JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	パワー半導体への適用を目指した液体プロセスによるSiC膜の研究
Author(s)	井上，聡
Citation	科学研究費助成事業研究成果報告書：1-4
Issue Date	2016-06-01
Type	Research Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/13698
Rights	
Description	挑戦的萌芽研究，研究期間：2014～2015，課題番号：26630127，研究者番号：60553237，研究分野：電子デバイス

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２８ 年　 ６ 月　 １ 日現在

機関番号：１３３０２
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2014～2015
課題番号：２６６３０１２７

研究課題名（和文）パワー半導体への適用を目指した液体プロセスによるSiC膜の研究

研究課題名（英文）Solution-processed SiC Films and Its Application to Power Devices

研究代表者
井上　聡（Inoue, Satoshi）

北陸先端科学技術大学院大学・グリーンデバイス研究センター・特任教授

研究者番号：６０５５３２３７

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）：液体シリコン材料と液体カーボン材料を原料としてSiC-inkを合成し、それを用いて成膜したSiC膜の物性評価とデバイスへの応用を検討した。液相蒸着法によりp型Si膜を作製し、IPES法によりCBMを、PYS法によりVBMを測定したところ、SiC-inkにおけるカーボン材料比率の増大に伴い、CBMとVBMそれぞれがBand Gapの増大する方向にシフトすることが確認された。このSiC膜を用いることで、SiCパワーデバイスにおけるPchコンタクト部の抵抗を低減することが可能になる。

研究成果の概要（英文）：We developed the SiC-ink using liquid silicon material and liquid carbon material, and investigated a possibility of its application to power devices. The SiC films were deposited by using the SiC-ink and LVD (liquid vapor deposition) method. The CBM (conduction band minima) and VBM (valence band maxima) were evaluated by the IPES (inverse photoemission spectroscopy) and PYS (photon yield spectroscopy), respectively. As a result, it was confirmed that CBM and VBM were controlled by the carbon ratio in the SiC-ink. Both CBM and VBM shifted with the increase of the carbon ratio so that the band-gap increased. These data indicate that the contact resistance between Ni electrode and P+-SiC region can be reduced by using the SiC film fabricated by SiC-ink. The CTLM-TEG was fabricated to measure the contact resistance between Ni electrode and P+-SiC film using SiC-ink, and the contact resistance of 1.01×10-7Ωcm2 was realized.

研究分野：電子デバイス

キーワード：Silicon carbide　Solution process　Power device　Liquid material　Contact resistance

１．研究開始当初の背景

省エネルギー化の観点から、情報機器や電気自動車、産業用ロボット、太陽光・風力発電等の多くの分野において、パワーデバイスの重要性が拡大している。特にワイドギャップ半導体である SiC には大きな期待が集まっており、一部量産化も始まっている。しかし SiC パワーデバイスには、以下に述べる様な課題があり、さらなる発展のためにはその解決が急務となっている。

我々は、液体シリコン材料（シクロペンタシラン(CPS)やシクロヘキサシラン(CHS)）と、液体カーボン材料（シクロヘキセン(CH)等）を原料として液体 SiC 材料（SiC-ink）を合成し、これを用いて SiC 薄膜を作製することに成功した。この技術により、SiC パワーデバイスの課題を克服しようと考え、本研究を行った。

２．研究の目的

本研究では、SiC-ink による SiC 膜のパワーデバイスへの適用可能性について検討した。具体的な検討項目を以下に示す。

（１）SiC-ink による SiC 膜の基礎物性評価
（２）p型 SiC 膜によるコンタクト抵抗の低減（SiC-MOSFET への適用）
（３）SiC-ink を用いた SiC 膜のエピタキシャル成長の可能性検討

３．研究の方法

（１）SiC-ink の作製方法

シリコンソースである CPS に、カーボンソースである CH を加え、80℃で 2 時間撹拌して SiC-ink を合成した。この SiC-ink に 3wt%のデカボランを添加することで、p 型 SiC-ink を完成させた（図 1、図 2 参照）。

カーボンソースとシリコンソースの比率を変えた p 型 SiC-ink を作製（本報告では、カーボンとシリコンの原子数の和に対するカーボン原子数の比で議論を行っている）し、

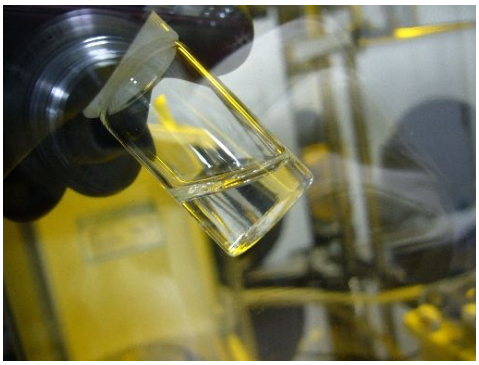

図 1.　SiC-ink

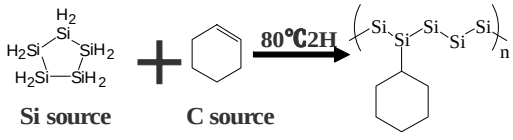

図 2.　SiC-ink の合成

各種実験評価を行った。

（２）成膜方法

SiC 膜の成膜方法を図 3 に示す。400℃に昇温したホットプレート上に基板を置き、アルミニウム製のキャップをかぶせる。この時、キャップの内側には数～数十 μL 程度の SiC-ink を滴下しておく。SiC-ink は 100℃程度で気化する為、気相状態で基板表面に達し、SiC 膜を形成する。我々はこの成膜方法を LVD (Liquid Vapor Deposition)法と名付けた。この後、必要に応じて RTA (Rapid Thermal Annealing)装置にて、窒素雰囲気/1000℃/20 分のアニールを行った。

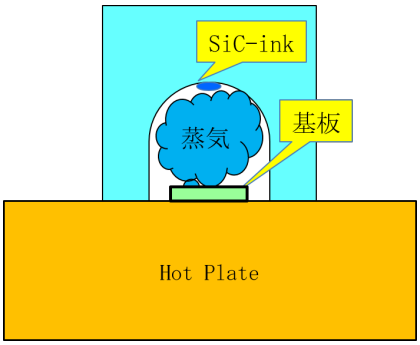

図 3．LVD 法による SiC 膜の成膜

（３）物性評価方法

SiC 膜の CBM (Conduction band minima)と VBM (Valence band maxima)を、IPES (Inverse photoemission spectroscopy) 法 、 PYS (Photon yield spectroscopy)法によりそれぞれ測定した。

膜の構造解析は XRD (X-Ray Diffraction)法、膜中不純物の濃度分布は SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy)法により分析した。

（４）コンタクト抵抗測定方法と測定用試料

コンタクト抵抗は、CTLM (Circular Transfer Length Method)TEG を作製して求めた。熱シリコン酸化膜付シリコン基板に、100 nm 程度の p 型 SiC 膜を堆積し、窒素雰囲気/1000℃/20 分の熱処理を行った。この上に Ni 電極をリフトオフ法で形成して CTLM-TEG を完成させた。この TEG により、Ni 電極-SiC 膜間のコンタクト抵抗を求めることが出来る。電気的測定には、Agilent 4155C を用いた。

４．研究成果

（１）p 型 SiC 膜のバンド構造

以前から SiC-ink のカーボン比率を増やすとバンドギャップが増大することが確認されていた。しかし、それが CBM の変化によるものか、VBM の変化によるものか、或いは両方の変化に起因するのかは明らかになっていなかった。IPES 法及び PYS 法による評価結果を図 4 に示す。評価した SiC 膜は as depo 膜、即ち成膜後のアニールを行っていないものを使用した。図において、成膜後のカーボン比率（カーボンとシリコンの総原子数に対するカーボン原子数）を Cfilm と定義してい

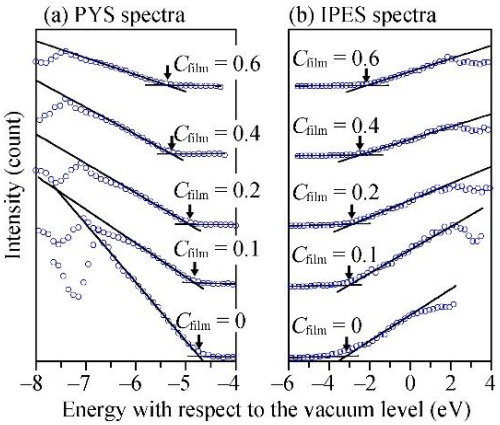

図 4．SiC 膜の CBM，VBM 評価結果
(a) PYS 測定結果、(b)IPES 評価結果

る。これより、CBM と VBN のそれぞれが、カーボン比率の増大に従いバンドギャップを増大させる方向にシフトすることが明らかになった。

（2）SiC パワーデバイスにおける Pch コンタクト抵抗の低減

SiC パワーデバイスでは、P^+-SiC 領域と金属配線間のコンタクト抵抗が問題になっている。これは、P^+-SiC の VBM と金属配線（Ni）の仕事関数のギャップに起因する。

図 5 は、Ni の仕事関数と SiC 基板の VBM、SiC 膜（Cfilm＝0.2）の VBM（as depo.膜とアニール後の膜）を PYS で評価した結果である。これより、Ni 電極の仕事関数が 5.1 eV、SiC 基板の VBM が 6.4 eV であるのに対し、as depo. SiC 膜は 4.95 eV、アニール後の SiC 膜は 5.5 eV となった。従って、アニール後の SiC 膜（Cfilm＝0.2）を P^+-SiC 基板-Ni 電極間に挟むことで、コンタクト抵抗の低減を達成出来ると推測された。

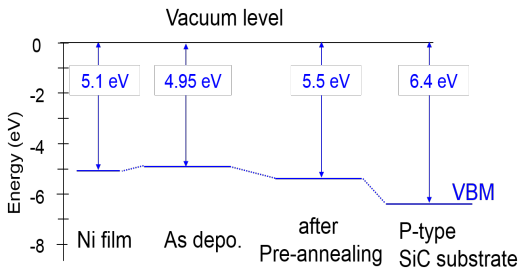

図 5．PYS による Ni の仕事関数、SiC 基板の VBM、SiC 膜(Cfilm＝0.2)の VBM(as depo.膜とアニール後の膜）評価結果

CTLM-TEG を用いて Ni 電極と P^+-SiC 膜間のコンタクト抵抗を測定した。その結果、10^{-7} Ωcm^2 台のコンタクト抵抗が得られる可能性を見出した（図 6 参照）。ただし、最終的な確認の為には SiC 膜厚ばらつきの低減が必要であり、新しい成膜用治具を作製して検証を進めている。

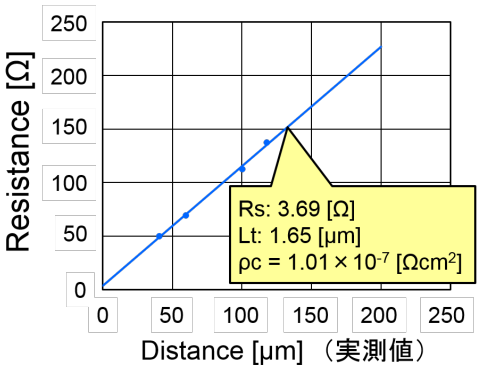

図 6．CTLM-TEG によるコンタクト抵抗測定結果

（3）SiC 膜中の不純物濃度の分析

SiC パワーデバイスにおいて、n 型 SiC 領域や p 型 SiC 領域を形成する場合、SiC 膜の結晶性を維持・回復させる為、500℃程度での高温イオン注入と 1700～1800℃の高温活性化アニールを行う。この場合、深い p 層の形成は、高加速イオン注入の多段打ちが必要であり、スループットの向上が求められている。また、熱拡散により不純物層を形成する方法は、SiC 中の不純物拡散速度が遅い為困難である。そこで SiC-ink により作製した SiC 膜を適用することで、この問題を解決出来ないかを検討した。

まず重要となるのは、SiC 膜中の不純物濃度であり、理想としては、膜中不純物濃度が一定であることが望ましい。そこで、酸化膜付シリコン基板上に p 型 SiC 膜を堆積し、SIMS 分析により膜中ボロン濃度を分析した。この時、ノッキング効果を防止する為、基板裏面方向から分析を行った。その結果、表面から膜の中心部分の濃度は一定であったものの、中心部から SiC/SiO2 界面に向けて濃度が低下しており、またカーボンの比率も低下していることが明らかになった(図 7 参照)。従って下部界面付近では、膜がシリコンリッチの状態になっていると考えられ、現在 TEM 観察の準備を進めている。

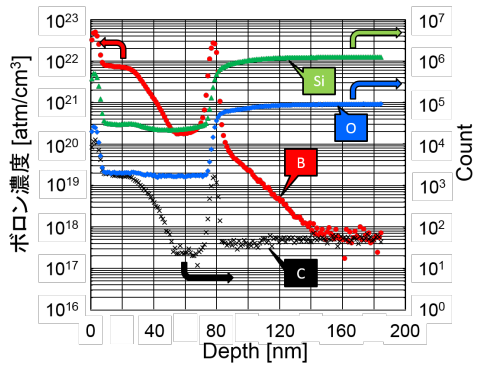

図 7．SiC-ink による p 型 SiC 膜の膜中不純物分析結果（SIMS 分析）
・ノッキング効果を防止する為、分析は基板の裏面方向から行った。

（4）SiC 膜のエピタキシャル成長の可能性検討

現在の SiC-MOSFET では、CVD（Chemical Vapor Deposition）法により SiC 膜をエピタキシャル成長させてチャネル膜を形成している。この時、1600～1800℃の高温処理が必要であり、製造装置は非常に高額となる。本研究では、SiC 基板上に液体プロセスを用いて SiC 膜をエピタキシャル成長させ、それをチャネル膜として用いることを目標の一つに定めている。そこで研究環境を構築する為に、高温アニール炉の導入を行った。また、高温アニールした SiC 膜の物性評価も行った。図 8 に XRD 分析の結果を示す。これより、高温アニールによってシリコン結晶のピークが出現し、膜内部でシリコン微結晶の様なものが形成されていることが示唆された。現時点で SiC 結晶のピークは観測されておらず、エピタキシャル成長の可能性を見い出すには至っていない。

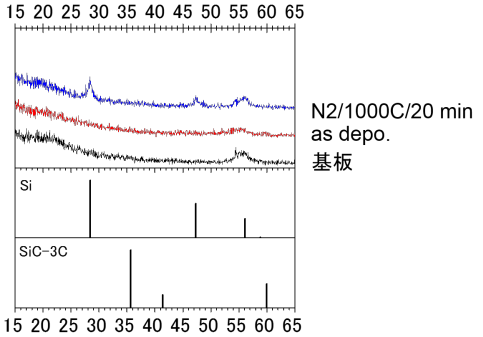

図 8. SiC-ink による SiC 膜の XRD 分析結果
・窒素雰囲気/1000℃/20 分のアニール後、シリコン結晶のピークが観測された。

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) Tatsuya Murakami, Takashi Masuda, Satoshi Inoue, Hiroshi Yano, Noriyuki Iwamuro, and Tatsuya Shimoda, "Photoelectron yield spectroscopy and inverse photoemission spectroscopy evaluations of p-type amorphous silicon carbide films prepared using liquid materials", AIP Advances, **6**, 2016, to be published. （査読有）

(2) Takashi Masuda, Akira Iwasaka, Hideyuki Takagishi and Tatsuya Shimoda, "Polymeric precursor for solution-processed amorphous silicon carbide", J. Mater. Chem. C, **3**, 2015, 12212-12219.（査読有）

〔学会発表〕（計 0 件）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計 1 件）
名称：前駆体溶液及び炭化シリコンを含有する層、並びに、パワー半導体素子及びパワー半導体素子の製造方法
発明者：下田達也、井上聡、増田貴史、村上達也、岩室憲幸、矢野裕司
権利者：北陸先端科学技術大学院大学、筑波大学
種類：特許
番号：特願 2015-030433
出願年月日：2015 年 02 月 19 日
国内外の別： 国内

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織
(1)研究代表者
井上　聡（INOUE　SATOSHI）
北陸先端科学技術大学院大学・グリーンデバイス研究センター・特任教授
研究者番号：60553237
(2)研究分担者
①　徳光　永輔（TOKUMITSU　EISUKE）
北陸先端科学技術大学院大学・グリーンデバイス研究センター・教授
研究者番号：10197882
②　下田　達也（SHIMODA　TATSUYA）
北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・教授
研究者番号：70447689
③　増田　貴史（MASUDA　TAKASHI）
北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・助教
研究者番号：70643138