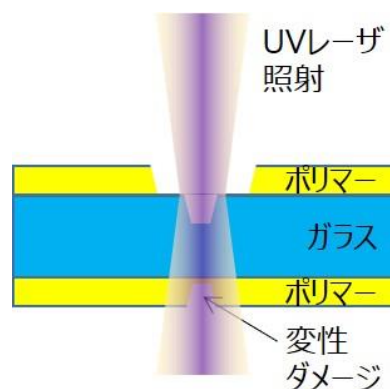


図 2-15 UV レーザによる孔加工時の出射側のポリマー劣化のメカニズム概要
図

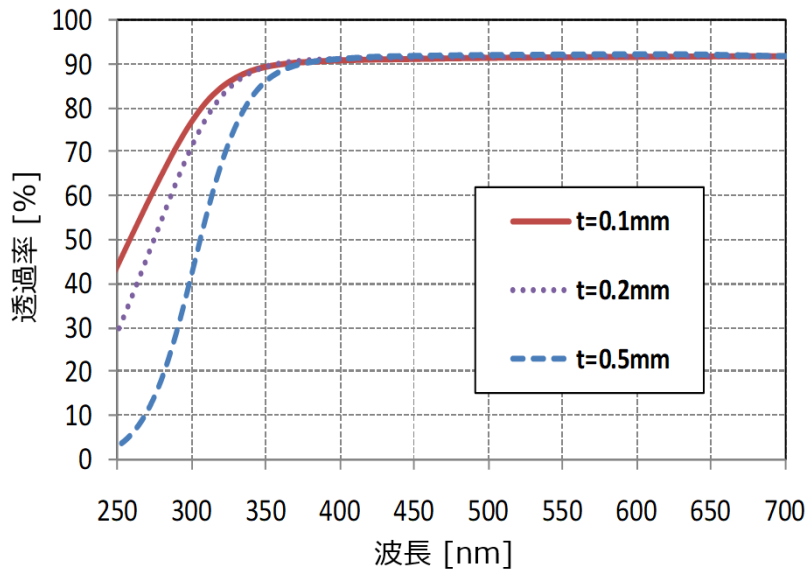


図 2-16 各厚みの EN-A1 ガラスの透過率スペクトル

ポリマーのダメージを軽減させる方法として、基板の両面からレーザを照射する両面加工を検証した。具体的には片側からガラス厚の半分位まで加工した後、基板を反転させ、反対面から加工し貫通孔を形成した。この加工法では、片側からのレーザ加工時間をおよそ半分にできる。さらに透過レーザ光により劣化したポリマーの領域は、反対面からの加工により除去できる可能性が有る。そこで 355 nm UV レーザを用いて実際に両面加工の実験を行った。孔加工、メタライゼーション後の TGV の断面図を図 2-17 に示す。

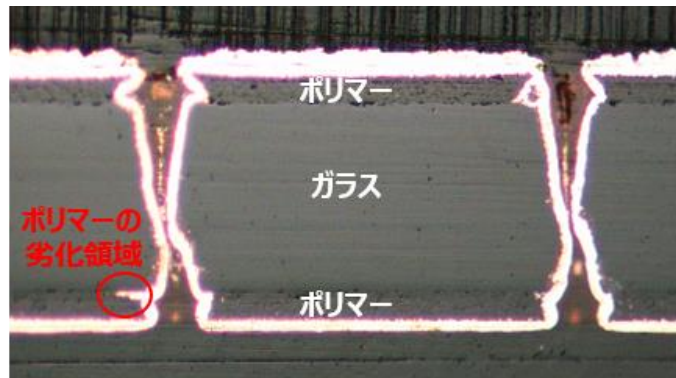


図 2-17 355 nm UV レーザの両面加工で形成された TGV の断面図

確かにポリマーの劣化領域の大部分は取り除かれているものの、依然として一部の劣化領域は残存している。加えて装置の機械精度や認識精度により、上下からの孔加工を完全に同じ位置に実施する事は難しく、図 2-17 に示すような非対称な孔形状となってしまう。これは TGV の信頼性の悪化に繋がる恐れが有る。またこのような非対称形状の TGV は不均一で不測な抵抗やインダクタンスを発生させるため、特に TGV を高周波用途に使用する際には課題になり得る。その為、レーザ出射側のポリマーの劣化を軽減させるためには、ガラスへの吸収率が高いレーザによる、片側からの加工が望ましい。

2.4.3. ArF エキシマレーザ

図 2-11 に示すように、エキシマレーザにて加工された孔は、直線的なテーパ形状となっている。これは 193 nm という短波長での加工により、UV レーザと比べても、ガラスへの作用がさらに瞬時に局所的になった為である（アブレーション加工）。また繰り返し周波数が低いことで、加工中におけるガラスへの蓄熱の影響を抑えることができたことも、直線的でダレの無い形状に寄与している。

図 2-18(a)に示す 180 μm 厚のガラス単体へ ArF エキシマレーザにて複数孔をアレイ状に加工した時の Abrio-IM によるリタレーション画像を図 2-18(b)に示す。孔周辺においてリタレーションは 7 nm 以下であった。ガラス厚み方向に一樣に応力が発生していると仮定すると、その応力は 13 MPa 以下であり、ArF エキシマレーザ加工により発生する内部応力はかなり低いことが分かる。

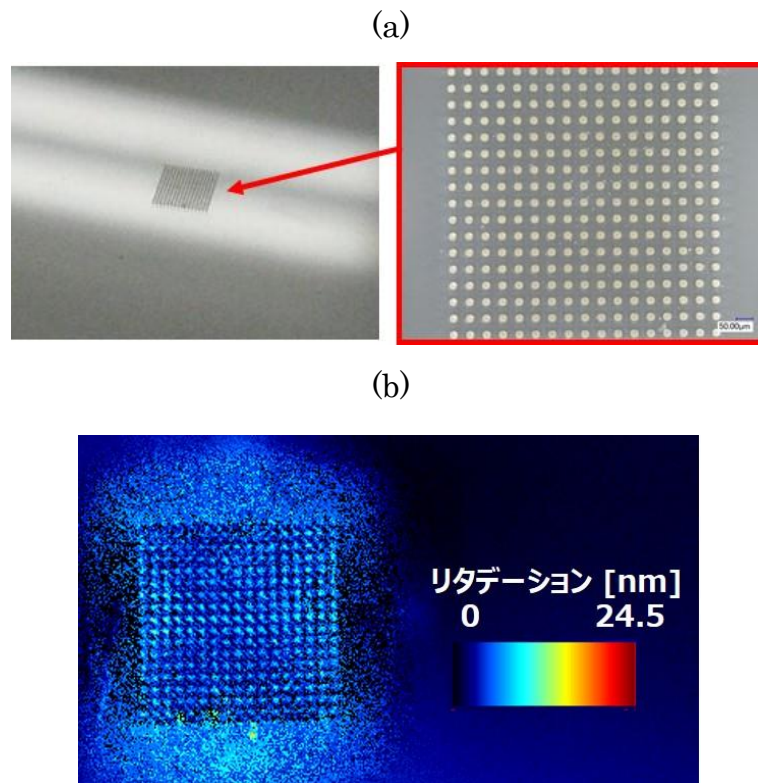


図 2-18 ArF エキシマレーザで加工した孔周辺に発生する応力; (a)測定したサンプル、(b)孔周辺のリタデーション画像

さらに 193 nm における EN-A1 ガラスの吸収率は 90 %以上と非常に高く、大部分のレーザエネルギーがガラスに吸収され、内部エネルギーに変換される。その為、出射側のポリマーまで到達するレーザのエネルギーはわずかである。このガラスへの吸収率の高さが UV レーザで見られたようなポリマーの劣化を抑制するのに役立っている。

一方で、さらなるスループットの向上を目指して、基板を加熱しながら加工するアイデアを検証した。ArF エキシマレーザの加工ステージの上にヒーターを設置し、その上にガラス基板を置き、孔加工を実施した。尚、ガラスの加工効率を正確に把握する為、今回はガラス単体で実験を行った。各温度にて複数パル

スで孔加工を実施し、加工深さをパルス数で割ることにより、加工効率を計算した。図 2-19 に各温度での加工効率を室温（20 °C）のときの値で規格化した結果を示す。室温に対し 400 °C で 7 %、800 °C で 22 % の加工効率の向上が見られた。これは加熱により分子の熱振動が活性化し、レーザエネルギーに対しより解離しやすくなった為と考えられる。ただしポリマーラミネートガラスの場合、ポリマーが変性しない基材の範囲ではガラスの加工効率の改善幅は大きくない。その為、基板加熱による加工効率の改善は、ポリマーラミネートガラスでは効果的ではない。

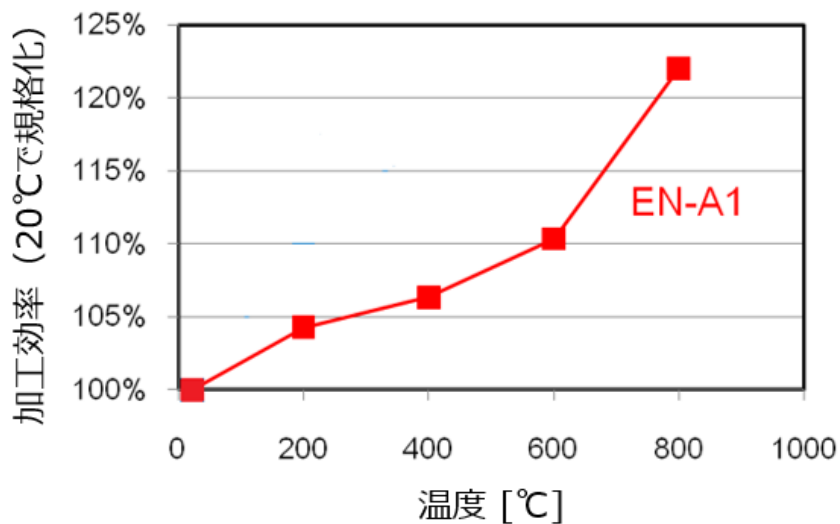


図 2-19 基板を加熱した時の ArF エキシマレーザの加工効率

2.5. 考察: TGV の熱機械的信頼性

孔加工後、ガラスの上下面の導通の為に、めっき等の手法で孔内を金属で充填し TGV が作られる。TGV はガラス、金属、そしてポリマーラミネートガラスの場合、ポリマーも含めた複合材料である為、熱プロセスにさらされると、各材料の熱膨張率の違いにより、各材料に内部応力が発生する。本節では ArF エキシマレーザで加工し、その後メタライズされた TGV の熱応力発生による信頼性について議論する。

まず ArF エキシマレーザによる TGV において、どのような信頼性リスクが内在するのかを理解する為、有限要素法によるシミュレーションを実施した。180 μm 厚の EN-A1 ガラスの両面に 20 μm 厚の RXP4 フィルムを配置した構成にて、レーザ入射側の孔径が 60 μm 、出射側の孔径が 20 μm の孔に、10 μm 厚の銅で孔を被覆したモデルを考えた。尚、TGV の上下には TGV 径より大きい、径が 90 μm のパッド（銅）を配置した。図 2-20(a)に今回の TGV モデルを示す。また表 2-3 に今回のモデルに用いた各材料の熱機械物性を示す。本モデルにおいて $-55\sim 125$ °Cの熱サイクルを実施した後の TGV 周辺の応力分布を見積もった。

図 2-20(b)に銅の疲労寿命に影響する銅の塑性変形を、図 2-20(c)にそれぞれの材料間での剥離を引き起こす剪断応力を示す。図 2-20(b)、(c)から分かる通り、塑性変形も剪断応力も、材料間の接合部に集中している事が分かる。その為、特に材料間の接合部が最も欠陥が発生する可能性の高い領域であることが予想される。

表 2-3 各材料の熱機械物性

材料	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	熱膨張率 (ppm/°C)	ストレスフリー温度 (°C)
ガラス EN-A1	77	0.22	3.8	25
ポリマー RXP4	1.83	0.3	67	232
銅	121	0.3	17.3	25

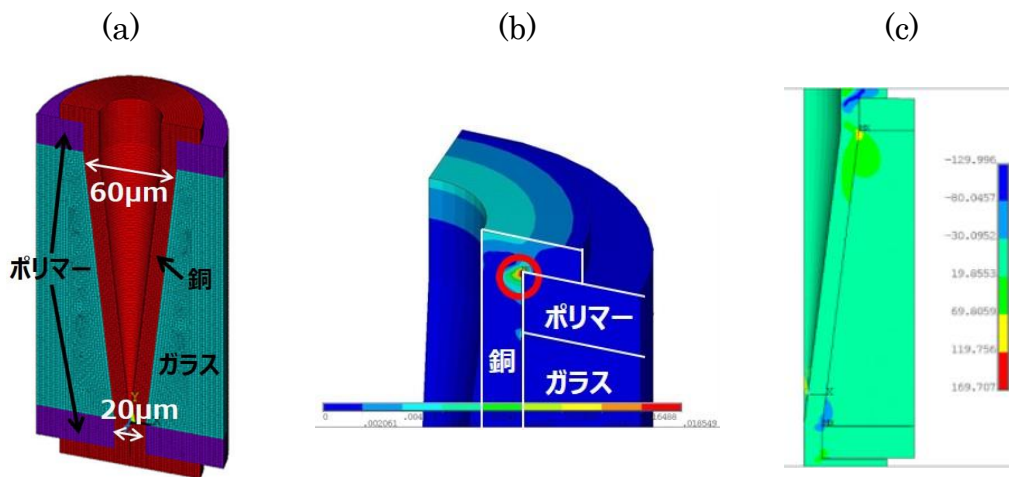


図 2-20 ArF エキシマレーザによる TGV の熱応力シミュレーション; (a)TGV の 3D モデル、(b)銅の塑性変形、(c)剪断応力

上記のシミュレーション結果を踏まえて、実際に TGV の試験サンプルを製作し、熱サイクル試験を実施し、TGV の熱機械的信頼性を検証した。試験サンプルは 20 μm 厚の RXP4 フィルムを両面にラミネートした 180 μm の EN-A1 ガラスを用いた。そのポリマーラミネートガラスに ArF エキシマレーザにて、入射側の直径が 60 μm 、出射側が 30 μm の孔を 120 μm ピッチで 8×6 のアレイ状に形成した。その後、2.2.4 項に記したセミアディティブプロセスにて

メタライゼーション、及び表面配線形成し、TGV のデージーチェーンサンプルを製作した。図 2-21(a)、(b)に製作した試験サンプルの概要図の断面図、TGV デージーチェーン部の上面図を示す。また図 2-21(c)に実際に製作した TGV デージーチェーンサンプルの顕微鏡像をそれぞれ示す。

本サンプルに対し、2.2.5 項に示したプリコンディショニング工程を実施した後、 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ の熱サイクル試験を実施した。熱サイクル試験の間はそれぞれ 8 個の TGV で構成される 12 個のデージーチェーンについて、その抵抗値の変化をモニターした。

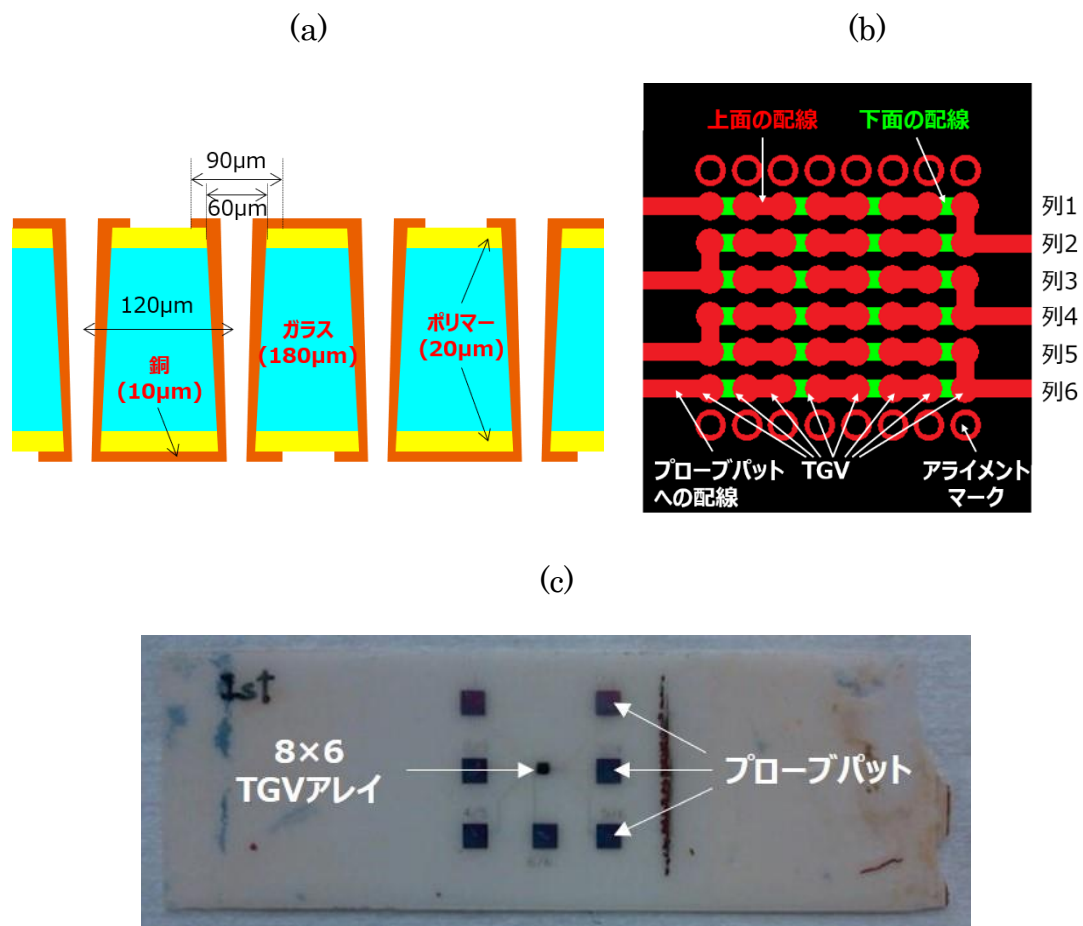


図 2-21 製作した TGV 信頼性試験サンプル; (a)概要図 (断面図)、(b)概要図 (TGV デージーチェーン部の上面図)、(c)実際に製作したサンプルの顕微鏡像

図 2-22 に 1,572 サイクルまでの TGV デイジーチェーンの抵抗値の遷移を示す。熱サイクル試験の間、すべてのデイジーチェーンにおいて抵抗値はほぼ一定で、変化が小さいことが分かる。

図 2-23、図 2-24 に 1,572 サイクル後の信頼性試験サンプルの X 線検査装置で撮影した画像、及び断面画像をそれぞれ示す。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、明らかなクラックや剥離は発生していない。

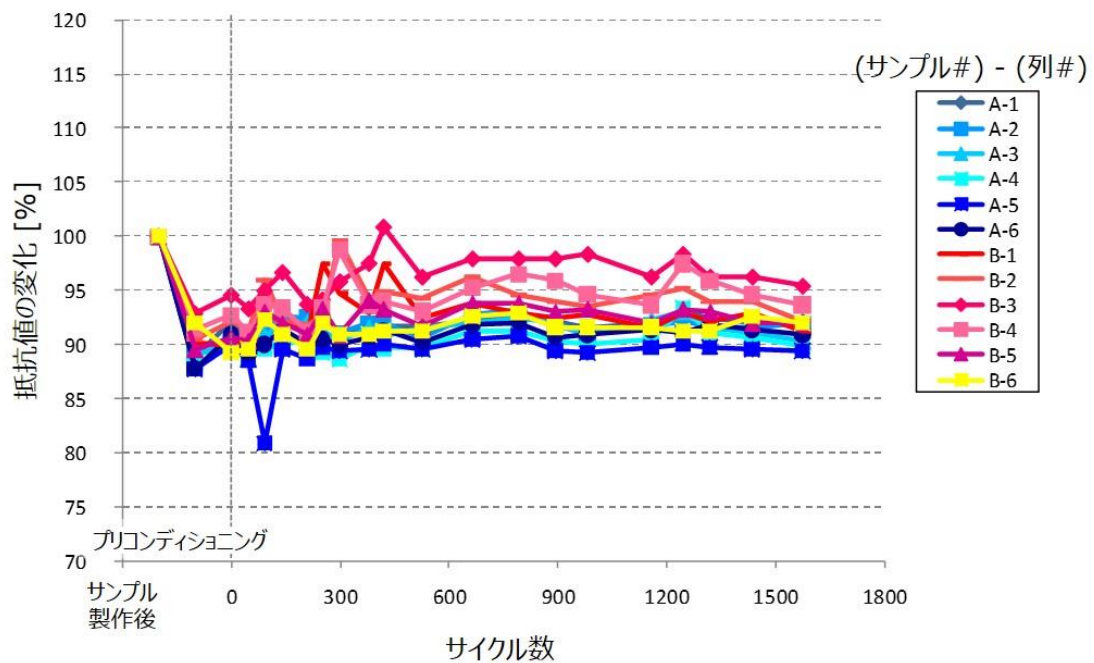


図 2-22 熱サイクル試験における TGV デイジーチェーンの抵抗値の遷移

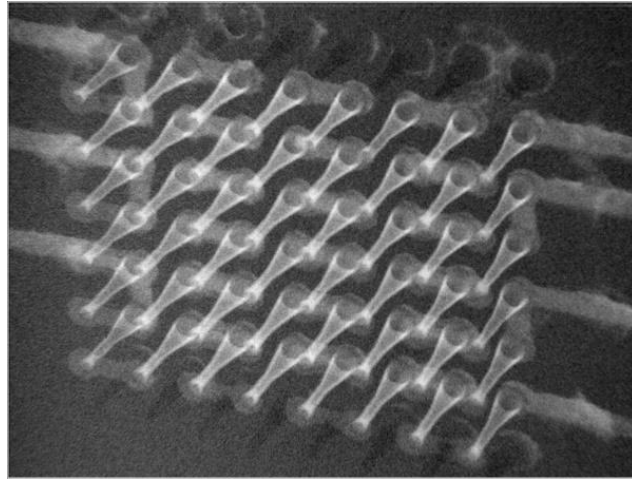


図 2-23 1,572 サイクル後の信頼性検証用サンプルの X 線画像

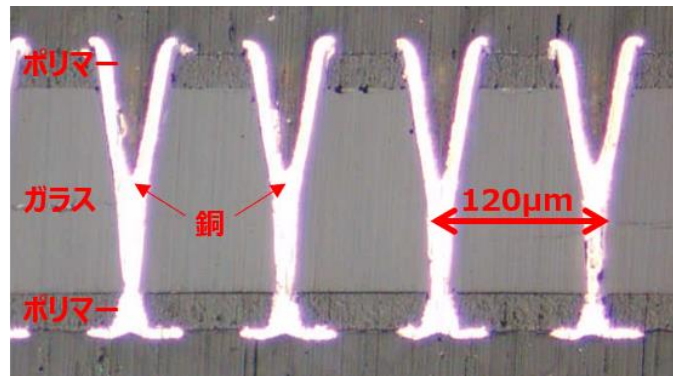


図 2-24 1,572 サイクル後の信頼性検証用サンプルの断面画像

しかし、同サンプルを超音波顕微鏡で観察したところ、レーザ出射側の一部の TGV 周辺において、図 2-25(a)の点線枠で示す位置で、ポリマーが部分的に剥離している様子が見られた。このような TGV 周辺の剥離は図 2-25(b)のようにレーザの出射側のみで発生しており、また熱サイクル試験前の超音波顕微鏡観察では確認されていなかった。その為、レーザ加工の影響が光や衝撃の形で裏面のポリマーの密着力の低下に及んでいる。光とはガラス透過し裏面のポリマーに到達した僅かな 193 nm のレーザ光である。衝撃とはレーザアブレーション時に発生する衝撃波である。

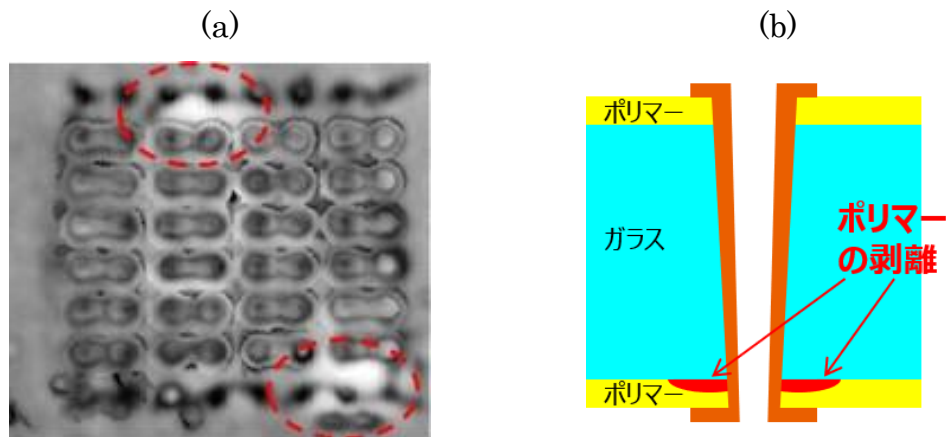


図 2-25 1,572 サイクル後の信頼性検証用サンプルにおける TGV 周辺のポリマーの剥離; (a)TGV のレーザ出射側の超音波顕微鏡画像、(b)ポリマー剥離の概念図

ポリマーの密着力が低下した領域において、熱サイクル試験にて内部応力が蓄積して、ポリマーの剥離となって顕在化したと考えられる。

ポリマーの剥離を抑制する為には、ポリマーとガラスの密着力を強化する事が必要である。そこでポリマーをガラスにラミネートする前にシランカップリング剤を用いた前処理の導入を検討した。2.2.2 項で述べたように、ガラス基板の表面を APTMS で前処理を行った後に、ポリマーフィルムのラミネートを行った。

シランカップリング剤導入によるポリマー密着力の向上を、SAICAS を使用し定量的に評価した。図 2-26 に、EN-A1 ガラスに 20 μm 厚の RXP4 フィルムを、シランカップリング剤による前処理を未実施のものと、実施してラミネートしたサンプルにおいて、SAICAS による接着強度測定結果の比較を示す。

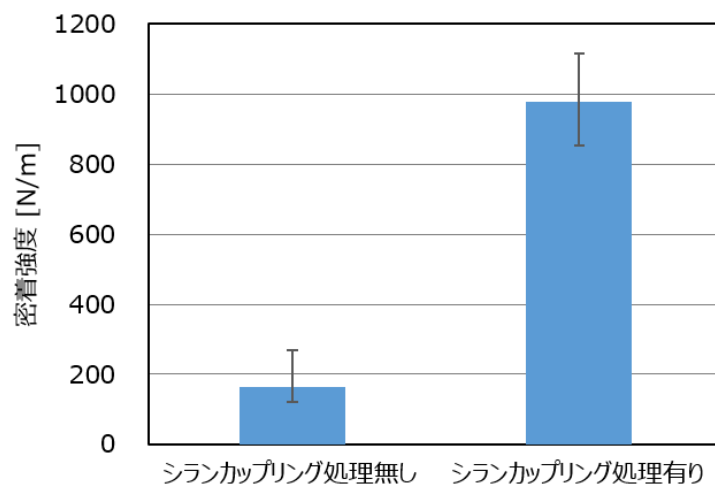


図 2-26 シランカップリング剤による前処理有無での SAICAS によるポリマー密着強度測定結果

図 2-26 よりシランカップリング処理を実施したものは、未実施のものに対しおよそ 6 倍程度、接着強度が強化されており、シランカップリング剤による前処理の導入はポリマーの密着力の強化に大きな効果がある事が示された。

続いて、シランカップリング剤による前処理を実施したポリマーラミネートガラスを用いて、同様の信頼性検証用サンプルを製作し、再度熱サイクル試験を実施した。1,015 サイクル後のサンプルの超音波顕微鏡像を図 2-27 に示すが、図 2-25(a)に見られたようなポリマーの剥離は見られなかった。すなわち、シランカップリング剤による前処理によりポリマーの密着力が向上し、ポリマーの剥離欠陥の抑制に繋がったことが示された。

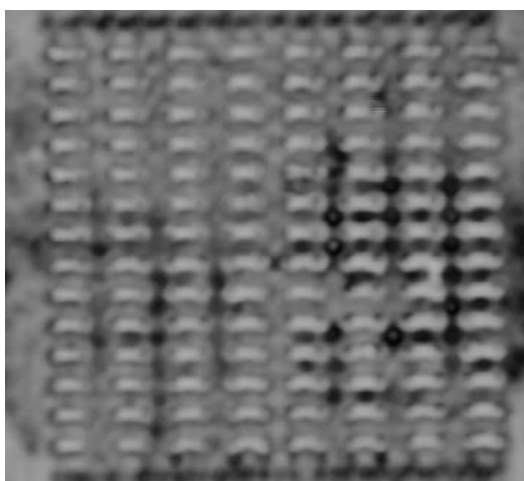


図 2-27 シランカップリング剤による前処理を実施した信頼性試験サンプルの 1,015 熱サイクル試験後の超音波顕微鏡画像

2.6. まとめ

ポリマーラミネートガラスへの孔加工に各種レーザを使った結果を表 2-4 に纏める。

今回検討したレーザでは、**ArF** エキシマレーザがガラス及びポリマーに対していずれもダメージの少ない孔加工が可能であった。さらに **ArF** エキシマレーザで加工した TGV は、熱サイクル試験においても顕著な欠陥が発生せず、信頼性の高い TGV である事が示された。レーザ出射面でのポリマー密着力の低下は、シランカップリング剤による前処理を導入する事で十分な密着力を担保でき、剥離欠陥を回避できることが示された。

表 2-4 各レーザーによるポリマーラミネートガラスの孔加工

レーザー種	CO ₂ レーザ	UV レーザ	ArF エキシマレーザー
波長	9.3 μ m	355nm or 266nm	193nm
0.2 mm 厚の EN-A1 ガラスでの透過率	10%以下	355nm: およそ 90% 266nm: およそ 40%	10%以下
主な結果と結論	<ul style="list-style-type: none"> ・ ポリマーの開口がガラスに対して著しく大きい ・ 熱プロセス故、ガラスへのクラック発生の原因となる内部応力が発生する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ガラスへの吸収率が低いことによりレーザー出射側のポリマーにダメージが発生 ・ 両面加工によりポリマーのダメージは軽減されるが、孔加工時のアライメントが課題 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 短波長、低繰り返し周波数によりガラス及びポリマーへのダメージが小さい ・ 出射側のポリマーの密着力の低下もシランカップリング材の前処理により影響を低減できる

第3章 TGV の IPD (Integrated Passive Device) への応用

3.1. 背景

2020 年現在、第 5 世代移動体無線通信システム (5G) のサービスが開始され、これまで有線通信で実施していた用途にも無線化が進み、高周波回路や部品の重要性は増している。高周波回路には、インダクタ、キャパシタ、抵抗等の受動素子の実装が必須である。実際、高周波機器において受動素子は基板のおよそ 60%もの面積を占めて実装されるとも言われており、特に実装スペースが限られるモバイル用途においては、高性能化に加え小型化は至上命題である [56]。

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 [25]。IPD をプリント基板に実装していく事も可能だが、実装基板上に直接形成することで更なる小型化が実現できる。この IPD は SOP には必須の技術である。IPD の基板はシリコン、樹脂、LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic: 低温同時焼成セラミックス)、ガラスが一般的であるが、特にガラスはその誘電特性、平坦性、熱安定性の観点から、低損失かつ微細化に優れている [57]。現在のガラス IPD は厚いガラスウェハを使用し、薄膜技術を使って基板の片面のみに受動部品回路が形成されている。製造プロセスの最後にガラス基板を研削して薄化している。今後、更なる小型化や製造コストの削減には、TGV を使った回路実装の 3D 化等、抜本的な構造やプロセスの変更が必要である。

本研究では、第 2 章で議論した TGV を形成したポリマーラミネートガラスを用いた 3D ガラス IPD を提案する。ポリマーラミネートガラスを用いることにより、100~200 μm 厚の超薄板ガラスを単体でハンドリングでき、研削工程を削減できる。またウェハからパネルにサイズアップすることで製造コストを劇

的に削減できる。TGVの導入は、図 3-1 に示すように基板の下面のみならず上面の領域にも素子形成が可能になることから、有効素子面積を倍増させることができる。更に TGV 配線自体にもインダクタやキャパシタ等の機能を持たせることも可能である。その為、3D ガラス IPD は、IPD の更なる高密度集積と小型化を可能にする。

本研究では、3D ガラス IPD のコンセプトを実証すべく、第 2 章で議論した ArF エキシマレーザで孔加工を実施した 100 μm 厚のポリマーラミネートガラスを用いて、その両面にローパスフィルタ (LPF) を形成した。本章ではその LPF を内蔵した 3D ガラス IPD の設計、製作、評価結果について述べる。

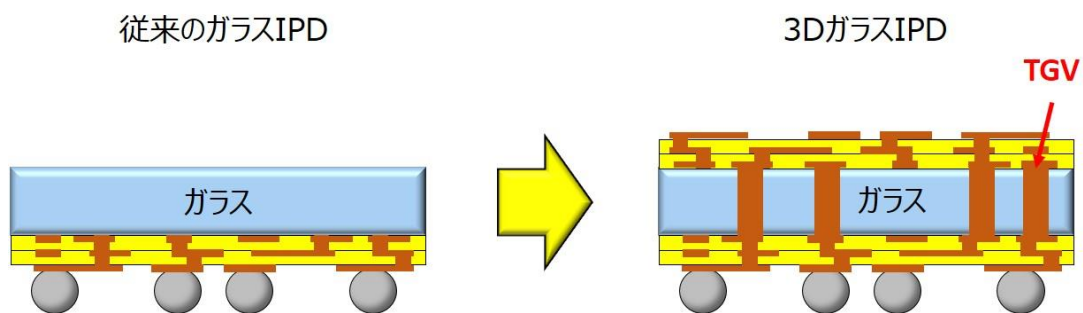


図 3-1 従来のガラス IPD と 3D ガラス IPD の概念図

3.2. ローパスフィルタの設計

3.2.1. 3D ガラス IPD の構成

評価に使用する LPF 回路は、ワイヤレス LAN の周波数帯でカットオフ周波数がそれぞれ 0.85 GHz と 2.5 GHz の 2 つの LC タイプの LPF を設計・製作した。LPF はガラス基板上下の絶縁層内に配置し、ソルダーボールにてプリント配線板への表面実装をする形態を検討した。TGV の導入により、図 3-2(a)の下面に LPF を配置するタイプに加え、(b)の TGV を介して LPF を上面に配置するタイプ、(a)、(b)をそれぞれの面に配置した(c)の両面配置のタイプが可能になり、今回この 3 つの構成をそれぞれ製作した。図 3-3 に今回製作した 3D ガラス IPD のデザインルール (プロセスで実現される設計上の決まり) を示す。TGV を持つ 100 μm 厚の EN-A1 ガラスの両面に各 2 層の配線層を持つ構成として、TGV の径やピッチ、配線幅等はより微細なものを形成した実績はあったが、今回は 3D ガラス IPD のコンセプトを確実に実証する為に、比較的大きめの値に設定した。

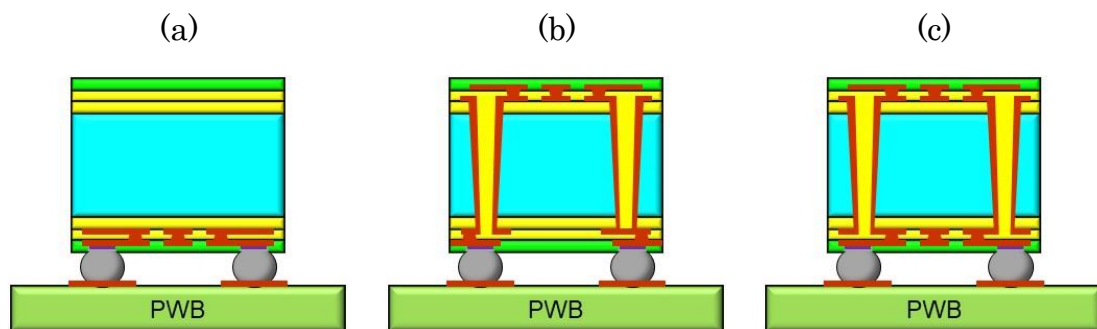


図 3-2 LPF 配置による 3 つの構成; (a)下面への LPF 配置、(b)上面への LPF 配置、(c)上下両面への LPF 配置

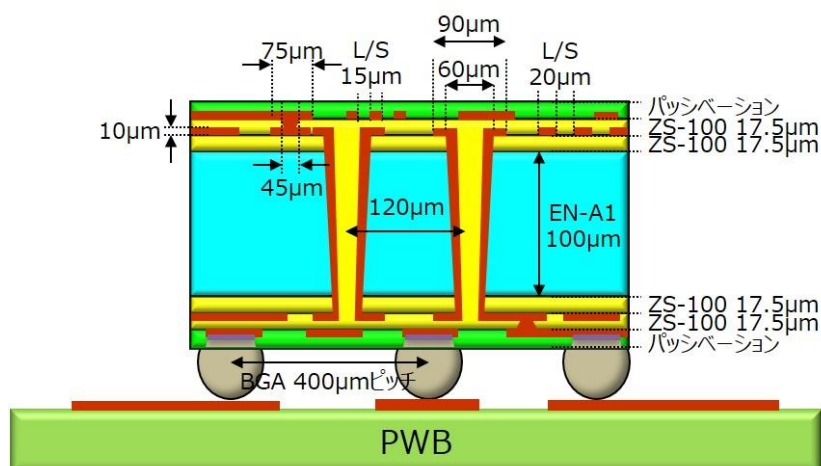


図 3-3 3D ガラス IPD デモンストレーターのデザインルール

3.2.2. インダクタ

今回、絶縁層内の平面スパイラルインダクタ、TGV を用いたコアスパイラルインダクタをそれぞれ検討した。平面スパイラルインダクタに関しては、単層の絶縁層に配置したもの、2 層に配置したものの 2 種を検討した。図 3-3 のデザインルールに基づいて、電磁界シミュレータの SONNET を用いて作成したコアスパイラルインダクタ、単層平面スパイラルインダクタ、複層平面スパイラルインダクタのモデルをそれぞれ図 3-4(a)、(b)、(c)に示す [58]。表 3-1 にそれぞれのモデルにおいて算出したインダクタンス、及び単位面積当たりのインダクタンス密度を示す [59]。今回のデザインルールではコアスパイラルインダクタより平面スパイラルインダクタの方が、インダクタ密度が高く設計でき、また複層にすることにより、インダクタ密度を飛躍的に高めることができる。そこで今回のデモンストレーターでは複層平面スパイラルインダクタを採用した。

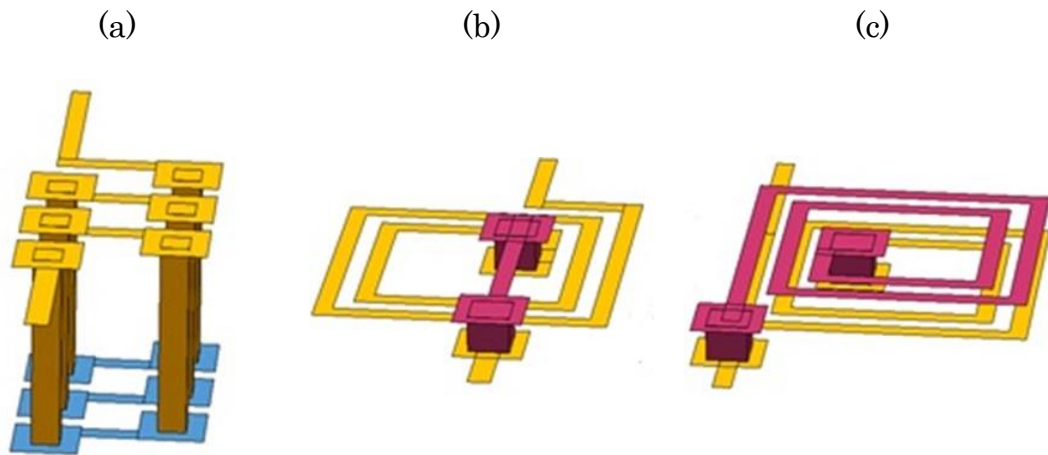


図 3-4 検討したインダクタのモデル; (a)コアスパイラルインダクタ、(b)単層平面スパイラルインダクタ、(c)複層平面インダクタ

表 3-1 検討した各インダクタの特性

	面積 [mm ²]	インダクタンス @1GHz [nH]	インダクタンス密度 @1GHz [nH/mm ²]
コアスパイラルインダクタ	0.05	0.8	16
単層平面スパイラルインダクタ	0.115	2.2	19
複層平面スパイラルインダクタ	0.102	6.8	66.7

3.2.3. キャパシタ

キャパシタは、ガラス基板上下の絶縁層内のスペースを利用した、図 3-5 に示す平行平板型、ステッチング型、くし型キャパシタの 3 種を検討した。表 3-2 にそれぞれのモデルにおいて算出したキャパシタンス、及び単位面積当たりのキャパシタンス密度を示す。今回の 3 種の構成ではそのキャパシタンス密度に大きな差異は見られなかった。そこで、今回のデモンストレーターには、僅かではあるが最もキャパシタンス密度が高く、かつ最も構成がシンプルな平行平板キャパシタを採用することにした。

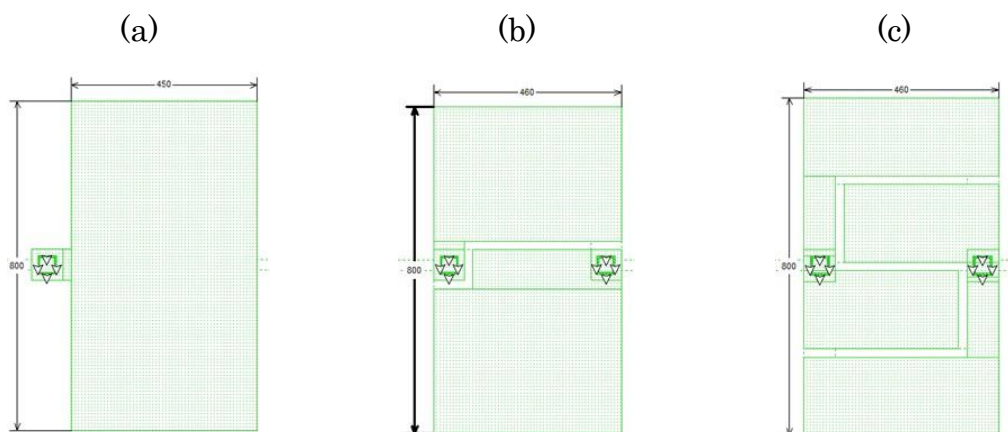


図 3-5 検討したキャパシタのモデル; (a)平行平板型キャパシタ、(b)ステッチング型キャパシタ、(c)くし型キャパシタ

表 3-2 検討した各キャパシタの特性

	面積 [mm ²]	キャパシタンス @1 GHz [pF]	キャパシタンス密度 @1 GHz [pF/mm ²]
平行平板キャパシタ	0.36	1.32	3.67
ステッチングキャパシタ	0.368	1.28	3.48
くし型キャパシタ	0.368	1.32	3.59

3.2.4. ローパスフィルタ

図 3-6 に示す LPF 集中定数回路において、Advanced Design System (ADS) を使用し、それぞれのカットオフ周波数 (0.85、2.5 GHz) におけるインダクタンス、キャパシタンスの回路定数を見積もった。その後、図 3-3 のデザインルールを基に、それぞれのインダクタ、キャパシタンスに相当する複層平面インダクタ、及び平行平板キャパシタをレイアウトした。回路周囲を取り囲むようにグラウンドをレイアウトした。その後、SONNET の電磁界シミュレーションを用いながらデザインを微調整し、フィルタ特性、及びフィルタの占有面積を最適化した。図 3-7 に最適化後の 2.5 GHz の LPF の 3D モデルを示す。また図 3-8 に

2.5 GHz LPF の集中定数回路モデル、及びレイアウト後の 3D モデルにおけるフィルタ特性を示す。レイアウト後の 3D モデルでは集中定数回路モデルに対し、挿入損失が僅かに大きいのが、これはインダクタの抵抗、及びインダクタンス、及びキャパシタンスの僅かなズレが原因と推察される。

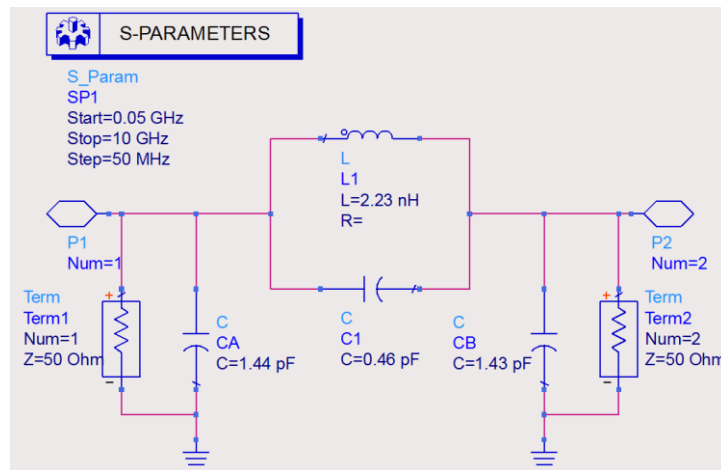


図 3-6 LPF の集中定数回路 (数値は 2.5 GHz のとき)

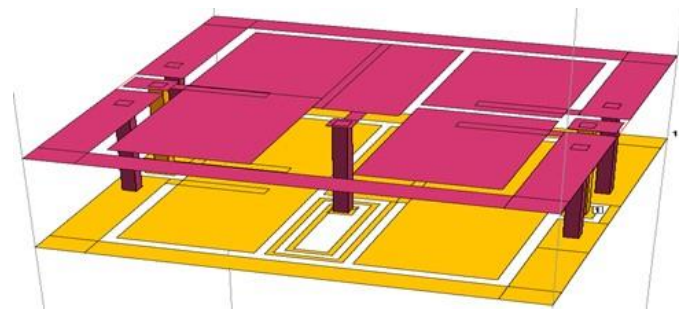


図 3-7 設計した 2.5 GHz LPF の 3D モデル

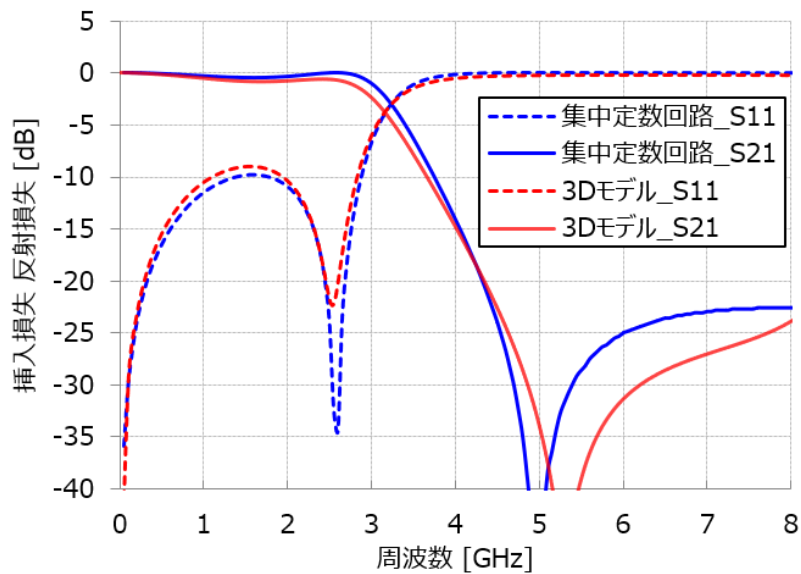


図 3-8 2.5 GHz LPF の集中定数回路モデル、及びレイアウト後の 3D モデルのフィルタ特性の比較

3.3. 3D ガラス IPD の製作

今回の 3D ガラス IPD の製作工程を図 3-9(a)に示す。シランカップリング処理を施した $100 \mu\text{m}$ 厚の EN-A1 ガラスの両面に $17.5 \mu\text{m}$ 厚の ZS-100 ポリマーフィルムをラミネートし、第 2 章で議論した ArF エキシマレーザで孔加工を実施した。その後、図 2-4 に示したセミアディティブプロセスにて、無電解銅めっき、フォトリソグラフィ、電解銅めっきを行い第 1 層目の配線層を形成した。続いて第 2 層目形成の為、 $17.5 \mu\text{m}$ 厚の ZS-100 を基板の両面にラミネートし、UV レーザにて配線層間ビアを形成後、再度セミアディティブプロセスにて第 2 層目配線層を形成した (図 3-9(b))。両面各 2 層の配線層が出来上がった後、フィルムタイプのソルダーレジストをパッシベーション層としてラミネートし、フォトリソグラフィにて 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) 用のパッド部の開口を形成

(図 3-9(c))。その後、パッド部を無電解ニッケルめっき、無電解パラジウムめっき、無電解金めっきにて表面処理 (ENEPIG) を行った後、BGA を搭載した [60]。その後、ダイシングにて小片化し (図 3-9(d))、それぞれテスト用のプリント配線板に実装した。

図 3-10、図 3-11 に製作した 3D ガラス IPD のプリント配線板への実装後の外観写真、及び断面写真をそれぞれ示す。

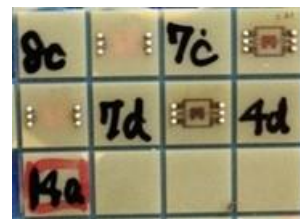
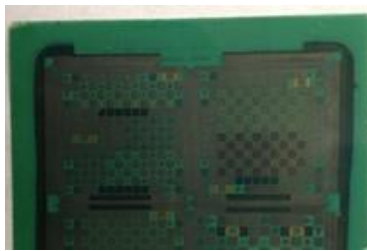
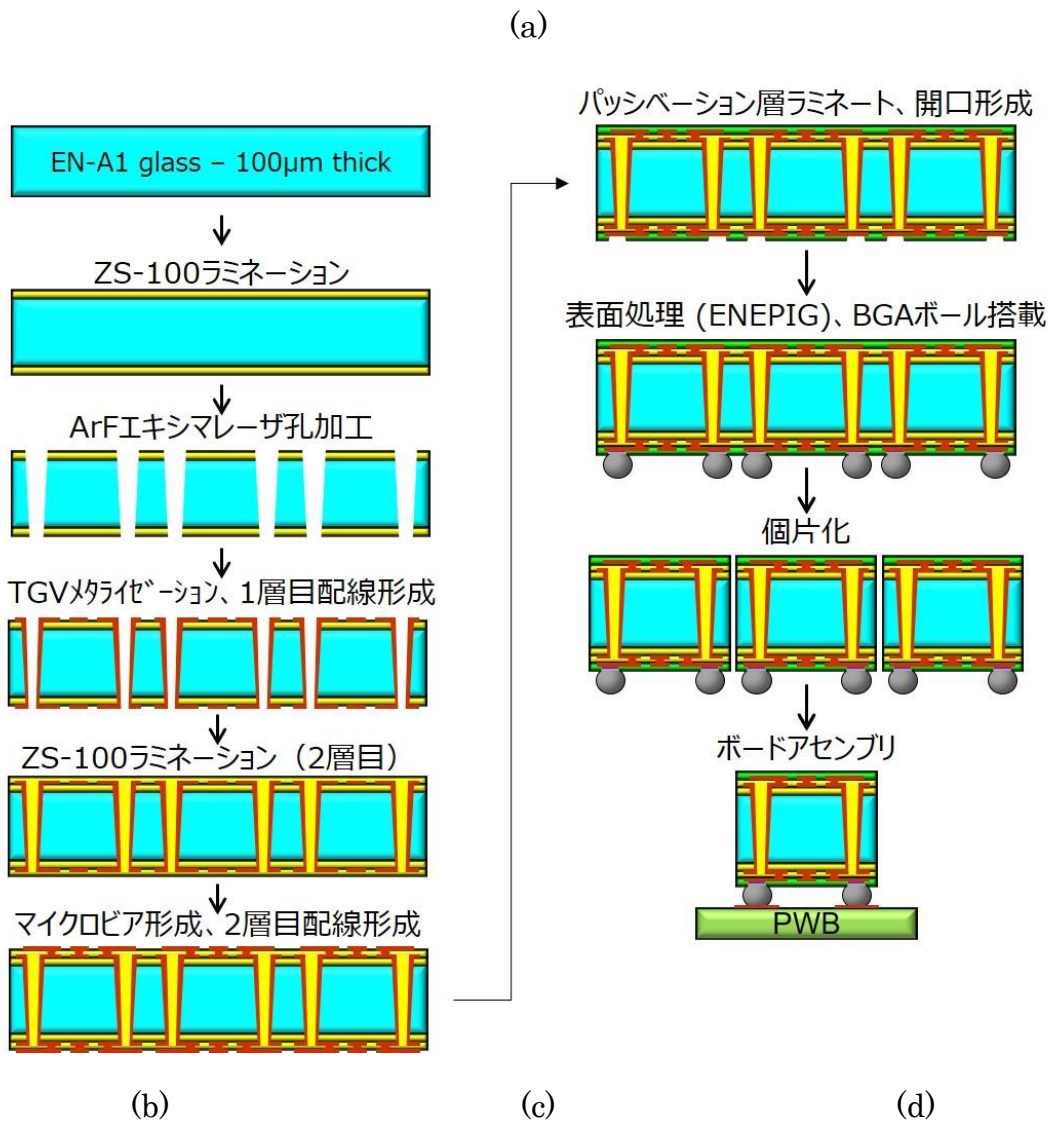


図 3-9 3D ガラス IPD の製作工程; (a)製作工程フロー、(b)2 層目配線形成後、(c)パッシベーション層形成後、(d)BGA 搭載、ダイシング後

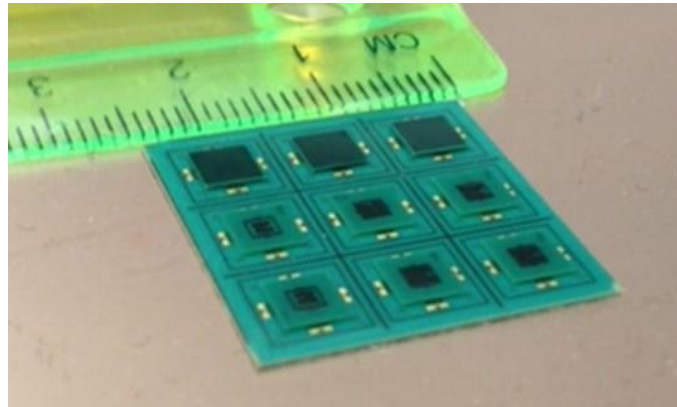


図 3-10 製作した 3D ガラス IPD の外観写真

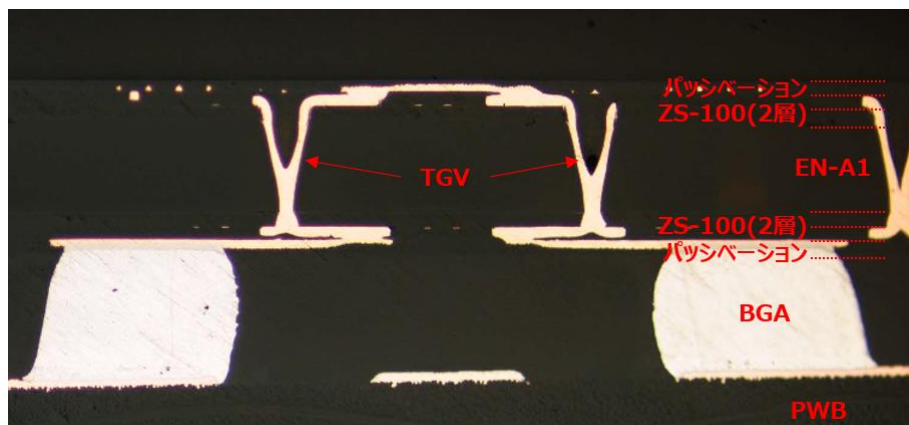


図 3-11 製作した 3D ガラス IPD の断面写真

3.4. 3D ガラス IPD の評価

製作後の 3D ガラス IPD において、ネットワークアナライザ（Agilent Technologies）を用いて LPF の特性評価を行った（図 3-12）。

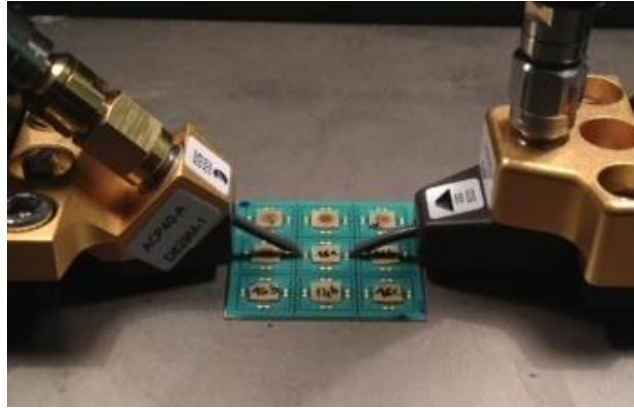


図 3-12 ネットワークアナライザでの評価の様子

まずはプリント配線板へ実装する前の 3D ガラス IPD 単体レベルにて、図 3-13(a)、(b)に示すようにガラス基板の上下各面に同じの設計レイアウトの 0.85 GHz LPF を配置した構成で評価を行った。測定は両者とも下面のプローブパッドより行っており、上面に配置したの LPF は TGV を介して下面に繋がっている。この上下面の二つのフィルタ特性を比べることにより TGV 挿入による影響が分かる。上下両フィルタの S パラメータを図 3-13(c)に示すが、カットオフ周波数が両方のフィルタとも設計値に対して 8~10%程度、高周波側にシフトしている。このシフトの原因は、銅配線の厚さの偏差に起因するものと考えられる。図 3-14 は 1 層目の配線層形成時に、基板内における銅配線の厚みの分布を測定したものであるが、基板面内でめっき銅厚が 10~25 μm と大きく変化していた。この銅配線の厚さの偏差により絶縁層の厚みも変化し、その結果インダクタ、キャパシタの値がそれぞれ設計値から外れてしまい、カットオフ周波数のシフトに繋がったと考えられる。一方で、両フィルタとも通過帯域では挿入損失が-1 dB 程度、減衰帯域では-20 dB 程度と実用にも適う良好な特性を示している。また下面のフィルタと、TGV を介した上面のフィルタでは、カットオフ周波数の差異は 5%以下であり、これは TGV の挿入はフィルタの特性に顕著な劣化を

及ぼさないことを示している。

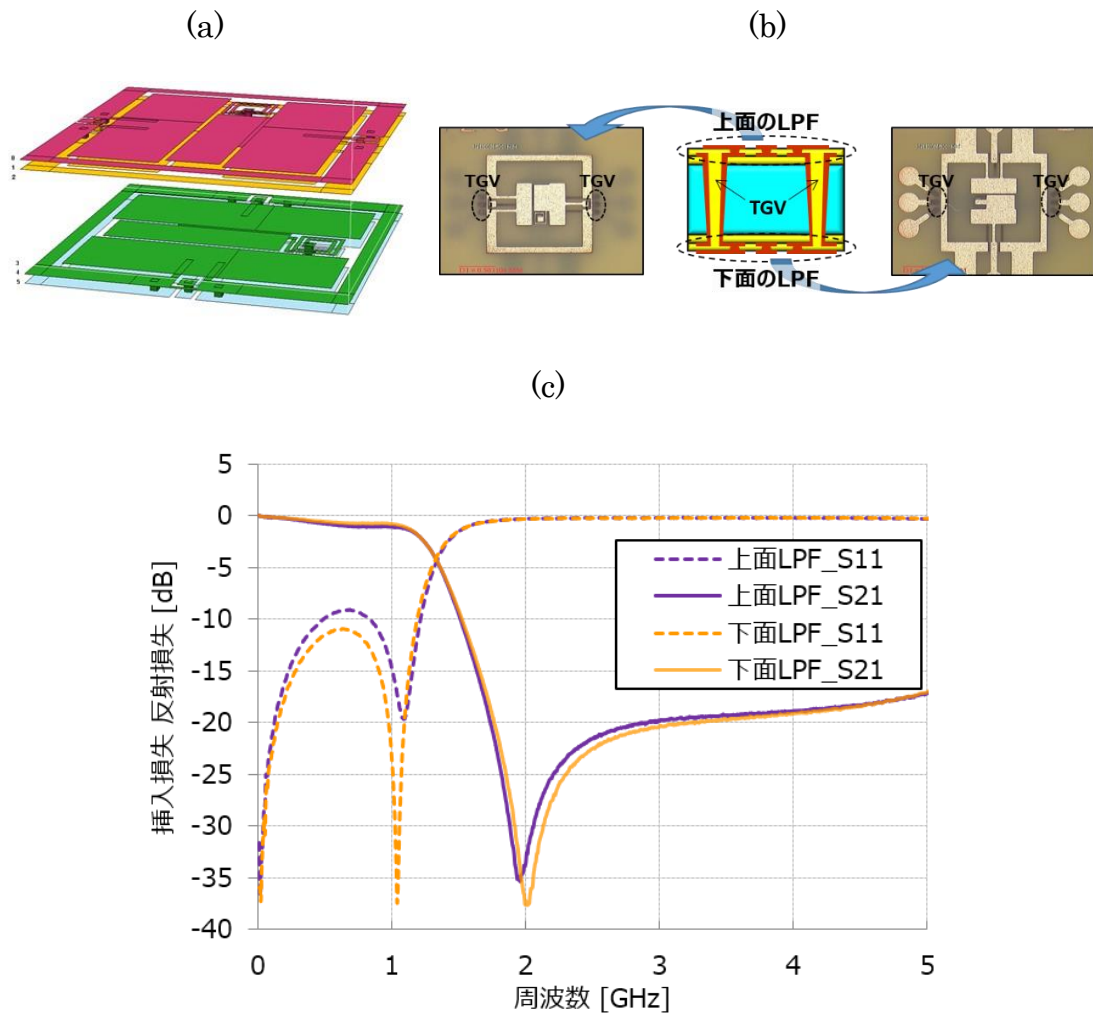


図 3-13 基板の各面に配置した 0.85 GHz LPF; (a)両面配置の概要図、(b)各面の LPF 上面図、(c)各フィルタのフィルタ特性

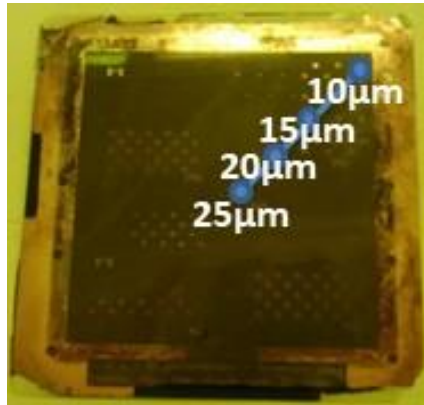


図 3-14 パネル内での銅配線の厚み分布

続いて、プリント配線板への実装前後で、フィルタ特性の測定を行った。図 3-15 に 2.5 GHz LPF の実装前後での S パラメータを示すが、カットオフ周波数に 5%程度の変化が見られた。これは BGA 部の寄生インダクタンスに起因すると考えられる。そこで図 3-16 の BGA の寄生成分を含めた集中定数回路モデルから解析すると、BGA によりおよそ 0.2 nH 程度の寄生インダクタンスが追加されたと考えられる [61]。

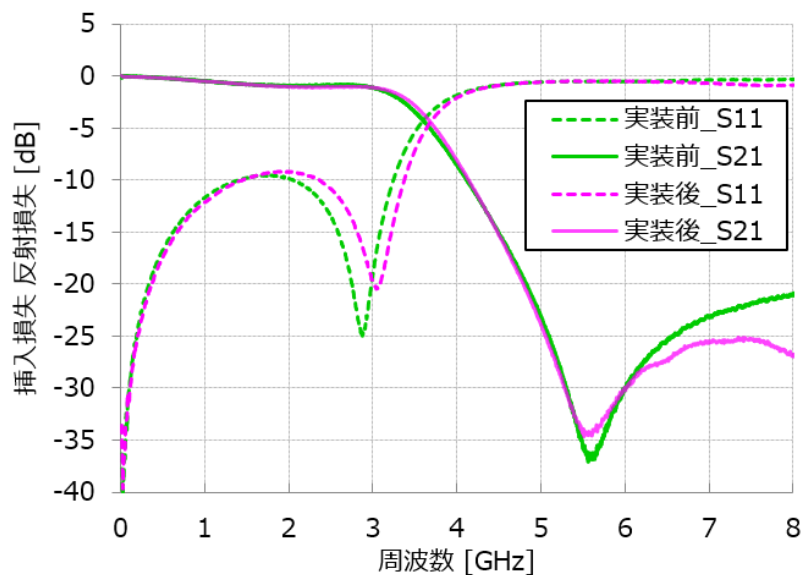


図 3-15 実装前後でのフィルタ特性

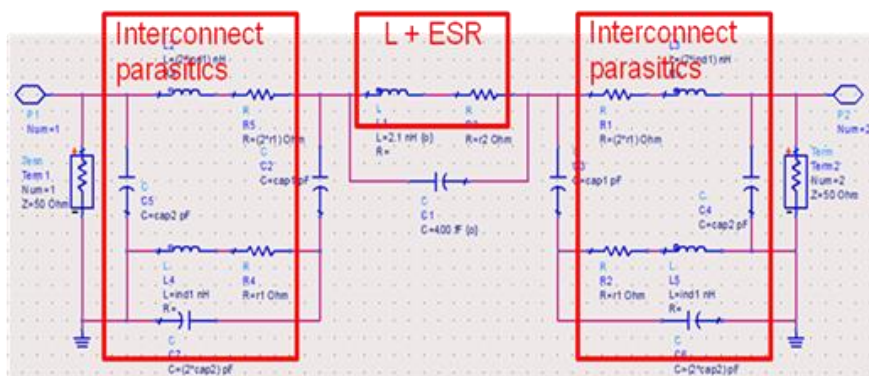


図 3-16 BGA の寄生成分も加えた LPF 集中定数回路モデル

3.5. まとめ

本章ではガラスの優位性が最も活かせる高周波向け実装基板において、TGV を利用した 3D ガラス IPD のコンセプトを提案した。TGV を導入する事により、基板の両面に素子形成が可能になり、受動部品の更なる高密度集積と小型化が可能になる。そこで実際に基板の両面に LPF を作り込んだ 3D ガラス IPD を設計、製作、評価し、3D ガラス IPD のコンセプトを実証した。

100 μm 厚のガラスをコア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 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 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が示された。プリント配線板に実装後の特性は、更に 5% 程度のカット

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された。

第4章 TGVの大気圧プラズマ源への応用

4.1. 背景

非平衡大気圧プラズマは、その名の通り、通常大気圧にて、電子温度は高温である一方、ガス温度の上昇を抑えたプラズマである [62]。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、工業、バイオ、医療、環境等の幅広い分野への応用が期待されている [63, 64, 65, 66, 67]。ガラス実装基板の製造においても、成膜前の表面洗浄や改質の目的でプラズマ処理が要所要所で活用されるが、製造時のワークサイズは～500 mm 角程度であることを考慮すると、このような大きなサイズの基板の処理には、真空装置の不要な非平衡大気圧プラズマが好適である [68]。大気圧プラズマの工業的応用では、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になる。

非平衡大気圧プラズマには、例えばグロー放電、誘電体バリア放電 (Dielectric Barrier Discharge: DBD)、沿面放電、コロナ放電など、様々な形態が存在し、様々な構成のプラズマ源が提案・開発されている [62]。例えば DBD では、 10^{14} cm^{-3} の比較的高い電子密度も実現できている [69, 70, 71, 72]。DBD の処理範囲を広げる為に、単純にプラズマ源を拡張する場合には、莫大な電力とガスが必要になる。また大量のガスがプラズマ源に流入した場合は、発生するプラズマが不安定になる。その為、プラズマ源の材料や構成を工夫し、プラズマ源を高効率化して処理範囲を広げるアプローチがなされている。

これまで沿面放電は高誘電率材料の表面に沿って放電が発生する現象が知られていた [73, 74, 75]。そこで、プラズマ源に沿面放電を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有る。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。しかしながら、高誘電率材料は脆く、また材料コストが高いという課題が有る [76]。

そこで、本研究では TGV がプラズマ源の材料として使えないかを検討した。TGV はガラス内にある数 10 μm 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、TGV をプラズマ源の内壁に用いた時に、発生するプラズマへの影響を検証した。また TGV はガラス面の任意の位置に製作できる為、その特徴を利用して、局所的に材料物性を変える事ができる。そこで、プラズマ源内壁の中で、TGV の位置を変えたときにプラズマへ与える影響も検証した。

4.2. 実験方法

4.2.1. TGV 基板

本章の実験では完全充填型の TGV にて評価を行う為に、ポリマーラミネートガラスではなく、ガラス単体の TGV を用いた。300 μm 厚の EN-A1 ガラスに、上面の孔径が 80 μm 、下面の孔径が 40 μm の孔を 150 μm ピッチで 39×40 個、正方配置したものをを用いた。孔形成後、チタンと銅をシード層としてスパッタで成膜し、その後、電解めっきで孔を銅で完全充填をした [77]。その後、化学機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing: CMP) にてガラスの両表面に堆積した銅を除去した [78, 79]。図 4-1(a)、(b)に今回の実験にて製作した完全充填型の TGV の上面図、及び断面図を示す。

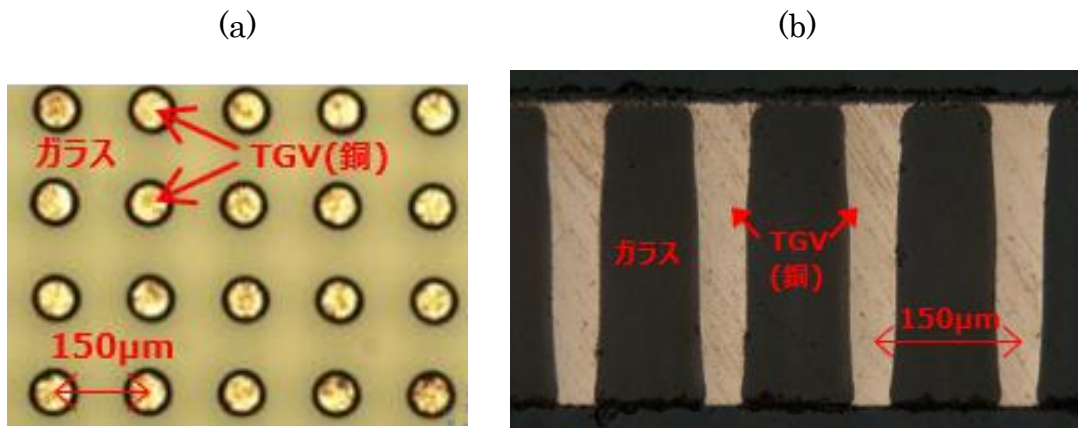


図 4-1 製作した TGV; (a)上面図、(b)断面図

4.2.2. 50mm 非平衡大気圧プラズマ源

本実験では 50 mm 幅の非平衡大気圧プラズマ源を使用した。本プラズマ源は、Iwasaki 等により報告されたプラズマ源を 50 mm 幅に拡張したものである [80, 81, 82]。その概要図を図 4-2(a)、(b)に示す。プラズマ源の上部から 10 slm の流量で放電領域に Ar ガスを供給し、下部から流出するようになっている。放電領域は一对のタンゲステン電極が 50 mm の間隔で対向している。放電部は透明な合成石英ガラスで作られており、放電の様子が観察できるようになっている。また図 4-2(c)に示すように放電領域の内壁は他材料に交換できるように設計されている。

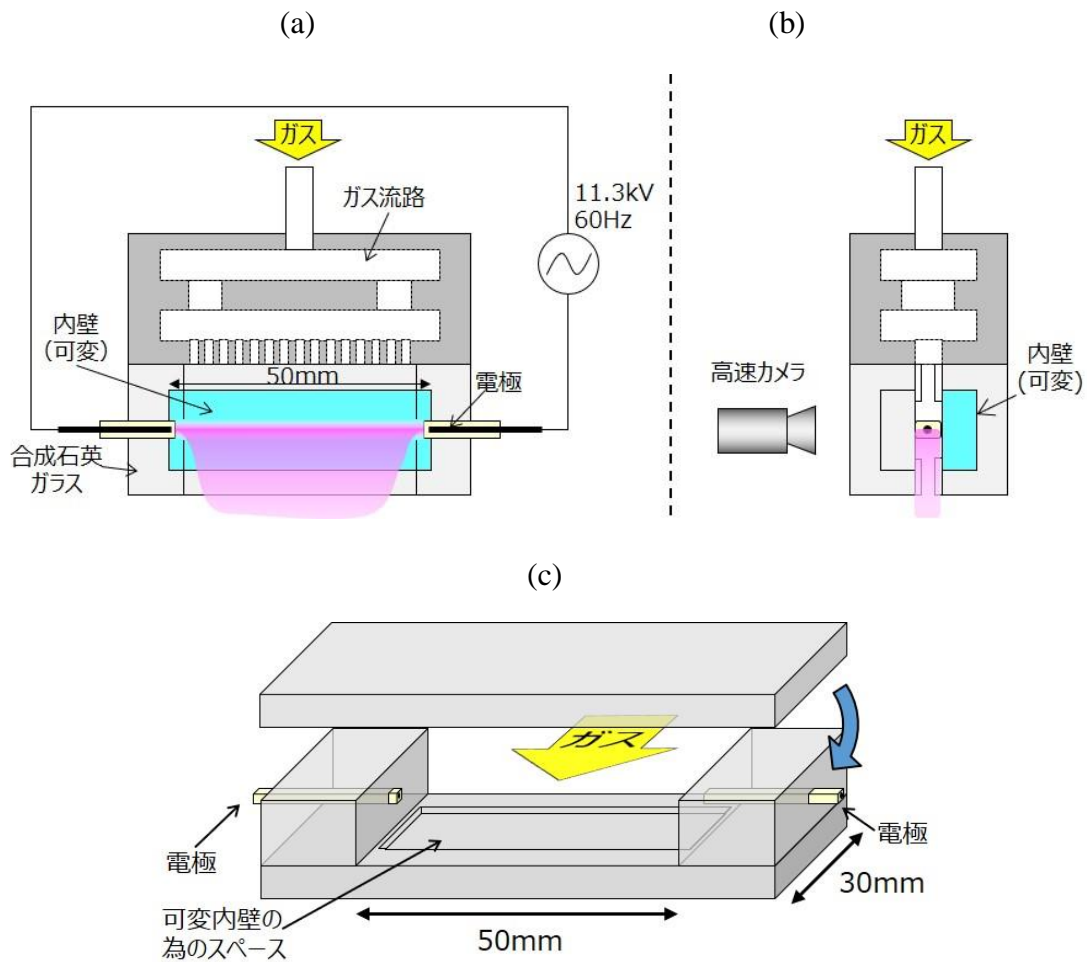


図 4-2 50 mm 幅非平衡大気圧プラズマ源の概要図; (a)正面図、(b)断面図、(c) 放電部

今回の実験では、放電部の片側の内壁を、図 4-3 に示すように前項で述べた TGV アレイを持つガラス基板に置き換えた。尚、TGV 基板は小片化されており、内壁内における TGV アレイの位置を任意に変えることができるようになっている。そこで内壁における TGV アレイの位置が与える影響を検証する為に、図 4-4 に示すように、1 対の TGV アレイを基板の端から 2 mm、7 mm、12 mm の位置に配置した場合、及びリファレンスとして TGV アレイのない同じ厚みの EN-A1 ガラスを挿入した場合において、それぞれ試験を行った。

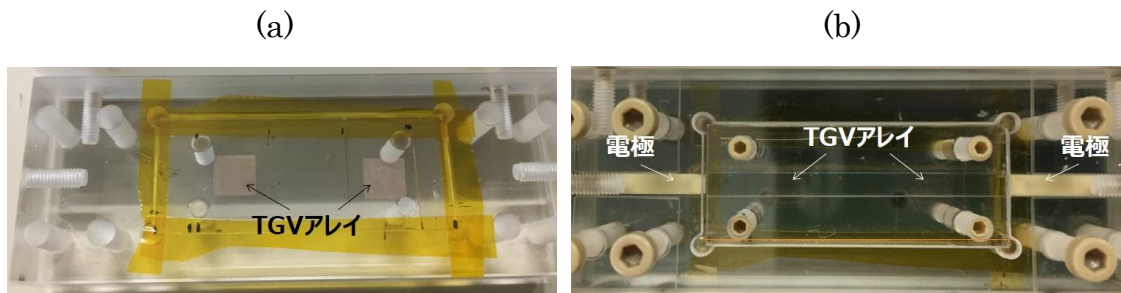


図 4-3 TGV 基板をその内壁に挿入したプラズマ源; (a)TGV 基板を貼り付けたプラズマ源内壁、(b)その後、もう片側の内壁、及び電極を取り付けたプラズマ源

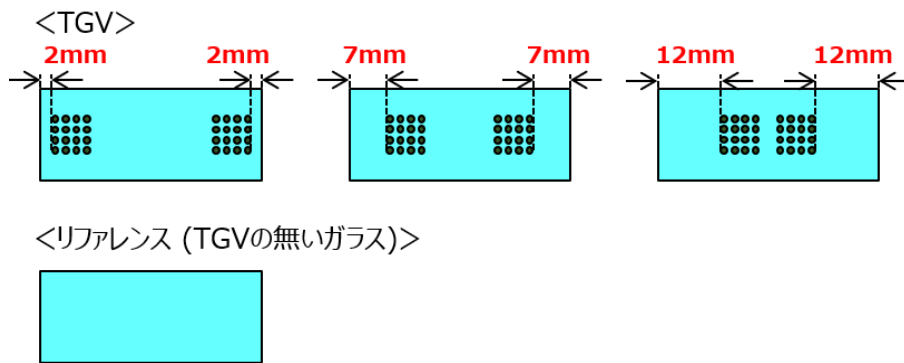


図 4-4 内壁における TGV アレイの位置

電源には図 4-5 に示す 60 Hz で変調した 20 kHz、11.3 kV の交流電圧を用い、対向するタングステン電極に印加した。

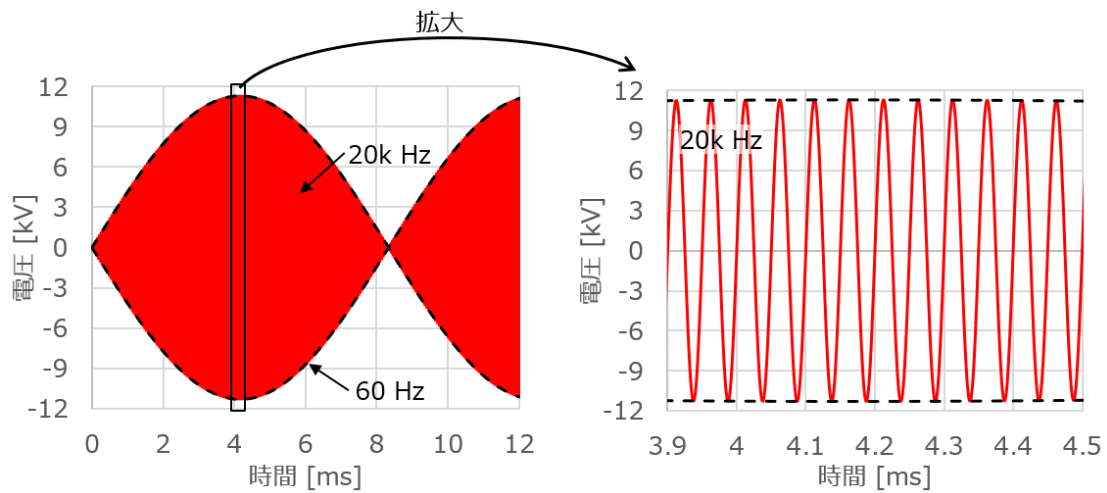


図 4-5 使用された電源の電圧波形; 60 Hz で変調させた 20 kHz、11.3 kV の交流電圧

4.2.3. プラズマ特性の評価方法

電流電圧・プラズマの様相の時空間計測

高電圧プローブ (Tektronix P6015A) と電流計 (Pearson Current Monitor Model 3972) を用いて電圧、及び電流をそれぞれ計測し、オシロスコープ (GW Instek GDS-3504) で記録した。またオシロスコープと高速カメラ (Vision Research Phantom v1610) と同期させ、放電の様相の時空間計測を行った。

電子密度測定

本研究では発光分光 (Optical Emission Spectroscopy; OES) による電子密度の測定も実施した。原子の周囲に存在する電子あるいはイオンによって作られる電界により縮退していた原子のエネルギー準位が分裂し、観測される輝線はシュタルク広がりと呼ばれる広がりを持つ。シュタルク広がりによる輝線プロファイルは主に電子密度によって決まる為、逆に輝線プロファイルから、プラズ

マ中の電子密度を求める事ができる [83]。

本研究では Ar (99.5 %) と H₂ (0.5 %) の混合ガスを用い、水素原子のバルマー系列 (H_β, $\nu_0 = 486.13 \text{ nm}$) の輝線の拡がりを解析して、シュタルク拡がりを求めることにより電子密度を見積もった。図 4-6 に示すようにプラズマ源の下部の吹き出し口に対物レンズ付きファイバーを設置し、プラズマ発光を高感度分光器 (ANDOR Shamrock 500i) に導き、イメージンテンシファイヤ搭載 CCD 検出器 (ANDOR iStar) で輝線スペクトルを取得した。回折格子は 2,400 本/mm のものを用い、波長分解能は 0.01 nm で測定を行った。

輝線スペクトルは複数の要因で拡がり幅を持つ。各拡がり幅を解析してシュタルク拡がりを求める。以下に電子密度の算出の手順を述べる。まず測定した H_β の輝線スペクトルを、ガウス関数とローレンツ関数の畳み込みとして(4-1)式で示すフォークト関数でスペクトル形状をフィッティングした [84, 85]。

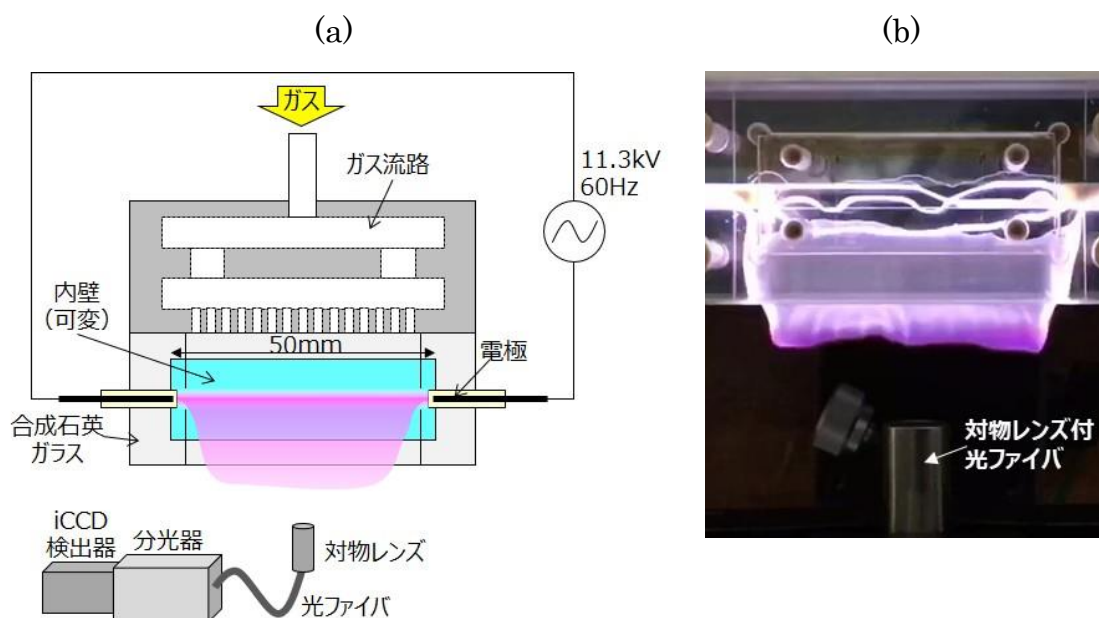


図 4-6 発光分光の実験系; (a)実験系概念図、(b)実験系の実際の写真

$$f_V(\nu) = \frac{a}{\pi} \int \frac{\exp(-y^2)}{a^2 + (\omega - y)^2} dy \quad (4-1)$$

ここでローレンツ/ガウス比を a 、スペクトル線幅 ω はそれぞれ以下である。

$$a = \frac{\Delta\nu_L}{\Delta\nu_G} \sqrt{\ln 2} \quad (4-2)$$

$$\omega = \frac{2(\nu - \nu_0) \sqrt{\ln 2}}{\Delta\nu_G} \quad (4-3)$$

$\Delta\nu_L$ はローレンツ関数における半値全幅であり、 $\Delta\nu_G$ はガウス関数における半値全幅である。ガウス幅は、ガウス関数で表される(4-4)式のドップラー拡がり $\Delta\nu_D$ の寄与が支配的である [86]。

$$\Delta\nu_D [nm] = 7.162 \times 10^{-7} \nu_0 \sqrt{\frac{T_{gas}}{M}} \quad (4-4)$$

ここで T_{gas} はガス温度、 M は原子量である。

シュタルク拡がり、上記のローレンツ半値全幅 $\Delta\nu_L$ よりファンデルワールス拡がり $\Delta\nu_{vdW}$ を差し引くことにより求める事ができる。Ar ガスにおける $H\beta$ のファンデルワールス拡がり $\Delta\nu_{vdW}$ は、Hofmann 氏等によって導かれた(4-5)式を使った [86]。

$$\Delta\nu_{vdW} [nm] = \frac{5.24}{T_{gas}^{\frac{7}{10}}} \quad (4-5)$$

シュタルク拡がり、と電子密度の関係式(4-6)を用いて電子密度を見積もった [86]。

$$\Delta\nu_S [nm] = 3.67 \times \left(\frac{n_e [m^{-3}]}{10^{23}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4-6)$$

4.3. 実験結果

4.3.1. TGV の無いガラスをプラズマ源内壁に用いたとき

放電の様子を観察

まず TGV の無いガラスをプラズマ源の内壁に挿入した時の放電の様子を、デジタルカメラ (iPhone6s、F2.2、露光時間 30 ms) で撮影したものを図 4-7 に示す。このときは電極間で発生した放電がガスによってプラズマ源一杯に拡がり、プラズマ源の下方から吹き出した。

次に放電の振舞いをより詳細に観察する為に、高速度カメラを用いて露光時間 $19 \mu\text{s}$ 、毎秒 50,000 フレームで撮影を行った。図 4-8(a)~(h)に 60 Hz の半周期である 8.3 ms 間における典型的な放電の振舞いの一連の画像を示す。まず 1.74 ms 時に電極間で放電が発生し (図 4-8(b))、その後、ガス流によってその放電が下方に流されてゆき (図 4-8(c))、プラズマ源の内部全体に拡がる (図 4-8(d)、(e))。放電がプラズマ源の下方から吹き出し、放電経路が長くなると、電極間でショートカットが発生する (図 4-8(f))。その後、電極間での放電が続いた後、7.50 ms 後に放電が消失する (図 4-8(g)、(h))。TGV の無いガラス基板の場合、放電は 8.3 ms 周期で、多くの場合、上記の典型的な振舞いを繰り返した。



図 4-7 TGV の無いガラスを内壁に用いた際の放電の様子 (デジタルカメラ (iPhone6s、F2.2、露光時間 30 ms) で撮影)

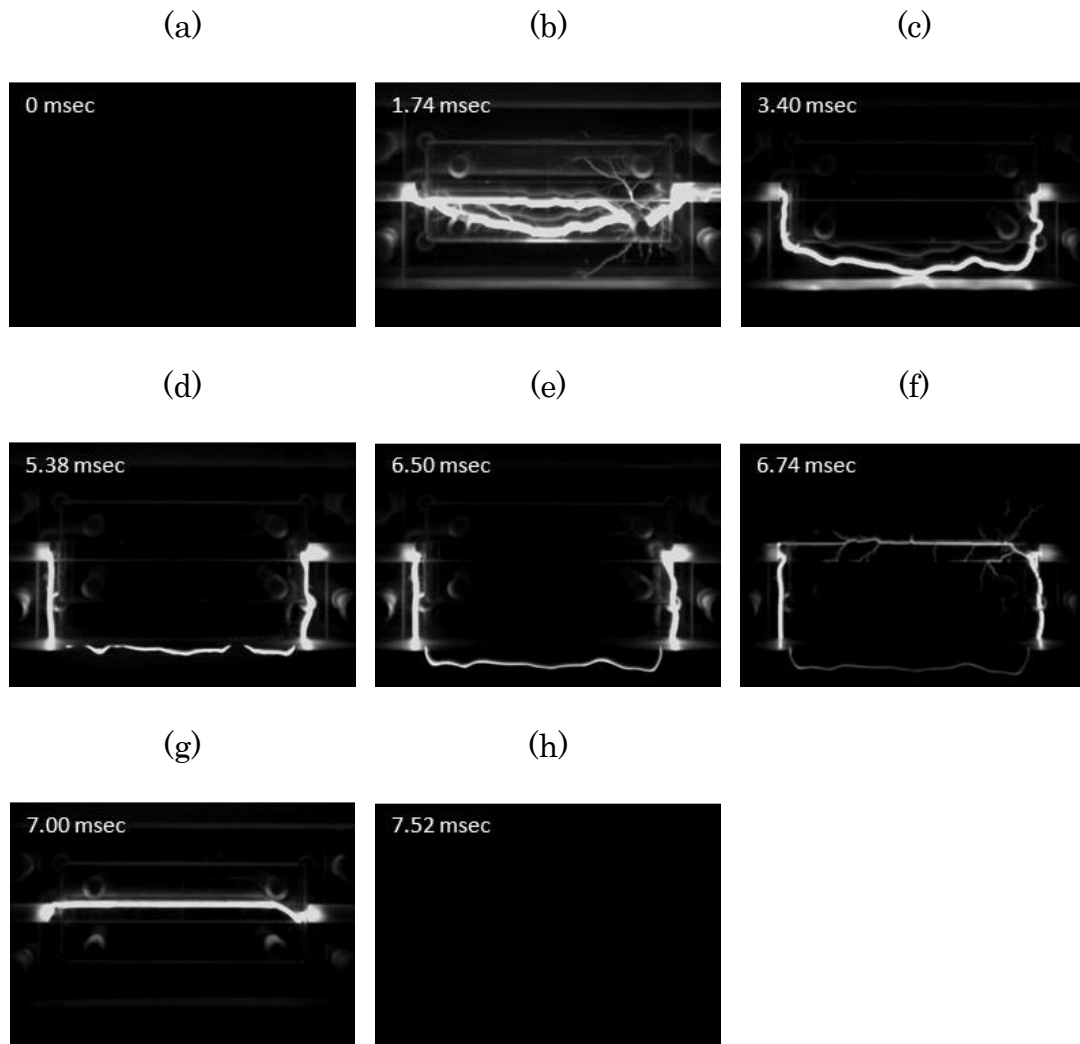


図 4-8 TGV の無いガラスを内壁に用いた際の放電の振舞い（高速カメラでの撮影、露光時間 $19 \mu\text{s}$ ）

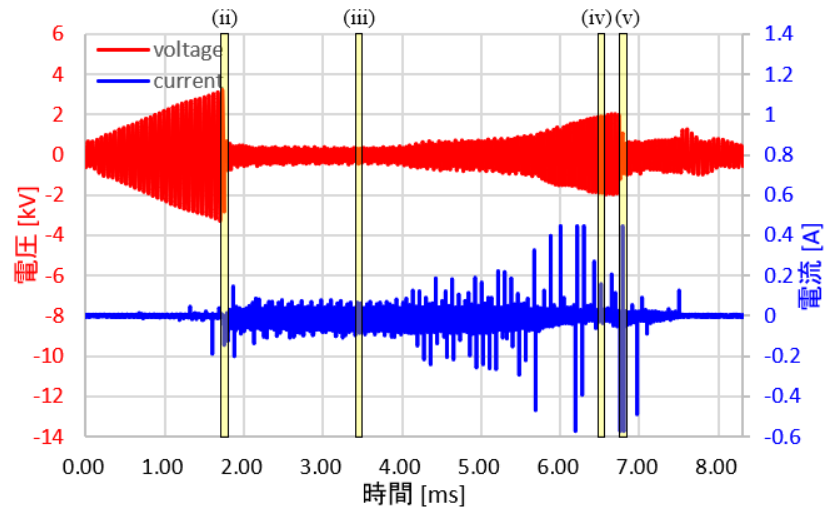
電流電圧特性

次に図 4-8 に示した放電に対して、高速カメラとオシロスコープを同期して計測した、放電の各瞬間の電流電圧特性について議論する。図 4-8 に示した放電の 60 Hz の半周期における電流電圧特性を図 4-9(i)に示す。また図 4-9(ii)、(iii)、(iv)、(v)は、それぞれ図 4-8(b)、(c)、(e)、(f)の時の電流電圧特性を示す。尚、各グラフ内の黄色でハッチングされた領域が、図 4-8 の各画像の露光時間

(19 μ s) と一致する。

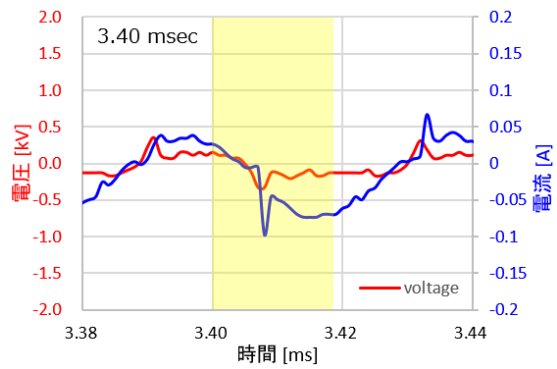
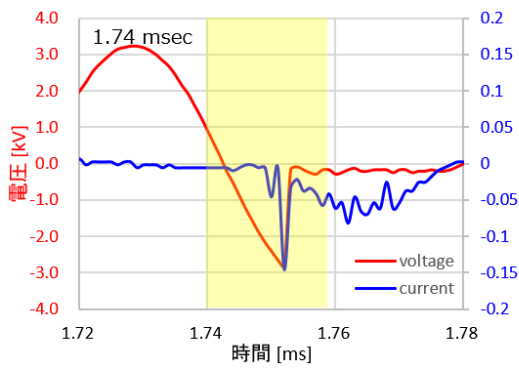
図 4-9(i)に示すように、電極間に印加された電圧が徐々に上昇し、印加電圧がおよそ 6 kV_{p-p}に達した時に電極間に放電が発生し、電流が流れるとともに電圧が急激に低下した (図 4-9(ii))。0.1 A 以上の電流スパイクを伴うスパーク型放電が起きている。その後、放電経路がガス流によって下流側に流されるとともに電圧が徐々に増加していったが、一方で電流は正弦波形の中にスパイクを伴っており、スパーク型放電が続いていた (図 4-9(iii)、(iv))。その後、放電が下方に大きく拡がりると同時に電極間で短絡経路が発生したとき、電圧がおよそ 4 kV_{p-p} から 2 kV_{p-p} に急激に低下した。その後、電極間で発生していた放電は印加電圧の低下により消失し、その後、電流は流れなくなった。

(i)



(ii)

(iii)



(iv)

(v)

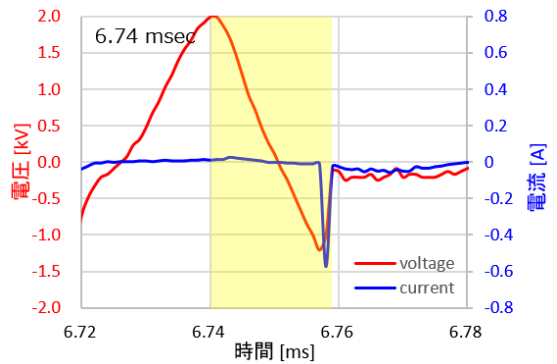
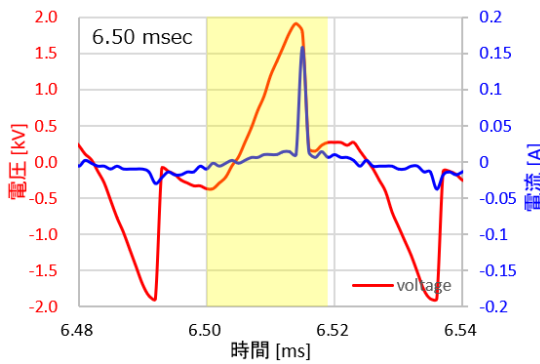


図 4-9 TGV の無いガラスをプラズマ源に用いたときの電流電圧特性; (i) 60 Hz 半周期間の電流電圧特性、(ii)~(v)各瞬間の電流電圧特性

4.3.2. TGV ガラスをプラズマ源内壁に用いたとき

放電の様子を観察

TGV 基板をプラズマ源の内壁に挿入した時の放電の様子を観察した。図 4-4 における基板の端から 2 mm の位置に TGV アレイを配置した TGV 基板をプラズマ源の内壁に貼り付けた。そして電圧を印加し、発生した放電の様子を、デジタルカメラ (iPhone6s、F2.2、露光時間 30 ms) で撮影したものを図 4-10 に示す。放電はプラズマ源いっぱいには拡がり、下方から噴き出ている。これは一見、図 4-7 の TGV の無いガラスを挿入した時と同じように見える。

高速度カメラを用いて放電の様子の詳細観察を行った。図 4-11(a)~(h)は、60 Hz の半周期 (8.3 ms) における典型的な放電の振舞いを、19 μ s、毎秒 50,000 フレームで取得した画像である。放電は 8.3 ms 周期で発生、消失しており、これは TGV が無いときと同様である。しかしながら TGV 基板を挿入した場合は、図 4-11(a)~(h)で示すように、放電は消失するまでの間、ガス流に流されることなく電極間に留まる傾向があった。そして TGV が無い時に比べ、放電がガス流によって下方に流される頻度が少なくなった。

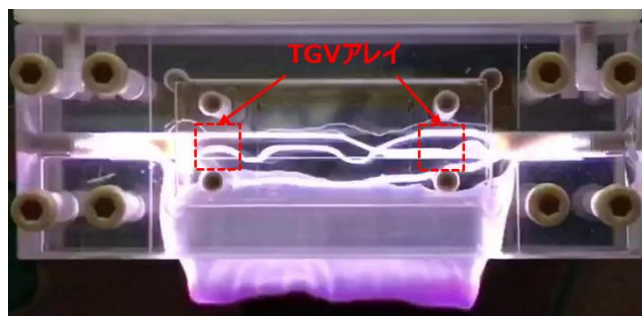


図 4-10 TGV ガラスを内壁に用いた際の放電の様子 (デジタルカメラ (iPhone6s、F2.2、露光時間 30 ms) で撮影)

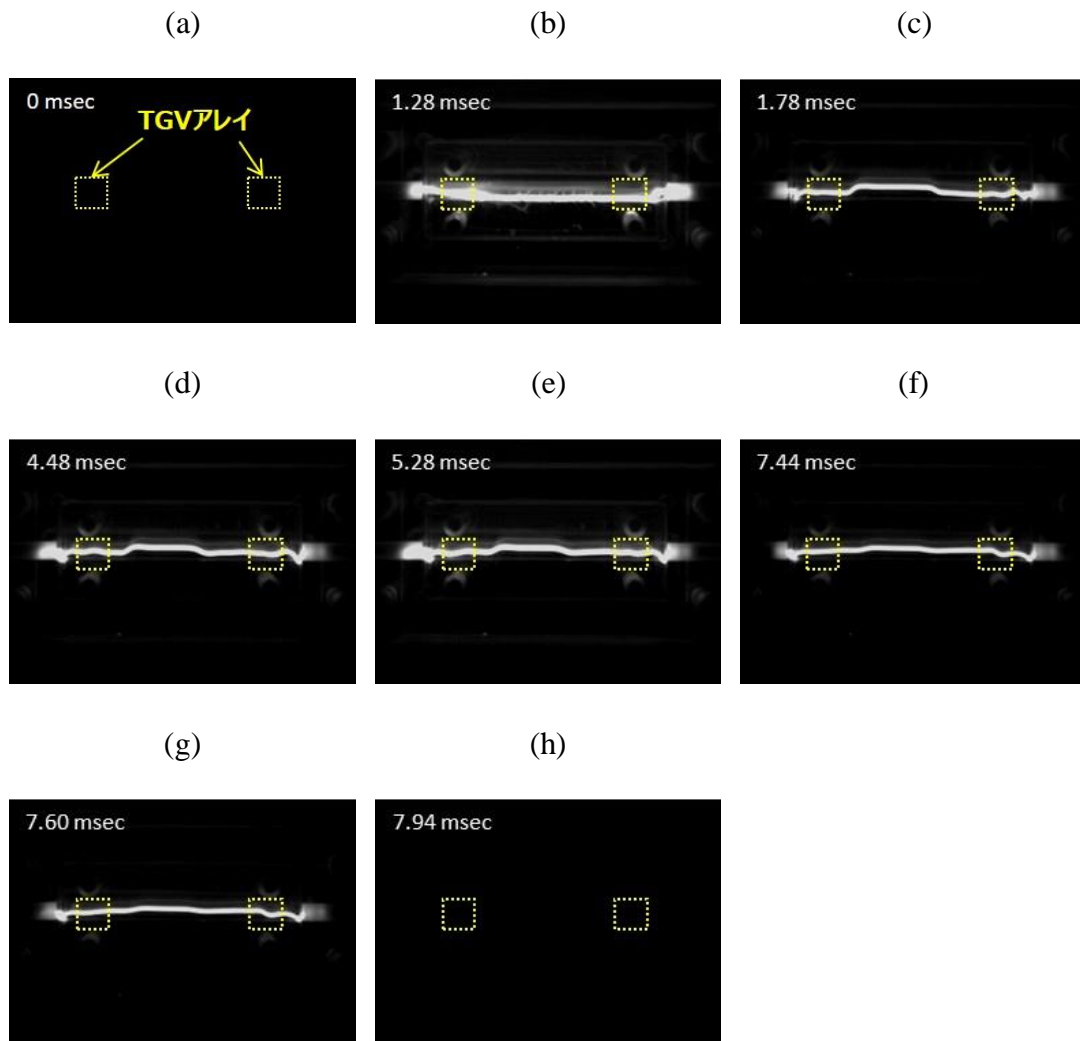


図 4-11 TGVA ガラスを内壁に用いた際の放電の振舞い（高速カメラでの撮影、露光時間 $19 \mu\text{s}$ ）

電流電圧特性

図 4-11 の放電に対し、同期測定により取得した電流電圧特性を図 4-12 に示す。図 4-12(i)に 8.3 ms 間の電流電圧特性を、図 4-12(ii)、(iii)、(iv)、(v)に図 4-11(b)、(c)、(d)、(f)の時の電流電圧特性をそれぞれ示す。放電開始電圧はおよそ 4 kV_{pp} と TGV が無い時に比べ、低い電圧で放電が発生している(図 4-12(ii))。放電が発生した直後は電流スパイクが見られるスパーク型放電であった(図

4-12(iii))。しかしその後、電流は正弦波形状になっていき、また電流スパイクも小さく不明瞭になっていった (図 4-12(iv))。また TGV が無い時 (図 4-9) とは異なり、放電がガス流に流されない時は電圧はより安定して低い値であった。その後、再び電流スパイクが見られ始め、7.94 ms 以降には放電が消失した (図 4-12(v))。

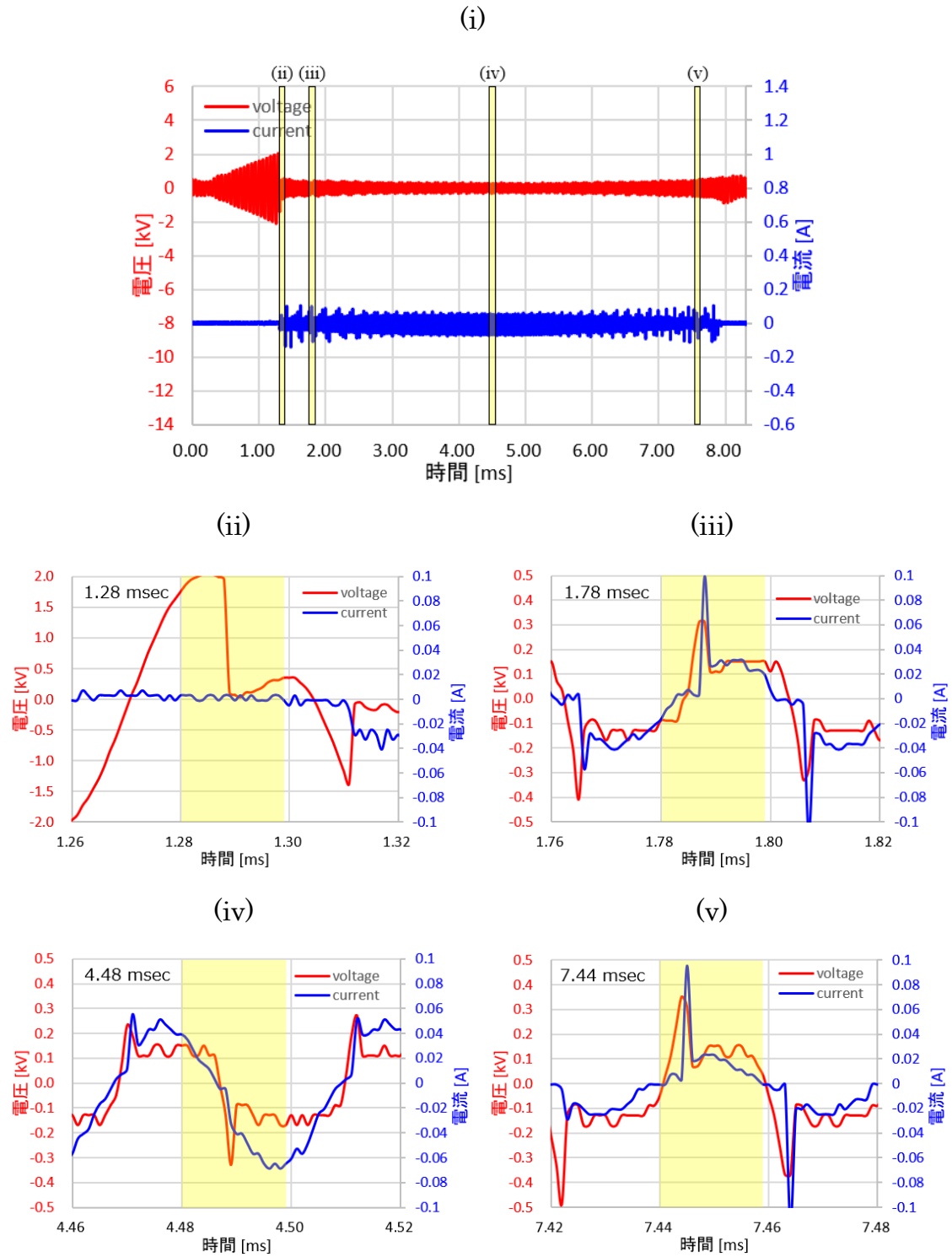


図 4-12 TGV ガラスをプラズマ源に用いたときの電流電圧特性; (i) 60 Hz 半周期間の電流電圧特性、(ii)~(v)各瞬間の電流電圧特性

4.3.3. TGV の位置の影響の検証

本項では内壁内での TGV の位置が発生するプラズマに与える影響を議論する。前項にて、TGV をプラズマ源の内壁に挿入することにより、放電が電極間に留まり下方に流れる頻度が減る現象が確認された。そこで、TGV アレイを図 4-4 に示すように一対の TGV アレイを基板の端から 2 mm、7 mm、12 mm に配置した。リファレンスとして TGV が無い基板も用意した。それぞれにおいて放電が流される頻度を計測した。本実験系では 60 Hz の半周期の 8.3 ms 毎に放電が発生し、その後消滅する放電の挙動を高速カメラにて 750 ms 間撮影をした。発生した放電経路が下方に流れてゆきプラズマ源の外に噴き出す回数を計測し (図 4-13)、8.3 ms で割ることで、発生した放電が電極間に留まらずに流される確率を計算した。その計測結果を図 4-14 に示すが、TGV アレイを両端の電極付近に配置したときに、より放電が流されにくくなっている。一方で、TGV アレイを電極から離れた位置に配置するにつれ、よりガス流に流されやすくなり、TGV が無い時の振舞いに近付いていくことが分かる。

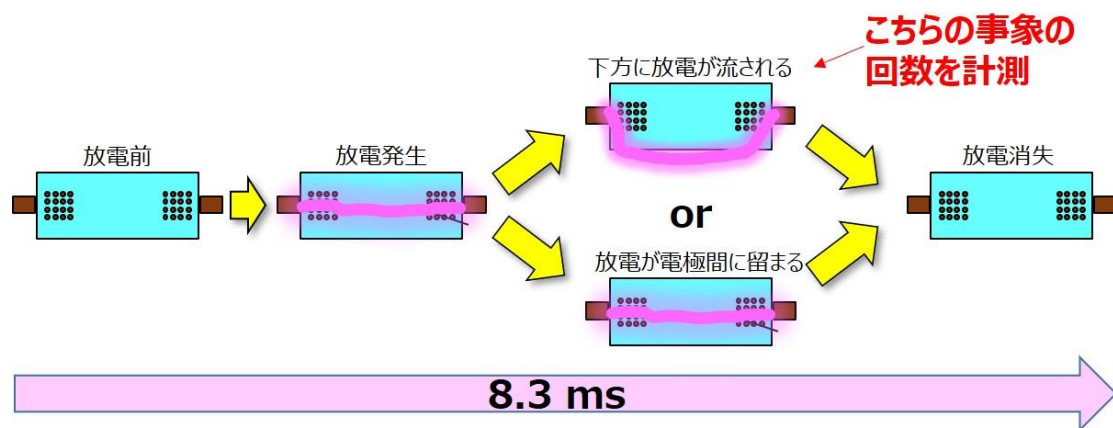


図 4-13 放電が下方へ噴き出す回数の計測

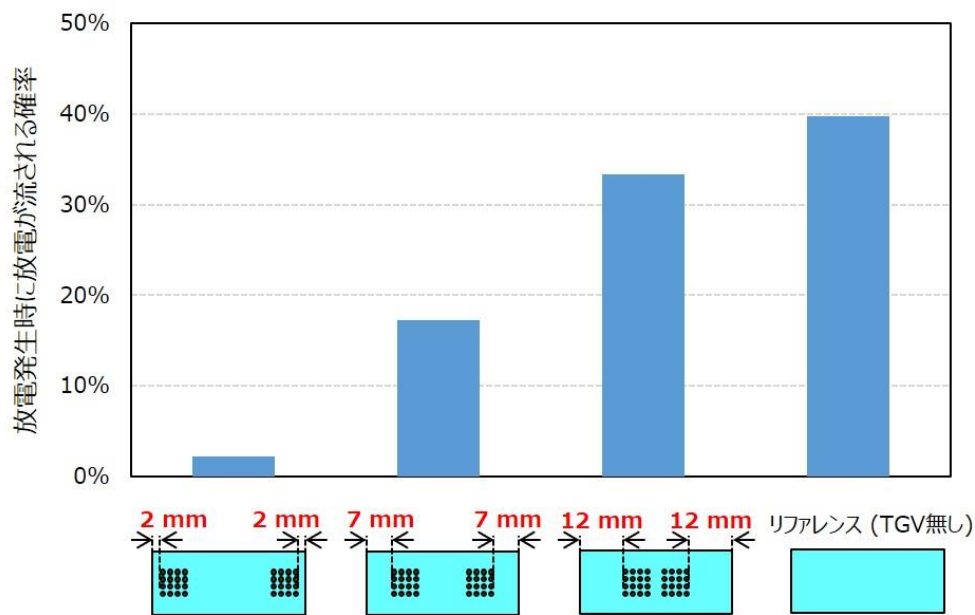


図 4-14 TGV アレイの配置位置を変えたときの、0.25 秒間に放電がプラズマ源から下方に噴き出した回数

次に TGV アレイを基板の端から 2 mm、7 mm、12 mm に配置した場合、及びリファレンスとして TGV が無い場合のそれぞれにおいて、放電が発生した放電開始電圧を計測した。その結果を図 4-15 に示す。TGV アレイを両端の電極に近付けて配置すると放電開始電圧が低下し、逆に電極から離れて配置すると放電開始電圧が増加することが分かった。

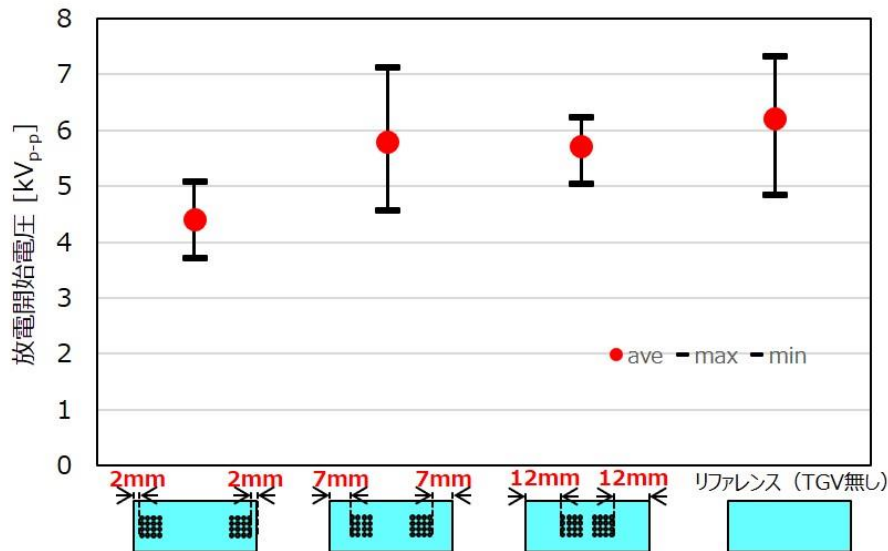


図 4-15 TGV アレイの配置位置を変えたときの放電開始電圧

4.3.4. 電子密度測定

TGV が無いガラス基板、及び TGV 基板をプラズマ源の内壁に挿入した場合において、発生したプラズマの発光分光から電子密度の測定を行った。図 4-6 に示すように対物レンズ付き光ファイバーをプラズマ源の直下に設置し、プラズマからの発光を分光器に導き、50 ms の露光時間で 2,000 回積算を行い、水素原子のバルマー系列 (H_{β} , $\nu_0 = 486.13 \text{ nm}$) の輝線スペクトルを取得した。

図 4-16(a)、(b)に TGV が無いガラス基板、及び TGV 基板の H_{β} の輝線スペクトルの測定値と、それをフォークト関数でフィッティングしたものをそれぞれ示す。尚、同様の実験セットアップでガス温度は 1,000 K が得られている。ガス温度 $T_{\text{gas}}=1,000 \text{ K}$ でのドップラー拡がり(4-4)式によるガウス半値全幅を考慮しフィッティングを行った。フィッティング曲線におけるローレンツ半値全幅は、TGV 無し、TGV 有りそれぞれ 0.2303 nm、0.2298 nm であった。 $T_{\text{gas}}=1,000 \text{ K}$ の仮定から、ファンデルワールス拡がり(4-5)式より 0.0416 nm と見積もられる。ローレンツ半値全幅よりファンデルワールス拡がりを差し引くことで、シ

ユタルク拡がりは TGV 無し、TGV 有りそれぞれ 0.01887 nm、0.1882 nm と求められる。(4-6)を使って、電子密度はそれぞれ $1.166 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.162 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ と見積もられた。これらの値はどちらも比較的高い電子密度である。今回の測定において TGV の有無で大きな差異は見られなかった。今回は図 4-6 のようにプラズマ源の直下より電子密度を測定した為、プラズマ源内を局所的に細かく測定した場合には、電子密度にも違いが見られるはずである。

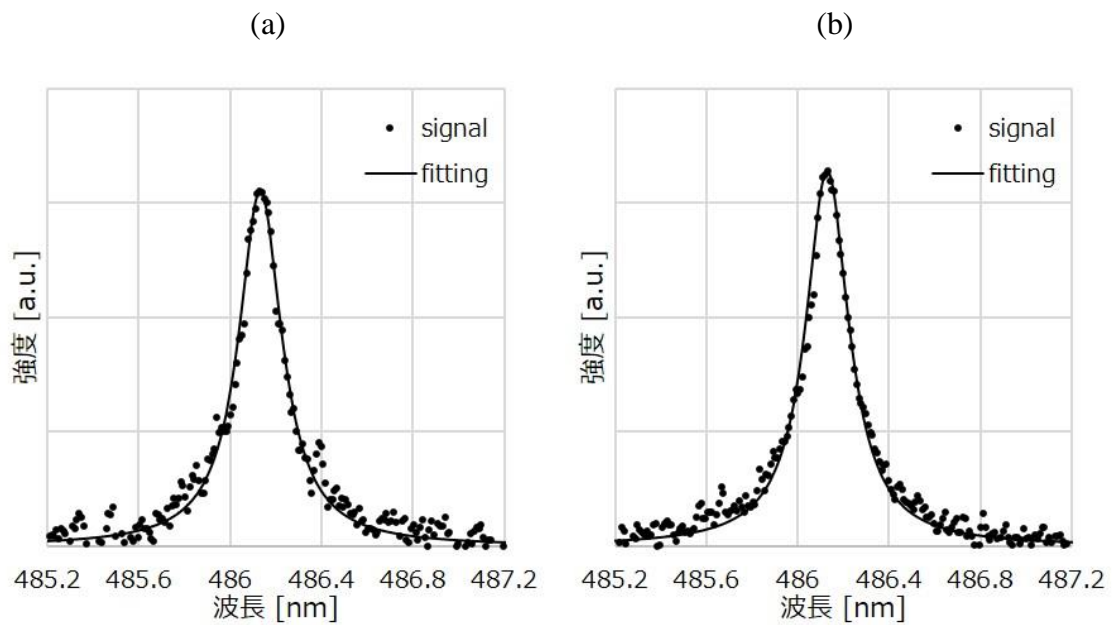


図 4-16 H_β の輝線スペクトル測定値とフィッティング曲線; (a)TGV が無いガラス基板、(b)TGV 基板

4.4. 考察

4.4.1. 放電開始電圧が低下する理由に関して

TGV を挿入すると放電開始電圧が低下する現象を理解すべく、プラズマ源内における電位シミュレーションを実施した。シミュレーションには COMSOL Multiphysics を用い、有限要素法によりプラズマ源内の電位分布を計算により求めた。図 4-17(a)、図 4-18 (a)、図 4-19 (a)に、TGV の無いガラス基板を内壁に用いた時、TGV アレイを内壁内で電極から離れた位置（端から 12 mm）に配置した時、TGV アレイを電極から近い位置（端から 7 mm）に配置した時の 3D モデルを示す。尚、今回のシミュレーションでは、モデル簡略化の為、TGV アレイの領域は、一様に銅の 10%の導電率である 6×10^7 S/m を持つ領域と仮定した。それぞれのモデルにおいて、対向する電極部に 1,000 V の電圧を印加した時の、電極を含む Y-Z 平面における電位分布を、それぞれ図 4-17(b)、図 4-18(b)、図 4-19(b)に示す。同様に、電極を含む Z-X 平面における電位分布を図 4-17(c)、図 4-18(c)、図 4-19(c)に示す。TGV が無い場合は、図 4-17(b)、(c)に示すように、対向する電極間で電位は一様に変化している。一方で、図 4-18(b)、(c)、図 4-19(b)、(c)が示すように、TGV の存在はプラズマ源内の電位分布を変化させる。特に片側の電極から TGV アレイにかけて急な電位勾配が発生しており、その領域に強い電場が発生している。また図 4-19(b)、(c)が示すように TGV アレイが電極付近に配置されると、電極付近の電位勾配が更に急峻になっている。この急峻な電位勾配が電子の加速を促進し、放電開始電圧の低下をもたらしたと考える。

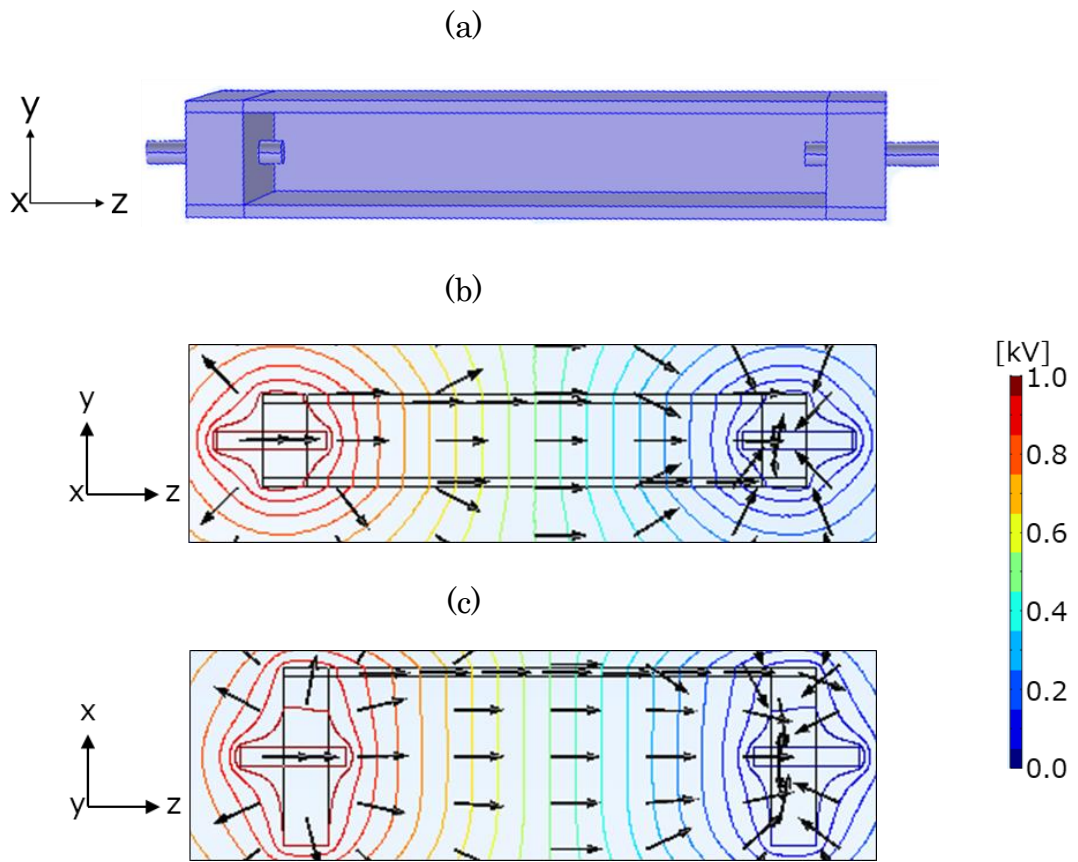


図 4-17 TGV が無いガラス基板を内壁に用いた際の電位シミュレーション;
 (a)3D モデル、(b)Y-Z 平面の電位分布、(c)Z-X 平面の電位分布

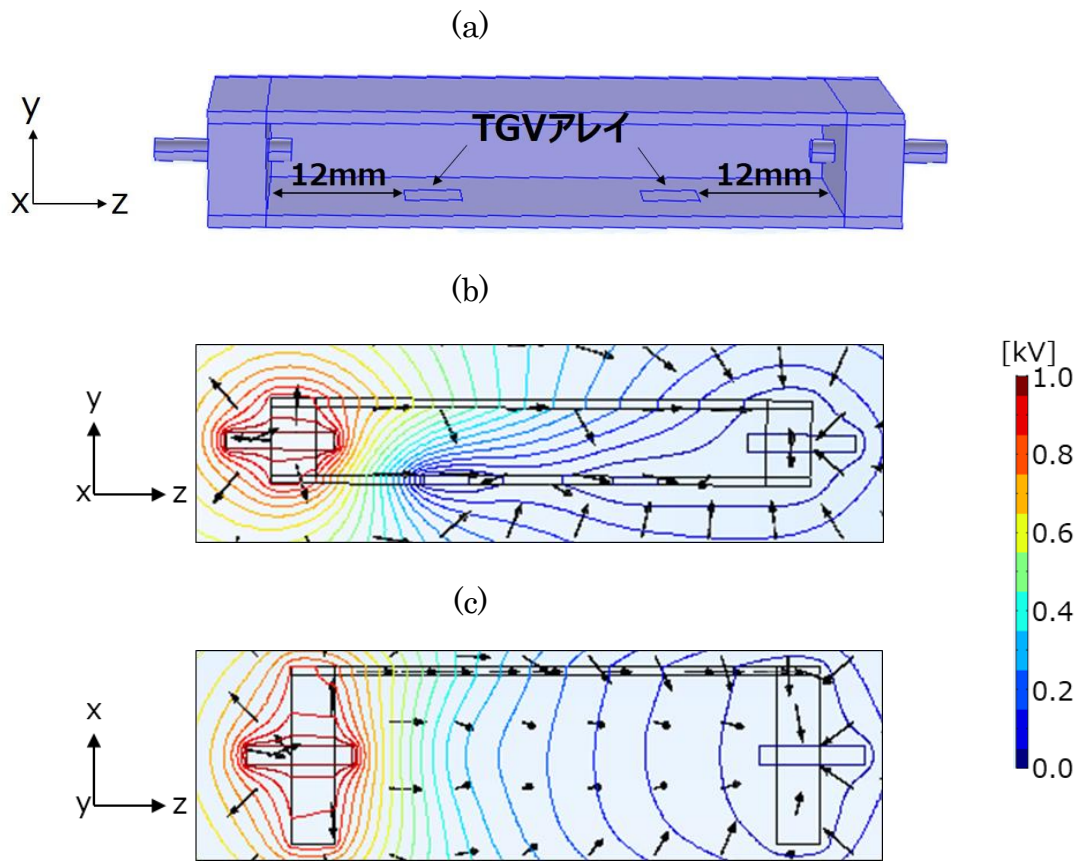


図 4-18 TGVAアレイを内壁内で電極から離れた位置に配置した際の電位シミュレーション (TGVAアレイは端から 12 mm に配置) ; (a)3D モデル、(b)Y-Z 平面の電位分布、(c)Z-X 平面の電位分布

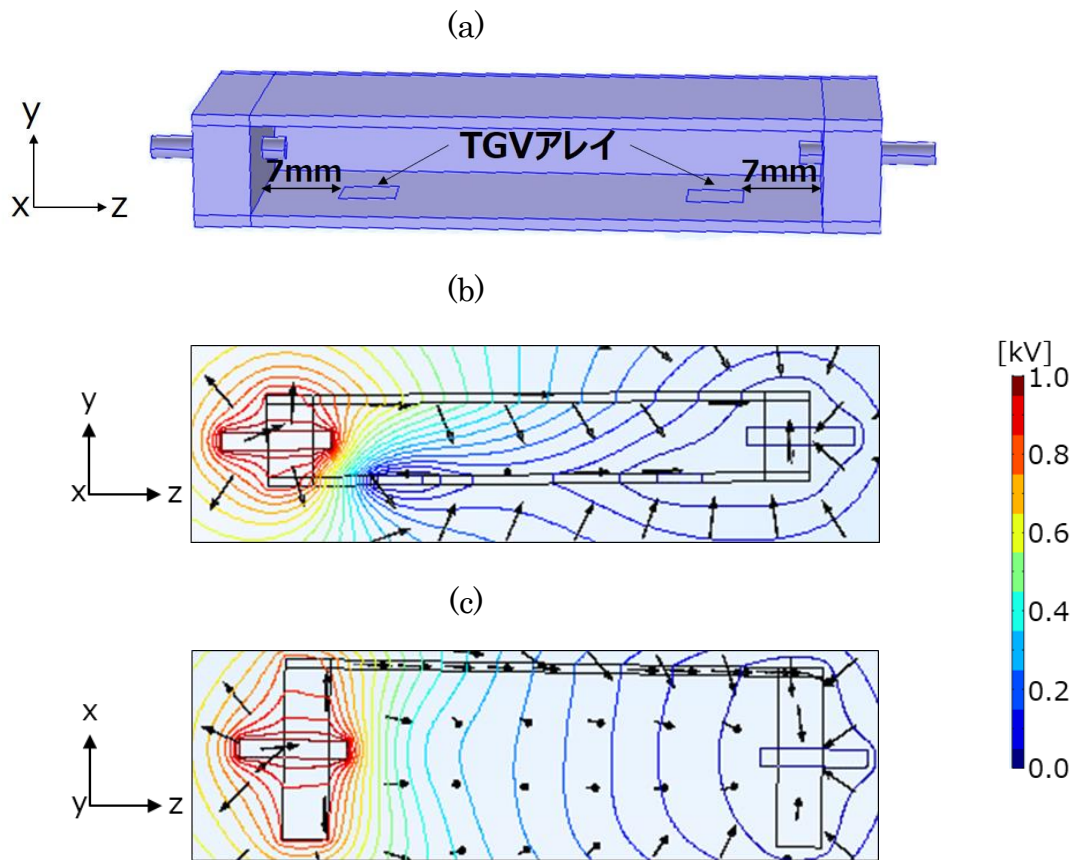


図 4-19 TGV アレイを内壁内で電極から近い位置に配置した際の電位シミュレーション (TGV アレイは端から 7 mm に配置) ;(a)3D モデル、(b)Y-Z 平面の電位分布、(c)Z-X 平面の電位分布

4.4.2. 沿面モードになる理由に関して

本項では TGV 基板をプラズマ源の内壁に用いた時の影響を、内壁材料の誘電特性に注目して考える。TGV が設けられたガラスは実効誘電率が高くなるので、比較として誘電率が 4,500 の高誘電率材料であるチタン酸バリウム (BaTiO_3) をプラズマ源の内壁に用いた時の放電の振舞いを調査した。図 4-20 にそのときの放電の様子を示すが、対向する電極間で発生した放電はガス流に流されることがなく電極間に留まり、またその誘電体の表面に貼りついていて、この現象は内

壁材料に高誘電体材料を用いたことで、チャージアップ効果によりその誘電体の表面に多数の電子が集まり、それに沿って放電が発生する沿面放電と解釈できる。

前節で議論したように、TGV が無いガラス基板の時に比べ、TGV 基板を内壁材料に用いた時は、放電がより電極間に留まりやすくなり、ガス流に放電が流される頻度が減った。ここで図 4-21(a)、(b)に示すように、TGV が無いガラス基板のような低誘電率材料を内壁に用いた時の放電の振舞いをバルクモード、チタン酸バリウムのような高誘電率材料を用いた時の放電の振舞いを沿面モードと呼称する。TGV 基板を用い時の放電の振舞いは、バルクモードと沿面モードの中間の状態と考えられる。TGV アレイの領域、すなわちマイクロオーダーの金属の構造体が低誘電率材料の中に存在する領域は、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る。放電と内壁内の有効媒質間の相互作用が強まる結果、バルクモードから沿面モードへの遷移が見られる。完全な沿面モードにならなかったのは、TGV 表面に集まった電子がチタン酸バリウムのとき程多くなく、電極から飛び出した電子の方向や速度によっては、壁から離れた位置でも放電が起きた為と考えられる。例えば TGV の密度を増やす、または面積を増やす等により、より沿面モードに近付けることができる可能性はある。

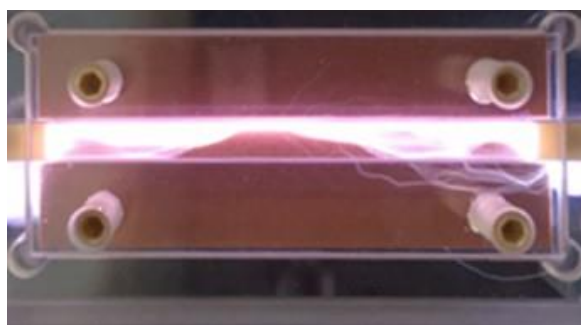


図 4-20 チタン酸バリウムをプラズマ源の内壁に用いた時の放電の様子

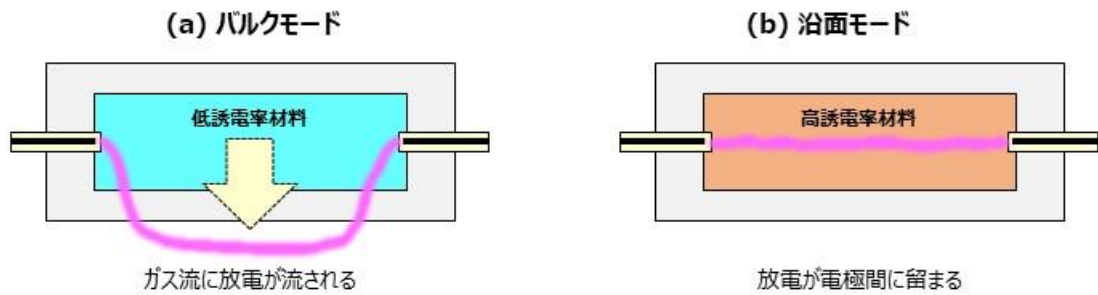


図 4-21 放電モードの概念図; (a)バルクモード、(b)沿面モード

TGV の位置に関する検証においては、TGV アレイをより電極に近い位置に配置した時に、沿面モードへの遷移、及び放電開始電圧の低下が、より顕著に見られた。これは図 4-19(b)、(c)に示したように TGV アレイが電極に近い位置に配置されると電極周辺に発生する電位勾配がより急峻になり、電子の加速を促進したことによる影響である。このように TGV の位置によってもプラズマに与える影響が異なる事が分かった。これは TGV の配置を工夫することにより、プラズマの形状を任意に局所的に制御できる可能性があることを示唆している。例えば、放電の経路を対象物によって変える、または処理領域でプラズマ密度を局所的に変えるといった事も可能かもしれない。そのような TGV によるプラズマの積極的な制御を実現する為には、TGV の配置に加え、TGV の材料、形状、密度がプラズマへ与える影響を更に深く理解する必要性が有り、それは今後の課題である。

4.5. まとめ

本章では TGV の新しい用途として、非平衡大気圧プラズマにおけるプラズマ源の利用を検討した。非平衡大気圧プラズマの課題であるプラズマ源の高効率化に向け、プラズマ源の材料や構成がプラズマに与える影響を検証する為に、プ

プラズマ源の内壁に TGV を導入し、その時に発生するプラズマの様子を調べた。その結果、TGV を導入すると、TGV が無い時に比べ、放電開始電圧が低下し、放電がガス流に流されにくくなる様子が確認された。これはプラズマ源の内壁に高誘電体材料を用いた時に発生する沿面モードと似ており、TGV がマクロ的な視点では高誘電率を持つ有効媒質のように働き、プラズマ源内で局所的に強い電場を発生させた為だと考えられる。また沿面モードへの遷移や放電開始電圧の低下は、TGV を電極付近に配置したとき程、顕著に現れた。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し、また TGV の配置を工夫するにより、発生するプラズマの形状や位置を制御できる。

第5章 結論および将来展望

5.1. 総括

ガラスは将来の SOP における実装基板の材料として、既存の材料では実現できない潜在的な優位性を持っている。しかしながらガラス実装基板の実現には複数の課題が存在し、その中でも TGV 形成はガラス実装基板特有の大きな課題である。特にポリマーラミネートガラスへの TGV 形成に関しては、これまでほとんど開発が行われてきていない。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 形成方法を示した。また TGV を形成したガラスの新しい応用を開拓してきた。その中で 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、実証した。

第 1 章では、SOP へ向かう背景と、その実装基板材料としてのガラスへの期待と課題について議論し、ポリマーラミネートガラスへの TGV 形成技術確立の必要性を述べた。またガラスの誘電理論より 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、本研究の目的と本論文の構成について述べた。

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、CO₂ レーザ、UV レーザ (355nm、266nm)、ArF レーザを選択しポリマーラミネートガラスへの加工を実施した。CO₂ 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ず、CO₂ レーザによる TGV はその信頼性に懸念がある。次に UV レーザは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、それがポリマーの剥離等、

さらなる欠陥を誘発させる恐れがある。一方で ArF エキシマレーザは短波長、低繰り返し周波数によりガラス、及びポリマーにダメージが少ない高品質な孔加工が可能であった。続いて熱機械的信頼性を検証すべく実施した熱サイクル試験においても、ArF エキシマレーザで加工した TGV は顕著な欠陥が発生せず、信頼性の高い TGV である事が示された。またレーザの透過光、またはアブレーション時の衝撃に起因すると考えられるポリマー密着力の低下は、シランカップリング剤による前処理を導入する事で密着力が改善し、剥離欠陥を回避できることが示された。

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。3D ガラス IPD は TGV を導入し基板上面も素子形成領域とすることで、IPD の更なる高密度集積化、小型化を実現する。100 μm 厚のガラスをコア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 にてプリント配線に表面実装を実施した。ガラス基板の両面に配置した LPF はそれぞれ良好な特性を示し、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した。非平衡大気圧プラズマの工業的応用では、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。そのようなプラズマ源の実現に向け、プラズマ源の材料や構成がプラズマに与える影響を検証する為に、プラズマ源の内壁に TGV を導入し、その時に発生するプラズマの様子を調べた。その結果、TGV を

導入した際は、放電開始電圧が低下し、放電がガス流に流されにくくなる様子が確認された。これはプラズマ源の内壁に高誘電体材料を用いた時に発生する沿面モードと似ている。この沿面モードへの遷移や放電開始電圧の低下は、TGVを電極付近に配置したとき程、顕著に現れた。これは、TGVの挿入によりプラズマ源内での電位分布が変化し、特に電極、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。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。

5.2. 結論

本論文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を形成する方法を示した。またTGVの新しい応用を開拓し、高周波回路の更なる高密度集積と小型化を可能にする3DガラスIPDを実証し、また非平衡大気圧プラズマ源での沿面放電を実現した。

5.3. 将来展望

2章で議論したポリマーラミネートガラスへのTGV加工は、ArFエキシマレーザーによる加工が最も高品質であり、熱サイクル試験によりその信頼性も実証された。エキシマレーザーはマスクプロジェクション法により複数孔の同時加工が可能である。しかしながら、歴史的にプリント基板製造工程を参考にすれば、ガラスのワークサイズはいずれ500mm角程度まで拡張されると予想される。まだまだ孔加工のスループットは十分では無く、加工コストが高くなってしまふ。1章で論じたようにガラスの潜在的可能性はいかに高くとも、加工コストが高ければ産業的には広まらない。その為、ガラス実装基板を広く展開する為には、

もう一段の加工スループットの改善が必須である。その為には、レーザ光源の高パワー化による加工範囲の拡大、ガラス組成改善による加工の高効率化、また基板設計側からのアプローチ（薄板化、TGV配置の効率化等）等の複合的な改善策が必要になる。

3章で議論した3DガラスIPDのデモンストレーションでは、TGVを形成したポリマーラミネートガラスを用いたLPFは良好に機能し、そのコンセプトを実証できた。今回は誘電率が低い絶縁層内でキャパシタ、インダクタを形成したが、今後、高誘電率材料や複雑構造を部分的に組み入れ、高キャパシタや高インダクタンスが実現できれば、更なる高集積化と、更なる用途展開が期待できる。

4章ではTGVを非平衡大気圧プラズマの内壁に導入する事により、沿面モードへの遷移、放電開始電圧の低下、というような興味深い現象が見られた。今回はTGVの位置に注目をして検証を行ったが、TGVの自由度を活かして、その大きさや、密度、更にはTGVの充填材料を変えて検証を行う事で、現象の理解の深化に繋がる。そしてそれはプラズマ形状、特性の制御技術への発展に繋がると考える。

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。また本論文で実装基板以外の応用を示した通り、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秘めている。その為、TGVの更なる基礎、応用研究が期待される。

参考文献

- [1] G. E. Moore, "Cramming More Components onto Integrated Circuits," *Electronics*, vol. 38, no. 8, 1965.
- [2] R. Tummala, "Moore's Law for Packaging to Replace Moore's Law for ICs," *Chip Scale Review*, vol. 23, no. 1, pp. 31-34, 2019.
- [3] J. Shalf, "The Future of Computing beyond Moore's Law," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 378, no. 2166, p. 20190061, 2020.
- [4] R. W. Keyes, "Physical Limits of Silicon Transistors and Circuits," *Report on Progress in Physics*, vol. 65, pp. 2701-2746, 2005.
- [5] Semiconductor Industry Association, "2015 International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)," 5 6 2015. [Online]. Available: <https://www.semiconductors.org/resources/2015-international-technology-roadmap-for-semiconductors-itrs/>. [Accessed 20 6 2020].
- [6] W. M. Mitchell , "More than Moore," *Nature*, vol. 530, pp. 144-147, 2016.
- [7] R. Tummala , S. Madhavan, System on Package: Miniaturization of the Entire System, McGraw-Hill Education, 2008.
- [8] T. G. Lenihan, L. Matthew and J. Vardaman, "Developments in 2.5D: The Role of Silicon Interposers," in *IEEE 15th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2013)*, Singapore, 2013.
- [9] R. Tummala, "2.5D Interposers; Organics vs. Silicon vs. Glass," *Chip Scale Review*, vol. 17, no. 4, pp. 18-19, 2013.

- [10] V. Sundaram, V. Sukumaran, G. Kumar and R. Tummala, "Glass as an Ideal Material for Next-Gen Interposers and Packages," *Chip Scale Review*, vol. 16, no. 3, pp. 27-31, 2012.
- [11] I. Whitney, B. A. Proctor and J. W. Johnson, "The Strength of Fused Silica," *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 297, no. 1451, pp. 534-557, 1967.
- [12] L. G. Baikova, T. I. Pesina, M. F. Kireeko, L. V. Tikhonova and C. R. Kurkjian, "Strength of Optical Silica Fibers Measured in Liquid Nitrogen," *Technical Physics*, vol. 60, no. 6, pp. 869-872, 2015.
- [13] A. Koike, "Study on Fracture of Glass: Control of Crack Generation and Growth in Glass," *Reports of the Research Laboratory, Asahi Glass Co., Ltd.*, vol. 59, pp. 39-44, 2009.
- [14] S. Yoshida, "Introduction to Fracture in Glass," *NEW GLASS*, vol. 23, no. 3, pp. 11-18, 2008.
- [15] V. Sukumaran, T. Bandyopadhyay, V. Sundaram and R. Tummala, "Low-Cost Thin Glass Interposers as a Superior Alternative to Silicon and Organic Interposers for Packaging of 3-D ICs," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 2, no. 9, pp. 1426-1433, 2012.
- [16] X. Cui, D. Bhatt, D. A. Hutt, K. Williams and P. P. Conway, "Copper Deposition and Patterning for Glass Substrate Manufacture," in *9th Electronics Packaging Technology Conference*, Singapore, 2007.
- [17] N. V. Toan, M. Toda and T. Ono, "An Investigation of Processes for Glass

- Micromachining," *Micromachines*, vol. 7, no. 3, p. 51, 2016.
- [18] L. A. Hof and J. A. Ziki, "Micro-Hole Drilling on Glass Substrates—A Review," *Micromachines*, vol. 8, no. 2, p. 53, 2017.
- [19] M. Töpfer, I. Ndip, R. Erxleben, L. Brusberg, N. Nissen, H. Schröder, H. Yamamoto, G. Todt and H. Reichl, "3-D Thin Film Interposer Based on TGV (Through Glass Vias): An Alternative to Si-Interposer," in *IEEE 60th Electronic Components and Technology Conference*, Las Vegas, NV, USA, 2010.
- [20] M. Tatsumisago, "Electrical Properties of Glass," *NEW GLASS*, vol. 23, no. 2, pp. 46-53, 2008.
- [21] 山根 正, はじめてガラスを作る人のために, 内田老鶴圃, 1989.
- [22] H. Scholze, *Glass: Nature, Structure, and Properties*, Springer , 1991.
- [23] Y. Sato and N. Kidera, "Demonstration of 28GHz Band Pass Filter toward 5G Using Ultra Low Loss and High Accuracy Through Quartz Vias," in *IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference*, San Diego, CA, USA, 2018.
- [24] G. Cho, M.-J. Shin, J.-M. Jeong, J.-H. Kim, B.-H. Hong, J.-H. Koo, Y. Kim and E.-H. Choi, "Glass Tube of High Dielectric Constant and Low Dielectric Loss for External," *Journal of Applied Physics*, vol. 102, no. 11, p. 113307, 2007.
- [25] Wikipedia, "Integrated passive devices," 8 5 2020. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_passive_devices. [Accessed 17 5 2020].

- [26] STMicroelectronics, "Technical article - STMicroelectronics offers full foundry services for its RF IPD process," 11 2013. [Online]. Available: https://www.st.com/resource/en/technical_article/dm00086348-stmicroelectronics-offers-full-foundry-services-for-its-rf-ipd-process-stmicroelectronics.pdf. [Accessed 16 5 2020].
- [27] E. Belloy, A. Sayah and M. Gijs, "Powder Blasting for Three-Dimensional Microstructuring of Glass," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 86, no. 3, pp. 231-237, 2000.
- [28] T. Asami and H. Miura, "Characteristics of Hole Machining of Brittle Material by Ultrasonic Complex Vibration," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 51, no. 7S, p. 07GE07, 2012.
- [29] T. Cormany, P. Enoksson and G. Stemme, "Deep Wet Etching of Borosilicate Glass Using an Anodically Bonded Silicon Substrate as Mask," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 8, no. 2, pp. 84-87, 1998.
- [30] T. Akashi and Y. Yoshimura, "Profile Control of a Borosilicate-Glass Groove Formed by Deep Reactive Ion Etching," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, no. 10, p. 105004, 2008.
- [31] M. J. Ahamed, D. Senkal, A. A. Trusov and A. M. Shkel, "Study of High Aspect Ratio NLD Plasma Etching and Postprocessing of Fused Silica and Borosilicate Glass," *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, vol. 24, no. 4, pp. 790-800, 2015.

- [32] K. Kadono, "Optical Properties of Glasses I. ," *NEW GLASS*, vol. 24, no. 1, pp. 59-63, 2009.
- [33] H. Ogura and Y. Yoshida, "Hole Drilling of Glass Substrates with a CO₂ Laser," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 42, no. Part1, Number 5A, pp. 2881-2886, 2003.
- [34] C. Baasandash, T. Yabe, J. Maehara, M. Yamaguchi and H. Wakatsuki, "Crack-Free High-Aspect-Ratio Drilling of Glasses by 1 μ m Yttrium Aluminum Garnet Laser and Translucent Adhesive Tape," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 43, no. 2A, pp. 133-135, 2004.
- [35] K.-R. Kim, J.-H. Kim, D. F. Farson, H. W. Choi and K.-H. Kim, "Hybrid Laser Cutting for Flat Panel Display Glass," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 47, no. 8, pp. 6978-6981, 2008.
- [36] Y. Ito, R. Shinomoto, K. Nagato, A. Otsu, K. Tatsukoshi, Y. Fukasawa, T. Kizaki, N. Sugita and M. Mitsuishi, "Mechanisms of Damage Formation in Glass in the Process of Femtosecond Laser Drilling," *Applied Physics A*, vol. 124, p. 181, 2018.
- [37] "Advanced Packaging – EN-A1 glass for TGV, WLP and MEMS," AGC Electronics America, [Online]. Available: <https://www.agcem.com/products/advanced-packaging-en-a1-glass-for-tgv-wlp-and-mems/>. [Accessed 9 3 2020].
- [38] Y. Suzuki, J. Brune, R. Senczuk, R. Pätzel, R. Furuya, F. Liu, V. Sundaram and R. Tummala, "Demonstration of 20 μ m Pitch Micro-vias by Excimer Laser Ablation in Ultra-thin Dry-film Polymer Dielectrics for

- Multi-layer RDL on Glass Interposers," in *IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference*, San Diego, CA, USA, 2015.
- [39] F. Liu, V. Sundaram, H. Chan, G. Krishnan, J. Shang, J. Dobrick, J. Neill, D. Baars, S. Kennedy and R. Tummala, "Ultra-High Density, Thin Core and Low Loss Organic System-on-Package (SOP) Substrate Technology for Mobile Applications," in *IEEE 59th Electronic Components and Technology Conference*, San Diego, CA, USA, 2009.
- [40] M. C. Gower, "Industrial Applications of Laser Micromachining," *Optics Express*, vol. 7, no. 2, pp. 56-67, 2000.
- [41] T. Katsura, R. Nakamura, T. Kojima, K. Yasui and Y. Saito, "Micro Processing in Glass Substrates with pulsed CO₂ lasers," in *9th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference*, Taipei, Taiwan, 2014.
- [42] "基板穴あけ用レーザ加工機," 三菱電機株式会社, [Online]. Available: <https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/mecha/laser/items/drilling/index.html>. [Accessed 11 3 2020].
- [43] B. Keiper, H. Exner, U. Löschner and T. Kuntze, "Drilling of Glass by Excimer Laser Mask Projection Technique," *Journal of Laser Applications*, vol. 12, no. 5, pp. 189-193, 2000.
- [44] R. Delmdahl and R. Paetzel, "Laser Drilling of High-Density Through Glass Vias (TGVs) for 2.5D and 3D Packaging," *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, vol. 21, no. 2, pp. 53-57, 2014.
- [45] Coherent, "LPXpro Series," [Online]. Available:

<https://www.coherent.com/assets/pdf/LPXpro-Series-Data-Sheet.pdf>.

[Accessed 13 3 2020].

- [46] 高木 清, プリント配線板のできるまで 第2版, 日刊工業新聞社, 2007.
- [47] Y. Takazaki, "Technology Trend of Build-up Printed Wiring Board," *Journal of The Japan Institute of Electronics Packaging*, vol. 2, no. 6, pp. 450-453, 1999.
- [48] JEDEC, "JOINT IPC/JEDEC Standard for Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Surface-mount Devices," 12 2014. [Online]. Available: <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/j-std-020e>. [Accessed 21 3 2020].
- [49] JEDEC, "Temperature Cycling; JESD22-A104E," 10 2014. [Online]. Available: <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-22-a104e>. [Accessed 21 3 2020].
- [50] Wikipedia, "Photoelasticity," [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelasticity>. [Accessed 23 6 2020].
- [51] 株式会社東京インスツルメンツ, "偏光測定装置," [Online]. Available: https://www.tokyoinst.co.jp/en/product_file/file/HN05_cat01_en.pdf. [Accessed 18 7 2020].
- [52] T. Umada, S. Orihara, S. Inaba, S. Ohgami and K. Imakita, "Development of the Stress Meter in Glass Material Using Photo-Elastic Effect of Scattering Light," *AGC Research Report*, vol. 69, pp. 13-19, 2019.
- [53] K. Kim, S. Byun, I. Cho, M.-H. Ryou and Y. M. Lee, "Three-Dimensional

Adhesion Map Based on Surface and Interfacial Cutting Analysis System for Predicting Adhesion Properties of Composite Electrodes," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 8, no. 36, pp. 23688-23695, 2016.

[54] F. Liu, R. Zhang, G. Khurana, B. H. DeProspo, R. R. Tummala and M. Swaminathan, "Smaller Microvias for Packaging Interconnects by Picosecond UV Laser with a Nanometer Metal Barrier Layer: A Feasibility Study," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*.

[55] L. Brusberg, M. Queisser, M. Neitz, H. Schröder and K.-D. Lang, "CO₂-Laser Drilling of TGVs for Glass Interposer Applications," in *IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference*, Orlando, FL, USA, 2014.

[56] M. Murphy and P. McGuinness, "Use of Integrated Passives in Micromodule SIPs," *Analog Dialogue*, vol. 52, 2018.

[57] A. C. Kundu, M. Megahed and D. Schmidt, "Comparison and Analysis of Integrated Passive Device Technologies for Wireless Radio Frequency Module," in *IEEE 58th Electronic Components and Technology Conference*, Orlando, FL, USA, 2008.

[58] Sonnet Software Inc., "Sonnet," [Online]. Available: <https://www.sonnetsoftware.com/>. [Accessed 28 3 2020].

[59] S. S. Mohan, M. d. M. Hershenson, S. P. Boyd and T. H. Lee, "Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances," *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, vol. 34, no. 10, pp. 1419-1424, 1999.

- [60] S.-S. Ha, J. Park and S.-B. Jung, "Effect of Pd Addition in ENIG Surface Finish on Drop Reliability of Sn-Ag-Cu Solder Joint," *Materials Transactions*, vol. 52, no. 8, pp. 1553-1559, 2011.
- [61] J. Laskar, N. Jokerst, M. Brooke, M. Harris, C. Chun, A. Pham, H. Liang, D. Staiculescu and S. Sutono, "Review of RF packaging research at Georgia Tech's PRC," in *4th International Symposium on Advanced Packaging Materials Processes, Properties and Interfaces*, Braselton, GA, USA, 1998.
- [62] P. J. Bruggeman, F. Iza and R. Brandenburg, "Foundations of Atmospheric Pressure Non-equilibrium Plasma," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 26, p. 123002, 2017.
- [63] S. Iseki, K. Nakamura, M. Hayashi, H. Tanaka, H. Kondo, H. Kajiyama, H. Kano, F. Kikkawa and M. Hori, "Selective Killing of Ovarian Cancer Cells through Induction of Apoptosis by Nonequilibrium Atmospheric Pressure Plasma," *Applied Physics Letters*, vol. 100, p. 113702, 2012.
- [64] S. Iseki, H. Hashizume, F. Jia, K. Takeda, K. Ishikawa, T. Ohata, M. Ito and M. Hori, "Inactivation of *Penicillium digitatum* Spores by a High-Density Ground-State Atomic Oxygen-Radical Source Employing an Atmospheric-Pressure Plasma," *Applied Physics Express*, vol. 4, p. 116201, 2011.
- [65] K. Ninomiya, T. Ishijima, M. Imamura, T. Yamahara, H. Enomoto, K. Takahashi, Y. Tanaka, Y. Uesugi and N. Shimizu, "Evaluation of Extra- and Intracellular OH Radical Generation, Cancer Cell Injury, and

Apoptosis Induced by a Non-Thermal Atmospheric-Pressure Plasma Jet," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, no. 42, p. 425401, 2013.

- [66] G. Joksić, A. V. Šobot, J. F. Tričković, D. Maletić, N. Puač, G. Malović, Z. L. Petrović and S. Lazović, "Apoptosis Time Window Induced by Cold Atmospheric Plasma: Comparison with Ionizing Radiation," *Current Science*, vol. 116, no. 7, pp. 1229-1233, 2019.
- [67] I. Adamovich, "The 2017 Plasma Roadmap: Low Temperature Plasma Science and Technology," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 50, no. 32, p. 323001, 2017.
- [68] M. Iwasaki, Y. Matssudaira, K. Takeda, M. Ito, E. Miyamoto, T. Yara, T. Uehara and M. Hori, "Roles of Oxidizing Species in a Nonequilibrium Atmospheric-Pressure Pulsed Remote O₂/N₂ Plasma Glass Cleaning Process," *Journal of Applied Physics*, vol. 103, p. 023303, 2008.
- [69] M. Baeva, A. Dogan, J. Ehlbeck, A. Pott and J. Uhlenbusch, "CARS Diagnostic and Modeling of a Dielectric Barrier Discharge," *Plasma Chemistry and Processing*, vol. 19, no. 4, pp. 445-466, 1999.
- [70] N. Gherardi and F. Massines, "Mechanisms Controlling the Transition from Glow Silent Discharge to Streamer Discharge in Nitrogen," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 29, no. 3, pp. 536-544, 2001.
- [71] F. Massines, P. Ségur, N. Gherardi, C. Khamphan and A. Ricard, "Physics and Chemistry in a Glow Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure Diagnostics and Modelling," *Surface and Coatings Technology*,

Vols. 174-175, pp. 8-14, 2003.

- [72] C.-T. Liu, T. Kumakura, K. Ishikawa, H. Hashizume, K. Takeda, M. Ito, M. Hori and J.-S. Wu, "Effects of Assisted Magnetic Field to an Atmospheric-Pressure Plasma Jet on Radical Generation at the Plasma-Surface Interface and Bactericidal Function," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 25, no. 6, p. 065005, 2016.
- [73] F. Sadaoui and A. Beroual, "DC Creeping Discharges over Insulating Surfaces in Different Gases and Mixtures," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 5, pp. 2088-2094, 2014.
- [74] M. Michelarakis, P. Widger, A. Beroual and A. M. Haddad, "Electrical Detection of Creeping Discharges over Insulator Surfaces in Atmospheric Gases Under AC Voltage Application," *Energies*, vol. 12, no. 15, p. 2970, 2019.
- [75] F. Sadaoui and A. Beroual, "AC Creeping Discharges Propagating over Solid-Gas Interfaces," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 595-600, 2014.
- [76] T. Trzepiecinski and M. Gromada, "Characterization of Mechanical Properties of Barium Titanate Ceramics," *Materials Science-Poland*, vol. 36, no. 1, pp. 151-156, 2018.
- [77] S. Kuramochi, S. Koiwa, H. Nagano, J. Iida, M. Akazawa, H. Mawatari, K. Suzuki and Y. Fukuoka, "Glass Interposers with Metalized Through Via," in *Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific)*, Big Island, HI, USA, 2016.

- [78] C.-K. Lee, J.-C. Wang, H.-H. Chang and Y. J. (Lu, "Reliability Evaluation for Integrated Glass Interposer," *Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging*, vol. 9, pp. E16-009-1 - 5, 2016.
- [79] J.-Y. Lee, S.-W. Lee, S.-K. Lee and J.-H. Park, "Through-glass Copper Via Using the Glass Reflow and Seedless Electroplating Processes for Wafer-level RF MEMS Packaging," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 23, no. 085012, 2013.
- [80] M. Iwasaki, H. Inui, Y. Matsudaira, H. Kano, N. Yoshida, M. Ito and M. Hori, "Nonequilibrium Atmospheric Pressure Plasma with Ultrahigh Electron Density and High Performance for Glass Surface Cleaning," *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 8, p. 081503, 2008.
- [81] H. Inui, K. Takeda, H. Kondo, K. Ishikawa, M. Sekine, H. Kano, N. Yoshida and M. Hori, "Measurement of Hydrogen Radical Density and Its Impact on Reduction of Copper Oxide in Atmospheric-Pressure Remote Plasma Using H₂ and Ar Mixture Gases," *Applied Physics Express*, vol. 3, no. 12, p. 126101, 2010.
- [82] F. Jia, K. Ishikawa, K. Takeda, H. Kano, J. Kularatne, H. Kondo, M. Sekine and M. Hori, "Spatiotemporal Behaviors of Absolute Density of Atomic Oxygen in a Planar Type of Ar/O₂ Non-equilibrium Atmospheric-pressure Plasma Jet," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 23, no. 2, p. 025004, 2014.
- [83] M. Goto, I. Murakami and T. Fujimoto, "Toward Deeper Understanding of a Plasma," *Journal of Plasma and Fusion Research*, vol. 80, no. 2, pp.

139-146, 2004.

- [84] N. Konjević, M. Ivkovic and N. Sakan, "Hydrogen Balmer Lines for Low Electron Number Density Plasma Diagnostics," *Spectrochimica Acta Part B*, vol. 76, pp. 16-26, 2012.
- [85] S. Takashima, M. Hori and T. Goto, "Measurement of Absolute Density of Atomic Species Using Vacuum Ultraviolet Absorption Spectroscopy with Microdischarge Lamp," *Journal of the Vacuum Society of Japan*, vol. 44, no. 9, pp. 802-807, 2001.
- [86] S. Hofmann, A. F. H. v. Gessel, T. Verreycken and P. Bruggeman, "Power Dissipation, Gas Temperatures and Electron Densities of Cold Atmospheric Pressure Helium and Argon RF Plasma Jets," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 20, no. 6, p. 065010, 2011.

謝辞

本研究の遂行ならびに論文の作成にあたり、非常に多くの方々にご協力いただきました。ここに謝辞申し上げます。

本研究において素晴らしい環境とその機会を与えて頂き、本研究の指導教授として多くのご指導を頂きました名古屋大学低温プラズマ科学研究センター堀勝教授に深く感謝申し上げます。

本研究を行うにあたり、多くのご指導とご助言を頂きました名古屋大学低温プラズマ科学研究センター 石川健治特任教授に深く感謝致します。

本論文を査読して頂きました名古屋大学大学院工学研究科 豊田浩考教授、名古屋大学未来材料・システム研究所 五十嵐信行教授、名古屋大学低温プラズマ科学研究センター 関根誠特任教授、名城大学理工学部 内田 儀一郎教授に深く感謝申し上げます。

本研究の遂行にあたり、多くのご指導、ご助言を頂き、また直接実験にも携わっていただいた名古屋大学低温プラズマ科学研究センター 堤隆嘉助教に深く感謝致します。

本研究を行うにあたり、多くのご指導とご助言を頂きました名古屋大学低温プラズマ科学研究センター 田中宏昌教授、近藤博基准教授、Thi-Thuy-Nga Nguyen 特任助教に深く感謝致します。また堀研究室の教員、研究員、事務員、学生の方々には名古屋大学での研究生活を送る上で多大なるご協力をいただきました。深く感謝申し上げます。

本研究を行うにあたり、素晴らしい機会を与えて頂き、多くのご指導を頂きましたジョージア工科大学 Madhavan Swaminathan 教授、Rao Tummala 教授、に深く感謝申し上げます。またジョージア工科大学 3D Systems Package Research Center の教員、研究員、事務員、学生、各社からの派遣研究員の方々

には本研究の遂行、また研究生活を送る上で多大なるご協力をいただきました。
深く感謝致します。

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、多くのご指導、ご助言を頂き、
また直接実験にも携わっていただいた AGC 株式会社 今城信彦氏、小高秀文氏、
勝野楓氏に深く感謝致します。

最後に本研究のみならず、多面において多大なるご協力とご支援を賜りまし
た先生方、諸氏に深く感謝するとともに、支えてくれた家族に心から感謝致しま
す。

2020 年 9 月

論文目録

(発表した論文)

論文題目	公表の方法及び時期	著者
<p>I. 学会誌等 主論文</p> <p>1. ガラスインターポーザの研究開発動向</p> <p>2. Laser-Drilling Formation of Through-Glass-Via (TGV) on Polymer-Laminated Glass</p> <p>3. Steering of Surface Discharges on Through-Glass-Vias (TGVs) Combined with High-Density Nonequilibrium Atmospheric Pressure Plasma Generation</p>	<p>表面技術, Vol. 66, No. 2, pp. 33-37 (2015)</p> <p>Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 30, No. 11, pp. 10183-10190 (2019)</p> <p>Journal of Physics D: Applied Physics, accepted for publication (2020)</p>	<p><u>佐藤 陽一郎</u></p> <p><u>Yoichiro Sato</u>, Nobuhiko Imajyo, Kenji Ishikawa, Rao Tummala, Masaru Hori</p> <p><u>Yoichiro Sato</u>, Kaede Katsuno, Hidefumi Odaka, Nobuhiko Imajyo, Kenji Ishikawa, Masaru Hori</p>

論文題目	公表の方法及び時期	著者
副論文		
4. Design, Fabrication, and Characterization of Ultrathin 3-D Glass Interposers with Through-Package-Vias at Same Pitch as TSVs in Silicon	IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 4, No. 5, pp. 786-795 (2014)	Vijay Sukumaran, Gokul Kumar, Koushik Ramachandran, Yuya Suzuki, Kaya Demir, <u>Yoichiro Sato</u> , その他3名
5. Prevention of Cracking from RDL Stress and Dicing Defects in Glass Substrates	IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, Vol. 16, No. 1, pp. 43-49 (2016)	Scott McCann, <u>Yoichiro Sato</u> , Venkatesh Sundaram, Rao R. Tummala, Suresh K. Sitaraman
6. Electrical Modeling and Analysis of Tapered Through-Package via in Glass Interposers	IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 6, No. 5, pp. 775-783 (2016)	Jialing Tong, <u>Yoichiro Sato</u> , Kadappan Panayappan, Venky Sundaram, Andrew F. Peterson, その他1名

論文題目	公表の方法及び時期	著者
<p>II. 国際会議 筆頭発表</p> <p>1. Through-Package-Via Formation Technique by Laser Ablation and Reliability of TPVs in Glass</p> <p>2. Ultra-Miniaturized and Surface-Mountable Glass-Based 3D IPAC Packages for RF Modules</p> <p>3. RF Device Integration on Glass Interposer toward 3D-IPAC Packages</p> <p>4. Demonstration of 28GHz Band Pass Filter toward 5G Using Ultra Low Loss and High Accuracy Through Quartz Vias</p>	<p>2012 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), April 17-20, Tokyo (Japan), pp. 6-10 (2012)</p> <p>2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 28-31, Las Vegas (USA), pp. 1656-1661 (2013)</p> <p>46th International Symposium on Microelectronics (IMAPS), September 30-October 3, Orlando (USA), pp. 825-830 (2013)</p> <p>2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 29-June 1, San Diego (USA), pp. 2237-2241 (2018)</p>	<p><u>Yoichiro Sato</u>, Motoshi Ono, Kaya Demir, Kenji Kitaoka, Mitsuru Watanabe, その他4名</p> <p><u>Yoichiro Sato</u>, Srikrishna Sitaraman, Vijay Sukumaran, Bruce Chou, Junki Min, その他7名</p> <p><u>Yoichiro Sato</u>, Bruce Chou, Vijay Sukumaran, Junki Min, Motoshi Ono, その他6名</p> <p><u>Yoichiro Sato</u>, Nobutaka Kidera</p>

論文題目	公表の方法及び時期	著者
共著発表		
5. Design, Fabrication and Characterization of Low-Cost Glass Interposers with Fine-pitch Through-Package-Vias	2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 31-June 3, Orlando (USA), pp. 583-588 (2011)	Vijay Sukumaran, Tapobrata Bandyopadhyay, Qiao Chen, Nitesh Kumbhat, Fuhan Liu, Raghu Pucha, <u>Yoichiro Sato</u> , その他9名
6. Comparison of Thermal Performance between Glass and Silicon Interposers	2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 28-31, Las Vegas (USA), pp. 1480-1487 (2013)	Sangbeom Cho, Yogendra Joshi, Venky Sundaram, <u>Yoichiro Sato</u> , Rao Tummala
7. Thermomechanical and Electrochemical Reliability of Fine-pitch Through-Package-Copper Vias (TPV) in Thin Glass Interposers and Packages	2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 28-31, Las Vegas (USA), pp. 353-359 (2013)	Kaya Demir, Koushik Ramachandran, <u>Yoichiro Sato</u> , Qiao Chen, Vijay Sukumaran, その他3名
8. Modeling, Design, and Fabrication of Ultra-high Bandwidth 3D Glass Photonics (3DGP) in Glass Interposers	2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 28-31, Las Vegas (USA), pp. 286-291 (2013)	Bruce C. Chou, <u>Yoichiro Sato</u> , Vijay Sukumaran, Jibin Sun, Venky Sundaram, その他2名

論文題目	公表の方法及び時期	著者
9. Experimental Demonstration of the Effect of Copper TPVs (Through Package Vias) on Thermal Performance of Glass Interposers	2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 27-30, Orlando (USA), pp. 1247-1252 (2014)	Sangbeom Cho, <u>Yoichiro Sato</u> , Venky Sundaram, Yogendra Joshi, Rao Tummala
10. High-frequency Characterization of Through Package Vias Formed by Focused Electrical-Discharge in Thin Glass Interposers	2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 27-30, Orlando (USA), pp. 2271-2276 (2014)	Jialing Tong, <u>Yoichiro Sato</u> , Shintaro Takahashi, Nobuhiko Imajyo, Andrew F Peterson, その他2名
11. First Demonstration of a Surface Mountable; Ultra-thin Glass BGA Package for Smart Mobile Logic Devices	2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 27-30, Orlando (USA), pp. 365-370 (2014)	Venky Sundaram, <u>Yoichiro Sato</u> , Toshitake Seki, Yutaka Takagi, Vanessa Smet, その他2名
12. A Comparative Reliability Study of Copper-Plated Glass Vias; Drilled with CO ₂ and ArF Excimer Lasers	5th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), September 16-18, Helsinki (Finland), pp. 1-5 (2014)	Mikael Broas, Kaya Demir, <u>Yoichiro Sato</u> , Venkatesh Sundaram, Rao Tummala

論文題目	公表の方法及び時期	著者
13. Study of Cracking of Thin Glass Interposers Intended for Microelectronic Packaging Substrates	2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 26-29, San Diego (USA), pp. 1938-1944 (2015)	Scott R. McCann, <u>Yoichiro Sato</u> , Venkatesh Sundaram, Rao R. Tummala, Suresh K. Sitaraman
14. Design, Demonstration and Characterization of Ultra-Thin Low-Warpage Glass BGA Packages for Smart Mobile Application Processor	2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 31-June 3, Las Vegas (USA), pp. 1466-1470 (2016)	Tailong Shi, Bruce Chou, Ting-Chia Huang, Tomonori Ogawa, <u>Yoichiro Sato</u> , その他6名
15. Development of Through Glass Vias (TGV) and Through Quartz Vias (TQV) for Advanced Packaging	2017 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), April 19-22, Tendo (Japan), pp. 434-438 (2017)	Kohei Horiuchi, Motoshi Ono, <u>Yoichiro Sato</u> , Shintaro Takahashi
16. Low-Loss Glass Substrates Formulated with a Variety of Dielectric Characteristics for Millimeter-Wave Applications	2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 28-31, Las Vegas (USA), pp. 712-717 (2019)	Kazutaka Hayashi, Nobutaka Kidera, <u>Yoichiro Sato</u>
17. High Frequency Characteristics of Glass Interposer	2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), June 3-July 7, Virtual Conference, pp. 601-610 (2020)	Masaya Tanaka, Satoru Kuramochi, Takahiro Tai, <u>Yoichiro Sato</u> , Nobutaka Kidera