

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289016

研究課題名(和文) プラズマ・ナノ科学による金属級シリコン原料から高品質ナノワイヤシリコンの直接創成

研究課題名(英文) Direct formation of the high-quality nanowire Si from metallurgical Si source based on the plasma and nanotechnology science

研究代表者

大参 宏昌 (Ohmi, Hiromasa)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00335382

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：太陽電池の性能向上と製造コストの削減を目的として、本研究では、危険な毒性原料ガスを用いる事無く、シリコンなどの半導体薄膜の形成を可能とする大気圧プラズマ化学輸送法を用いて、ナノワイヤシリコン(NW-Si)薄膜を形成するための必要条件を見出した。とりわけ、NW-Si薄膜をプラズマ中で作製するためには、触媒の種類、原子状水素のエッチング作用の抑制、さらにはSi系前駆体フラックスの最適化が必要であることを明らかにした。また、リモート型プラズマ化学輸送法を用いて金属級シリコンを原料に用いたNW-Siの形成に成功した。

研究成果の概要(英文)：Toward the improvement of conversion efficiency and the reduction of production cost of solar cell, we have achieved the formation of nanowire Si (NW-Si) film by atmospheric pressure plasma enhanced chemical transport technique which can chemically prepare the Si film without toxic and dangerous source gases, such as SiH₄. In particular, it was founded that the type of catalyst metal, the suppression of atomic hydrogen etching, and the optimization of Si precursor flux are required to prepare the NW-Si film in the high density hydrogen plasma. Furthermore, the formation of NW-Si film from metallurgical Si source was achieved by remote type plasma enhanced chemical transport technique.

研究分野：材料科学

キーワード：ナノワイヤ シリコン 太陽電池 プラズマ 水素

1. 研究開始当初の背景

現在、世界に普及している太陽電池の80%以上はバルク結晶 Si 型である。このバルク Si に比べ Si 使用量を 1/100 以下に低減できる薄膜 Si 型に多くの期待が寄せられてきたが、変換効率の低さ、長期安定性、さらには製造コストを大きく削減できない等の問題に直面している。一方、太陽光発電ロードマップ (PV2030+) の実現に向けて、Si 太陽電池の大幅な変換効率の向上と Si 使用量の低減を目指した研究が進められており、原料使用量の大幅低減とバルク結晶 Si 太陽電池を上回る効率が期待できるナノワイヤシリコン (NW-Si) 型 Si 太陽電池が注目され、多くの研究がなされている。ここで、ほぼ全ての Si 系太陽電池 (バルク、薄膜含む) は、①珪砂の還元による金属級 Si (MG-Si) 生成→②高压高温塩酸による Si 気化→③蒸留による SiHCl_3 の精製→④熱 CVD による高純度 Si の析出/④'不均化反応によるシラン (SiH_4) の生成→⑤鋳造による Si ブロック製造とウエハ化/⑤'プラズマ CVD 法などによる Si 薄膜の形成、を経て製造されている。この高純度 Si 製造工程 (①~④、④') では、大量の電力が消費され、極めて環境負荷の大きな塩素などの薬品が用いられているにも拘わらず、そのウエハ化/薄膜化の工程 (⑤、⑤') では、貴重な高純度 Si の半分以上が、切り粉および CVD ダスト、廃ガスとして廃棄されている。このことは、これまでの NW-Si の形成手法 (熱 CVD 等) においても例外では無い。薄膜型 Si に代表される様に、デバイスに使用する Si 量の削減を指向した研究例は多数存在するが、薄膜形成プロセスでのロスまで勘案して Si 消費量を削減しようという研究は、その例を見ない。爆発的な普及が進む Si 系太陽電池において、より格段の性能向上が期待される NW-Si の製造プロセスの低コスト化は不可避であるといえる。

2. 研究の目的

上記の背景から、本研究では、これまで研究代表者が開発してきた高密度・高压水素プラズマによる薄膜形成法である大気圧プラズマ化学輸送法 (Atmospheric-pressure plasma enhanced chemical transport) を応用し、エネルギー・資源的な無駄の多い従来の精製法 (例: ジーメンス法) や成膜プロセス (例: CVD 法) を経ずに、廉価な MG-Si 原料から NW-Si を作製する事を目的とする。とりわけ、本研究で用いる高密度水素プラズマ中での NW-Si の成長の試みは世界でも例がなく、まず本手法における各種因子が NW-Si の成長にどのような影響を及ぼすかを検証し、本手法を用いて NW-Si を作製するための学理を確立することにある。また、APECT 法は、先にも述べたとおり危険で高価な SiH_4 ガスを用いる事なく、ソフトな化学反応により Si 等の機能材料薄膜を高効率形成できるだけでなく、ラジカル反応の元素選択性により、MG-Si 中に含まれる金属不純物の精製作用も併せ

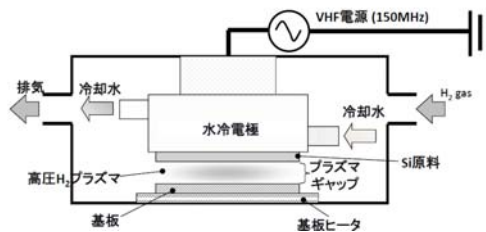


図1. 近接型 APECT 法で用いた平行平板型 VHF 装置

持っている。このため、MG-Si から作製された NW-Si は、大きな表面積を持つことから、NW-Si 成長後の処理により、B、P などのドーパント不純物濃度を容易に低下させるのではないかと考えられるため、NW-Si からの B ならびに P 除去に関し、知見を得ることも目的とした。

3. 研究の方法

NW-Si 形成手法は、次の 3 通りで行った。一つは、平行平板型 VHF プラズマを用いた近接型 APECT 法、一つはプラズマ生成部と成膜基板を分離設置したリモート型 APECT 法、さらには溶液中での金属誘起酸化法を用いた手法で行った。近接型 APECT 法では、図 1 に示す装置を用いた。本研究では、高密度水素原子を含むプラズマにより実現される APECT 法での NW-Si 成長の可能性を検証するため、最もポピュラーな Au、さらには触媒金属が NW-Si 成長に及ぼす影響を調べるため Al を触媒として用いた。ここで、本研究で選択した Al は、Au と異なり、Si のバンドギャップ中に深い準位を形成しないことから少数キャリア寿命を劣化させにくく、Si 中で p 型半導体のドーパントとして作用するため、デバイス化に向けての障壁が比較的小さな金属であることが挙げられる。また Al 触媒を用いる際の着眼点として、基板温度 400°C 以下では、NW-Si の成長様式が気相-固相-固相の VSS 成長 (Vapor-Solid-Solid) 成長となることが期待され、Au 触媒を用いた場合に見られる VLS (Vapor-Liquid-Solid) 成長とは、その成長様式に大きな相違があることである。NW-Si 成長における触媒金属膜厚の最適化には、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM) による触媒金属の凝集形態の観察と SiH_4 を用いた熱 CVD により実際に NW-Si を成長させることで行った。

上記の手法で最適化された膜厚を有する触媒金属を担持した基板を用いて、電力密度、原料-基板間ギャップ、水素濃度、水素圧力、原料温度、さらには基板温度を変化させ、近接型 APECT 法による NW-Si 膜の形成条件の確立を目指した。

一方、研究の進捗に伴い、プラズマ中に存在する高密度の原子状水素による NW-Si 成長への影響を排除する必要があり、リモート型 APECT 法の適用を試みた。リモート型 APECT 法は、図 2 に示す様に水素プラズマ中での Si エッチングにより SiH_4 を生成し、この SiH_4 をプラズマから離れたヒーター上

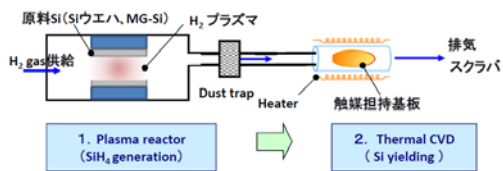


図 2. リモート型 APECT 法の概念図

に設置された触媒担持基板上へ輸送・熱分解させることで NW-Si 成長を行う手法である。本手法では、触媒担持基板を、プラズマ源からの距離として 30 mm ならびに 3000 mm と 2 通り設定し、実験を行った。リモート型 APECT 法の原料には、n 型 Si (0.001 Ωcm) の他、純度 98% 程度の金属級 Si 板を用いた。

さらに、NW-Si における B および P 除去特性を把握することを目的として、APECT 法における化学輸送時の B および P の除去特性の影響を受けることなく NW-Si を作製するため、溶液を用いた NW-Si の作製を試みた。本作製プロセスでは、溶液中で生じる Si の金属誘起酸化現象と HF によるエッチング反応を用いている。

以上の手法で作製した試料について、表面・断面形状を走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy : SEM) で確認した。また形成された NW-Si の結晶構造を透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscopy : TEM) により評価した。また溶液作製した NW-Si からの昇温脱離ガスの分析には、昇温ガス脱離分析 (TPD) を行った。

4. 研究成果

まず Au 膜厚の最適化のため、基板上に Au を膜厚 3 nm, 5 nm, 10 nm, および 20 nm 蒸着し、アニール後の表面形態を AFM、ならびに SiH4 を用いた CVD により NW-Si が成長するための最適膜厚を探索したところ、10nm の Au 膜厚の時、最も凝集に偏りがなく、NW-Si が高密度に得られることが明らかとなった。以後実験では Au 膜厚 10nm の Si 基板を用いた。

この基板を用いて基板温度 400 °C に固定し近接型 APECT 法によって形成した Si 膜の断面 SEM 像を図 3(a)~3(c) に示す。なお、図 3(a)~3(c) に示す断面 SEM 像は、それぞれ図 3(d) の概念図に示すプラズマとの位置関係で

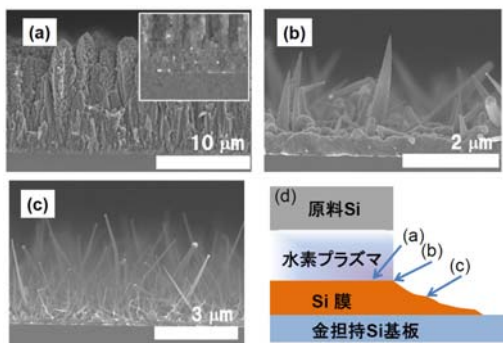


図 3. 金担持 Si 基板上に近接型 APECT 法で形成した Si 膜の断面 SEM 像(a),(b),(c)は、それぞれ概念図(d)の位置(a), (b), (c)に該当

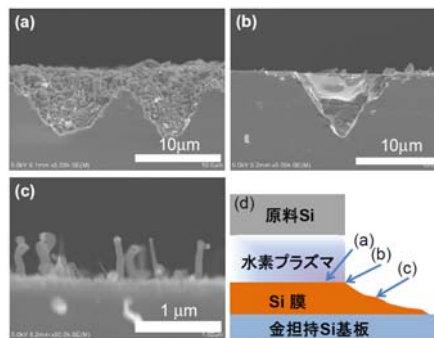


図 4. 低 Si フラックス条件で近接型 APECT 法により形成した Si 膜の断面 SEM 像(a),(b),(c)は、それぞれ概念図(d)の位置(a), (b), (c)に該当

得られたものを示している。図 3(a)では NW-Si は確認できず柱状の多結晶 Si 膜が形成されており、Au 触媒粒子が Si 膜に被覆されていることが確認された。一方、図 3(b), 3(c)よりプラズマ境界部、ならびに外部に形成された Si 膜は、プラズマの境界部でコーン形状、プラズマから離れるにともない、直径 50nm 程度の NW-Si が形成されている事が分かった。ここで、プラズマ内で NW-Si が形成されなかったのは、成膜前駆体の供給過剰により Au 粒子の移動が追従出来なかったことが考えられる。この結果、プラズマ中で NW-Si を形成するには、適正な Si 前駆体の供給量を維持すること、もしくは基板温度を上昇させる等の対策が必要であることが分かった。

そこで、上記で得られた成果から、より低い Si フラックスとするため、原料 Si の温度を高めに設定し、NW-Si の形成を試みた。得られた Si 膜の断面 SEM 像を図 4 に示す。図より、Si フラックスを低下させた場合、プラズマ内部および境界部においては NW-Si の成長は見られず、Si 基板がエッチングされる事が明らかとなった。このエッチングは、Si-Au が共晶反応をすることで低融点化し、この合金融液中に過剰な原子状水素が溶解する事により生じている事が、低融点金属を用いた実験結果から大いに予想される。これに依れば、プラズマ内の水素原子に曝露される雰囲気中で VLS 成長モードにより NW-Si を成長させることは困難であるとの知見を得た。なお、本低フラックス条件においても、プラズマ外では NW-Si の成長が確認され、TEM 像と回折パターンから、直径 20 nm 程度の NW-Si が単結晶成長していることが明らかとなっている。

そこで、NW-Si 成長の触媒となる金属として 400 °C の基板温度で VSS 成長を誘起する Al を選択し、5 nm の Al 膜を 400 °C でアニールする事で Al アイランドが形成された Si 基板を用いて NW-Si の作製を行った。作製した試料の SEM 像および TEM 像と回折パターンを図 5 に示す。図より、Al 触媒を用いる事でプラズマ曝露表面において NW-Si の成長に成功した。図 5(a)より形成した NW-Si は成長方向が特定の方向に揃っており、長さは短く

不揃いで面密度が低いものの、**図 5(b)**より、単結晶の NW-Si を形成できることが明らかとなった。そこで、成膜時間を 30, 60 分と長くし、長尺高密度な NW-Si を狙ったが、NW-Si の形成はなく、一面に連続的な Si 膜が得られるのみであった。このことから、本手法において成膜種を生成する働きを担う原子状水素は、それと同時に基板表面近傍で形成した NW-Si や金属触媒をエッチングするため、長時間の NW-Si 成長を試みた場合、その成長が破綻するのではという推察に至った。これを回避するため原子状水素が侵入しにくい形状を持った基板を用いて成膜を行った。得られた NW-Si の表面 SEM 像を**図 6**に示す。図より高密度かつ長尺な NW-Si の形成が確認でき、本手法では基板側での原子状水素のエッチング反応が、NW-Si 形成の阻害因子であり、高密度な長尺 NW-Si を形成するためには、それを抑制した反応系を構築することが必要であるという知見を得た。

そこで、NW-Si の成長を阻害する水素エッチングの影響を受けないリモート型 APECT 法の適用を試みた。原子状水素は、三体再結

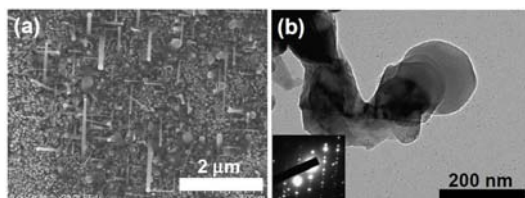


図 5. Al 担持 Si 基板を用いて低 Si フラックス条件の近接型 APECT 法で作製した Si 膜の表面 SEM 像(a)と TEM 像(b) (挿絵は TED パターン)

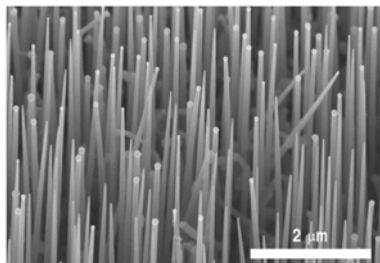


図 6. Al 担持 Si 基板を用いて低 Si フラックス条件の近接型 APECT 法により原子状水素の影響を抑制して作製した Si 膜の表面 SEM 像

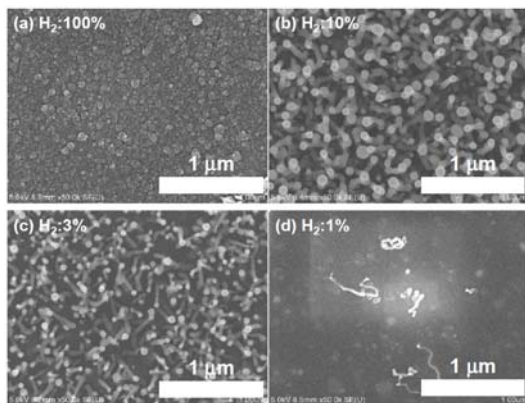


図 7. リモート型 APECT 法で Al 担持基板に形成した Si 膜の表面 SEM 像(a),(b),(c), ならびに(d)は、雰囲気中の H₂ 濃度が異なる。希釈ガスは He。

合反応により水素分子を形成する。この反応速度は、圧力の 2 乗に比例して早くなるため、我々のプラズマ生成圧力領域では、極めて大きな影響をもつ。このため原子状水素は、プラズマ外において極めて速やかに消滅する。一方、SiH_x ラジカルは、原子状水素に比べて比較的長い寿命を持つため、基板-SiH₄ 生成プラズマ間距離を離れた成膜が可能となる。ここでは 30 mm として、プラズマ生成雰囲気中の H₂ 濃度を変化させて成膜前駆体 (SiH_x) の生成量を調整し、NW-Si 成長に及ぼす影響を明らかにした。

図 7 に基板温度 600 °C、H₂ 濃度を 100、10、3、1%としてプラズマを生成し、これにより得られたプラズマ源直下における表面 SEM 像を示す。図より、H₂ 濃度が 100%のとき、NW-Si 成長は見られず、膜構造はポーラスであるものの、面内にほぼ連続した Si 膜の形成が確認でき、NW-Si の成長は見られない。一方、H₂ 濃度を 10%と 3%減少させると、基板上に高密度に NW-Si が形成されている事が分かる。これら形成した NW-Si は、H₂ 濃度 10%のとき平均直径約 40 nm、長さ最大 350 nm となり、H₂ 濃度 3%のとき平均直径約 30 nm、最大長さ 220 nm が得られた。さらに H₂ 濃度を 1%まで低下させると、基板には、非常に低密度な NW-Si の成長が確認されるのみである。この結果は、たとえ原子状水素の影響を無くしたとしても、供給される Si 膜前駆体が多すぎると、NW-Si の形成が出来ないことを示唆する結果である。一般的な SiH₄ を用いた熱 CVD では、NW-Si 成長触媒の表面が SiH₄ 熱分解反応の基点となるため、SiH₄ 分圧を今回のリモート型 APECT 法で生成される SiH₄ 分圧以上に上昇させても NW-Si の成長が確認できる。一方、本リモート型プラズマを用いた場合、H₂ 濃度 100%のプラズマにて推定される最大 SiH₄ 濃度は、0.1%程度 (即ち SiH₄ 分圧で 0.1 Torr 程度) であるにもかかわらず、NW-Si の成長が見られなかった。このことは、本リモート成膜において、主たる前駆体となっているのは SiH₄ ではなく、より付着係数の大きな SiH_x ラジカルであると言える。これら SiH_x ラジカルは、触媒の有無に関係無く、比較的大きな確立で基板表面へ付着する事ができるため、触媒に左右されることなく連続膜が形成されやすい。このことから、プラズマ源と基板間の距離が比較的近接したリモート型 APECT 法を行う場合、SiH_x ラジカル密度が NW-Si の成長にとって重要なパラメータとなることが分かった。そこで、基板温度 400 °C 以下の基板上に NW-Si を作製するための Si フラックスを触媒非担持 Ge 基板を用いて Si の付着量を測定することで同定した。その結果、400 °C の温度にて VSS モードで NW-Si を形成するための Si フラックスは、 3.3×10^{15} atoms/cm² s 以下である必要があることが分かった。ここで、H₂ 濃度 10%で形成した NW-Si の TEM 像と電子線回折パターン (TED パターン) を**図**

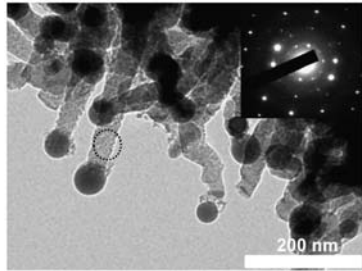


図 8. リモート型 APECT 法で Al 担持基板に形成した Si 膜の TEM 像とその TED パターン (挿絵)

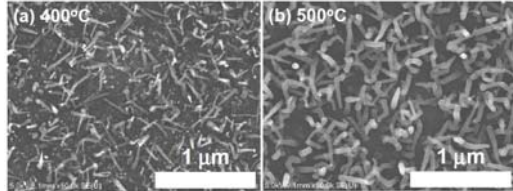


図 9. リモート型 APECT 法で Al 担持基板に形成した NW-Si 膜の表面 SEM 像。基板温度を (a)400°C, (b)500°C として NW-Si を形成。H₂ 濃度は 10%。

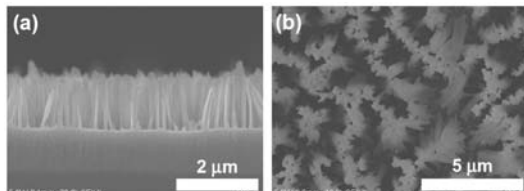


図 10. n⁺-Si 基板上に金属誘起酸化エッチング法により形成した NW-Si の断面 SEM 像 (a) と表面 SEM 像 (b)。

8 に示す。TEM 像中の破線円の領域における TED パターンより、600 °C という低基板温度にもかかわらず、NW-Si は単結晶成長していることが明らかとなった。

そこでさらなる低温 NW-Si 成長を目指し、H₂ 濃度を 10% に固定し、NW-Si 成長に及ぼす基板温度の影響 (500 °C、400 °C、350 °C、ならびに 300 °C) を調査した。得られた NW-Si の SEM 像を図 9 に示す。ここで、350°C ならびに 300°C では NW-Si の成長は見られなかった。図より、図 7 で観察された NW-Si とは異なる形状の NW-Si が確認できる。基板温度 600 °C では、先端に球状の金属触媒が確認できたが、図 9 で示す基板温度 500°C 以下で形成した NW-Si は、いずれも先端が先細りした形状を呈した。この、基板温度による形状の違いは、Al-Si 合金における共晶温度を考慮することが重要であり、この温度以上では VLS が、この温度よりも低温側では VSS による成長モードが出現するためと言える。いずれにせよ、本研究によりリモート型 APECT 法によって 400 °C という低基板温度にて Al 触媒を用いた NW-Si の成長に成功した。このような低温化の一因は、基板—プラズマ源の距離が 30 mm 確保されたリモート型であるものの、プラズマの影響が強く表れたものと考えられることができる。

そこで、このプラズマの効果を検証するため、リモート型 APECT 法で NW-Si が得られた条件と同等の SiH₄ 分圧の原料ガスをボン

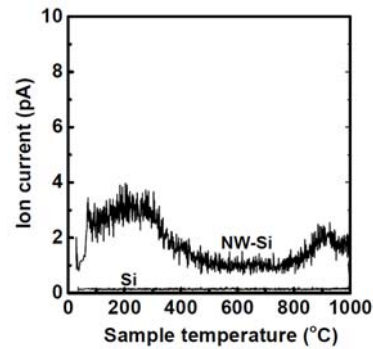


図 11. 溶液処理により作製した NW-Si、ならびに未処理 Si 基板からの P (m/e=31) の脱離スペクトル

ベ SiH₄ から供給し、熱 CVD 法による作製を試みた。その結果、熱 CVD 法では、400 °C において NW-Si は形成されず、600 °C でも短尺・低密度にしか形成されなかった。この結果より、リモート型 APECT 法を用いることで NW-Si の成長温度を低温化できることが明らかとなった。この低温化には、H₂ プラズマによる Si エッチングにより SiH_x ラジカルが生成されている事、プラズマから発生する真空紫外線により、SiH₄ 分子ならびに成長表面が活性化されていることなどが考えられる。

溶液中でのエッチングによる NW-Si の室温近傍形成を、n⁺-Si(001) ウエハを用いて行った。以下に実験手順を述べる。本手法での NW-Si の作製には、AgNO₃、HF、ならびに H₂O₂ 溶液を用いた。処理後の試料の表面、断面 SEM 像を図 10 に示す。図より直径 50 nm–100 nm の NW-Si が長さ 1.4 μm にわたり形成されていることがわかり、さらには溶液処理時に発生した表面張力によって、隣接する NW-Si の先端が凝集している。この様に表面積の非常に大きな試料が得られたため、この試料を TPD チャンバー内で昇温速度 10 °C/min で 1000 °C まで加熱し、脱離してくる P 由来の成分を確認した。図 11 に NW-Si 処理サンプル、ならびに未処理 Si 基板からの P (m/e=31) の脱離スペクトルを示す。これより昇温によって、処理基板からのみ P (31) に起因する分子・原子が脱離している事が分かる。このことは、金属級 Si を原料とした APECT 法により NW-Si を作製することで、金属級 Si 原料中に含有される P を除去し易くなる事を示唆しており、APECT 法による精製 NW-Si 膜の形成に向け、有用な知見が得られた。

最後に、MG-Si 原料からリモート型 APECT 法により作製した NW-Si を図 12 に示す。本実験では、SiH₄ 生成プラズマと基板との距離を 3000 mm 離している。基板として Ge、Si(001)、Si(111)、さらには石英基板を用い、Au を触媒金属として用いた。基板温度は、全て 700 °C で行った。図より、MG-Si を原料として、数十 nm のワイヤ径をもつ NW-Si の形成に成功した。即ち、MG-Si から生成された SiH₄ を用いて直接 NW-Si を形成する事に成功した。

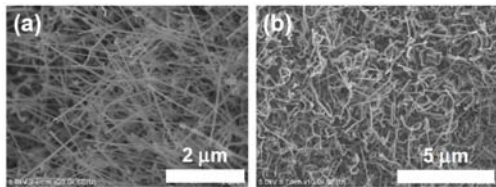


図 12. リモート型 APECT 法で形成した NW-Si
(a)Si(111)基板上、(b)石英基板上

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 1 件)

H. Ohmi, H. Kakiuchi, and K. Yasutake, “Selective deposition of a crystalline Si film by a chemical sputtering process in a high pressure hydrogen plasma”, Journal of Applied Physics 118, 45301 (2015).査読有

[学会発表] (計 13 件)

①H. Takemoto, Y. Ishikawa, H. Kakiuchi, K. Yasutake and H. Ohmi, “Impact of catalytic metal element on silicon nanowire growth by high-pressure hydrogen plasma chemical transport”, TACT 2015 International Thin Films Conference (国際学会) 2015/Nov/15 ~ 2015/Nov/18, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan

②H. Ohmi, A. Goto, Y. Onoshita, H. Kakiuchi, K. Yasutake, “Nucleation for Si film selective growth using GeO₂ solution and high-pressure plasma”, 20th international colloquium of plasma processes (国際学会) 2015/Jun/1~2015/Jun/05 Saint-Etienne, France

③竹本啓輝, 垣内弘章, 安武潔, 大参宏昌, 高圧水素プラズマ化学輸送法によるシリコンナノワイヤ形成における金属触媒の影響, 第76回 応用物理学会秋季学術講演会, 2015/Sep/13 ~ 2015/Sep/16, 名古屋国際会議場

④竹本啓輝, 垣内弘章, 安武潔, 大参宏昌, 準大気圧雰囲気での水素プラズマ化学輸送法を用いたシリコンナノワイヤの形成, 精密工学会 2015年度関西地方定期学術講演会, 2015年06月23日~2015年06月23日, 京都工芸繊維大学

⑤H. Ohmi, H. Kakiuchi, and K. Yasutake, Boron Elimination Filter from SiH₄ and B₂H₆ Gas Mixture for Purification of Metallurgical Si, 225th ECS Meeting, 2014年05月11日~2014年05月15日, Orlando, FL, USA

⑥大参宏昌, 垣内弘章, 安武潔, 低純度Si精製に向けたジボラン (B₂H₆) 選択除去手法の開発とその特性評価, 第75回 応用物理学会秋季学術講演会, 2014年09月17日~2014年09月20日, 北海道大学

⑦大参宏昌, 垣内弘章, 安武潔, 水素プラズマによる金属の蒸発促進と高速成膜への応用, 第75回 応用物理学会秋季学術講演会, 2014年09月17日~2014年09月20日, 北海道大学

⑧大参宏昌, 大気圧近傍の非平衡水素プラズマを用いた材料変換プロセスの開発, 第68回

マテアルズ・テーラリング研究会 (招待講演), 2014年07月24日~2014年07月26日, 軽井沢研修所

⑨H. Ohmi, H. Kakiuchi, and K. Yasutake, SiH₄ conversion rate in Si etching reaction induced by high-pressure hydrogen plasma, 13th European Vacuum Conference, 2014年09月08日~2014年09月12日, Aveiro, Portugal

⑩大参宏昌, 垣内弘章, 安武潔, 高圧水素プラズマによる液体金属の蒸発促進と金属膜の超高速形成, 2014年度 精密工学会春季大会学術講演会, 2014年03月18日~2014年03月20日 東京

⑪H. Ohmi, H. Kakiuchi, K. Yasutake, selective formation of silicon film by chemical transport technique using a high-pressure narrow-gap hydrogen plasma, 19th International Vacuum Congress IVC-19, 2013年09月09日~2013年09月13日, Paris, France

⑫石川祥博, 垣内弘章, 安武潔, 大参宏昌, 水素プラズマ化学輸送法によるシリコンナノワイヤ成長, 2014年度 精密工学会春季大会学術講演会, 2014年03月18日~2014年03月20日, 東京

⑬H. Ohmi, H. Kakiuchi, K. Yasutake, Printable formation of Ge film using a GeO₂ solution by high-pressure hydrogen plasma reduction treatment, TACT 2013 International Thin Films Conference, 2013年10月05日~2013年10月09日, Taipei, Taiwan

[図書] (計 1 件)

大参宏昌, 大阪大学出版会, 超精密加工と表面科学 -原子レベルの生産技術- 「大気圧プラズマ化学輸送法」2014

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 成膜方法および成膜装置

発明者: 大参宏昌

権利者: 大阪大学

種類: 特許

番号: 特願2013-215103

出願年月日: 2013年10月15日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www-ms.prec.eng.osaka-u.ac.jp/jpn/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

大参 宏昌 (OHMI, Hiromasa)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 00335382

(2)研究分担者

安武 潔 (YASUTAKE, Kiyoshi)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80166503