

外-95-27

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

気相ドーピング法によるシリコン超浅拡散層
形成技術とその応用に関する研究

申 請 者

清田幸弘

Yukihiro Kiyota

1995 年 11 月

超高速ロジックLSI、高集積メモリLSI等で代表されるシリコンデバイスは、今日まで横方向寸法の微細化によってその性能を目ざましく向上させてきた。例えば、MOSトランジスタのゲート長は電子線描画技術により、 $0.1\mu\text{m}$ 以下のものを形成することができるようになり、大容量メモリのみならずプロセッサ用ロジックLSI等にも用いられている。また、バイポーラトランジスタは横方向の微細化とともに自己整合技術の進歩によって、遮断周波数70GHz以上の性能が報告され、光伝送システム用ロジック及びアナログLSI等に適用されている。このような微細デバイスのさらなる高性能化には、横方向の微細化のみならず縦方向の微細化、すなわち浅い不純物拡散層を形成することが必須である。たとえば2010年頃に量産されるMOSトランジスタのソースドレインの拡散深さは20nm程度、バイポーラトランジスタのベース幅は20から30nmになると思われ、これらは現在の1/4から1/5程度の値である。このような超浅拡散層はイオン注入法や、熱拡散法といった従来法では形成困難であり、新たな不純物拡散層形成技術が必要とされている。

このような背景に鑑み本論文では、筆者が提案した気相ドーピングによる超浅拡散層形成プロセスの実験結果、および本技術を用いて試作したバイポーラおよびMOSトランジスタの特性について述べている。本論文の目的は浅い接合を形成するための新たな不純物ドーピング方法を提供し、シリコンデバイスの高性能化に寄与することである。

第1章「緒言」

本研究を行うに到った背景、動機について触れ、浅い拡散層を形成するプロセスの重要性、必要性、研究動向について述べた。現在、LSIの生産に広く用いられているイオン注入法、あるいは固相拡散法では、それぞれイオンのチャネリング効果、高温プロセスという問題点を持つため、浅い不純物拡散層の形成は困難である。浅い拡散層を形成するプロセスとして要求されることは(1) 50nm以下の接合を形成できること、(2) デバイスに必要とされる不純物濃度を制御できること、(3) 低温プロセスであること、(4) 基板に損傷を与えないこと、である。

第2章「瞬間気相ドーピング法」

筆者が提案し、研究を続けてきた瞬間気相ドーピング法(RVD; Rapid Vapor-phase Doping)の特徴、従来法との相違点について述べた。本技術は緒言で述べた接合形成プロセスに要求される条件を満たしており、次のような特徴を持つ。

- (1) 水素還元によって自然酸化膜を除去した後不純物分子を気相から拡散させる。
- (2) 拡散源ガスの流量によって拡散層の表面濃度を制御する。
- (3) 短時間ドーピングが可能であり浅接合を形成することができる。

従来の固相拡散法との相違点は、水素雰囲気中で拡散源となるガスを流すため、シリコン表面は酸化されない点、固溶限ではなく不純物ガス流量で不純物濃度を制御する点、基板上に不純物薄膜あるいは酸化膜等を残さないためデバイス試作に適用しやすい点である。

気相ドーピングの実験は誘導加熱による常圧CVD装置を用いて行った。使用したガスは

キャリアガスとして水素、拡散源ガスとして B_2H_6 (ジボラン)、 PH_3 (ホスフィン)である。また、より高濃度で浅い拡散層を形成するためのランプ加熱機構を持つドーピング装置を開発した。本装置を用いることで、拡散源となるガスを流した雰囲気中でシリコン基板を急速に加熱してドーピングを行う、という新たな不純物拡散プロセスが可能となった。

第3章「ボロンドーピング」

本技術によるボロンドーピングについて実験結果および考察を述べた。まず、800℃、900℃におけるボロン拡散層の評価結果を述べ、本プロセスの基礎データを示すことによって上記の本プロセス独自の特徴を説明した。特に、拡散源ガスの流量で拡散層濃度を制御できる点は従来法にはない特徴である。また、800℃、7分程度のドーピングで表面濃度 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、深さ20 nmという、従来法では形成困難であった超浅拡散層を形成できることを示した。また、時間の1/2乗に比例して表面のキャリア濃度が増加するという実験結果を境界条件として拡散方程式を解くことにより、本プロセスによって形成したボロンプロファイルは補誤差関数を一回積分した形で近似されることを示した。この関数は、通常の固相拡散法によるプロファイルを近似する補誤差関数よりも急峻な分布を示すことがわかっており、このことが通常の固相拡散法よりも浅い接合を形成できるひとつの原因であることを明らかにした。また、「ドーピング効率」というボロンのシリコンへの付着係数を相対的に表す指数を定義し、ボロンの偏析の有無がこのドーピング効率を用いることによって説明できることを示した。偏析が起こればドーピング効率が急激に増加することにより、ボロンの付着係数が増加していることが予想される。さらに、シートボロン濃度のアレニウスプロットによる考察を行い、活性化率を向上させるためにはシートボロン濃度がボロンの供給量で律速される条件でドーピングを行うことが必要であることを示した。また、拡散層中の不活性なボロンはドーピング後の水素アニールによって急速に外方拡散し、その挙動は通常の拡散方程式では表せないことを示した。さらに、新たに開発したランプ加熱装置を用いたドーピング装置を用いることにより、拡散源ガスの雰囲気中に基板を置き瞬間加熱を行う、という新たなドーピング方法が実現可能であることを示した。これは従来から行われていた急速酸化の概念を不純物拡散に初めて適用したものである。

第4章「ボロン原子層ドーピング」

本技術を用いてボロンの原子層ドーピング(ALE; Atomic Layer Doping)を形成した。シリコン基板上の自然酸化膜を除去した後、基板温度を500℃まで下げ、 B_2H_6 ガスを導入し、ボロン吸着層を形成した。次に Si_2H_6 ガスを用いてa-Siを堆積した。この試料を600℃でアニールすることによってa-Siを固相成長によって結晶化させることができた。SIMS分析よりこの不純物層の厚さは数nmと見積もられ、不純物の極薄い層を単結晶シリコンで挟んだ構造、すなわち原子層ドーピングが実現されていることを確認した。このとき、吸着したボロン濃度が数原子層ならば、a-Siの単結晶化が起こったが、吸着量が数原子層を越えるとa-Siは多結晶となった。これらの実験結果より、ボロンの吸着は自己抑止(self-limiting)プロセスではないことがわかった。原子層ドーピングを実現するためには吸着する不純物

量を制御することが必要であり、本実験においては B_2H_6 ガス流量によって制御することが可能であることを示した。

第5章「リンドーピング」

気相ドーピングにおいては拡散源ガスを B_2H_6 から PH_3 に変えることによってN型のドーピングも可能である。N型不純物である砒素あるいはリンは蒸気圧がボロンに比べて高いため、不純物単体の薄膜からの固相拡散は困難であるが、気相からならばドーピングが可能となる。リンをドーピングするためにはボロンよりも高温(900℃以上)が必要であるが、ボロンと同様、ガス流量によって不純物濃度を制御することができることを示した。900℃、30分という条件で拡散深さは60nm程度となる。また、ドーピング時間に従って表面の濃度が増加したボロンの場合とは異なり、リンの表面濃度は時間に対してほぼ一定であり、その拡散プロファイルは従来法と同様に補誤差関数で表される。さらに、「ドーピング効率」の計算より、リンの方がボロンよりも付着確率が低いことを示した。この理由としてリンの蒸気圧がボロンに比べてはるかに高いことが挙げられる。

第6章「デバイスへの応用」

デバイス応用に先立ち、マスク材料の検討を行った。LSIを試作するためには所望の場所のみに不純物を導入する必要がある。そのためのマスク材料は作成および加工が簡便な物が望まれる。そこで10nmの薄い熱酸化膜をマスク材料として検討した結果、酸化膜上には B_2H_6 ガスの熱分解で生じたボロン分子が吸着しにくいため、酸化膜中にはボロンはほとんど拡散しないことがわかった。マスク材料としては薄い酸化膜を用いることが可能である。

本技術をバイポーラトランジスタの真性ベース領域の形成に適用することによって、ピーク濃度 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、厚さ25nmという高濃度で非常に薄いベース幅を実現することができた。本トランジスタではリーク電流のない直流特性が得られ、本技術が結晶欠陥等を引き起こすことがなく、デバイス試作に適用可能であることを示した。本技術で自己整合超高速バイポーラトランジスタのベース領域を形成した結果、遮断周波数64GHz、ECLリングオシレータのゲート遅延時間15 psという世界最高の性能を得た。

また、PMOSトランジスタの極浅ソースドレイン領域形成にも本技術を適用し、ソースドレインの拡散深さが50nmのデバイスを試作した。これは従来の BF_3 イオン注入によるデバイスの約1/2の拡散深さである。 BF_3 イオン注入によるデバイスはゲート長 $0.4 \mu\text{m}$ 以下で短チャネル効果のため、閾電圧が変化したのに対し、本技術を用いて浅いソースドレインを形成したデバイスではゲート長 $0.16 \mu\text{m}$ まで短チャネル効果を抑制することができた。これらの結果より、将来の超高速バイポーラ、微細MOSLSIには浅い不純物拡散層を形成することが性能向上に有効であり、そのためには気相ドーピングが適していることを示した。

第7章「結言」では本研究で得られた知見をまとめ、今後の課題、将来のシリコンデバイス像について展望した。