

#### (4) サブテーマ2： 次世代高精細ディスプレイ向け電界放出素子の開発

九州大学 佐道 泰造

##### ①研究概要

次世代ディスプレイとして、微小真空技術を利用した電界放出素子を用いて画素を発光させる、マルチエミッター型薄型ディスプレイが注目されている。電界放出素子には、シリコンのほか、負性電子親和力を有するとされるダイヤモンドの利用が検討されている。しかし、ダイヤモンドからの電子放出機構は十分には解明されていない。本研究では、シリコン系電界放出素子、及びダイヤモンド系電界放出素子の電気特性が素子の構造、電気的性質とどのように関係するのかを明らかにし、電界放出素子製造工程への指針を提示する事を目的とする。

電界放出素子の電子放出特性と素子の構造、材料物性との関係が解明されると、高効率で信頼性の高い電界放出素子を用いた次世代高精細ディスプレイ製造手法の指針を与えることができると考えられる。

##### ②フェーズⅠの取り組み（H9年11月～H12年3月）

###### ②-1 目的及び目標

電界放出素子には、シリコンのほか、負性電子親和力を有するとされるダイヤモンドの利用が検討されているが、ダイヤモンドからの電子放出機構は十分には解明されていない。素子の低電圧動作、効率向上には、これらを解明する必要がある。そこで、シリコン系電界放出素子を形成する要素技術の開発、及びダイヤモンド薄膜の電気特性が素子の電子放出特性に及ぼす効果の解明を行った。

###### ②-2 研究方法及び結果

平坦ディスプレイでは、透明基板上にシリコン薄膜を堆積してデバイスを形成し、そのデバイスを用いて画素の選択を行う。シリコン薄膜をデバイスに応用する際、シリコン薄膜の電気特性を正確に把握し制御する必要がある。シリコン薄膜の電気特性のうち、室温での抵抗率等は評価されている。しかし、デバイスの動的特性と効率に大きな影響を及ぼすシリコン結晶薄膜の禁制帯中の深い準位については、その測定手法が確立されておらず、評価が不可能であった。

そこで、深い準位から放出される電荷を分光学的に測定し、禁制帯中の深い準位を精密に評価する技術、TCS (Transient Current Spectroscopy) 法を開発した。さらに、透明基板として結晶シリコンとの格子定数の整合性の良いサファイアを用い、その上にシリコン結晶薄膜を形成したSOS (Silicon On Sapphire) 基板を対象とし、TCS法により、結晶シリコン薄膜の深い準位を正確に評価可能であることを実証した。

また、電界放出素子からの電子放出特性を把握し、素子の形状を決定する際の指標を与

える目的で、素子の電子放出特性のシミュレーションシステムを導入し、研究環境を整備した。

### ②-3 考察

シリコン系薄膜の電気特性を評価する技術を開発した。

この評価技術を利用することで、シリコン系薄膜形成技術にプロセス最適化の指針を与えることが可能と考えられる。この技術は、ディスプレイ向け高品質シリコン薄膜製造部門などでも有効に活用できる。

## ③フェーズⅡの取り組み（H12年4月～H14年11月）

### ③-1 目的及び目標

シリコン、ダイヤモンド系薄膜表面からの電子放出機構を解明し、放出効率の高い電子放出素子を作成するための指針を得るため、以下の2テーマを行った。

- i) 低電圧動作電子放出素子の検討
- ii) 薄膜の電気物性・表面微細構造と電子放出特性との相関の解明

### ③-2 研究方法及び結果

- i) 低電圧動作電子放出素子の検討

非常に小さな印加電圧（約20V）で電子放出が観測可能な電子放出素子を試作した。

- ii) 薄膜の電気物性・表面微細構造と電子放出特性との相関の解明

シリコン、ダイヤモンド等、IV族元素で構成される電界放出素子の動作特性が素子を構成する電子放出薄膜の電気物性・表面形状とどのように関係するのかを解析した。特に、低エネルギー領域（引き出し電圧：200V以下）で動作可能とするための条件について、検討を行った。

### ③-3 考察

- i) 低電圧動作電子放出素子の検討

図4-1に、素子の構造及びそのバンド図を示す。素子のゲート材料には、抵抗率が低く、化学的安定性に優れるコバルトシリサイドを使用した。図4-2に、素子を流れる全電流（ $I_d$ ）および放出電流（ $I_e$ ）の印加電圧依存性を示す。7V程度の小さな印加電圧で電子放出が観測された。図4-3に、全電流および放出電流のFowler-Nordheimプロットを示す。全電流および放出電流とも、ほぼ直線である。これより、両電流は、Fowler-Nordheimトンネル機構に従っていることが確認された。図4-4に、放出電流の駆動時間依存性を示す。放出電流は非常に安定しており、ダイヤモンド表面からの電子放出をシミュレートするための精密低エネルギー電子放出源としても利用可能である。

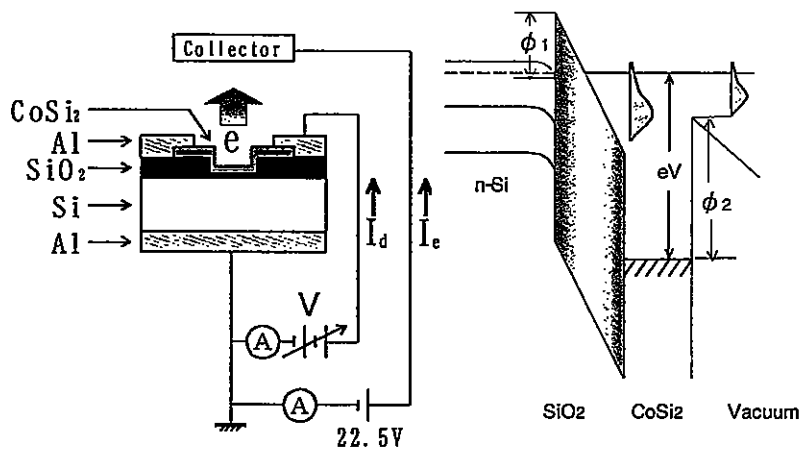


図 4 - 1 低電圧動作電子放出素子の試料構造およびバンド図

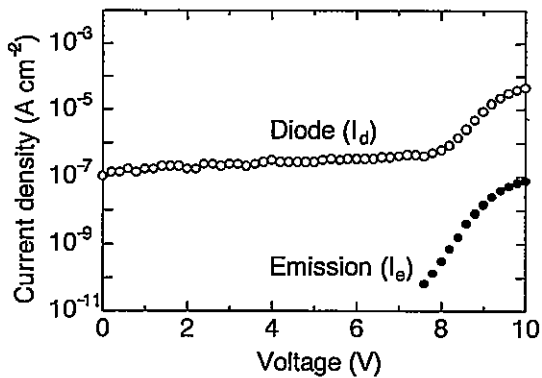


図 4 - 2 全電流( $I_d$ )および放出電流( $I_e$ )の電圧電流特性 (明部の電流 - 電圧特性)

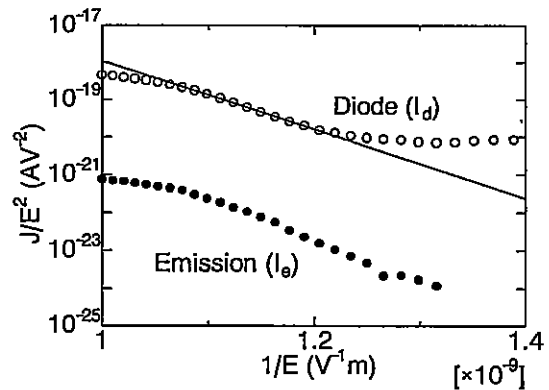


図 4 - 3 全電流( $I_d$ )および放出電流( $I_e$ )の FN プロット

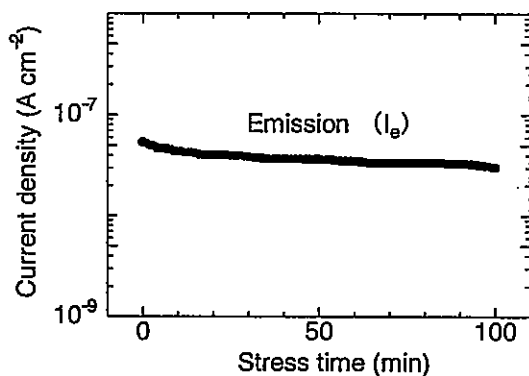


図 4 - 4 放出電流の駆動時間依存性

ii) 薄膜の電気物性・表面微細構造と電子放出特性との相関の解明

電界放出素子の動作特性を把握するため、最新の文献データを基に、素子表面のマクロな曲率半径に応じた電界集中、及び表面層の微細凹凸構造による電界増加効果が、電子放出特性に及ぼす影響を比較検討した。

まず、図4-5に示すような、薄膜のマクロな表面曲率に応じた電界集中を考慮した解析モデル（マクロモデル）を用い、放出電流が、薄膜の曲率及び仕事関数にどのように依存するのかを詳細に解析した。解析結果の一例を図4-6に示す。

ダイヤモンド（ $\phi = 2.3 \text{ eV}$ ）で  $1 \text{ mA/cm}^2$  を得るためには、曲率半径  $0.3 \mu\text{m}$  以下が必要であることが判る。実際の薄膜では、上記のマクロな表面曲率に加え、成膜プロセスに起因する、表面微細構造が電界集中に寄与する可能性がある。

そこで、図4-7に示すような、薄膜の表面微細構造における電界増加効果を考慮したモデル（ミクロモデル）を用い、放出電流と薄膜表面の微細形状との関係を定量的に解析した（図4-8）。その結果、放出電流は、表面微細形状に大きく依存する事が明らかとなった。動作効率向上には、構成材料の仕事関数の低減に加え、表面微細凹凸構造制御による微視的電界の増大が効果的である。

例えば、半径  $5 \text{ nm}$ 、高さ  $200 \text{ nm}$  の円柱状微細凹凸構造を多数、素子表面に形成すれば、微視的電界増加効果による電界増加係数が  $400$  となる事、従って、仕事関数  $2.3 \text{ eV}$ （ダイヤモンド相当）、引き出し電圧  $200 \text{ V}$  において、放出電流密度は  $1 \text{ mA/cm}^2$  と極めて増大する。

更に、ナノチューブやポラス構造を用いれば、更なる高効率化が可能である。

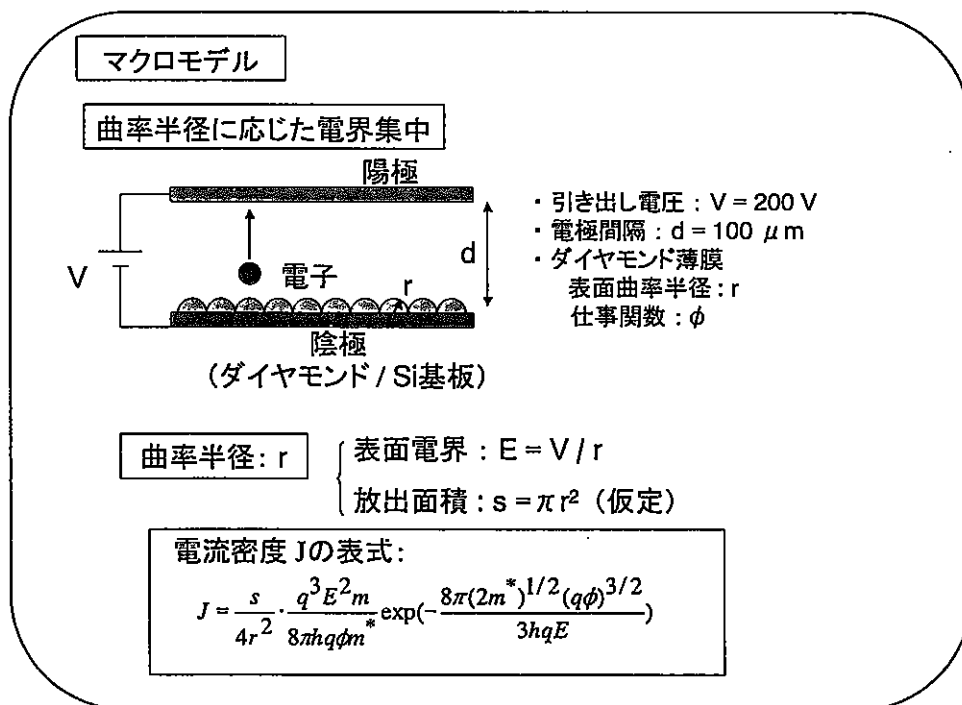
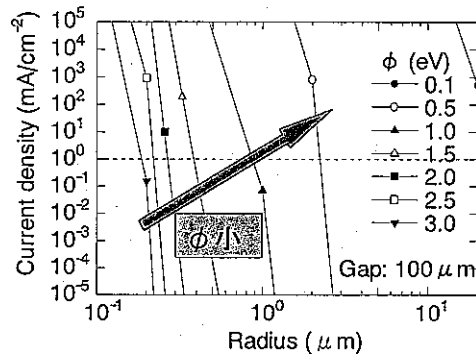


図4-5 マクロモデルの概要

放出電流の曲率半径及び仕事関数依存性



- ・ 曲率半径及び仕事関数の減少と共に、電流密度は増加
- ・ ダイヤモンド ( $\phi = 2.3\text{eV}$ ) で  $1\text{mA/cm}^2$  を得るためには、曲率半径  $0.3\mu\text{m}$  以下が必要

図 4 - 6 放出電流と薄膜の曲率及び仕事関数との関係

マイクロモデル

微細構造による電界増加効果

$E$ : 巨視的電界 (印加電界)

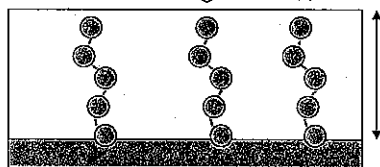
$E_M$ : 微視的電界

$$E_M = \gamma E$$

( $\gamma$ : 電界増加係数)

$$\gamma = 2 + (h/a)$$

Ref: SSE 45, 779 (2001)



クラスター伝導を考慮した薄膜表面近傍の微細構造

F-Nプロットより求める見かけ上の仕事関数  $\phi^*$  は、  
 $\phi^* = \phi / \gamma^{2/3}$  に低下

図 4 - 7 ミクロモデルの概要

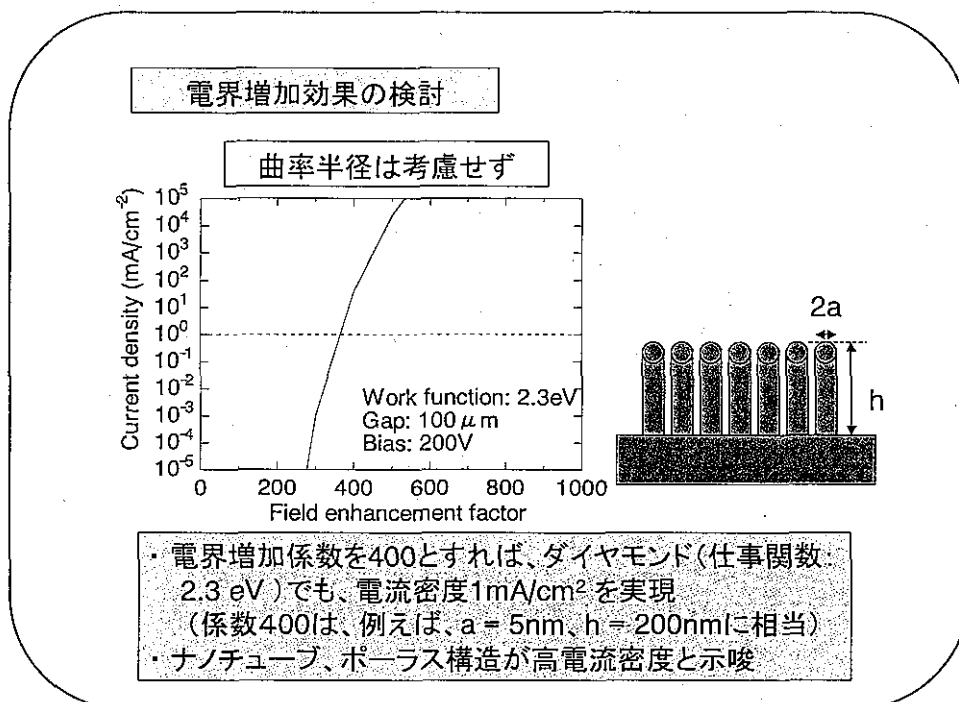


図 4 - 8 薄膜の表面微細形状と放出電流の関係

### ③-4 成果の達成度

電界放出素子の成膜工程における最適プロセス条件を具体的に提示するには至らなかったが、薄膜の表面物性及び表面微細形状とデバイス特性の関係を定量的に提示する事が出来た。

今後は、プロセス条件と表面物性及び表面微細形状との相関を解明する必要がある。

### ③-5 今後の課題

ダイヤモンド系薄膜の微細表面形状と電子放出特性の関係について、系統的に検討を行う。ダイヤモンド表面からの電子放出特性は、試料表面の元素組成および結合状態に強く依存する可能性が示唆されている。STMなどの測定結果を系統的に解析し、ダイヤモンド表面の微細表面形状・元素組成・結合状態と、電子放出特性との関係について、検討を行う。

さらに、ダイヤモンド系電子放出素子の効率向上のための指針を提供するため、電子放出特性解析手法の高度化を図り、トンネル電子分光測定データの定量的な解析を行い、最適なプロセス条件の指針を与える。

### ③-6 フェーズIIIへの取り組み

本研究で明らかにした電界放出素子の解析結果を、デバイス試作にフィードバックし、デバイス構造設計・プロセス設計の高度化に資する。