

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630368

研究課題名(和文) 溶融半導体中パルス放電の生成と結晶成長への応用

研究課題名(英文) Formation of Pulsed Discharges in Molten Semiconductors and Their Application to Crystal Growth

研究代表者

堤井 君元 (TEII, Kungen)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10335995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：電気エネルギーの効率的利用と高性能電子機器の開発には、高品質半導体を用いたパワー半導体デバイスの開発が必要である。本研究は、溶融半導体物質中において、パルス電力を印加することによって放電を生成し、その電気特性の評価を行った。またパルス放電を利用して半導体結晶の成長を行った。その結果、高密度パルス放電を効率的に生成するプロセス条件を見出し、高密度パルス放電を利用することで、半導体結晶成長に成功した。

研究成果の概要(英文)：For efficient consumption of electric power and development of high performance electronic devices, power semiconductor devices using high-quality semiconductors are increasingly desired. In this study, discharges were generated in molten semiconductor materials by applying pulse power and their electrical properties were characterized. Also semiconductor crystals were grown by using the pulsed discharges. As a result, the process conditions for efficient generation of high-density pulsed discharges were found and semiconductor crystals were successfully grown by using the high-density pulsed discharges.

研究分野：無機材料・物性

キーワード：パルスパワー 半導体 結晶成長

1. 研究開始当初の背景

(1) 携帯電話、家電製品、乗り物などの電気・電子機器の電力変換・供給・制御等には、パワー半導体デバイスが用いられている。パワー半導体デバイスは、交流を直流に変換したり、電圧を低減（降圧）したり、モータを駆動したり、バッテリーを充電したり、大規模集積回路（LSI）を動作させるなどの働きを行うものである。例えば、電圧をある一定方向に印加したときだけに電流を流し、交流を直流にする「整流」作用を有するものを整流ダイオードという。ダイオードにはさまざまな種類があり、多数キャリアが正孔の p 型半導体と多数キャリアが電子の n 型半導体を接合させた pn 接合ダイオード、半導体と金属を接合させたショットキーバリアダイオード、量子トンネル効果（エネルギー障壁のために通常は電子が超えることのできない領域を、電子が一定の確率で通過する現象）による降伏現象を利用して比較的低い逆方向電圧で電流が流れ出すツェナーダイオード、p 型層と n 型層の間に真性半導体（i 型）層を挟むことにより少数キャリアの蓄積効果を高めて逆回復時間を短くした 3 層構造の pin 接合ダイオードなどがある。

(2) 電気製品の性能向上やハイブリッド車・電気自動車などの環境対応車の開発ニーズの高まりにつれて、パワー半導体デバイスに必要とされる動作条件はますます過酷になっている。いままでのパワー半導体デバイスには、シリコン半導体が使われてきた。しかしシリコン半導体デバイスの電力損失は大きいうえ、高出力・高温動作環境に対応することが難しいため、シリコンよりも優れた電気物性を有する半導体を用いた高性能デバイスの開発が求められている。

(3) シリコンのエネルギーバンドギャップ（価電子帯と伝導帯の間の禁制帯のエネルギー幅）は、約 1.1 eV で比較的小さい。それに対しバンドギャップが大きい半導体を、ワイドギャップ半導体という。バンドギャップが大きい半導体を用いたパワーデバイスは、原理的にシリコン半導体デバイスよりも電力損失が小さく、高出力・高温動作環境にも対応することができると考えられている。それゆえバンドギャップが大きい半導体を用いたデバイスの研究開発が、国内外の大学および研究機関において推進されている。

(4) 高性能パワー半導体デバイスの作製には、高品質な半導体結晶の製造が必要である。半導体結晶の製造には主として気相成長が用いられている。気相成長とは、気相（ガス）雰囲気下において、高エネルギー源を用いて原料ガスを分解・励起し、成長させる半導体材料と結晶構造等が同等あるいは類似する基板材料に対して、半導体結晶を成長させる方法である。しかし半導体と基板の材料の性

質の違いによって、得られる半導体結晶内に格子欠陥（原子配列の乱れ）等が生じるおそれがある。半導体結晶内の格子欠陥は、結果的にデバイスの動作性能を低下させる原因となりうる。そのため半導体結晶内の格子欠陥をなるべく少なくできる結晶成長法の開発が望まれている。

2. 研究の目的

(1) 熔融半導体中においてパルス電力を印加して放電を生成し、その電気特性を調べ、高密度パルス放電を生じるプロセス条件を得るための指針を確立する。

(2) 熔融半導体中において高密度パルス放電を発生することにより、半導体結晶を基板上に成長させ、高品質結晶の形成条件を得るための指針を確立する。図 1 に本研究のスキームを示す。

3. 研究の方法

(1) 図 2 に本研究で用いた実験装置の概略を示す。実験装置は加熱炉、反応容器、水冷設備、ヒーター、パルス電源、ガス制御装置、真空排気設備、電極、温度計、電圧計等で構成されている。

(2) 原料には半導体材料のインゴットを用い、機械的に粉碎後、化学洗浄を行う。加熱炉の内部に設置された反応容器内に、粉碎した半導体インゴットを封じる。ヒーターを用いて、加熱炉内の反応容器全体を半導体材料の融点以上に加熱することにより、半導体インゴットを溶解する。反応容器周囲に設置された水冷系を適宜制御・調節することによって、反応容器内の温度を制御する。反応容器内の温度を、赤外放射温度計を用いて測定する。

(3) 加熱炉内の反応容器内に、絶縁管を通して電極を挿入し、電極間距離を調整する。高温に加熱して半導体インゴットを熔融後、パルス電源を用いて、高電圧パルスを印加し、熔融半導体中で放電を生成する。電圧計によって電圧波形を検出し、放電の振る舞いを調べる。

(4) 反応容器周辺に設置した水冷系を用いて、反応容器内の温度を制御しながら、熔融半導体中でパルス放電を生成する。反応容器内に堆積物を成長させる。成長後、反応容器を自然冷却、そこから取り出した堆積物を、化学処理を用いて分離する。特に高密度放電が得られるパルス印加条件を用いて成長を行う。

(5) 上記手法によって反応容器内で得られた堆積物を種結晶として、気相成長法を用いて結晶膜を成長させる。

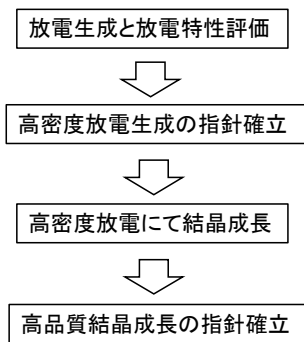


図1 研究のスキーム

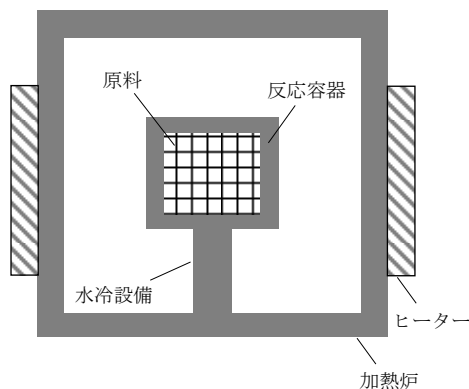


図2 実験装置の概略

4. 研究成果

(1) 半導体物質を溶解可能な加熱炉内の反応容器内へ、高電圧パルスを印加するための電極を挿入することによって、熔融半導体中においてパルス放電を生成するための実験装置を試作することが出来た。

(2) 上記反応容器内で半導体物質を熔融しながら、電極へパルスを印加することによってパルス放電を生成した。生成した放電の電気特性を体系的に調べ、高品質半導体結晶の高速成長に必要な高電流を生ずる高密度パルス放電を生成するための各種実験因子（電極位置、電極形状、パルス印加条件等）を特定した。

(3) 高温に加熱することで熔融した半導体中において、パルス印加によってパルス放電を発生することに成功した。パルス印加条件が一定の場合、放電開始電圧は主として電極間の距離と電極の形状に依存し、融体の温度にはあまり依存しないことが分かった。電極間の距離と電極の形状が一定の場合、放電開始電圧はパルス電圧、波形等に依存することが分かった。放電電流は放電開始電圧が減少するにつれて増加する傾向を示したことから、高品質半導体結晶の成長に必要な高密度放電の生成条件を明らかにすることが出来た。

(4) 加熱炉内の反応容器内へ電極を挿入し、半導体インゴットを溶解しながらパルス放電を発生した。その際電極形状、電極配置、パルス波形等を制御することによって、安定な高密度放電を生ずることが出来た。そして放電生成下で、反応容器内温度を制御することによって、反応容器内にて結晶性物質を堆積することが出来た。

(5) 放電生成下で反応容器内にて得られた結晶性堆積物を、化学処理を用いて分離し、それらの形態および構造を各種分析・評価方法によって調べた。放電生成条件と堆積物の形態および構造の相関を明らかにすることが出来た。

(6) 放電開始電圧が減少するにつれて放電電流は増加する傾向を示した。一方放電電流が増加するにつれ、結晶成長速度はおおむね増加する傾向が得られた。放電電流が同等の場合、成長速度はパルス波形にも強く依存することが分かった。半導体原料の純度を変えることで、反応促進による成長速度の増加を図った結果、成長速度は増加する傾向を示すことが分かった。

(7) 気相成長法を用いて、得られた種結晶を成長させた結果、高品質な結晶膜が得られることが分かった。以上より、本研究手法の有用性を実証することが出来た。

(8) 本研究を通して得られた知見を、気相放電と固体物質表面間の化学的相互作用の制御および解明にも適用できることが分かった。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

[1] R.-C. Hsiao, T.-L. Sung, C.-M. Liu, S. Teii, S. Ono, K. Teii, K. Ebihara
Numerical Study on Heat Flow during Catalytic Dissociation of Ozone in a Dielectric Barrier Discharge Ozonizer
IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. 43, pp. 665-669 (2015).
DOI:10.1109/TPS.2014.2381258 (査読有)

[2] J. Yang, 金子祐太, 堤井君元
プラズマ曝露処理による親水性硬質コーティングの作製
電気学会プラズマ/放電/パルスパワー合同研究会資料,
PST-15-073/ED-15-093/PPT-15-106, 49-52 頁
(2015). (査読無)

〔学会発表〕（計 2 件）

[1] J. Yang, 金子祐太, 堤井君元

プラズマ曝露処理による親水性硬質コーティングの作製
電気学会プラズマ/放電/パルスパワー合同研究会, 2015年10月23日, JR九州ホテル宮崎 (宮崎県宮崎市), 日本.

[2] R. C. Hsiao, T. L. Sung, C. M. Liu, S. Teii, H.-P. Jhou, S. Ono, K. Ebihara, K. Teii
Double Probe Method to Form a Simple Ozone Detector Using the Effect of Catalytic Ozone Dissociation on Metal Surface
9th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology/28th Symposium on Plasma Science for Materials, 2015年12月13日, 長崎大学 (長崎県長崎市), 日本.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K001514/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堤井 君元 (TEII, Kungen)

九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授

研究者番号：10335995

(2) 連携研究者

加藤 喜峰 (KATO, Yoshimine)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60380573