

1. 緒言

本原稿は、筆者が研究支援を行っている研究室においてALD(Atomic Layer Deposition)成膜装置に用いるプラズマ発生装置を設計し、学生と共に製作をおこない、問題解決を行った過程を報告する。ALD 成膜法の詳細な説明は本稿の意図するところではないので簡単な説明に留め、主に高周波電力を効率よくプラズマ発生エネルギーとして供給するための整合(マッチング)回路の、スミスチャートを用いた設計方法と問題解決手法に付いて述べる。

2. ALD成膜法とプラズマ

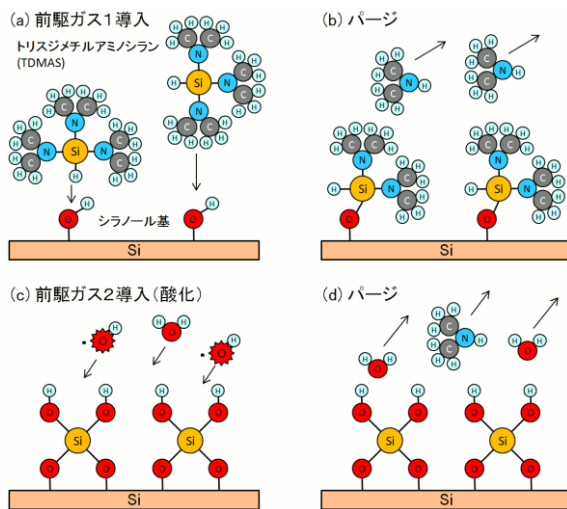


図1 ALD成膜法の基本プロセス

図1はALD成膜における基本プロセスを説明したものである。目的とする膜物質によって原料ガスは異なるが、基本的には膜物質を含む前駆ガス1(一般的には有機金属化合物)を N_2 等のキャリアガスと共に反応チャンバーに導入し、基板表面へ化学吸着させる(図1(a))。次に N_2 パージによって余分な原料ガスと反応生成物をチャンバー外へ排出する(図1(b))。この段階で基板表面は、原料ガス1分子層によって覆われた状態となる。更に前駆ガス2(上記例では H_2O)を導入することによって反応を完結させる(図1(c))。この時に生じた反応生成物を再び N_2 パージによって排出することによって、原子1層分の膜(上記例では SiO_2)を得る(図1(d))。

これら図1(a)~(d)の一連のプロセスを繰り返すことによって、任意の膜厚を1原子層単位で制御しながら成膜することが可能となる。図1の事例では原理上、図1(c)の加水分解反応は H_2O のみで進行するはずであるが、実際には原料ガスの反応性も考慮してより確実に反応が完結するように酸化性のガス、例えば O_3 等を加える場合もある。

当研究では上述の酸化剤として、 $\cdot OH$ ラジカルを使用している。これは図1(c)の前駆ガスとして導入している H_2O を、Arプラズマ中で分解させて生成させている。 $\cdot OH$ ラジカルの反応性は極めて高く、酸化反応と新規のシラノール基($Si-OH$)の生成に大きな効果を示す。特にシラノール基の生成は極めて重要である。なぜならばこれが生成されなければ図1(a)の反応が不可能となり、継続的な成膜ができなくなるからである。実際に $\cdot OH$ ラジカルを導入しないと成膜が進まない事例があった。

3. プラズマ発生装置の設計と製作

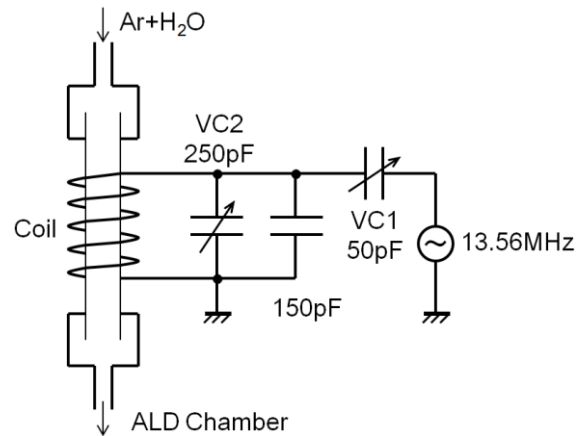


図2 誘導結合プラズマ発生回路

図2は、製作したプラズマ発生装置の原理を説明した図である。ガスの放電によるプラズマ発生方法には、直流電源によるものと高周波電源によるものがある。本装置においては、電極等を必ずしも反応気体中に置く必要が無いいため電極からの汚染の心配が無い、高周波放電によるプラズマ発生方法を採用した。高周波放電を起こさせるためのエネルギーの供給方法として、電極を用いる静

電結合とコイルを用いる誘導結合方式があるが、高電圧が不要であることと、放電可能圧力範囲や製作のし易さから誘導結合プラズマを用いた。誘導結合プラズマは CVD 等の他の成膜方法や、ICP(Inductively Coupled Plasma)元素分析装置に広く使われている。図 2 のコイルは石英管等の周りに巻かれており、このコイルが作り出す高周波磁場が石英管内に高周波電場を誘導し、これによりプラズマ放電が引き起こされる。ここで重要となるのが高周波電力をコイルへと有効に伝達するための整合回路である。図 2 ではコイルと 13.56MHz の高周波電源との間に、2つの可変コンデンサからなる整合回路が挿入されている。これらはコイルが有する L 成分を相殺しつつ、インピーダンスを高周波電源の出カインピーダンスに等しい 50Ω へと変換する。

高周波の整合回路を設計する際に有効なのがスミスチャートである。図 3 は、図 2 に示した回路の整合条件を求めた結果である。予めコイル単体

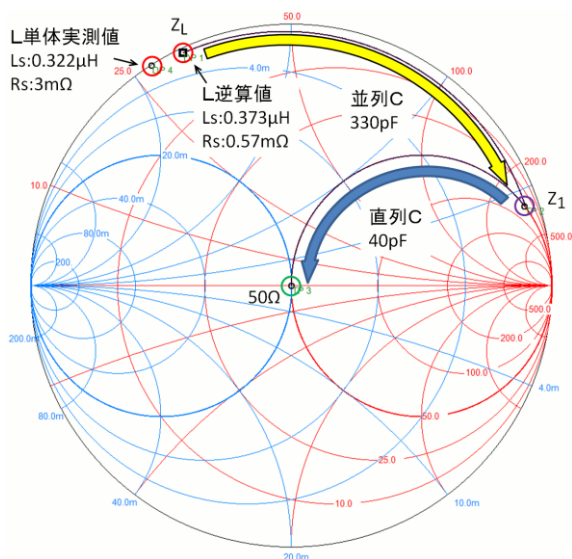
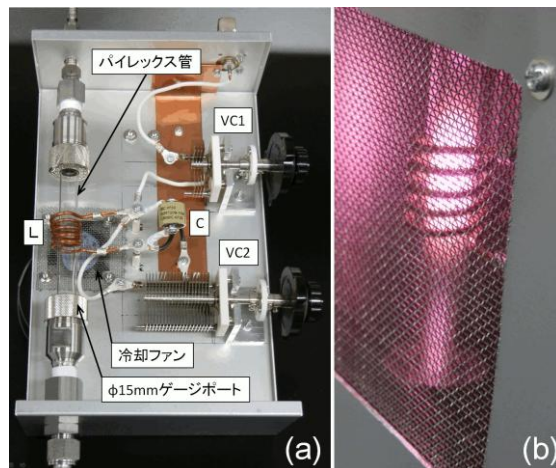


図 3 スミスチャート(イミッタンスチャート)による整合回路の設計

のインダクタンス L_s と直列抵抗 R_s を測定した。この直列抵抗には真の放射抵抗と各種損失が含まれているが、各々を分離するのは不可能であり、また値そのものが極めて小さいので絶対値の信頼性は低い。そこでこれを大まかな値として捉え、これを 50Ω に整合するように VC1 と VC2 の可変範囲を決定した。最終的には反射電力を最小になるように VC1 と VC2 を調整する必要がある。図中の L 逆算値 (Z_L) は、整合が取れてプラズマ放

電しているときの VC1 と VC2 の値からコイルのインダクタンス値を逆算して求めた値である。L 単体での実測値に極めて近い値となっている。

図 4 (a) は、実際に担当学生が製作したプラズマ発生装置の内部である。プラズマ発生部は石英管



ではなく、入手性と加工性を考慮してパイレックスガラスを用いている。真空系とガラス管との接続はゲージポートを利用して簡便に実現している。試作当初は全く整合が取れずに苦労したが、ネットワークアナライザを使用することができたため、整合条件を見つけることができた。部品はなるべく市販品を用い、更に教育上の観点から加工と組み立ては出来る範囲で全て担当学生に実施してもらった。実は最も苦労したのは、近年特に入手が困難になりつつある高周波関連の部品の探索と調達であった。図 4 (b) は、Ar ガスを用いて誘導結合プラズマ(放電)を発生させている様子である。

謝辞

本装置の設計製作において廣瀬文彦教授より多くのご指導を賜りました。また、研究室の学生諸君、特に博士後期課程 1 年の鹿又健作君には多数の検証実験を行って頂きました。感謝申し上げます。整合回路の設計には成田克助教より貴重なアドバイスを頂きました。同じく整合回路の測定には齊藤敦准教授よりネットワークアナライザを使用させて頂きました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 出貝 求, “原料ガス励起法を用いた室温原子層堆積プロセスに関する研究”, 山形大学大学院理工学研究科 2011 年度修士論文.