

# 弗化物系超ヘテロ・ナノ結晶の創製と 量子効果光・電子デバイスへの応用

## Fluoride-based Superheterostructures for Advanced Quantum devices

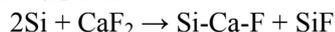
### 1. はじめに

CdF<sub>2</sub>/CaF<sub>2</sub> 超格子は 2.9eV と非常に大きな伝導帯バンド不連続をもち、Si に対する格子定数のミスマッチが CdF<sub>2</sub> で-0.8%、CaF<sub>2</sub> で 0.6%と小さく結晶構造が蛍石型で Si のダイヤモンド型と似ており Si 基板上にエピタキシャル成長可能なため、Si 基板上量子効果光・電子デバイス実現の可能性がある、既存のシリコン集積回路との融合が期待される。

今回、基板表面の原子ステップに起因する欠陥抑制のため 100nm 程度の微小孔内部に結晶成長するナノエリア・ローカルエピタキシー法を用いて Si(111)および Si(100)基板上に RTD を作製し、その微分負性抵抗特性を評価した。

### 2. Si(111)基板上への CaF<sub>2</sub> 成長

結晶成長装置は、10<sup>-9</sup>Torr の超高真空のチャンパーであり、MBE により CaF<sub>2</sub>, CdF<sub>2</sub> を成長することができる。CaF<sub>2</sub> の gun にはイオン化機構が設けられており、るつぼから蒸発した CaF<sub>2</sub> が電子ビーム衝撃により数%イオン化し、物質流としてのイオンビームを基板側に輸送させることができる。このイオン化の効果についてであるが、Si 基板上に CaF<sub>2</sub> を成長させるときに起こる



という CaF<sub>2</sub> と Si の反応により、フッ素が抜けて Si と CaF<sub>2</sub> が結合するのをイオン化によって促進する効果があり、Si 基板上の CaF<sub>2</sub> 薄膜の被覆率が向上する<sup>[1]</sup>。

Si 基板表面には off 角に起因する原子ステップが存在する。一般に低 off 角基板はステップの数が少ないために凹凸の少ない平坦な膜を成長する上で有利だがテラスが広いので覆いきれない部分が出てしまう。また、高 off 角基板の場合結晶核はステップエッジに形成されるため、ステップの数が多ければそれだけ核を作りやすくなり被覆率の高い膜を成長するのに有利だが、CaF<sub>2</sub> は type-B 成長では Fig3 に示すようにステップで必ず欠陥が出てしまう結晶構造のため結晶性は劣る。

### 3. ナノエリアローカルエピタキシー

低 off 角の基板を用い、そのテラス幅より小さく、確実に被覆できる 100nm ~ 400nm の領域に限定して結晶成長することができれば結晶性が高く平坦な結晶を得られるはずである。そこで Si 基板を SiO<sub>2</sub> で覆い微小孔をあけて、

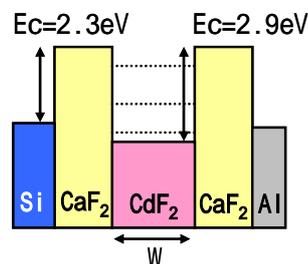


Fig.1 Band diagram of CdF<sub>2</sub>/CaF<sub>2</sub> RTD

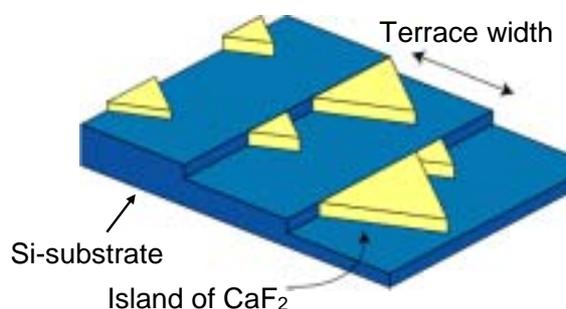


Fig.2 Two dimensional growth of CaF<sub>2</sub> on Si(111)

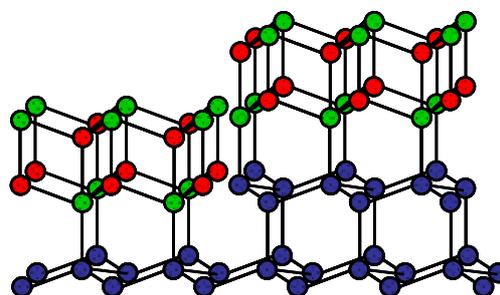


Fig.3 Atomic arrangements of type-B at CaF<sub>2</sub>/Si(111) interface.

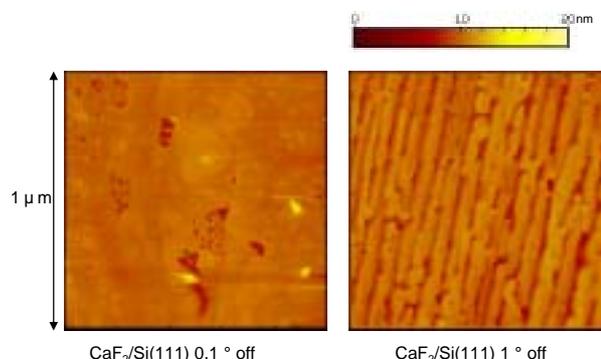


Fig.4 AFM image of CaF<sub>2</sub> 3ML / Si(111)

その中のみ RTD 構造を形成するナノエリアローカルエピタキシー法を用いて結晶成長を行った。

#### 4. Si(100)基板への $\text{CaF}_2$ 成長<sup>[2]</sup>

これまでに  $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$  超格子は結晶成長上の理由から Si(111)基板上に形成されてきたが、Si LSI との融合を考え Si(100)基板上にも結晶成長を試みた。Si(100)清浄表面には  $2 \times 1$  の表面再配列が存在しマイグレーションに異方性が生じて平坦な結晶成長を妨げている。そこで表面を HF を用いて水素終端化することで異方性マイグレーションの抑制を試みた。

#### 5. RTD の作成と測定結果

まず、 $n^+$ -Si(111)基板を熱酸化し電子ビーム露光、および HF によるエッチングを用いて、成長領域を  $\text{SiO}_2$  層により区切られた 100nm 程度の微小孔を形成する。次に、イオン化 MBE 法を用いて  $\text{CaF}_2/\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$  からなる RTD を微小孔内部にエピタキシャル成長する。このナノエリアローカルエピタキシー法を用いて作成した微小孔 RTD アレー上にメタルマスクを用いて Au/Al 電極(100 $\mu\text{m}$ )を形成する。電極下には数万個の微小孔 RTD が並び、複数個の平均化された特性が観測される(Fig.5 参照)。2つのバリア層は 4ML に固定し、 $\text{CdF}_2$  量子井戸層厚を 6,9,12ML と変化させた素子を作成しピーク電圧の変化の実測値を Fig.6 のエラーバーに示す。測定結果は Esaki-Tsu モデルによる共鳴トンネル特性の理論計算により、1ML の層厚誤差を考慮することにより説明できる範囲に分布していることがわかった。Si(100)基板においては弗酸による水素終端化とナノエリアローカルエピタキシー法を用い  $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$  ヘテロ構造形成を試み、Si(100)基板上で初めて  $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$  二重障壁共鳴トンネルダイオード (DBRTD) の室温微分負性抵抗を観測した。また、理論計算の値と比較したところリーク電流を考慮すれば良く一致した。

#### 6. まとめ

今回、微小領域への成長を行うことで、 $\text{CaF}_2$  バリア層の結晶欠陥を抑制し、素子の電気的特性の均質化、長寿命化を図ることができた。

また、Si(100)基板への  $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$  ヘテロ構造形成を試み、Si(100)基板上で初めて  $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$  二重障壁共鳴トンネルダイオード (DBRTD) の室温微分負性抵抗を観測した。

#### 参考文献

[1]M.Watanabe et al, Nat. Conv. Rec. ,JapanSoc. Appl.Phys., 40-V-16, Akita, September

[2]松田克己他 2002 年春季応用物理学会 27p-YH-3

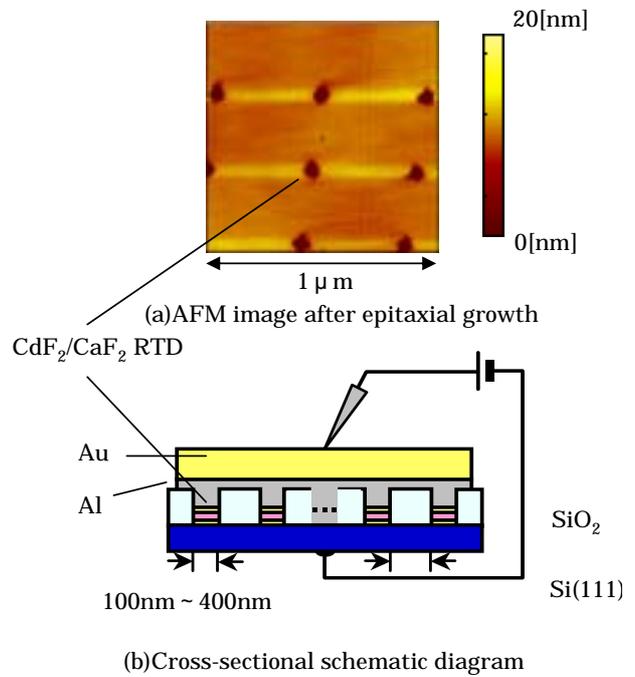


Fig.5 Device structure of  $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$  RTD

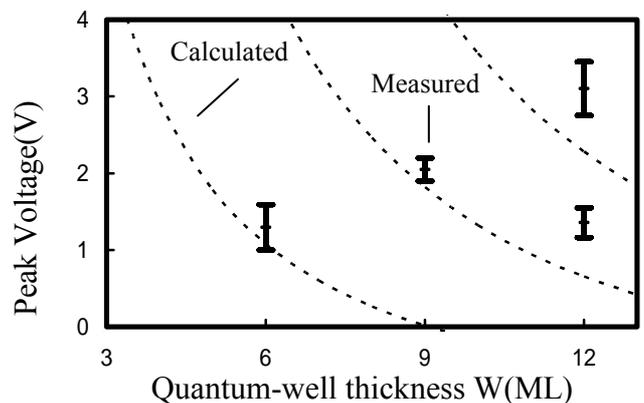


Fig.6 Quantum-well thickness dependence of peak voltage

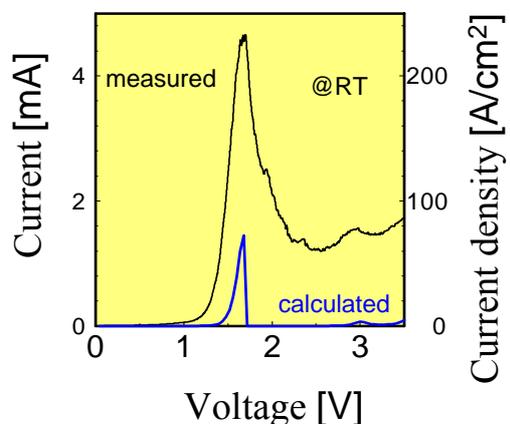


Fig. 7 I-V characteristics of  $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$  RTD on Si(100)