

外 95-35

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

大面積イオンドーピング技術の開発と
薄膜トランジスタへの応用に関する研究

申 請 者

吉田 哲久
Akihisa YOSHIDA

1995 年 11 月

近年の映像・情報通信の進展に伴い、画像表示のキーデバイスであるディスプレイが重要になりつつある。その中で、液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display: LCD) は、薄型、軽量、低消費電力という特徴をもつことから、応用市場を拡大している。なかでもアクティブマトリックス駆動方式によるLCD (Active Matrix LCD: AM-LCD) は、各画素にスイッチング素子が組み込まれており、見かけ上各画素が各フィールド (NTSC方式: 1秒間に60枚の画面) 毎に、オンかオフかの情報を保持した状態で駆動されるため、高階調・高精細の多色・フルカラー表示に適している。現在AM-LCDでのスイッチング素子としては、水素化非晶質シリコン (a-Si:H) を構成材料とした薄膜トランジスタ (Thin Film Transistor: TFT) が主に用いられている。a-Si:H TFTでは、構成要素であるソース/ドレインコンタクト部の低抵抗層の形成を、プラズマ化学的気相成長法 (Plasma Chemical Vapor Deposition: PCVD法) によるn⁺膜の堆積によって行なう。しかしこの方法は、不要な部分に堆積したn⁺膜を除去する工程が必要であったり、装置の制御性・稼働率、n⁺膜の剥離などの問題がある。この方法を超LSIプロセスで一般的になっているイオン注入法に置き換えると、マスクを用いた選択的なドーピングが可能であり、しかも不純物の量及び分布の制御が可能であるため、現行のPCVD法における諸問題を解決する可能性がある。しかし通常のイオン注入装置におけるイオンビームの幅は数mm程度であり、AM-LCDの様な大面積基板に対するドーピングの均一性を高めるためには、イオンビームの電気的な走査または試料の機械的走査等が必要となる。そのためAM-LCDを高い生産性と低いコストで製造することに適さない。筆者は通常のイオン注入装置を用いたイオン注入に代わる、低コストで均一かつ高精度の大面積ドーピングを容易に行う技術として、高周波イオン源で発生させた大口径の非質量分離イオンビームによるドーピング (大面積イオンドーピング) 技術を提案・開発した。本技術は、室温・高速処理であることによる高スループット、堆積ガスを用いないことによる高装置稼働率・高歩留まり、基本的にイオン注入であることによる自己整合プロセス可能である等の特長を有する。本論文は、この大面積イオンドーピング技術についての研究成果をまとめたもので、7章から構成されており、以下にその概略について述べる。

第1章は「序論」であり、本研究の背景となるAM-LCD及びその製造プロセス、a-Si:H薄膜とそれを用いたデバイス、イオン注入技術についてまとめ、大面積イオンドーピング技術の概要と目的について述べる。

第2章は、「大面積イオンドーピング装置の試作とドーピングの均一性」についての研究成果をまとめている。RF高周波電界 (13.56MHz) によるグロー放電は、大面積に均一な放電を得ることが可能である。この点に着目し筆者は、イオン源としての効率をさらに上げるために、高周波の印加とともに、石英管壁への電子の拡散・消失の抑制と、電子-中性分子の衝突の増加をもたらす静磁場の印加を行うイオン源を提案した。このタイプのイオン源を用いたドーピング装置を作成し、装置に投入する高周波電力・静磁場・加速電圧とイオン電流との相関を明らかにした。またイオン源で生成されるプラズマの均一性と印加磁場の関係については、イオン源に窒素を導入し、高周波電力を印加して、N₂(0,0); λ = 337nmの発光強度分布を測定して調べた。イオン源の中心部で3mTの軸方向の静磁場を印加した場合、開口部に対応する位置でのN₂(0,0)の発光強度のバラつきが±5%以下で、かつ磁場を印加しない場合の発光強度の3倍程度であること、逆に磁場の強度を5mTに強めた場合には、高周波電極付近にプラズマが局在

し、発光強度のバラつきとして±76%という不均一なプラズマになることを明らかにした。この結果を基に本装置における最適磁場の印加下で、n型またはp型の単結晶Si基板に対してBまたはPの大面積イオンドーピングを行い、実用可能なドーピングの均一性の実現を示した。実際のAM-LCDのTFTは、ガラス等の絶縁基板上に形成されるため、大面積イオンドーピング (イオンの照射) による基板・薄膜表面の電位上昇 (チャージアップ) と、それによるイオン注入の制御性や均一性の悪化が懸念される。このチャージアップの原因について明らかにし、引き出し電極の改造を行ってチャージアップを抑制するとともに、4インチ角のガラス基板上に堆積したa-Si:Hに対するドーピングを行って、単結晶Si基板と同様の均一性の実現できることを示した。

第3章では、「大面積イオンドーピングにおける注入分布とイオン種」についての研究成果をまとめている。大面積イオンドーピングでは、イオン源ガスが解離・電離して生成されたイオンが質量分離されずに注入される。本技術によって注入されたイオンの分布と量について、二次イオン質量分析法 (Secondary Ion Mass Spectrometry: SIMS) を用いて調べた。なおAM-LCDで用いられるa-Si:H膜には、10atom%程度の水素 (～10²²cm⁻³) が含まれているおり、注入された水素との区別が困難である。従って、減圧CVD法で形成した結晶粒の小さい多結晶Si薄膜 (水素濃度: ～10¹⁹cm⁻³) に対して、イオン源ガス: 5%PH₃/H₂, イオン電流密度: 10μA/cm², 全イオン注入量: 5×10¹⁶cm⁻²で大面積イオンドーピングを行ったものをSIMSで測定した。この結果、Pについては濃度分布がGaussianに近く、かつ分布のピーク深さはLindhard-Sharff-Schiott (LSS) 理論から求められた投影飛程 (R_p) より若干浅いことを見出した。またHについては、濃度分布は単一イオンの注入分布と比較して広がっており、分布のピーク深さはLSS理論から求められたH⁺のR_pの50%程度になっていることを見出した。このHの分布の広がりから、水素は複数種のイオンの形で注入されていることを示した。SIMSによる深さ方向の注入元素の濃度分布の結果を基に、モンテカルロシミュレーション (Transports of Ions in Matter: TRIM) を用いて個々のイオン種とその分布を分離し、各イオン種の量を決定した。結果として、大面積イオンドーピングにおける全イオンの約50%がPを含んだイオンであること、また水素だけのイオンはH₂⁺, H₃⁺の形であることを明らかにした。この水素の量とその影響については次章で述べている。また本章では、ドーピングされた元素の熱処理による拡散・再分布についても述べ、デバイス作成プロセスに対する指針を示している。

第4章では、「a-Si:Hへの大面積イオンドーピングにおける水素の効果」についての研究成果をまとめている。a-Si:Hに対するドーパント元素と水素の同時注入によるドーピングは、筆者らによって初めて試みられた方法である。なお、a-Si:H膜のホール移動度が極めて小さく、TFTとしてはnチャンネル型が用いられるため、本研究におけるa-Si:Hへの大面積イオンドーピングはn型のドーパントであるPのドーピングを主として取り組んだ。まず大面積イオンドーピング技術で同時に注入される水素の影響について、P⁺ (5×10¹⁶cm⁻²固定) と水素イオン (バケット型イオン源: 0, 10¹⁶～10¹⁷cm⁻²) の同時注入を行って調べた。その結果、注入する全イオンの中で水素イオンの比率が70%以上の同時注入を行った場合、膜中のSiH₂, (SiH₂)_n, SiH₃の結合が増加し、ドーピングされた膜の電気伝導率が低下することを明らかにした。これに対し5%PH₃/H₂をイオン源ガスとした大面積イオンドーピング

では、第3章で述べた様に水素イオンの比率が50%程度であり、単体のP⁺注入と比較して水素による電気伝導率の低下は小さく、ソース／ドレインコンタクト部の低抵抗ドーピング層形成には問題とならないことを明らかにした。また注入欠陥に対する水素の効果については、電子スピン共鳴 (Electron Spin Resonance: ESR) により、大面積イオンドーピング前後におけるa-Si:H膜のスピン密度の変化を測定し、P⁺単独注入と比較してスピン密度の増加量は約30%程度であり、大面積イオンドーピングにおいて水素による注入欠陥の補償が行われていることを明らかにした。また大面積イオンドーピング後の低温(200~400℃)熱処理による欠陥の回復と、熱処理温度が300℃付近でスピン密度が極小となることも明らかにした。なお、水素のみをa-Si:H膜に注入・ドーピングした場合には、P⁺単独注入と比較してもスピン密度の増加量が大きく、TF T作製プロセス時にチャンネル層のa-Si:H膜には水素イオンが到達させないことが必要であることを明らかにした。

第5章では「大面積イオンドーピングされたa-Si:Hの電気特性に関するドーピング時の基板温度依存性」についての研究成果をまとめている。最初に基板加熱しながら大面積イオンドーピングを行ったa-Si:Hについて、電気伝導率の活性化エネルギー、ドーズ量依存性、基板温度依存性を調べた。この結果、基板温度が300℃付近で電気伝導率が極大($8.7 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$)となり、かつ活性化エネルギーとして0.18 eVが得られ、基板温度の最適値があることを見出した。この最適ドーピング温度については、基板温度の上昇に伴う注入欠陥の補償や、a-Si:H膜の電気伝導率が大きくなる(300℃で 10^{-3} S/cm)ことによりチャージアップがさらに抑制されること、400℃以上でa-Si:H中の水素が脱離すること等に起因することを見出した。またドーズ量依存性に関して、総イオン注入量が $10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 付近に電気伝導率の極大値があることを見出した。次に加熱イオンドーピングよりもスループットが高い、基板加熱なしのイオンドーピングドーピング(室温イオンドーピング)を行い、ドーズ量依存性、加速電圧依存性、ドーピング後の熱処理効果やAM-LCDプロセスとの整合性について調べた。この結果、室温イオンドーピングによっても、a-Si:H TF Tのソース／ドレインコンタクトに適用可能なn⁺層の形成が行えることを示した。

第6章では、「大面積イオンドーピング技術のa-Si:H TF Tの作製への応用」についての研究成果をまとめている。作製したa-Si:H TF Tは逆スタガー型で、ゲート電極(Cr)／ゲート絶縁膜(SiN)／チャンネル層(a-Si:H)／保護膜(SiN)の構成をし、イオンドーピング時のマスクは保護膜で行った。この保護膜中の水素イオンの飛程をシミュレーションし、イオンドーピング時の加速電圧に対して、水素イオンがチャンネル層に到達しないドーピングマスク(保護膜)の厚さを求めた。この結果、水素イオンがチャンネル層に到達しない条件で加熱イオンドーピングを行うことによって、 $V_T = 6.0 \text{ V}$, $\mu_{FE} = 0.6 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ の良好な特性を有するTF Tが作製できることを示した。さらに室温イオンドーピングによるTF Tプロセスの検討との作製を行い、TF T完成後の熱処理時に、ソース／ドレイン電極のAlが拡散することを明らかにし、Ti/Al電極の有効性と、この電極構成とドーピングマスクの最適条件と実用レベル($V_T = 2.0 \text{ V}$, $\mu_{FE} = 1.0 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)のTF Tの実現を示した。

第7章は「まとめ」の章であり、第1章から第6章までの内容を章ごとにまとめ、今後の展望を述べている。