

81/98-30

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

LSI多層配線における  
低誘電率層間絶縁膜に関する研究

申 請 者

遠 藤 和 彦

KAZUHIKO ENDO

1998年 11月  
(西暦)

これまで20年以上に渡り進行し続けているシリコン集積回路(LSI)の高性能化により、近年電子機器の担う役割は飛躍的に増大し、家電から情報機器まで我々の日常生活に様々な形で取り入れられている。特にマイクロプロセッサやメモリーデバイスの微細化・高性能化の結果は、1990年代の後半に我々を取り巻く電子的ネットワークを大きく発展させ、インターネットをはじめとする急速な通信環境の変革を通し、情報化社会といわれる現代社会に多大な影響を与えている。

このような情報化社会の基礎を担う、シリコンLSIの高集積化と高性能化は、R. H. Dennardによって1975年に提唱されたMOSFETの比例縮小則を指針とした、素子寸法の微細化により達成されてきた。しかし、素子寸法が $0.1\mu\text{m}$ に近づくにつれ、LSIを構成する様々な材料の物理的な性質の限界、もしくはプロセス上の限界が見え始め、これまでの様な飛躍的な発展を抑制するようになってきている。特に、LSI回路の電気的な相互接続を行う多層配線では、配線幅、配線間隔が次第に狭くなり、配線間の寄生容量が増加している。そのためLSI配線中の信号伝播速度は次第に低下し、今後微細化を行ってもその処理速度を高速化することができなくなる。従ってプロセスおよび設計技術の改善による配線間寄生容量の低減は、微細化による高速化という20年以上も続いたシリコンLSIのトレンドを維持し、さらなる性能向上を行う上での大きな課題となっている。

今後の微細化による寄生容量の増加を防止するには、LSIの発明以来用いられてきた $\text{SiO}_2$ 膜(比誘電率4)に代えて、新たに低誘電率の絶縁膜をLSIの層間絶縁膜に搭載する必要がある。そのため、近年さまざまな低誘電率膜が模索されている。一般に絶縁膜の比誘電率は、膜中に誘起される分極によって決定されるため、低誘電率膜としては密度の小さく分極の小さな絶縁膜を用いる必要がある。従って無機膜よりも密度が小さい炭素系絶縁膜は、新規低誘電率膜の有力候補となる。しかし、層間膜絶縁膜として炭素膜をLSIに搭載させるには、耐熱性を向上させ、多層配線に使用される他の膜との密着性を向上させ、またその加工方法を新たに開発するなど、様々な未解決の問題に取り組まなければならない。

本論文では、低誘電率層間絶縁膜として満足すべき特性を備える、新規の炭素系絶縁膜を提案する。さらに実際にシリコンLSIへの搭載を目指し、既存の多層配線プロセスとの整合を取るための新規プロセスの構築を試みる。

本論文は全5章で構成されており、以下にその概要を述べる。

第1章では、本論文の背景を述べる。第1節では、近年のシリコンLSIの抱えている諸問題を指摘する。第2節では、多層配線技術の動向を述べ、微細化のために生じる配線遅延の問題を取り上げる。第3節では、配線遅延低減のために低誘電率の層間絶縁膜を導入する必要性を説明する。さらに、物質の誘電率に関

する考察を行い、低誘電率膜実現のための指針を明らかにする。また低誘電率膜の候補として、炭素系絶縁膜が有力であることを示し、フッ素の含有が誘電率低下に効果があることを述べる。第5節および第6節では、本論文の目的および構成を述べる。

第2章では、耐熱性高分子の一つであるポリイミド膜を取り上げ、炭素膜を低誘電率の層間絶縁膜として多層配線に適応させる可能性とその問題点を探る。第1節では、これまでのポリイミドの多層配線への応用例を示す。第2節ではポリイミドのフッ素含有による低誘電率化を試みる。芳香族ポリイミドを基板に形成後、フッ素プラズマを照射することにより、ポリイミド中をフッ素が拡散し、膜全体がフッ素化されることを明らかにする。その結果、ポリイミドの比誘電率が低下することを示す。第3節では、ポリイミドのフッ素化とその電気伝導の変化との関連を考察する。ポリイミドへのフッ素含有は、膜の比誘電率を低下させるとともに、膜のリーク電流を低下させることを示す。ポリイミドの電流-電圧特性を解析し、イオン伝導により電気伝導が生じていることを明らかにする。従って、フッ素プラズマ照射によりポリイミド中を拡散したフッ素は、膜のイオン伝導を担うキャリアを減少させる効果があることを示す。第4節では、本実験の結果明らかになった問題点を指摘する。フッ素プラズマ照射により膜表面に含有される多量のフッ素のため、膜の耐熱性は劣化することを示す。従って耐熱性を保ちつつ、膜の比誘電率を低下させるには、堆積と同時のフッ素化が望ましいことを示す。

第3章では、新規低誘電率絶縁膜であるフッ素化アモルファスカーボン(a-C:F)膜を提案し、その基本特性を評価する。第1節では、ポリイミドのフッ素化実験の結果明らかになった問題点を解決し、詳細なフッ素含有量制御を行うための化学気相成長(CVD)による炭素膜堆積を提案する。従来から炭素膜の堆積に広く用いられている塗布法の問題点を指摘し、気相成長による堆積の優位性を示す。また堆積する膜として、低誘電率性と高耐熱性を併せ持つa-C:F膜を提案する。第2節では、平行平板型プラズマCVD装置を用い、提案した膜の基本特性を評価する。 $\text{CH}_4$ を原料に用いて堆積させた水素化アモルファスカーボン(a-C:H)膜は、比誘電率4以上を示すのに対し、 $\text{CF}_4$ を添加し膜にフッ素を含有させると、ポリイミドと同様に比誘電率が低下することを示す。またa-C:H中にベンゼン環を含有させ、ポリイミドと同様の構造を持つ膜を、気相成長で堆積させることを試みる。その結果、低い誘電率を保ちつつ耐熱性 $400^\circ\text{C}$ が得られることを示す。第3節では、ヘリコン波高密度プラズマCVDを用いた、膜特性向上の試みについて述べる。ここでは、耐熱性や比誘電率などの膜特性に影響を及ぼす、膜のフッ素含有量制御を試みる。原料ガスに $\text{C}_4\text{F}_8$ を用い、また高解離なヘリコン波プラズマを用いることにより、原料が低フッ素量の前駆体に分離し、膜のフッ素含有量を制御可能であることを明らかにする。

その結果膜の耐熱性は、目標値である  $400^{\circ}\text{C}$  を達成することを示す。第4節では、 $\text{a-C:F}$  膜の比誘電率を構成する各分極の寄与を求め、炭素系絶縁膜による低誘電率化機構を明らかにする。まず屈折率の2乗から、電子分極に起因する比誘電率を求める。次に、極性を持った原子の位置が、印加電界により変化して生じるイオン分極を、吸収係数  $k$  の  $\text{Kramers-Kronig}$  変換により算出する。また  $\text{C-V}$  測定により電氣的に求められた比誘電率は、全分極の和となる。以上の関係を用いて膜中の各分極成分を分離する。 $\text{a-C:H}$  膜と比較すると、フッ素化により電子分極および配向分極が低下し、 $\text{a-C:F}$  膜は低誘電率化されることを示す。一方  $\text{SiO}_2$  膜と比較すると、イオン分極および配向分極が低下していることを示す。また、水素雰囲気中でアニールを行うことにより、 $\text{a-C:F}$  膜の配向分極がさらに低下することを示す。

第4章では、 $\text{a-C:F}$  膜を層間絶縁膜に用いた、新規多層配線形成技術を構築する。第1節では、炭素系絶縁膜を用いて多層配線を形成する際に特有の問題点を指摘し、それらを解決するための手法を考案する。炭素系絶縁膜を層間膜に用いる場合、露光工程で使われるレジスト材料との選択比がとれず、従来の加工法を用いることができない。さらに、化学機械研磨による平坦化の工程では、その弱い機械強度が問題となる。そこで  $\text{a-C:F}$  膜上に保護膜として  $\text{SiO}_2$  膜を堆積させ、微細加工および平坦化工程を  $\text{SiO}_2$  上で行う新規プロセスを考案する。第2節では、 $\text{a-C:F}$  膜の微細配線間への埋め込み特性を評価する。埋め込み向上のために新に開発した、バイアス  $\text{CVD}$  技術による微細な配線間への堆積について述べ、バイアス印加により良好な埋め込み特性が得られることを示す。第3節では、 $\text{SiO}_2$  との複合プロセスを構築する上で必須の、膜の密着性について議論する。ダイヤモンドライクカーボン膜、およびシリコン過剰な  $\text{SiO}_2$  膜を密着膜として界面に堆積させることにより、界面に  $\text{SiC}$  結合が形成され、密着性が改善されることを明らかにする。第4節では、 $\text{a-C:F}$  膜を層間絶縁膜に用いた多層配線の電気特性について述べる。配線間に  $\text{a-C:F}$  膜を埋め込み、さらに上部に  $\text{SiO}_2$  膜を堆積させ3層配線を形成した結果、隣接間配線容量が従来の約50%に低減されることを実証する。以上  $\text{a-C:F}$  膜を用いた多層配線形成技術は、今後の  $\text{LSI}$  多層配線の配線遅延を減少させる技術として、高い可能性を持つことを実証する。

第5章では、本論文をまとめ、得られた成果を総括する。