

# エピタキシャル $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ を用いた MIS 型フィールドエミッタに 関する研究

## 論文要旨

近年、液晶を中心にフラットディスプレイの研究・開発と実用化が精力的に進められ、ディスプレイの王様ともいべき CRT にとって代わろうとしている。フィールドエミッションディスプレイ (FED) は原理的に他のフラットパネルディスプレイに比べ優れた特性を示すことが予想できるため、CRT の真の後継ディスプレイとして様々な研究が行われた。しかしながらプロセスの複雑さや高い製造コストなどの問題で未だに成功には至らない状態である。一方、半導体基板上に作ることができるフィールドエミッタは、半導体プロセスを応用して様々な機能を持った素子として開発される可能性が大きい。特に平面型フィールドエミッタは放出効率は低いが簡単な作製プロセスで製造でき、耐久性にもすぐれるため、半導体プロセス技術と真空ナノエレクトロニクスを融合した次世代電子源デバイスとして適任である。

本研究ではエピタキシャル  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$  構造を応用したトンネリングデバイスを作製し、 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  をトンネル酸化膜として用いる時の問題点を明確にし、それら解決することで  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  を利用したトンネルデバイスを実現する。まず、エピタキシャル  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜は固相成長法を導入した MBE 法により作製した。MBE 法は低い成長速度で  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を成長することが可能で、ナノメートルスケールで正確に膜厚制御を行うことができる。しかしながら、膜厚が増すに従い、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  の平坦性が徐々に悪化することが判明した。また  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  の膜厚 4nm 以上になると 3 次元成長が始まることを明らかにした。この  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜に対して適宜な窒素雰囲気での熱処理を行うことでリーク電流密度が 3 桁低減できた。フィールドエミッタ作製のため、様々な膜厚の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の結晶性や表面特

性及び電気絶縁特性を調べ、膜厚に依存するが、ブレイクダウン電界が 6~12MV/cm であることがわかった。膜厚が増すに従い電界強度が悪化し、電界強度は膜厚と半比例的に下がる傾向を示した。これは 3 次元成長による表面平坦さの劣化が電界集中をもたらすことに起因すると考えられた。一方、 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を用いて MIS 型のフィールドエミッタを駆動するためには、その仕事関数とトンネル電界強度との関係より  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜は約 5nm 以上が必要であることが計算できた。2~10nm の範囲で  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜は F-N トンネリング現象することを実験的に確認でき、F-N プロットから算出した Si と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のバンドオフセット ( $\Delta E_c$ ) は 2.5eV であることが判明した。次にエピタキシャル Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を用いてフィールドエミッタを作製し、評価を行った。エピタキシャル Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を用いることで、すべてが単結晶で構成される MIS 型フィールドエミッタを作製することができた。

まず、単結晶金属層として Al が  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 上に MBE 法を用いることでエピタキシャル成長できることを確認した。また Al 電極の代わりに Pt 電極を用いることを検討し、プロセスの改善を行った。すべての層を単結晶で構成することで、SiO<sub>2</sub> 熱酸化膜をトンネル絶縁膜とする MOS 型フィールドエミッタに比較し、絶縁膜中の伝導帯及び電極中の伝導帯において電子の格子散乱を抑えられ、電子の放出効率が向上すると考えられた。これまでの作製プロセスではエピタキシャル Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 成長はフィールド酸化膜の形成後に行うため、 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜とフィールド酸化膜間での電気的特性が問題であり、またデバイスの歩留まりに低下を起こした。そこで、 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を先に成長する作製プロセスを新たに提案し作製を試した。この結果、 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の表面の状態や結晶性を安定的に制御可能となった。また、エピタキシャル電極/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si 構造に真空アニールを施すことで表面の平坦性の改善を行う手法を提案した。10nm の  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜成長を行った。As-grown サンプルは Zrange=18nm、Rms=1.6nm であったが、真空アニールを施したサンプルは Zrange=7.5nm、Rms=0.9nm と改善し、電気・絶縁特性も向上した。これは、熱処理により、表面でのマイグレーションが促進したためだと考えら

れる。この真空アニール法を用いてフィールドエミッタを作製した ( $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜厚 10nm)。ゲート電圧 4V から pA オーダーのエミッション電流が測定できた。その最大電子放出効率は 1% である。従来の MOS 型の電子放出効率が 0.1% であることからエピタキシャル  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜を用いた単結晶 MIS 電子放出素子が優れていることは明らかである。本研究から得られた知見から、 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  の膜質向上やプロセスにより、Si 上に共鳴トンネル構造や CMOS をと融合したスマート電子源の構築が期待できる。

## Abstract

Recently, a field emission display (FED) has been expected to be state-of-the-art technology for flat and thin display. Ordinary FE device has been studied Spindt or micro-tip type. However, micro tip technology as the first generation did not appeal for the commercialization due to the complicated process and the high manufacturing cost. A field emitter with planar type a metal-insulator-semiconductor (MIS) type or metal-insulator-metal (MIM) type structures were studied to be an attractive field emitter for vacuum microelectronic devices because the emission current is very stable and uniform throughout the entire gate area of the field emitter. Especially the MIS type field emitters were studied their advantages; low threshold voltage, emission current stability at a poor vacuum ambient and more easily fabricated and assembled into microelectronic circuits than the micro-tip structures. When a voltage exceeding the work function of the gate electrode is applied in the MIS type field emitter, electrons travel through the conduction band of the oxide and the gate electrode after tunneling thorough the potential barrier in the oxide, and some of them are emitted into vacuum. MIS type field emitter with silicon dioxide is not practically available, because the transfer ratio, that is, the ratio of the emission current to the total tunneling current, was ordinarily less than 1%, since tunneled electrons are easily scattered during traveling in the oxide. In this study, we propose fabrication of MIS type field emitter using epitaxial  $\text{Al}_2\text{O}_3$  insulator and also Al electrode on an n-type Si(111) substrate it can be electron scattering will be as decreased and emission efficiency will be as increased.

Epitaxial  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  film was formed in two step process sequentially. First step is a prelayer was formed with 1-nm-thick protective  $\text{SiO}_2$  layer and 1-nm-thick Al layer by heat treatment at  $800^\circ\text{C}$  for 30 minutes. Afterward, epitaxial  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  film was grown by mixed source MBE method using Al and  $\text{N}_2\text{O}$ . The surface morphology of the formed epitaxial  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  was

studied using AFM. AFM images show that the surface begins to appear the small protrusions as increasing thicknesses. However it indicates that the rms value of surface roughness is equivalent to atomic level and maintains a smooth surface. I investigate the electric characteristics of epitaxial  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films in range of 2~10nm-thick. In this region of insulator thickness may be applicable to quantum tunneling device as MIS type FE. The characteristics of current density-voltage ( $J$ - $V$ ) and current density-electric field ( $J$ - $E$ ) were observed that breakdown field is 6 ~ 12 MV/cm and leakage current is low. Breakdown voltages among the different samples are increased as the film thickness increased but the breakdown electric field is decreased as the film thickness increased. It is considered that the atomic rough surface cause to concentration of electric field and degrade the electrical characteristics. Although the breakdown field lowered on the thicker  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film, applied bias is sufficiently large for fabrication of device with tunneling effect. Epitaxial  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films led to low leakage current density of  $\sim 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> at a field of 3 MV/cm. Also in-situ annealing at 750° in MBE chamber leads to good breakdown voltage with low leakage current. I obtained the Fowler-Nordheim tunneling characteristic in the different Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thickness to adapt to FE. The conduction band offset ( $\Delta E_c$ ) is calculated 2.5eV from the F-N plot. The obtained value of band offset is sufficiently large to create potential barrier for quantum device without a large leakage current.

To increase process yield and establish the FE device fabrication process, the epitaxial  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film was formed on the Si substrate at the first step with RHEED and XPS measurement in MBE system. Also this process was applied to epitaxial Al and Pt electrode. The fabrication process was suitable to increase yield and reliability.

The electron emission observed and maximum transfer ratio is 1% with new FE fabrication process. The transfer ratio is higher than MOS type FE with silicon dioxide. From this result, these high qualities of electrical dielectric properties and tunneling properties with good

surface flatness for epitaxial  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are considered suitable for a quantum tunneling device. Moreover, field emission characteristics considered that the Al / $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Si(111) structure field emitter indicates viability to a new MIS type field emitter.